全国共同利用研究成果報告

第 15 号

平成23年度

九州大学応用力学研究所

発　刊　の　辞

応用力学研究所が 1997 年に全国共同利用研究所となって 15 年が経過しました。この間，毎年 60～80 件の共同研究が行われ，多くの成果が得られました。この報告書に示しますように，2011 年度も，特定研究　件を含む貴重な研究が数多く行われました。これらの成果の一部は,2012 年 6 月 5 日に開催される「RIAM フォーラム 2012」でも報告されます。また，この報告書は，応用力学研究所のホームページ（http://www.riam.kyushu-u.ac.jp）にも掲載されます。さらに，この報告書には掲載されていませんが，この他にも，同じ研究分野の研究者が応用力学研究所に集まり，掘り下げた討論を行う研究集会が 2011 年度は 15 件行われ，それぞれについて研究集会報告書としてまとめられています。

九州大学は 2004 年に国立大学法人として文部科学省から独立しました。応用力学研究所は，法人化後も引き続き，「力学に関する学理及びその応用の研究」を目的とする全国共同利用研究所として九州大学に附置され，重要な役割を与えられています。附置研究所は，大学を特徴づけ個性化する存在でもあります。

さらに、応用力学研究所は，2010 年度 4 月からは文部科学省により応用力学共同利用・共同研究拠点の認定を受けて、力学とその応用に関する先端的課題に関し，国際的に高い水準の研究成果を挙げるとともに，21 世紀の人類にとって極めて重要な課題となっている，地球環境問題とエネルギー問題の解決に向けた研究に，理学と工学の両面から取り組むことになっています。

同時に，全国共同利用研究を基にして，全国および世界の研究者と連携し，力学とその応用の分野における世界的研究拠点となることを目指します。そのため 2011 年度からは国際共同研究も開始しました。

これからも応用力学研究所が一層発展し，日本のみならず世界の学術研究の重要な拠点であり続けることができますように，全国の研究者の方々からのより一層のご支援・ご指導・ご鞭撻をよろしくお願いいたします。

2012 年 3 月
九州大学応用力学研究所
所長　柳　哲雄

目　次

平成 23 年度共同研究一覧 ……i

平成 23 年度研究集会一覧 ……vi

地球環境力学分野共同研究成果報告 ……1

核融合力学分野共同研究成果報告 ……95

新エネルギー力学分野共同研究成果報告 ……179

平成２３年度共同研究一覧

地球環境力学分野

番　号	研　究　課　題		代 表 者 名	所内世話人 協 力 者 数	頁
特定研究					
	次世代大気化学・気象結合モデルの開発と応用に関する研究		統括責任者 鵜野 伊津志		
23特1-1	サブテーマ	メソおよび雲解像スケールの大気境界層モデリングと観測的研究	熊本県立大学 張　代州	山本　勝 4名	1
23特1-2		大気化学・エアロゾル気候モデルの開発と検証	名古屋大学 須藤　健悟	竹村　俊彦 3名	3
23特1-3		大気化学・気象結合モデルと衛星計測データを用いたアジア域の越境大気汚染の研究	海洋研究開発機構 山地　一代	鵜野 伊津志 4名	5
23特1-4		ライダー計測と黄砂輸送モデルを統合した黄砂の発生・輸送過程の研究	国立環境研究所 原　由香里	鵜野 伊津志 4名	7
23特1-5		大気エアロゾルと雲の光学的特性の気候影響に関する研究	富山大学 青木　一真	竹村　俊彦 3名	9
23特1-6		地上型および衛星搭載ライダを用いたエアロゾル消散係数の時間空間変動特性の解析	国立環境研究所 西澤　智明	岡本　創 3名	11
23特1-7		全球気候モデルと衛星計測データを用いた雲-放射-力学相互作用過程の研究	東京大学 渡部　雅治	岡本　創 2名	13
一般研究					
23A0-1	海洋乱流の観測およびモデリング研究		東京大学 日比谷 紀之	吉川　裕 14名	15
23A0-2	海洋窒素循環に関する研究		神戸大学 林　美鶴	柳　哲雄 2名	17
23A0-3	水中ビークル運用のための装備に関する研究		長崎大学 吉村　浩	中村　昌彦 6名	19
23A0-4	九州東方沿岸域における透明度の季節・経年変動特性		宮崎県水産試験場 渡慶次　力	柳　哲雄 1名	21
23A0-5	定期旅客船による山口県沖合海域の表層水温観測		山口県水産研究センター 渡辺　俊輝	千手　智晴 1名	23
23A0-6	定期旅客船を利用した能登半島輪島沖での対馬暖流モニタリング		石川県水産総合センター 大慶　則之	千手　智晴 2名	25
23A0-7	越前沿岸域の表層流に関する研究		福井県立大学 兼田　淳史	千手　智晴 3名	27
23A0-8	海洋環境モニタリングのためのグライダー型海中ロボットの研究開発		大阪府立大学 有馬　正和	中村　昌彦 2名	29
23A0-9	対馬海峡東水道における海洋環境変動		水産大学校 滝川 哲太郎	千手　智晴 2名	31

23AO-10	アジア大陸から輸送される反応性窒素酸化物およびその構成成分の動態に関する研究	大阪府立大学 坂東　博	鵜野 伊津志 6名	33
23AO-11	海洋大循環の力学、とくに中深層循環に及ぼす海岸・海底地形の影響に関する研究	北海道大学 水田　元太	増田　章 14名	35
23AO-12	水産資源量調査用グライダー型海中ビークルの開発	九州大学 山口　悟	中村　昌彦 3名	37
23AO-13	自律型無人探査機によるセンサ曳航の最適形態に関する研究	海洋研究開発機構 百留　忠洋	中村　昌彦 5名	39
23AO-14	対馬海峡近海の海面流速場の季節・経年変動に関する研究	名古屋大学 森本　昭彦	柳　哲雄 2名	41
23AO-15	流体工学的手法による絶滅遊泳性爬虫類の生体復元	東北大学 西　弘嗣	中村　昌彦 2名	43
23AO-16	多用途型コンパクト水中ロボットに関する研究	佐世保工業高等専門学校 長嶋　豊	中村　昌彦 3名	45
23AO-17	フェリーニューカメリアを利用した対馬海峡のクロロフィル変動に関する研究　No.3	名古屋大学 石坂　丞二	広瀬　直毅 5名	47
23AO-18	化学トレーサーを用いた日本海水塊構造と深層循環	富山大学 張　　勁	松野　健 4名	51
23AO-19	地形上を伝播する非線形内部波の平面2次元数値解析による研究	鹿児島大学 柿沼　太郎	辻　英一 3名	53

核融合力学分野・一般研究

23FP-1	透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発	京都大学 高木　郁二	図子　秀樹 5名	95
23FP-2	金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響	京都大学 徐　　虬	渡辺　英雄 3名	97
23FP-3	タングステン中の水素同位体保持特性に及ぼす照射欠陥の影響	富山大学 波多野 雄治	渡辺　英雄 5名	99
23FP-4	Quest装置におけるVUV分光法による不純物の振舞いに関する研究	核融合科学研究所 森田　　繁	図子　秀樹 4名	101
23FP-5	ドリフト波乱流中の渦構造に関する非線形シミュレーション研究	高知工業高等専門学校 成行　泰裕	矢木　雅敏 3名	103
23FP-6	重水素イオン照射に伴う金属堆積層中水素同位体挙動に関する研究	九州大学 片山　一成	渡辺　英雄 4名	105
23FP-8	第一原理計算によるタングステン中のガス元素吸蔵および拡散の研究	日本原子力研究開発機構 山口　正剛	大澤　一人 2名	107
23FP-9	タングステン被覆低放射化材料の接合界面における微細組織－力学特性相関	京都大学 木村　晃彦	渡辺　英雄 4名	109
23FP-10	タングステン被覆低放射化材料の高熱負荷特性	京都大学 笠田　竜太	徳永　和俊 6名	111

23FP-11	核燃焼プラズマ周辺における磁力線垂直方向輸送のモデリング研究	日本原子力研究開発機構 滝塚　知典	矢木　雅敏 3名	113
23FP-12	タングステン中の水素同位体挙動に及ぼすヘリウム同時照射影響	大阪大学 上田　良夫	渡辺　英雄 6名	115
23FP-13	プラズマ輸送理論	核融合科学研究所 伊藤　公孝	矢木　雅敏 21名	117
23FP-14	圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果	岩手大学 鎌田　康寛	渡辺　英雄 4名	119
23FP-15	核融合炉材料の高温変形および液体増殖材腐食による内部組織発達過程	核融合科学研究所 室賀　健夫	渡辺　英雄 2名	121
23FP-16	核融合炉用高靭性タングステン材料の高熱負荷特性	東北大学 栗下　裕明	徳永　和俊 7名	123
23FP-17	巨視的運動論的MHD現象解析用のトロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発	山口大学 内藤　裕志	矢木　雅敏 6名	125
23FP-18	希ガスプラズマ照射によるタングステンの表面損傷	名古屋大学 大野　哲靖	渡辺　英雄 4名	127
23FP-19	ナノ構造タングステン上でのアーク痕のTEM観察	名古屋大学 梶田　信	渡辺　英雄 4名	129
23FP-20	LHD第一壁トロイダルアレイ試料による対向材料の損耗/損傷および水素同位体捕捉量分布の評価	核融合科学研究所 時谷　政行	渡辺　英雄 3名	131
23FP-21	酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性	九州大学 安田　和弘	渡辺　英雄 6名	133
23FP-22	NDB法によるタングステンと銅との接合界面特性に及ぼすイオン照射効果の研究	茨城大学 車田　　亮	渡辺　英雄 4名	135
23FP-23	無欠陥接合により作製されたタングステン/銅接合材料の熱負荷特性	茨城大学 車田　　亮	徳永　和俊 7名	137
23FP-24	ゾーンプレートを使ったQUESTプラズマ計測	電気通信大学 竹田　辰興	中村　一男 2名	139
23FP-25	トリチウムプラズマ照射した核融合炉材料中の水素拡散・捕獲挙動に関する研究	九州大学 田辺　哲朗	徳永　和俊 6名	141
23FP-26	物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状再構築システム（CCS）のSTプラズマ位置形状制御への適用検討 （II）	日本原子力研究開発機構 栗原　研一	中村　一男 6名	143
23FP-27	応力下における照射組織の発達過程に係る強度特性評価（その2）	日本原子力研究開発機構 井上　利彦	渡辺　英雄 2名	149
23FP-28	低エネルギープラズマ照射によるタングステン中の水素拡散、吸蔵、透過に関する研究	筑波大学 坂本　瑞樹	渡辺　英雄 11名	151
23FP-29	低エネルギーヘリウムイオン照射された絶縁体における光学特性	琉球大学 岩切 宏友	渡辺　英雄 7 名	155
22FP-30	核融合炉用先進バナジウム合金のイオン照射効果	核融合科学研究所 長坂　琢也	渡辺　英雄 4名	157
23FP-31	磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス現象の理論・シミュレーション研究	日本原子力研究開発機構 石井　康友	矢木　雅敏 11名	159
23FP-32	照射による金属ミラー材の光学特性変化挙動とプラズマ対向材料のその場診断手法への応用	島根大学 宮本　光貴	渡辺　英雄 5名	161

23FP-33	窒素を含む多粒子低温プラズマ生成による炭素ダスト成長と水素同位体吸蔵の制御	金沢大学 上杉　喜彦	中村　一男 3名	163
23FP-34	核融合炉材料中に捕捉された水素同位体の加熱再放出挙動	名城大学 土屋　文	徳永　和俊 1名	165
23FP-35	タングステン混合堆積層における炭素・ヘリウムと照射欠陥分布と水素同位体滞留挙動の相関関係	静岡大学 大矢　恭久	渡辺　英雄 12名	167
23FP-36	酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究	九州大学 橋爪　健一	渡辺　英雄 4名	169

新エネルギー力学分野・一般研究

23ME-1	機械的伸縮刺激に対する間葉系幹細胞の分化に関する研究	名古屋大学 森田　康之	東藤　貢 2名	179
23ME-2	風レンズ風車のブレードの振動原因の究明と大型ブレードの実働ひずみ計測	鹿児島工業高等専門学校 小田原　悟	烏谷　隆 3名	181
23ME-3	2次元流れレンズによるフラッタ水力発電装置の出力性能向上	福岡工業大学 阿比留　久徳	胡　長洪 10名	185
23ME-4	3次元環境下における細胞の力学エネルギー測定法の確立	北海道大学 水谷　武臣	東藤　貢 3名	187
23ME-5	CO2削減省エネ海上輸送のための新船型開発に関する研究	広島大学 岩下　英嗣	胡　長洪 6名	189
23ME-6	風レンズ技術を用いた潮流発電用水車の性能評価	九州大学 経塚　雄策	胡　長洪 3名	197
23ME-7	高効率大量輸送のための特殊航空機に関する研究	広島大学 岩下　英嗣	大屋　裕二 4名	199
23ME-8	エネルギー効率向上のための船舶の風圧抵抗低減に関する研究	広島大学 岩下　英嗣	大屋　裕二 4名	211
23ME-9	GaN系窒化物半導体の結晶成長シミュレーション	三重大学 河村　貴宏	柿本　浩一 2名	217
23ME-10	電磁波遮蔽材料の創製とその評価法の確立	信州大学 倪　慶清	汪　文学 1名	219
23ME-11	高効率化合物半導体太陽電池用基板の作製	宮崎大学 吉野　賢二	柿本　浩一 4名	221
23ME-12	発電機能を有するナノコンポジットの開発	千葉大学 胡　　寧	汪　文学 1名	225
23ME-13	クレイ強化ナイロンハイブリッドナノコンポジットの破壊機構	福岡工業大学 朱　世杰	汪　文学 2名	229
23ME-14	TLPを利用した浮体式洋上風車の最適設計に関する研究	大阪府立大学 二瓶　泰範	胡　長洪 2名	231
23ME-15	振動水柱型波力発電装置の不規則波中発電特性試験	佐賀大学 永田　修一	胡　長洪 3名	233

23ME-16	次世代人工股関節と生体股関節の力学的相互作用に関する研究	九州大学 中島　康晴	東藤　貢 2名	235
23ME-17	多孔質バイオセラミックスと骨組織再生の生体力学的相互作用に関する研究	大阪大学 名井　陽	東藤　貢 4名	237
23ME-18	生体吸収性高分子材料の高機能化に関する研究	山形大学 高山　哲生	東藤　貢 1名	239
23ME-19	下肢屈曲動作解析に基づく人工膝関節の安全性評価	愛媛大学 三浦　裕正	東藤　貢 2名	241
23ME-20	船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発	大阪大学 橋本　博公	末吉　誠 3名	243
23ME-21	風洞実験による回転するサッカーボール・ラグビーボールの空気力学特性実験	九州工業大学 溝田　武人	大屋　裕二 3名	245
23ME-22	風レンズ風車翼の空力設計法の開発	九州大学 古川　雅人	大屋　裕二 1名	247

平成２３年度研究集会一覧

地球環境力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
23A0-S1	里海創生のための沿岸海域の環境保全	広島大学 橋本 俊也	柳　哲雄 15件、40名	応用力学研究所	23年12月 6-7日	55
23A0-S2	乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性	筑波大学 吉田　恭	岡村　誠 19件、26名	応用力学研究所	23年11月 10-12日	59
23A0-S3	地球流体における波動と対流現象の力学	東京大学 新野　宏	和方 吉信 24件、40名	応用力学研究所	23年12月 14-15日	65
23A0-S4	日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会	水産大学校 滝川 哲太郎	増田　章 13件、42名	応用力学研究所	23年12月 15-16日	71
23A0-S5	海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用	琉球大学 藤井 智史	吉川　裕 10件、47名	共通管理棟3階	23年12月 14-15日	75
23A0-S6	地形のダイナミクスとパターン及び境界領域	北海道大学 柳田 達雄	岡村　誠 10件、22名	応用力学研究所	23年11月 4-5日	77
23A0-S7	非線形波動研究の進展　－現象と数理の相互作用－	立教大学 筧　三郎	辻　英一 37件、69名	筑紫ホール	23年10月 27-29日	81
23A0-S8	東シナ海の循環と混合に関する研究	名古屋大学 石坂　丞二	松野　健 10件、16名	応用力学研究所	24年　2月 6-7日	91

核融合力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
23FP-S1	第10回核燃焼プラズマ統合コード研究会	京都大学 福山　淳	矢木　雅敏 25件、25名	応用力学研究所	23年12月 15-16日	173

新エネルギー力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
23ME-S1	第4回　九大グラフェン研究会	九州大学 田中　悟	寒川　義裕 6件、22名	伊都キャンパス	24年　1月 27日	249
23ME-S2	窒化物半導体結晶成長講演会	東京大学 藤岡　洋	寒川　義裕 10件、76名	筑紫ホール	23年　6月 17-18日	253
23ME-S3	海洋エネルギー利用・海洋環境問題に関する力学問題	大阪大学 柏木　正	胡　長洪 18件、44名	応用力学研究所	23年12月 16-17日	297
23ME-S4	複合材料および新エネルギーへの応用と評価	九州大学 汪　文学	汪　文学 20件、46名	応用力学研究所	24年　1月 6-7日	305
23ME-S5	CT画像を利用したバイオメカニクス・シミュレーション法の開発と臨床問題への応用	横浜市立大学 稲葉　裕	東藤　貢 13件、79名	東京国際フォーラムG棟	23年　8月 27日	315
23ME-S6	力学適応能、自己組織化能を有するバイオマテリアル-生体インターフェイスの創製	東北大学 佐々木 啓一	高雄 善裕 15件、25名	応用力学研究所	24年　3月 2-3日	319

平成２３年度

地球環境力学分野
共同研究成果報告

23 特 1－1

メソおよび雲解像スケールの大気境界層モデリングと観測的研究

熊本県立大学環境共生学部　張代洲

目的：

大気境界層における物質(水蒸気・降水も含む)循環過程のモデリングとそれに関連した拡散・沈着過程のパラメタリゼーションに向けた数値実験および観測を行う.

まずは，海洋中規模擾乱が海洋大気境界層に与える影響について明らかにすることが主目的の一つである．海洋モデルデータ同化 SST を，初めて雲解像モデルへ適用し，豪雪災害事例に応用した点が特筆すべき点である.

また，天草半島における気象および大気汚染物質の大気境界層構造を係留気球で観測して，大気境界層内や自由対流圏の拡散と沈着の LES モデルや雲解像モデルへの適用に向けたデータ収集をすることである．天草半島は，大陸からの影響が早い段階で到達する場所で，地理的にも応用力学研究所に近く，密接に連携した研究が進められる.

研究方法：

海洋中規模擾乱が海洋大気境界層に与える影響の研究は，応用力学研究所の日本海海洋データ同化システムから得られた渦解像 SST を用いて，名古屋大学で開発された雲解像モデル CReSS による数値計算を行う．海況が大気混合層におよぼす影響に着目した解析を行う.

天草半島の係留気球観測で得られるデータを収集・解析し，境界層および自由対流圏の気象状況の変化とそれに伴う各高度の浮遊粒子の粒径分布や性状について調べ，モデルへの応用や検証に用いる.

結果：

前年度に引き続き，豪雪災害をもたらした 2005 年 12 月 21－30 日の事例について，名古屋大学で開発された雲解像気象モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS, Tsuboki and Sakakibara 2001; 2002, Ohigashi and Tsuboki 2007) を用いた数値実験を行った．日本海域を 3 km 水平格子で分割し，地上から 14814 m を 60 層で分割したモデルで，初期値と境界値は気象庁 RSM を用いた．海面温度は，九大応力研日本海データ同化システム (対馬海峡 ADCP 流量や衛星データを結合した RIAMOM)から得られた高解像度(1/12°) データ同化 SST (実験 R)と気象庁の最適内挿 SST(実験 J)の２つを用いた．微物理過程は６カテゴリー(vapor, cloud, ice, rain, snow and graupel)のバルクモデルを用いた．turbulent kinetic energy を予報する 1.5 次のクロージャーよって，混合過程はパラメタライズされている.

北西の季節風が卓越する状況下で海洋中規模擾乱に対する大気境界層の応答を詳しく調べた．大和堆の北の暖水域では，渦解像海洋データ同化で生じる正の SST anomaly（実験 R－実験 J）は，熱・水蒸気フラックスを介して，乱流混合，風速，温位，水蒸気量，雲水量，雪水量を増大させる．逆に，朝鮮半島の東沿岸の冷水域では，負の SST anomaly が，乱流混合，風速，温位，水蒸気量，雲水量，雪水量を減らす．他方，佐渡沖の冷水舌では，SST anomaly に対する応答が複雑である．乱流混合と風速は局所的な SST の影響を素早く受けるが，温度や水蒸気・雲水量は北西季節風の移流を介して上流側の SST anomaly の影響が大きい．このように，海洋中規模擾乱の SST のみならず，上流側の海況と大気の相互作用について詳しく調査する必要性が明らかになった．

気象要素の 10 日平均量に関して SST anomaly の影響はたいして大きくないが，10 日積算降水量では顕著な影響が表れる．実験 R と実験 J の間で降水量差は 10%にも達し，SST プロダクトの差異に対して敏感であることが分かった．豪雪災害では降雪の積算量が問題になることから，SST が積算降雪量に与える影響は気象学のみならず災害予測という点でも重要である．

本研究のシミュレーションから，海洋中規模擾乱は数百 km を超えるスケールの気象現象のみならず，メソβやγスケールの気象現象においても重要である．加えて，海洋中規模擾乱は寿命が長いので，その海洋擾乱の影響は降雪量のような積算量で顕著に表れることが明らかになった．

天草半島の係留気球観測のモデルへの応用や検証に関しては，温度，湿度，気圧，GPS 高度，エアロゾル粒径別の濃度，ブラックカーボン(BC)の濃度，電子顕微鏡分析用のエアロゾルサンプルを採集したデータや地上および境界層観測データの整理等を行い，CReSS への応用に向けた検討を行った．

発表論文：

M. Yamamoto, T. Ohigashi, K. Tsuboki, and N. Hirose, Cloud-Resolving Simulation of Heavy Snowfalls in Japan for Late December 2005: Application of Ocean Data Assimilation to a Snow Disaster. *Natural Hazards Earth System Science*, **11**, 2555-2565, 2011.

研究組織：

張代洲	熊本県立大学環境共生学部	サブテーマ代表者・観測
大東忠保	名古屋大学水循環研究センター	研究協力者・気象モデリング
坪木和久	名古屋大学水循環研究センター	研究協力者・気象モデリング
広瀬直毅	九州大学応用力学研究所	研究協力者・海洋モデリング
山本勝	九州大学応用力学研究所	所内世話人・気象モデルング

23 特 1−2

大気化学・エアロゾル気候モデルの開発と検証

名古屋大学大学院環境学研究科　須藤 健悟

1　目的

本研究課題では、大気化学モデル CHASER とエアロゾルモデル SPRINTARS の結合により、大気化学・エアロゾル結合気候モデルの開発を行い、シミュレーション結果の妥当性について詳しく検証する。特に、これまでモデルでの扱いが不十分であった、大気化学過程と関連の深いエアロゾルの表現、およびエアロゾルの微物理過程の表現方法の改良について、新たな計算スキームの導入を検討・実施する。シミュレーション結果については、九州大学・応用力学研究所・大気環境モデリンググループで扱われている SPRINTARS モデルや領域スケール大気質モデル CMAQ などによるシミュレーションの評価方法に準じた検証を行い、大気汚染物質分布やエアロゾル濃度・光学パラメータについて、各種観測データを用いて詳細に評価する。これにより、大気組成・大気汚染の気候への影響の理解・評価における不確定性の低減を図り、気候変動予測の精緻化および精度向上に貢献する。

2　研究方法

名古屋大学で開発されている大気化学モデル CHASER と九州大学・応用力学研究所で開発されているエアロゾルモデル SPRINTARS を結合し、気候モデル中での大気化学過程とエアロゾル過程の同時計算を可能にする。この際、大気化学と関連の深い硫酸塩・硝酸塩や有機エアロゾルの生成については、個別の化学反応スキームを追加・導入し表現する。また現状 SPRINTARS で不十分と思われるエアロゾルの内部混合や粒径分布の表現方法などの微物理的取り扱いについても、改良作業を進める。H23 年度では、ダストの変質過程に着目し、ダスト表面上での不均一反応による二酸化硫黄（SO_2）の硫酸（SO_4^{2-}）への変換過程などをモデルに導入し、ダストがおよぼす硫酸塩エアロゾルの全球分布に対する影響の評価を行った。以下に化学・エアロゾル結合モデルの概略と、本年度に行った研究の作業方法・手順について記述する。

(1) 化学モデルとエアロゾルモデルの概略

CHASER モデルおよび SPRINTARS モデルは、ともに東大・気候センター（CCSR）、国立環境研究所（NIES）、および海洋研究開発機構・地球環境変動領域（JAMSTEC/RIGC:旧 FRCGC）で開発されている CCSR/NIES/FRCGC 気候モデル（MIROC）を土台としている。CHASER モデルでは、化学反応に加え、大規模移流輸送、積雲対流による鉛直輸送、人為・自然起源地表 emission、雷による NOx 生成、湿性/乾性沈着が考慮され、光化学過程では対流圏光化学の基本サイクル(O_3-NOx-HOx-CO-CH_4) と非メタン炭化水素(NMHCs)の酸化反応、および不均一反応が考慮されている。CHASER モデルで計算されたオゾンや各オゾン前駆気体の分布は各観測値と整合的であり、オゾン生成・消滅過程の表現の妥当性が確認されている（Sudo et al., 2002,2007)。一方、SPRINTARS では硫酸塩（SO_4^{2-})、黒色炭素・有機炭素（BC・OC)、土壌ダスト、海塩の各種エアロゾルの全球分布をシミュレートし、これらの大気放射、雲・降水過程への影響を計算する。本研究では、これまでの作業により、CHASER と SPRINTARS の両モデルが結合され、エアロゾルとオゾン化学の同時計算が可能となっており、二次有機エアロゾルの生成過程の計算も導入されている（H22 年度研究)。

(2) 土壌ダストと硫黄成分の相互作用の導入

本研究では、上述の全球化学・エアロゾル気候モデル CHASER-SPRINTARS を用いて、硫酸塩エアロゾルの全球分布に対するダストの影響評価を行った。まず、ダスト表面での SO_2 の不均一反応による硫酸塩の生成、および硫酸塩粒子のダスト表面への凝集過程をモデルに導入し、硫酸成分がダスト表面を被覆することによる影響を数値実験により検討した（実験 1)。次に、雲水（液相）中での硫酸と $CaCO_3$ の中和反応（$H_2SO_4 + CaCO_3 \rightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$）やダスト中の陽イオン成分による中和を考慮し、液相過程においてダストが硫酸塩の生成・分布に与える影響を定量的に評価した（実験 2)。

3　結果・考察

(1) ダスト表面上の不均一反応の影響

ダスト表面での過程に着目した実験1では、ダスト上のSO_2の不均一反応の導入により、アジア域においてダストの輸送経路にあたる韓国や日本の日本海側の観測サイトの多くでSO_2のモデル値と観測値との相関が向上することが確認された。不均一反応の取り込み係数γ を0.01とした実験では、SO_2のダスト表面上の反応による時定数は、アフリカ北部から西アジアでJJAに最大となり、地表で1～2時間、高度3kmでは数時間～半日であった。ダスト表面上に被覆されている硫酸層の厚みは、年平均では東アジアで最大をとり、粒径0.13μmのダストにおいては、ダスト半径の80～120%程度の厚さが硫酸に覆われている。また、ダストの粒径に対して覆っている硫酸層の厚みの比（core/shell比）は、粒径が小さいダストほど大きくなっている。そして、ダスト表面上に存在する硫酸塩濃度と全硫酸濃度の比は、極域で特に大きくなっており(90%以上)、SONで最大となった。不均一反応は、ダスト表面のSO_2の不均一反応のγ が 0.001および0.01のとき、外部混合の硫酸塩エアロゾル総量をそれぞれ 0.02 TgS（2.4%）、0.15 TgS（18.1%） 減少させる効果が見られた。この外部混合の硫酸塩エアロゾルの減少は、γ = 0.01 のとき、直接効果及び間接効果の放射強制力をそれぞれ0.083(0.038～0.174)、0.127(0.054～0.327)W/m2減少させることに相当する。ダスト表面上での不均一反応による硫酸塩生成量は12 TgS/yearであり（γ =0.01)、これはOHによる気相反応の硫酸塩生成量に匹敵する。また、γ =0.01のときダスト表面上の硫酸塩及び外部混合の硫酸塩の湿性沈着/乾性沈着の比は、0.22、7.6となり、ダスト表面上の硫酸塩は湿性沈着により除去されにくい特徴を持っていた。

(2) 液相過程の影響

実験2においては、液相中での硫酸と$CaCO_3$との中和反応やダスト中の陽イオンによる酸性度の中和を考慮することで、観測された硫酸成分の湿性沈着量や降水pHの季節変動をより正確に再現できることが確認された。また、いくつかの感度実験を行い、東アジアにおける液相中での硫酸生成速度への影響を定量化した。中和反応により、$CaSO_4$が生成されることでSO_4^{2-}が除去され、pHが上がることによって、中国沿岸域では硫酸生成速度が大きくなった。ダストの中和反応及びダストの陽イオンの硫酸生成を促進させる効果の和は、NH_4^+の効果に匹敵することが示唆された。

4　研究成果報告

・誌上発表

Sudo K. and Y. Ogihara (2012) Global Modeling of Secondary Organic Aerosol in a Chemistry Coupled Climate Model, Earozoru Kenkyu, 27（1）, 51-61.

・学会発表

(1) Kengo Sudo, T.Takemura, and H. Akimoto, “Evaluating past changes in short-lived climate forcers and their climate impacts with a chemistry-aerosol coupled climate model”, 3rd International Workshop on Atmospheric Modeling Research in East Asia, Chengdu, Sichuan Province, China, September 24-25, 2011.

(2) Kengo Sudo, T.Takemura, and H. Akimoto, “Evaluating past changes in atmospheric pollutants and their climate impacts with a chemistry-aerosol coupled climate model”, The 8th International Conference on Acid Deposition , Acid Rain 2011, Beijing China, 16-18 June 2011.

(3) Kengo Sudo, T.Takemura, and H. Akimoto, “Modelling Short-Lived Climate Forcers: Climate Impacts and Interaction”, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, Melbourne Australia, 28 Jun-07 July 2011.

(4) 清水俊成、須藤健悟、” 硫酸塩生成におけるダストの影響：全球化学・エアロゾル輸送モデルの改良と検証”、日本気象学会2011年度秋季大会、名古屋大学、名古屋、2011年11月16日-18日。

(5) 須藤健悟、竹村俊彦、秋元肇、”化学・エアロゾル気候モデルを用いた短寿命気候影響物質（SLCFs）の放射強制力と気候応答の評価”、第17回大気化学討論会、京都大学宇治キャンパス、京都、2011年10月18日-20日。

(6) Kengo Sudo, Hiroya Endo, Keiichiro Hara, Kazuo Osada, and Toshihiko Takemura, “Simulating black carbon at Syowa station, Antarctic: long-range transport from various source regions”, JPGU 2011年度大会 , Makuhari Chiba, Japan, 23th May, 2011.

(7) 須藤健悟、竹村俊彦、秋元肇 ”化学・エアロゾル気候モデルを用いた短寿命気候影響物質（SLCFs）の放射強制力の評価”、日本気象学会2011年度春季大会、国立オリンピック記念青少年総合センター、2011年5月18日-21日。

23 特 1−3

大気化学・気象結合モデルと衛星計測データを用いたアジア域の越境大気汚染の研究

海洋研究開発機構地球環境変動領域　山地一代、入江仁士、金谷有剛、滝川雅之

【はじめに】東アジア地域を対象とする領域化学物質輸送モデルは、日本の遠隔観測地のガス状物質（例えば、EANET 等の O_3 や SO_2）の濃度レベルや季節変動を比較的良く再現できている（e.g., 鵜野ら, 2005; Yamaji et al, 2006）。一方、O_3 前駆物質であり、また、対流圏化学において重要な的な役割を担っている、二酸化窒素（NO_2）に関しては、特に排出量が集中する中国華北平原において、モデルが衛星による対流圏 NO_2 カラム濃度を著しく過小評価することが報告されている（e.g., Uno et al., 2007）。さらに、華北平原中央に位置する泰山における MAX-DOAS（多軸差分吸収法）、および、地上観測とモデルの比較研究によると、モデルが鉛直約 0−1km の NO_2 濃度を著しく過小評価する傾向にある事が判明している（e.g., Yamaji et al., 2010）。他方、Valin ら（2011）は、発生源地域の NO_2 カラム濃度予測に関して、NO_2-OH 化学的非線形性に起因するバイアスへのモデル空間解像度の影響を調べ、例えば、LA では 12km、San Joaquin Valley,CA では 4 km の空間解像度が必要である事を示した。我々は、東アジア地域の大気物質濃度のモデル予測精度の向上を進めており、本研究では、モデルの空間解像度の違いによる、冬期（2009 年 1 月）の華北平原における窒素酸化物等の組成や濃度の検証を実施した。

【方法】［領域ネストモデル］本研究では、領域化学物質輸送モデル（CMAQ ver.4.7.1）と領域気象モデル（WRF ver.3.2）を利用した。CMAQ の化学スキームとエアロゾルスキームは、SAPRC-99 と AERO5 を利用した。排出量は、REAS（人為起源）、RETRO（バイオマス・バーニング）、GEIA（植物 NMVOC、土壌 NOx）、および、海塩（inline）を用いた。モデルの解像度は、アジア域に対して鉛直方向に 37 層（最上部約 50hPa）、水平方向に 80km 格子（98×78）（D1）とし、華北平原中央部に対してネスト領域（20km 格子（106×98）（D２）、5km 格子（250×250）（D３））を設定した（図１）。**［衛星観測データ］**Irie et al.（2011）にて実施された、MAX-DOAS 法による観測データによって定量的に検証された衛星観測データ（GOME-2 および OMI）を利用した。

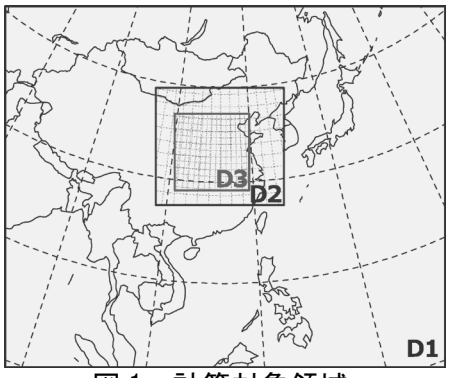


図１　計算対象領域

【結果】モデルの水平分解度を高めた結果、時刻に関係なく、2009 年 1 月における華北平原の対流圏 NO_2 カラム濃度の増大が確認できた（図２）。特に、地表付近（高度 0-0.5km）では、D1（80km）-D2（20km）-D3（5km）の空間解像度の変化に伴い、OH の減少と NO_2 の増加が生じた。これは、Valin ら（2011）の高 NO_2 下の OH-NO_2 の挙動と整合する。他方、高度 1-2km では、逆に、空間解像度の変化に伴い、OH は増加し、D3 の NO_2 は顕著に増加した（図３）。各モデル空間解像度下における対流圏の各窒素酸化物の存在割合を調査した結果、D3 では、NO_2（および、PAN 等ガス状）の存在割合が高くなり、逆に、硝酸塩の割合が低くなった。

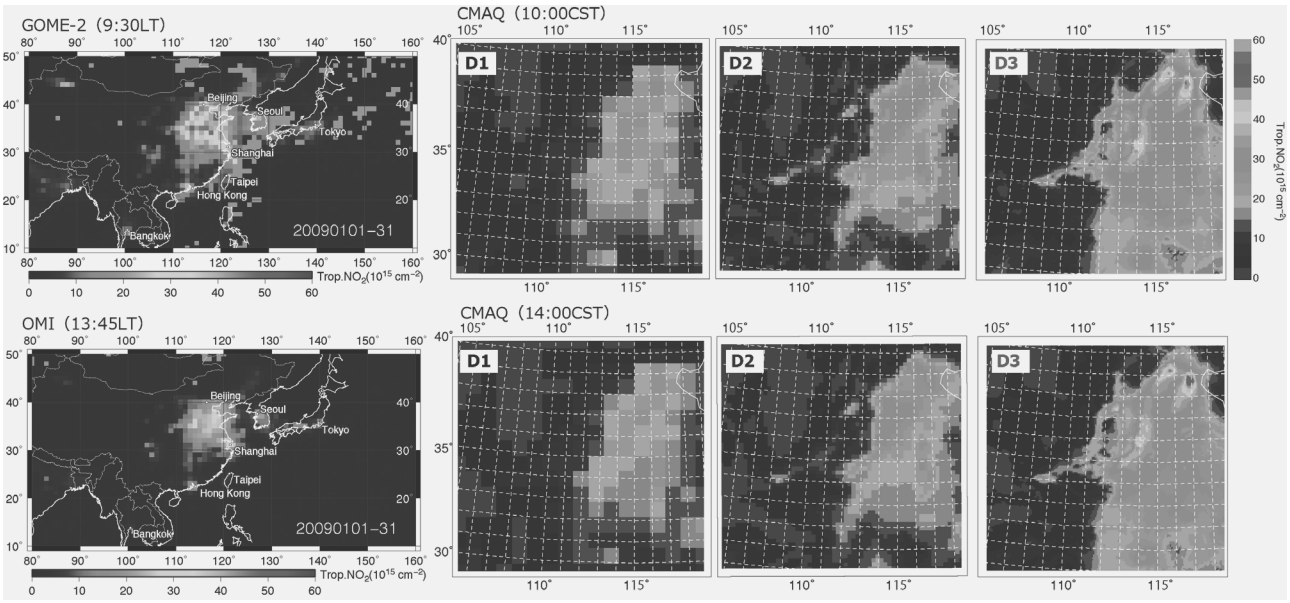


図 2 2009 年 1 月、衛星（GOME-2・OMI）とモデル（D1（80km）、D2（20km）,D3（5km））の対流圏 NO_2 カラム濃度の月平均値

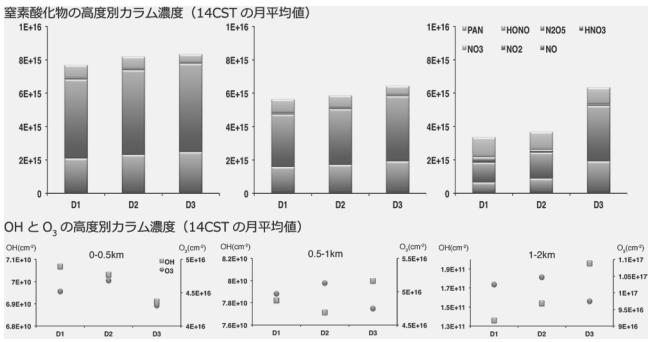


図３各モデル空間解像度の窒素酸化物、OH、O_3 高度別カラム濃度

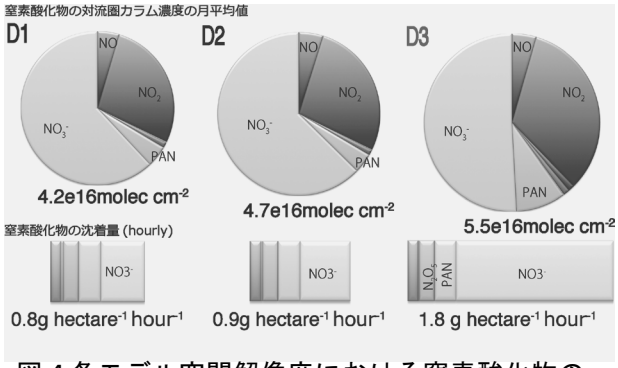


図４各モデル空間解像度における窒素酸化物の対流圏カラム量と沈着量

【研究成果報告】

山地一代ら、「領域ネストモデルを用いた窒素酸化物の動態評価」、第 17 回大気化学討論会、2011.10

入江仁士、K.F. Boersma、山地一代ら、「対流圏 NO_2 衛星データの検証とそれに基づく CMAQ モデル評価」、第 17 回大気化学討論会、2011.10

23 特 1−4

ライダー計測と黄砂輸送モデルを統合した黄砂の発生・輸送過程の研究

国立環境研究所
原　由香里

目的

2010 年 11 月 12 日，西日本から東日本にかけて 37 地点もの気象官署で黄砂が観測された．東アジア域における黄砂現象は春季に起こる頻度が高く，秋季にこのような大規模黄砂現象が発現するのは比較的珍しい．本研究では，4 次元変分法を導入した領域黄砂輸送モデル(RC4; RAMS/CFORS-4DVAR, Yumimoto et al., 2008)と地上/衛星搭載ライダーデータなどの観測データを併せて，秋季の大規模黄砂の発生要因や，その輸送構造を明らかにする．

モデルの概要

本研究で使用した黄砂輸送モデルは RAMS/CFORS (Uno et al., 2004)を基礎とし，4 次元変分法(Four Dimensional Data Assimilation; 4DVAR)を導入したデータ同化システム(RAMS/CFORS-4DVAR; RC4)である．RC4 のデータ同化計算には，NIES ライダー観測の偏光解消度をもとにエアロゾル消散係数を非球形粒子成分(ダスト)に分離した成分を用いた(Shimizu et al., 2004)．データ同化に利用したライダー観測地点は図 1 の 11 地点であり，シミュレーション期間は 2010 年 11 月 5 日～11 月 20 日とした．モデルの計算領域は図 1 に示した領域(計算中心を 37.5°N, 115°E)であり水平解像度を 40km(180×100 格子点)，鉛直解像度は 140-650m で 23km までを 40 層で分割した．RAMS の気象場計算の初期・境界条件には NCEP/NCAR の解像度 2.5°×2.5°の全球再解析データ(6 時間毎)を用いた．モデルの詳細は Yumimoto et al., (2008)を参照の事.

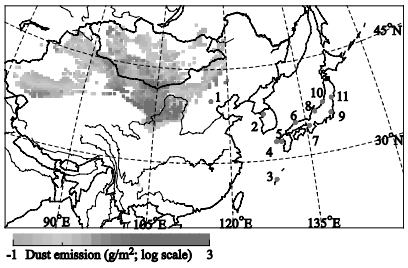


Fig.1 Model domain and distribution of emission intensity (tone level). Dots represent NIES lidar network locations. The NIES lidar sites are: 1, Beijing; 2, Seoul; 3, Hedo; 4, Fukue; 5, Nagasaki; 6,

NDVI, 土壌水分データ

発生源域の地表面状態を調査するため，2000～2010 年における MODIS Terra による Level3 NDVI データセット(MOD13C2.005)を使用した．解像度は 0.05 度である．また，土壌水分データとして 2002～2010 年における Aqua 搭載 AMSR-E (The Advanced Microwave Radiometer – Earth Observing System)の Level 3　Daily Soil Moisture データセットを使用した．

結果と考察

2010 年 11 月 10 日に 500hPa における気温が-30°C 以下に低下した空気塊を伴う低気圧がモンゴルと中国の国境近くを北西から南東に向けて通過した．SYNOP によれば中国の内モンゴルの西部に位置する Bayan Mod において最大風速 17m/s を記録している．ダストプルームは 11 日に中国・韓国を通過し，12 日(Jday316)に日本列島を北上する輸送経路をとった．ライダーとモデルによるダスト消散係数の時間高度断面から，ダストの輸送高度は 2km 以下と低く，春季によく見られる低気圧の寒冷面を輸送される輸送パターンである．秋季としては珍しく高濃度(0.4)が観測されていた．松江においてデータ同化前のモデル結果はダスト濃度を過小評価しており，データ同化により改善されている．ここでは示さないが北京においてはモデルの過大評価が解消されており，図 2 の下段に示すようにデータ同化によって発生源の北側で濃度が減少し，南側で濃度が増加したのが今回のイベントの特徴である．

図 3(a)に RC4 から得られたエミッションファクター(=データ同化によるダストエミッション/データ同化なしのダストエミッション)を示す．実線で囲んだ領域は発生量の解析で定義した領域で上がゴビ領域，下が黄土高原領域である．図 3(b)と(c)はそれぞれゴビ領域と黄土高原領域におけるデータ同化前/後のダスト発生量の比較である．図 3(d)にゴビ領域と黄土高原領域平均の摩擦速度と 10m 風速を示す．図 3(d)から，低気圧が発生源を通過した 11/10 における風速はゴビ領域よりも黄土高原領域で高かった．データ同化なしのダスト発生量はゴビ領域，黄土高原共に 2.5Tg 程度であったが，データ同化により黄土高原におけるダスト発生量は 11/10 に 344%も増加した．一方，ゴビ領域におけるダスト発生量は 30%減少した．

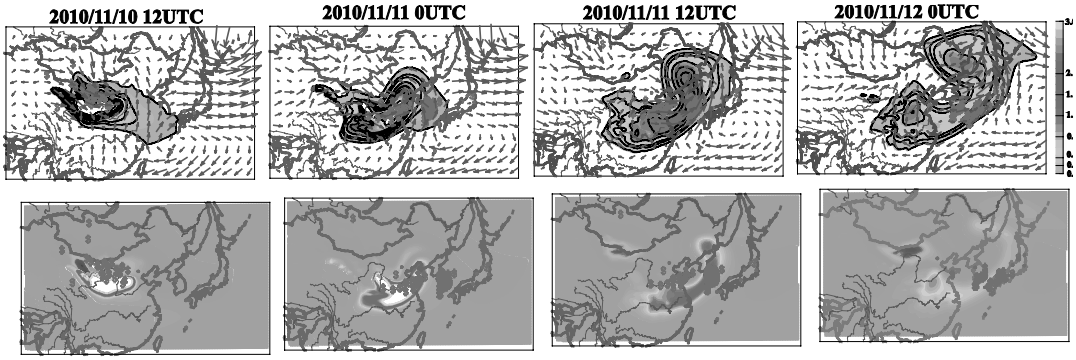


Fig. 2 (Upper) RC4 dust AOT (color and thick black contour), surface wind speed and SYNOP dust code ($). (Bottom) AOD difference between assimilated results and first guess.

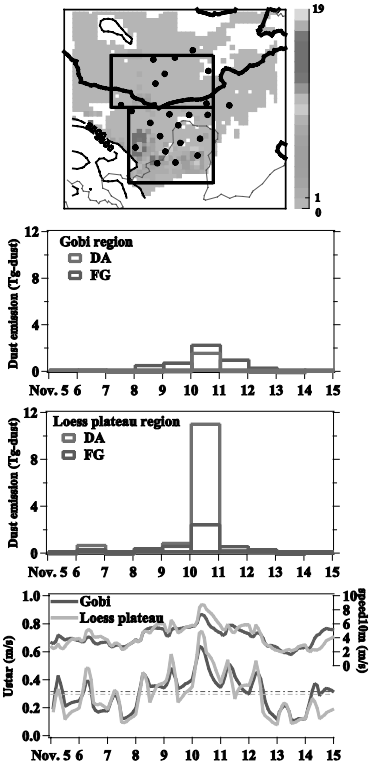


Fig.3 (a)The averaged emission factor , Daily dust emission for (b) Gobi region and (c) Loess Plateau region, (d) Regional averaged modeled wind field at 10m and u∗, and u∗,th for Gobi and Loess Plateau region.

モデルがダスト発生量を多分に過小評価した原因として，風速の過小評価と臨界摩擦速度の過大設定が考えられる．黄土高原領域において，ダスト発生量が大きく増加した原因を明らかにするため，発生量が特に大きく増加した領域に存在する SYNOP station (Minqin;52681, Yulin; 53646)の風速データを用いて，モデルによる風速の検証を行った．発生量の増加が最も大きい領域に位置する Minqin においては，モデルは 11/10 の日平均風速を約 27%,, 最大風速を 1.6m/s 過小評価していた. 黄土高原に位置する Yulin では 11/10 の日平均風速については 4%過大評価しているが, 最大風速を 1.5m/s 程過小評価している．この比較から，モデルはトングリ砂漠と黄土高原において地上風速を過小評価する傾向があったことが示され，モデルがダスト発生量を過小評価した一因と考えられる．続いて，2010 年 11 月の発生源域における地上風速，土壌水分，植生の平年からの偏差を明らかにするため，NCEP 地上風速， AMSR-E 土壌水分データ，MODIS による NDVI データを用いてアノマリー解析を行った(図 4)．2000 -2010 年 11 月における NCEP データから作成した 500hPa 気象場のアノマリーから，2010 年はバイカル湖の北西に低気圧性循環が見られ，特に寒気の南下が起こりやすい総観気象場であったことが明らかとなった．このため，モンゴルの西部からゴビ砂漠，黄土高原にかけ特に強風発生頻度が高かったと考えられる．次に，秋季において地表面のダストの舞い上がり易さ(臨界摩擦速度)を変動させる要因として夏季(JJA)の植生が考えられるため，JJA 期の土壌水分と NDVI の最大値のアノマリーを図 4(b)(c)に示す．これらの図から，2010 年の夏季において特にトングリ砂漠と黄土高原で土壌水分の負の偏差が見られる．NDVI についてはトングリ砂漠で負の偏差，黄土高原では正の偏差がみられる．以上のことから，植生が例年より少なく猛烈な強風が吹き荒れたトングリ砂漠においてスポット的に最も多くダストが発生したことが示唆された.

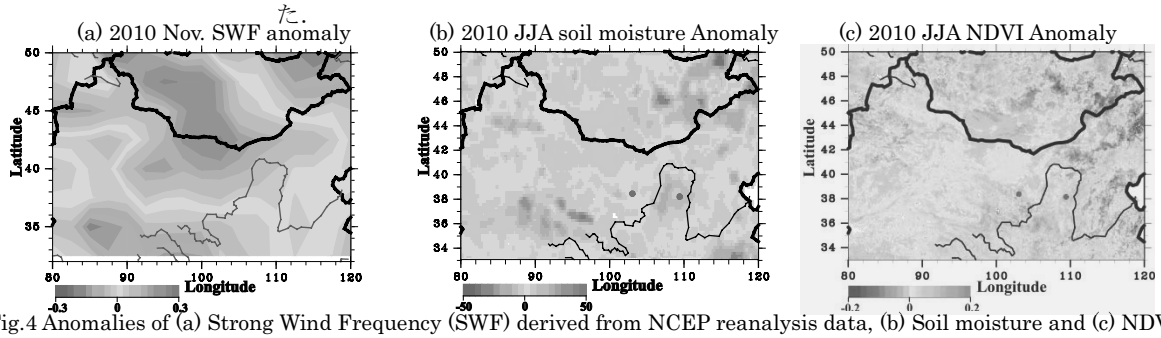


Fig.4 Anomalies of (a) Strong Wind Frequency (SWF) derived from NCEP reanalysis data, (b) Soil moisture and (c) NDVI.

研究成果報告 原由香里，弓本桂也，杉本伸夫，鵜野伊津志，清水厚，データ同化ダスト輸送モデルによる秋季大規模黄砂の解析，日本気象学会，愛知県名古屋市，2011 年 11 月.

23 特 1−5

大気エアロゾルと雲の光学的特性が気候影響に関する研究

富山大学大学院理工学研究部（理学）　青木 一真

１．はじめに

越境大気汚染物質や黄砂粒子の影響は、風下側に位置する日本に影響を受けている。とりわけ、近年の東アジア域における化石燃料の大量消費等による人為起源から排出される大気中に浮遊する微粒子（エアロゾル）は、健康被害や気象障害など、私たちの生活にも影響している。本研究では、2003 年から応用力学研究所において継続観測を行っている太陽光を用いたスカイラジオメーターを使ってエアロゾル光学的特性の解析を行っている。それらの観測データにより、エアロゾルやそれが核となって形成する雲の気候影響の現状を評価することを目的とする。粒子の輸送は、越境大気汚染として、次世代の大気化学・気象結合モデルの開発や応用を行うためにも、定量的な地上観測データの蓄積が重要となる。エアロゾル気候影響を評価する際には、応用力学研究所大気環境モデリング分野で開発・改良されているエアロゾル気候モデルSPRINTARS を用いて、地上観測の結果を基にモデルの検証を行う。また、本観測領域（富山、福岡、長崎、福江島、沖縄等）は、大陸から日本へ輸送されてくるエアロゾルをいち早くモニタリング可能な地理的位置にあり、各観測サイトと連携して本研究を行っていく。

２．観測・解析概要

太陽の直達光と周辺光の角度分布を自動測定出来るスカイラジオメーター（プリード社製、http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/）は、晴天時の日中に連続観測を行っている。この観測データから解析されたエアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数（エアロゾル粒径の指標）・一次散乱アルベド（放射吸収のパラメータ）を用いて、気候変動の指標である放射強制力を求める。また、これらのデータを地上検証として用いてSPRINTARSを改良し、東アジア全体の広域的な放射強制力のさらなる精度向上を目指している。

３．結果及び、考察

Fig.1は、2008年1月から2010年12月までの福岡県春日市（九州大学応用力学研究所）における0.5μmのエアロゾルの光学的厚さの月平均値を示している。赤丸がSPRINTERS（モデル）から得られた全天大気の光学的厚さ、青丸がモデルから得られた晴天大気の光学的厚さ、緑丸はスカイラジオメーター観測から得られた光学的厚さである。どれも季節変化が見られるが、最大月や絶対値が違っている。モデルと観測は、必ずしも同じ時間で比較しているわけではなく（観測は晴天時日中のみ）、必ずしも同じになることはありませんが、モデルの全天大気の結果に近い傾向にもありますが、違う月も見られるので、今後も継続して観測を行い、SPRINTARSや衛星観測等と比較しながら、とりわけ、九州地域を中心に、越境大気汚染やローカルな影響評価を行い気候影響の解明につなげたい。

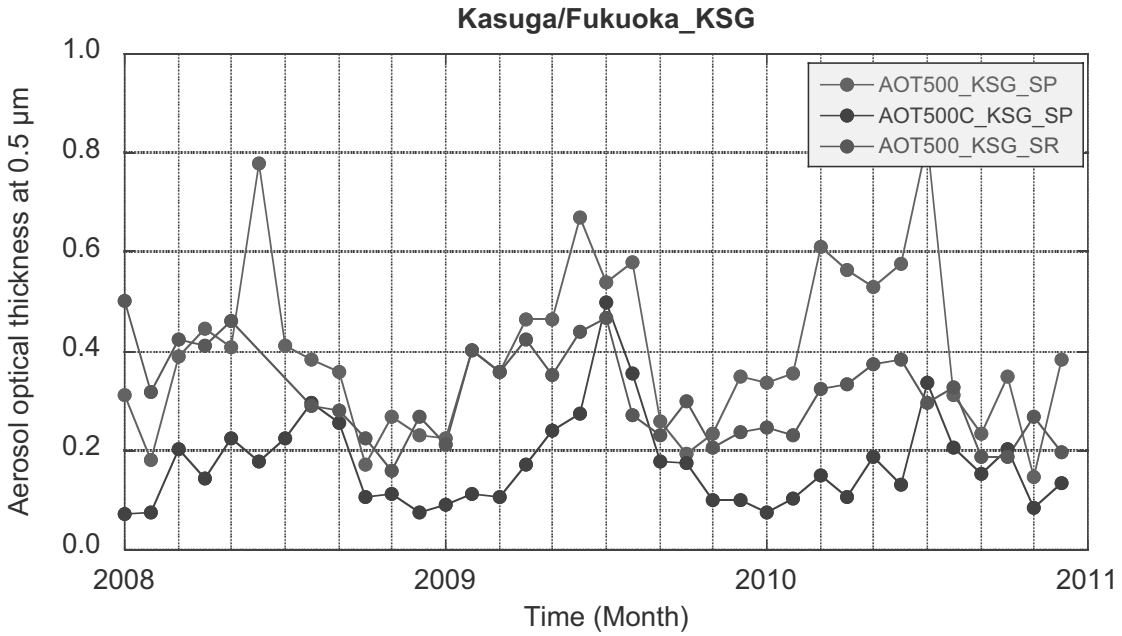


Fig. 1　2008年1月から2010年12月までの福岡県春日市（九州大学応用力学研究所）における0.5μmのエアロゾルの光学的厚さの月平均値(赤:モデル（全天）、青：モデル（晴天）、緑：観測)

４．研究成果

Aoki, K., T. Hayasaka, K. Kawamoto, and T. Takemura : Spatial and Temporal Variation of Aerosol Climatology over Japan Measured by Sky radiometer (10th AeroCom Workshop, Kasuga, Fukuoka, 2011.10)

浦 幸帆, 長田 和雄, 香川 雅子, 三上 正男, 的場 澄人, 青木 一真, 篠田 雅人, 黒崎 泰典, 林 政彦, 清水 厚, 植松 光夫 (2011)、非水溶性大気沈着物中のFe含有量を用いた鉱物質ダスト量の推定、エアロゾル研究、26、234-241.

Osada, K., S. Ura, M. Kagawa, M. Mikami, T. Y. Tanaka, S. Matoba, K. Aoki, M. Shinoda, Y. Kurosaki, M. Hayashi, A. Shimizu, and M. Uematsu (2011), Temporal and Spatial Variations of Wet Deposition Flux of Mineral Dust in Japan. SOLA, submitted on January 5, 2011, 7, 049-052, doi:10.2151/sola.2011-013.

Maki, T., K. Aoki, F. Kobayashi, M, Kakikawa, Y. Tobo, A. Matsuki, H. Hasegawa, Y. Iwasaka (2011), Characterization of halotolerant and oligotrophic bacterial communities in Asian desert dust (KOSA) bioaerosol accumulated in layers of snow on Mount Tateyama, Central Japan. Aerobiologia, DOI 10.1007/s10453-011-9196-0.

５．研究組織

代表者　青木 一真　（富山大学大学院理工学研究部）

協力者　竹村 俊彦　（九州大学応用力学研究所、所内世話人）

河本 和明　（長崎大学環境科学部）

小林 有友　（富山大学大学院理工学教育部）

23 特 1−6

地上型および衛星搭載ライダを用いたエアロゾル消散係数の時間空間変動特性の解析

(独)国立環境研究所環境計測研究センター　西澤智明

目的

本研究は、船舶観測を含めた地上ライダーから得られる時間的に高分解能な観測データと、衛星搭載ライダーから得られる全球網羅観測データを複合解析することで、時間・空間的に包括したエアロゾル光学特性データを取得およびデータセット化し、そのデータからエアロゾルの時・空間変動に関する知見を抽出することを最終的な目標に据える。また、本目標遂行においてエアロゾル輸送モデル等の数値モデルのエアロゾル分布データは非常に有用な情報となる。そこで、数値モデルの再現性やデータ同化技術の向上に資するライダーデータ解析技術の開発も視野に入れる。

そこで本目標遂行のために、ライダーデータからエアロゾル光学特性を抽出するためのアルゴリズムの開発を行い、それを地上および衛星ライダーデータへ適用し、その性能評価と供に推定されたエアロゾルデータの時空間変動について考察する。更に、エアロゾル輸送モデルの再現性検証のため、衛星搭載ライダーの測定信号シミュレータの開発も推進する。

実施方法

国立環境研究所の 2 波長偏光ライダーを用いた地上ネットワーク観測データおよび船舶搭載 2 波長偏光ライダーデータを使用する。エアロゾル消散係数の導出には、これまで西澤らが開発を進めてきた 2 波長偏光ライダー解析用アルゴリズム（以下、エアロゾル分類推定アルゴリズム）を用いることにする。衛星搭載ライダー解析では、上記アルゴリズムを衛星ライダー用に改良して用いる。また、岡本らの開発した雲・エアロゾルマスク手法（マスクアルゴリズム）を適用する。

結果

JAMSTEC の研究船みらいに搭載した 2 波長偏光ライダーにより測定されたデータにエアロゾル分類推定アルゴリズムを適用して、洋上での海塩粒子・鉱物ダスト粒子・大気汚染粒子（硫酸塩・有機性粒子等）の時空間分布を導出した。2001 年（日本海）、2004 年（熱帯域大平洋）、2006 年（熱帯域大平洋）に実施された全８ヶ月間のデータを解析し、データセット化した。日本海上データの解析では、境界層内に海塩粒子がトラップされている状況や、鉱物ダストと大気汚染粒子が混合して日本海上へ輸送されて来た様子を克明に捉えることができた。また、同船に搭載されたスカイラジオメーターから導出されたエアロゾル光学的厚さとオングストローム指数との比較により、本アルゴリズムの妥当性も証明できた。熱帯域大平洋上では、鉱物ダストは全く見られず先行研究と合致する。境界層内に海塩粒子が存在すると供に、大気汚染粒子が高濃度に存在している地域が見られ(日本−ニューギニア間およびスマトラ島付近)、陸域での人為起源やバイオマス燃焼由来の汚染粒子の海上流出が示唆される。

上記のエアロゾル分類推定アルゴリズムをCALIPSO衛星搭載の2波長偏光ライダー解析用に改良してデータ解析を実施した。本アルゴリズムを適用する前に、マスクアルゴリズムを適用してエアロゾルのみが存在する層を抽出し、その層のみにエアロゾル分類推定アルゴリズムを適用した。これにより雲のコンタミネーションの無い、より信頼度の高いエアロゾル推定が実

現される。2007年の３月から５月までの３ヶ月間の全球データの解析を行った。サハラ砂漠起源およびタクラマカン砂漠起源の鉱物ダストの発生や輸送、そしてアフリカ大陸のバイオマス燃焼由来と考えられる汚染粒子の高濃度領域が赤道付近の大西洋上やインドネシア付近に見られ、エアロゾル種毎の全球分布の特徴を捉えることができた。また、高度分布（経度平均）に関しても、妥当な結果が得られている（境界層が形成される低高度域（２km以下）にエアロゾル濃度（汚染粒子や海塩粒子）が高く、サハラ砂漠やタクラマカン砂漠が存在する緯度0-30度では高度5km 以下に高濃度の鉱物ダストが推定された)。

これまでに、エアロゾル輸送モデル（SPRINTARS）の再現性検証を目的として、岡本らによってSPRINTARSのエアロゾル出力を用いた船舶搭載の2波長偏光ライダーデータのシミュレーターが開発された。そこで、本シミュレーターを改良して、CALIPSO衛星搭載の2波長偏光ライダーデータのシミュレーターの開発を行った。シミュレーターのプログラム開発を終え、今後実測データとの比較を進めていく。

考察

衛星搭載ライダー用のエアロゾル分類推定アルゴリズムの開発および実測データへの適用を行った。また、マスクアルゴリズムも併用し、より信頼度の高いエアロゾル推定を進めた。推定されたエアロゾル種毎の全球分布は妥当な結果を示している。推定されたエアロゾル濃度の検証として衛星搭載の受動型センサーMODIS により推定されたエアロゾルの光学的厚さとの比較を現在進めている。初期解析結果では、ライダーの過小評価が見られている。その要因として、ライダーデータの品質（ノイズ）およびエアロゾル分類推定アルゴリズムで仮定されるエアロゾル種毎の光学特性モデルの不完全性が挙げられる。今後の課題として、ライダーデータ品質向上のためのノイズ除去手法の開発、そして全球解析に対応できるエアロゾル光学モデルの構築が必要と考えられる。

研究成果報告

黒木翔太、岡本創、西澤智明、萩原雄一郎、衛星搭載ライダを用いたエアロゾル特性の研究、2011 年秋季気象学会、名古屋大学、2011 年 11 月

Sugimoto, N., T. Nishizawa, A. Shimizu, and H. Okamoto, AEROSOL CLASSIFICATION RETRIEVAL ALGORITHMS FOR EARTHCARE/ATLID, CALIPSO/CALIOP, AND GROUND-BASED LIDARS, *IGARSS Proc.*, 4111-4114, 2011.

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当	メールアドレス
西澤　智明	国立環境研究所	NIES 特別研究員	サブテーマ代表者	nisizawa@nies.go.jp
杉本　伸夫	国立環境研究所	室長	ライダー観測	nsugimoto@nies.go.jp
松井　一郎	国立環境研究所	主任研究員	ライダー開発	i-matsui@nies.go.jp
岡本　創	九州大学応用力学研究所	教授	衛星ライダー解析	okamoto@raim.kyushu-u.ac.jp

23 特 1−7

全球気候モデルと衛星計測データを用いた雲 - 放射 - 力学相互作用過程の研究

東京大学大気海洋研究所　渡部雅浩

1. はじめに

地球温暖化などの気候変化予測における最大の不確定要因である雲および雲と放射・力学場の相互作用は、未解明かつ最先端の課題である。雲の生成消滅に関わる循環場は空間的に連続であり、気候変化の時間スケールを数値計算で扱うためには、全球気候モデル（GCM）を使う必要がある。しかし、GCM の解像度は O(100km)であり、雲システムの直接計算はできない。そこでパラメタリゼーションと呼ばれる粗視化手法を取り入れるが、これはさまざまな誤差を含むため、各々異なるスキームを用いた複数の GCM では温暖化計算時の雲変化およびその放射への作用が大きくばらつく。この状況を打破する一つの方向性として、最近データが増えつつある人工衛星からの雲プロダクトで GCM の雲の場を検証することが考えられる。最終的には、GCM の改良とともに大気中 CO_2 濃度の増加に対する雲-放射フィードバックのより確かなメカニズムを明らかにすることが目標となる。

上記の目的のためには、衛星計測および雲物理量導出アルゴリズムの専門家と、全球気候モデリングの専門家の間の連携が不可欠である。そこで、本課題では、CloudSAT などの雲の鉛直構造の衛星解析で世界的に認められている岡本教授のグループ(1-2)と、日本のコミュニティモデルの一つである MIROC 最新版の開発リーダーである代表者のグループ(3-5)による共同研究を推進する。MIROC は東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋開発研究機構の共同開発による GCM で、第 3 次・第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3/CMIP5)へシナリオ実験をはじめとする多くの実験データを提出している。本格的な共同研究の前段として、MIROC の新旧版における下層雲のフィードバック解析において、岡本教授らが導出した CloudSAT の雲平均場のデータを用いた(4)。その後、以下のような方法でモデル・衛星比較のための作業をすすめた。

2. モデル、データおよび手法

本課題で用いる MIROC5 は、CMIP5 に向けて開発されたバージョンで、旧版に比べ気候平均場や自然変動の再現性が向上している(1)。標準モデルの解像度は、大気が水平約 1.4 度、鉛直 40 層、海洋が約 0.5×1 度、鉛直 51 層である。雲周辺については、液相・固相それぞれの雲粒数濃度と混合比を予報変数とし、エアロゾルや積雲、境界層過程と結合して解かれる。検証に用いる CloudSAT のデータ期間が短いため、気候値での比較が困難で、モデルを初期値化した計算を行って瞬間的な雲の場を比較する必要がある。この目的には、CMIP5 のサブプロジェクトとして提案されている Transpose AMIP[1]実験が適当である。これは、2008 年 10 月から 2009 年 8 月の Year of Tropical Convection (YOTC)集中観測期の ECMWF 解析値で大気を初期化して、64 のケースについて 5 日間の疑似気象予報を行うという実験で、ここから得られる 3 時間間隔のデータを利用する。

衛星プロダクトは、いくつかの制約のもとで導出されたデータで、直接 GCM の出力と比較することができない。そこで、岡本教授の開発した衛星シミュレータをモデル結果に適用する。シミュレータは、「衛星が仮にモデル内部を周回した」ときに計測される放射輝度やライダーシグナルを、3 時間ごとの

[1] http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/tamip/index.html

CloudSAT の周回軌道に沿った鉛直断面で計算するものである。衛星シミュレータが想定するピクセルは GCM の格子よりずっと細かいため、モデル 1 格子の気柱を 100 分割し、雲量などはモデル内の放射スキームが採用する maximum-random オーバーラップの過程に基づいて配分した。

3. 結果と今後に向けて

今年度は、MIROC へのシミュレータ導入方法の検討、Transpose AMIP の計算、シミュレータ導入のテスト、および初期計算結果の比較までを終了した。MIROC へのシミュレータ適用は期待通りに実施され、軌道に沿った雲の場も概ねモデルと衛星で整合的であった。こうした検証研究で重要なのは、似ている似ていない論議で終わらせずに、モデルの誤差および、それに起因する放射フラックスの誤差を特定し、対照実験を行って誤差とフィードバックの関係を明らかにすることである。そのため、Transpose AMIP でモデルの系統誤差を軽減する実験、全球の海面水温を上昇させた疑似温暖化実験なども実施した。これらへのシミュレータの適用と解析は今後の作業である。本課題は、1 年間で達成できる内容ではないので、次年度も何らかの形で継続してゆく必要があると考えている。

文献

1. Okamoto, H., and Coauthors, 2007: Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: mid-latitude case study during the MR01/K02 cruise of the R/V Mirai, J. Geophys. Res, 112, D08216, doi:10.1029/2006JD007628.
2. Okamoto, H., and Coauthors, 2008: Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar, J. Geophys. Res., 113, D24213, doi:10.1029/2008JD009812.
3. Watanabe, M., and Coauthors, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. J. Climate, 23, 6312-6335.
4. Watanabe, M. and Coauthors, 2011: Fast and slow timescales in the tropical low-cloud response to increasing CO2 in two climate models. Clim. Dyn., doi:10.1007/s00382-011-1178-y.
5. Watanabe, M. and Coauthors, 2012: Using a multi-physics ensemble for exploring diversity in cloud shortwave feedback in GCMs. J. Climate, accepted.

23 AO－1

海洋乱流の観測およびモデリング研究

東京大学大学院　理学系研究科　教授　日比谷　紀之
九州大学　応用力学研究所　准教授　吉川　裕

地球温暖化や海洋酸性化など、環境変化に果たす海洋の役割は大きい。その役割を正しく評価し、今後を精度よく予測するために、海洋モデルや大気海洋結合モデルの高精度化が取り組まれている。しかし、十分な予測信頼性を得るには至っていない。海面境界過程や混合過程にかかわる海洋乱流現象が十分に解明されていないことが、その原因の一つである。

本研究課題では、海洋乱流の観測やモデリングなどに携わる研究者が集い、互いの知識や疑問点を共有し、海洋乱流現象の理解を深めるとともに、今後の研究の展開を模索することを主眼として、11 月 22 日から 23 日にかけて、九州大学応用力学研究所で研究会を開催した。プログラムの詳細は最後に掲載するとおりである。講演内容は海洋大循環に寄与する海洋深層での乱流混合から、沿岸域での水質改善をもたらす乱流混合まで、幅広い分野にわたった。

最初の講演では、日比谷より海洋深層大循環に寄与する乱流混合に関する話題提供がなされた。現状の深層大循環を維持するのに必要とされる鉛直拡散係数が観測されないという問題は、海洋学の大問題の一つである。この鉛直拡散係数は、海洋内部領域においては内部波の標準スペクトルと目されている GM スペクトルから乱流エネルギー散逸率を推定して見積もられるが、この方法の妥当性について、観測データをもとに検証を行った。その結果、散逸率の推定には GM スペクトルの歪みを考慮する必要のあること、この歪みは乱流の励起過程の違いを反映していることなどを示した。一方古市は、海洋表層の乱流混合過程に関する数値実験に基づいた研究を紹介した。近慣性波と共鳴する風応力を与えた場合には乱流混合が著しく増加することなどを示した後、これらの効果を適切に再現する混合層スキームの検討を行った。従来の研究で広く用いられている Mellor and Yamada スキーム、近年大気境界層の分野で成果を上げている Nakanishi and Niino スキームを比較し、後者がより優れていること、さらにそれを海洋用に修正するとさらに再現性が良くなることなどを示した。Noh は、大気境界層の強制力に関係する海表面温度に着目し、その日変化を再現しうる混合層スキームを開発した。さらにそのモデルを大気モデルに結合させたシミュレーションを行った結果、大気場の再現性が向上したことを示した。井手は、熱フラックスの日周変動の季節変化が、観測された表層吹送流の季節変化に重要であることを、数値実験、線形解析、データ解析を通じて示した。

堤は有明海における海底近傍の乱流混合を、データ解析を通じて調べた。その結果、潮流に起因する強乱流混合域は、密度成層に強く制限されていること、計測された散逸率と整合的な乱流応力を、流速データから見積もることに成功したことなどを報告した。また、内部波に伴う乱流混合のパラメタリゼーションが、従来のパラメタリゼーションとは大きく異なる可能性があることを報告した。遠藤は、５ビーム ADCP を用いて乱流応力の直接測定の試みについて紹介を行った。測定データはノイズの影響が大きく、さらなるデータ処理の必要性があるものの、数値実験から示唆される西向流と東向流の非対称性と矛盾しない結果を示しており、今後のさらなる解析と、数値実験との比較が期待される内容であった。井上は、赤道不安定波が引き起こす密度場と流速場の変化が、内部波励起の変調を引き起こすことを、

詳細な観測データを解析することで示した。また、乱流混合とモード水の変質過程に関する観測計画の紹介を行った。秋友は、海水の状態方程式の非線形性が対流に及ぼす影響について講演し、キャベリング効果は混合層の下に対流を発生させること、サーモバッリク効果は対流をさらに強めることを示し、これらの効果の有無により対流を二種類に分類できることを示した。吉川は、熱フラックスの下での吹送流の構造について数値実験を行い調べ、適当にスケーリングすれば相似形で表現できそうであることを報告した。

以上の話題提供とその後に行われた活発な質疑応答や議論を踏まえて、（1）海洋中の乱流混合現象は海洋大循環など広範囲な現象に影響を及ぼすことの再確認、（2）海洋循環や海洋構造の高精度予測のためには既存のパラメタリゼーションの検証・改良が必要であること、（3）そのためにも現場の観測データが特に必要であり、モデリングやパラメタリゼーションのグループと連携をとって進めていくことの必要性などが確認され、今後の研究の方向性を考える上で非常に有意義であった。海洋乱流のコミュニティーを形成・維持するためにも、このような集会は有効であり、来年度も継続して進めることも確認された。

---------- プログラム ----------

11 月 22 日

13:30 - 14:30 日比谷（東大）
Assessment of fine-scale parameterization of diapycnal diffusivity near mixing hotspots

14:30 - 15:30 古市（東大）
Large Eddy Simulation に基づく海洋混合層モデルの有効性の検証

15:30 - 16:15 NOH (Yonsei Univ.)
Prediction of diurnal variability of SST by an atmosphere-ocean mixed layer coupled model

16:15 - 17:30 井手（九大）
熱フラックスの短周期変動を考慮した吹送流の数値実験（LES）結果

11 月 23 日

09:00 - 10:30 堤（九大）
乱流微細構造の観測から見た有明海における鉛直混合

10:30 - 11:45 遠藤（九大）
5 ビーム ADCP を用いたレイノルズ応力の測定

11:45 - 13:15 井上（JAMSTEC）
(a) Modulation of Equatorial Turbulence by Tropical Instability Waves
(b) Understanding rolls of near- inertial waves and mesoscale processes on formation and modification of STMW

14:15 - 15:15 秋友（京大）
極域乱流混合層の安定性と深層対流

15:15 - 16:00 吉川（九大）
熱フラックス下での吹送流のスケーリング則

23 AO－2

海洋窒素循環に関する研究

神戸大学　自然科学系先端融合研究環

内海域環境教育研究センター　林　美鶴

１．目的

海洋の基礎生産にとって重要な栄養塩として窒素やリンが挙げられる。これらの物質は海洋中で、プランクトンなどの有機態や、イオン（硝酸やリン酸など）で無機態として存在する。さらに窒素はリンと異なり、気体としても存在する。これまで海水中の窒素循環過程において、気体としての窒素は十分に評価されてこなかった。しかし気体の中には地球温暖化ガスの一種である一酸化二窒素(N_2O)が含まれており、例えば淀川河口の海水中 N_2O 濃度は、海底堆積物中の脱窒に加え、海水中での硝化により生成されて、外洋深層と同程度で高濃度であり、これが直接大気に放出されていることが明らかになっている。沿岸海域の面積は小さいため、地球温暖化の議論において沿岸海域からの温暖化ガス放出は十分に議論されて来なかった。しかしより精度の高い温暖化予測を行うためには、沿岸海域での温暖化ガスの挙動を正しく把握する必要がある。本研究では、大気・海水 N_2O 濃度の海洋での測定、定点での大気中濃度の測定などを元に、大気－海水－海底間隙水－海底地下水間のガスを含めた窒素交換・循環を明らかにする。

本報告では、神戸大学海事科学部所属練習船「深江丸」で実施した観測のうち、二酸化炭素(CO_2)と同時に測定した事例の解析結果について述べる。

２．方法

図 1 に、観測を実施した 5 航海の航跡を示す。CO_2 濃度は海水中 CO_2 分圧測定装置(大滝ら, 1994 の改良版)を用いて測定した。また N_2O 濃度は、同装置を N_2O 用に改良したシステム(山下ら、2008)を用いて測定した。N_2O 濃度測定システムの構成を図 2 に示す。いずれの装置も、平衡器内の海水に既知濃度のキャリアガスをバブリングしてガス交換させ、交換後のサンプルガスを赤外線ガス分析計(CO_2 は LICOR 社製 LI-6252、N_2O は Thermo Electron 社製 MODEL46C)で計測する。3 種類以上のキャリアガスで濃度測定を行い、検量線から海水中濃度を決定した。サンプル海水には船底(水深約 3m)からのインテイク海水を使用した。CO_2 濃度測定は、平衡器内に海水を自動導入して 15 分毎に行った。N_2O 濃度測定には、約 1 時間毎に採水した海水を用いた。

３．結果

図 3 に結果の一例を示す。CO_2 と N_2O には、明確な連動傾向は見受けられなかった。海水中の CO_2 分圧は、pH により全炭酸との間で平衡状態が変化する。一方 N_2O は、海水中の硝化(アンモニア態窒素から亜硝酸態窒素への酸化)・脱窒(亜硝酸態窒素からの還元)過程で生成される。この様に海水中の化学過程が異なるため、両者の濃度変動が連動するとは限らない。一方で大阪湾では、湾奥に向けて CO_2 は急低下、N_2O は急上昇し、負の関係性が見受けられる。この様な変化の原因は、CO_2 は光合成が活発になるため、N_2O は表層での硝化と底泥での脱窒が活発になるためである。この様に根本原因は異なるものの、何らかの水質の変化に伴う濃度変動が両者に現れると、連動した変化が起こる可能性がある。

＊参考文献

・Yamashita et. al (1993) : JO, Vol.49, 559-596.
・森ら(2005)：神戸大学海事科学部紀要、第 2 号、115-126.
・大滝ら(1994)：海の研究、Vol.3, 413-418.
・山下ら(2008)：岡山理科大学技術科学研究所年報、第 26 号、29-40.

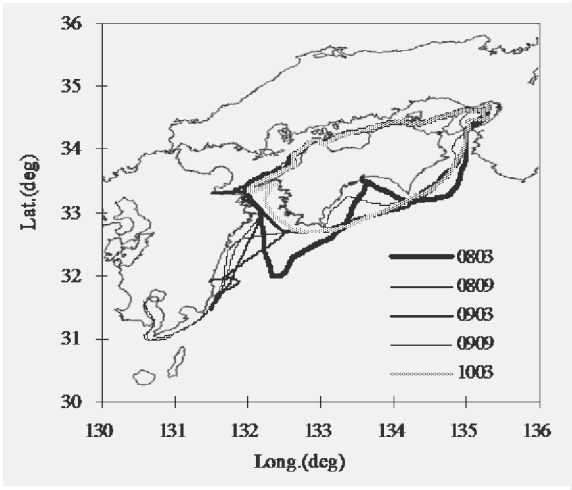


図 1　航跡(凡例は YYMM で表記)

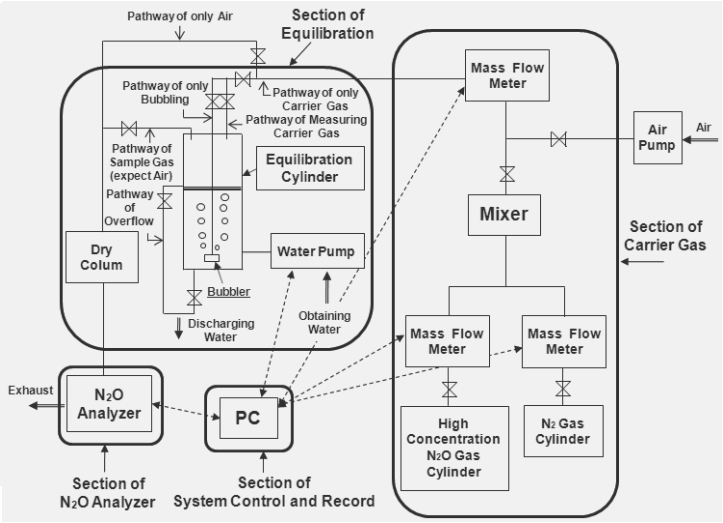


図 2　N_2O 濃度測定システム

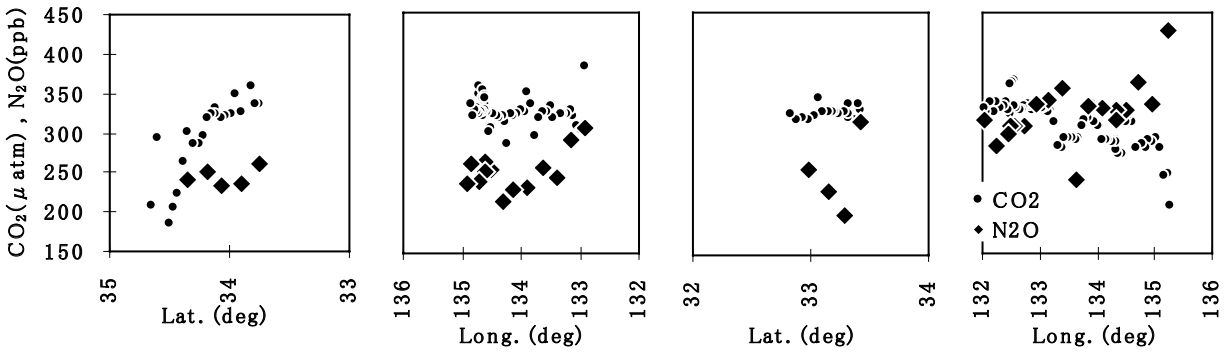


図 3　2009 年 3 月航海における海水中二酸化炭素・一酸化二窒素濃度測定結果
右から瀬戸内海(右が東)、豊後水道(右が北)、四国南岸(右が西)、紀伊水道(右が南)で反時計回りにつながる配置

４．研究成果報告

・Dissolved Inorganic Nitrogen budget in the inner part of Manila Bay, Philippines, La Mer, 49, 221-228, 2011 (in press).

・Estimation of submarine groundwater and TP flux near the intertidal zone by the budget analysis using the marine observation data, EMECS9

・Onboard Observation of Nitrous Oxide (N2O) and Estimation of N2O Emission, WESTPAC

・Short time variation of phytoplankton in the Yodo River estuary in Japan, WCMB

５．研究組織

代表者：林美鶴
所属　：神戸大学
役職　：准教授
担当　：観測

分担者：山下栄次
所属　：岡山理科大学
　　技術科学研究所
役職　：教授
担当　：観測

分担者：柳哲雄
所属　：九州大学
　　応用力学研究所
役職　：教授
担当　：観測結果評価

水中ビークル運用のための装備に関する研究

長崎大学・水産学部　　吉村　浩

1．はじめに

近年、海洋観測・調査用の海中ビークルは、専用の母船を必要とする大型の物から、専用の母船を必要としない小型のものまで数多く作られ、実用的な段階へと入りつつある。特に、技術者の支援を必要とせず、海洋物理の研究者が比較的容易に海洋観測に使用できる、中、小型のビークルは、専用母船、すなわち専用の母船に装備された投入・回収装置を持たないため、作業がいっそう困難なものとなる。長崎大学、長崎丸は応用力学研究所と共同で長年海洋観測を行っており、応用力学研究所所有の海中ビークル運用の実績を持つ。そこで本研究では、ビークルを損傷することなく、波浪中で、安全にビークルを運用するために必要な装備について調査・研究を行う。多様な形状のビークルに対応可な装備は、海洋観測・調査に大きく貢献するものと考えられる。本年度は、改造中の円盤型水中グライダーが完成予定であるため海上試験の検討、水中ビークルの海上試験に必要な超音波機器、船舶艤装についての調査を実施したので報告する。

2．円盤型水中グライダーの海上試験について

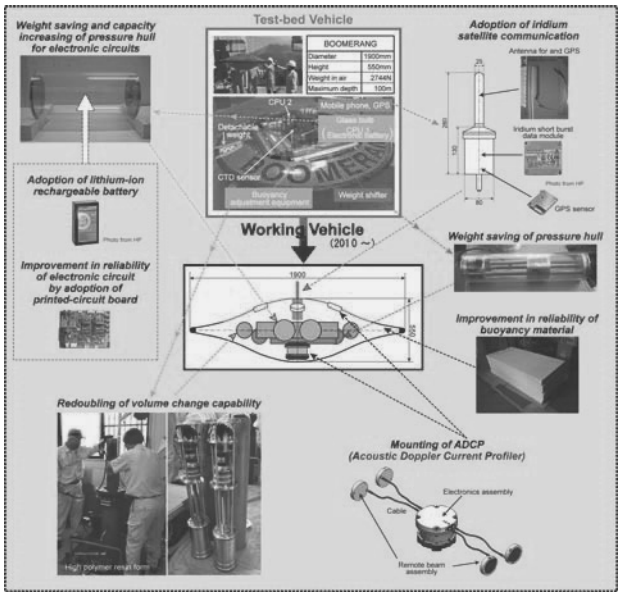


Fig.1 円盤型水中グライダーの実用化に向けた改造

共同海上試験を実施してきた円盤型水中グライダーの実用化に向けた改造（Fig.1）が今年度完成予定であるため、完成後の海上試験について打ち合わせを行った。

改造完了後の動作試験は 3 月 7 日鹿児島湾内（Fig.2）の水深 50m海域において、安全索をビークルにつないだ状態で行う予定である。索の片方は船上で保持するのではなく、浮きにつなぎ海上に投入することで、索がビークル運動に与える影響を軽減する計画である。

Fig. 2　実験予定海域

3．超音波機器等の水中ビークルに必要な機器の調査

海洋電子（株）を訪問し、ビークルの位置を知るための超音波式測器に関する調査を行った。

まず、従来型のトランスポンダ（Fig.3）と無指向性のトランスポンダ（Fig.4）の性能について情報を収集し、ビークルに搭載するにはどちらが有利であるか検討を行った。さらに超音波機器テスト用の無音響水槽を見学し、ビークルに搭載した超音波機器のテストが可能かどうか検討を行った。

次に深海で使用する機器の水圧試験機について説明を受けた。試験の依頼が可能かどうかについて打ち合わせを行った結果、水深 1000m相当までの

の水圧試験は比較的簡単に行ってもらえることがわかった。

Fig. 3　従来型の
トランスポンダ

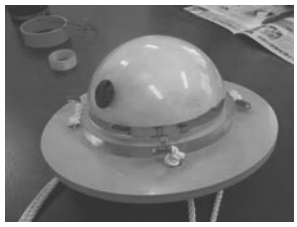


Fig. 4　無指向性の
トランスポンダ

Fig. 5　無音響水槽

Fig. 6　水圧試験機

最後に浮力材について情報を収集した結果、
・10000m級浮力材は優れた物があるが、高価であり、比重も 0.5 前後と大きく、浅海用水中ビークルには適さない。
・浅海用の浮力材は比重 0.2 程度の物があるが、吸水率が比較的大きい。
・浮力材は切断した場合、端面処理を適切に行う必要がある。
ことがわかった。

Fig. 7　浮力材

４．観測母船の艤装に関する調査

鹿児島大学の鹿児島丸が新潟造船において新造中であるので新潟造船を訪問し、艤装中の鹿児島丸（Fig. 8）の艤装について情報収集を行った。
・鹿児島丸は 2 ポット型の推進器を有し、運用後の高操船性能が期待されている。
・電気推進船ではあるが、プロペラ回転数ではなく可変ピッチにより船速が制御される。
・プロペラ回転を可変にすると電気回路が複雑になり建造コストが高くなる。
・ポッド推進を採用することで大きなスケグが必要となり船尾形状に工夫がなされている。
・漁労実習のみならずさまざまな海洋観測が効率的に行えるようにクレーンが配置されている。
・CTD 計測が効率よく迅速に行えるように、特別格納室が設置されており（Fig.9）、小型水中ビークルの格納・運用場所としても利用できそうである。

Fig. 8　艤装中の鹿児島丸

Fig. 9　CTD 用特別格納室

５．研究組織

・研究代表者
　吉村浩（長崎大学水産学部教授）
・研究協力者
　青島隆、山脇信博（長崎大学水産学部准教授）
　清水健一、内田淳（長崎大学水産学部助教）
　中村昌彦（九州大学応用力学研究所准教授、所内世話人）
　稲田勝（九州大学応用力学研究所　技術職員）

23 AO－4

九州東方沿岸域における透明度の季節・経年変動特性

宮崎県水産試験場　　渡慶次　力

1.研究の目的

市川ら(2009)は，土佐湾の基礎生産を透明度データから推定可能であり，透明度が物理環境と魚類資源をつなぐ要素として，過去の生物生産に関わる情報を引き出せる最適なデータとして重要だと指摘している。各県では，月 1 回の沿岸海洋観測にて地先の透明度をはじめとした海洋環境データが長期にわたり蓄積・保存されている。渡慶次・林田(2009)は，日向灘透明度の時空間変動特性の解明を試みたが，隣接する豊後水道を含めた広域の透明度との関係が不明であった。

そこで本研究では，九州東方沿岸域における透明度の季節・経年変動特性の解明を目的とする。

2. 材料と解析方法

大分県,愛媛県及び宮崎県が原則月 1 回実施している 1972 年 4 月～2010 年 3 月までの沿岸定線観測による透明度及び海洋観測記録を使用した。解析で使用した透明度データは，毎月の観測日が各県で異なるため，各月 15 日の値へ線形内挿した。季節変化の解析は，各県とも欠測値が少ない 1990 年 1 月～2009 年 12 月までの各月の調和平均値(平年値と呼ぶ)の全観測地点を用いて，クラスター分析（ウォード法)により区分けされた 4 海域の変動特性を議論した。一方，経年変動の解析では，観測データが長期的に安定して取得されている観測点の平年偏差値を EOF 解析し，卓越する時空間変動成分を抽出して，変動特性を議論した。

3. 結果

3.1　時間平均場

日向灘の透明度は，都井岬東方沖で 24m と最も高く，中部に位置する大淀川河口付近で約 10m と最も低い。一方，豊後水道では，10～17m と日向灘より低く，九州側では四国側よりさらに低い。

3.2　季節変動特性

図 1 の各海域で空間平均した各月の透明度は,Ⅳから Ⅰ の順に低い。Ⅰ海域の空間平均の季節変化は，7 月に最小となり，同海域平均の 0m 層塩分値の季節変化と類似していた。一方，Ⅳ海域の空間平均の季節変化は、4 月に最小値となり，長田ら(1996)が示す黒潮内側域の季節変化と類似し，春季ブルームと考えられる(長田・小川,1997)。ⅡおよびⅢ海域平均の透明度については，ⅠとⅣの 2 つの特性を合わせ持つ季節変化をしていた。

3.3　経年変動特性

図 2 に EOF の時係数の経年変動と EOF の固有ベクトルを示し，左図が EOF 第 1 成分を右図が第 2 成分をそれぞれ示している。透明度の EOF 第 1 成分の時空間変動については，寄与率 28%を占め，固有ベクトルの空間分布は日向灘全域で高い正の値となっており，日向灘の変動特性を示していると考えられる。第 1 成分の時係数の経年変動は，大淀川の河川流量及び日本南岸の黒潮流量の変動との関係が示唆された。一方，寄与率 23%を占める透明度の EOF 第 2 成分の時空間変動については，固有ベクトルの空間分布が豊後水道全域で低い負の値を示し，底入り潮の勢力の指標となる豊後水道湾口部の底層水温との関係が示唆された。

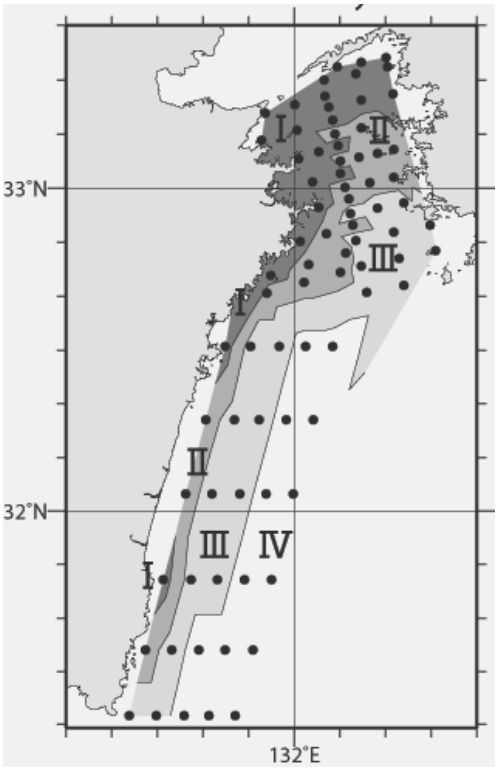


図 1. クラスター分析（ウォード法）により季節変化を 4 分類した透明度.

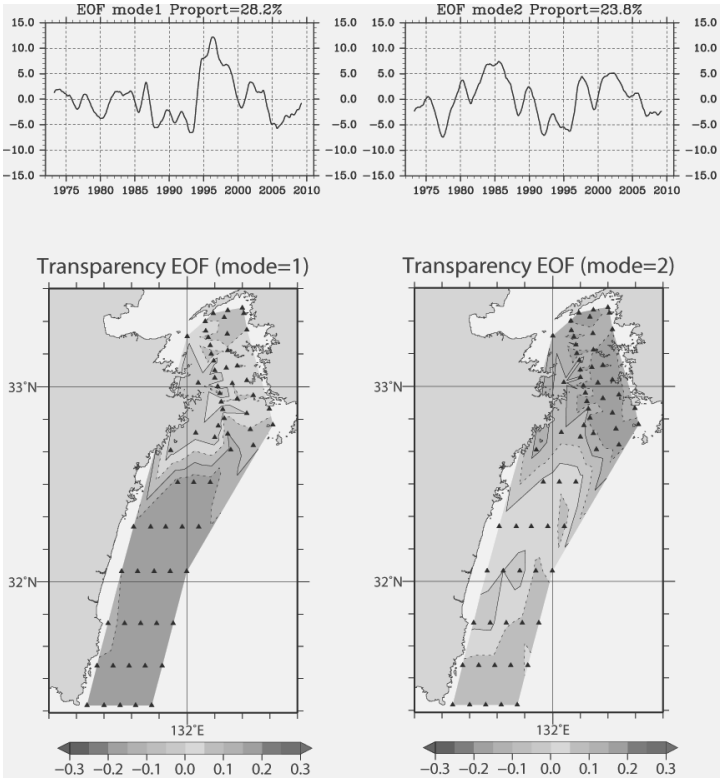


図 2. 透明度 EOF の時係数の経年変動(上段)と固有ベクトルの空間分布（下段）. 左図が EOF 第 1 成分を，右図が EOF 第 2 成分をそれぞれ示している.

4. 今後の展開

透明度の EOF 第 1 成分は宮崎県沿岸漁業の年間漁獲量と，EOF 第 2 成分についてはプランクトンの増減等との関係がみられたことから，物理・化学・生物過程の鉛直積分値である透明度をモニタリングすることは重要である。しかしながら，九州東方沿岸域における詳細な物理・化学・生物過程は，透明度データのみで解明できないことから，今後は，海況データやクロロフィル a 量の鉛直プロファイルデータ等を解析して，その変動特性を明らかにしたい。

5. 成果報告

渡慶次　力・福田博文・林田秀一(宮崎水試)・清水学・瀬藤聡・黒田寛(水研セ中央水研)・柳哲雄(九大・応力研)：漁船データを利用した日向灘海況モニタリング.2011 年度日本海洋学会秋季大会.

渡慶次　力(宮崎水試)・柳哲雄(九大・応力研)・行平真也(大分水研)・橋田大輔(愛媛水研セ)・市川忠史(水研セ中央水研)・林田秀一・福田博文・甲斐史文(宮崎水試)：九州東方沿岸域における透明度の季節・経年変動特性.2011 年度水産海洋学会.

渡慶次　力・福田博文・林田秀一(宮崎水試)・柳哲雄(九大・応力研)：まき網漁船による日向灘海況リアルタイムモニタリング.海の研究(投稿中).

6. 研究組織

研究代表者	宮崎県水産試験場	主任技師	渡慶次　力
所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授	柳　哲雄

23 AO－5

定期旅客船による山口県沖合海域の表層水温観測

山口県水産研究センター　渡辺俊輝

目的

山口県水産研究センターでは漁況予報を年 2 回程度行っているが、漁業の現場からは、より短期的な予報や盛漁期前の予報の実施についての要望がある。これらのニーズに沿った予報を行うには、短期の海況変動の把握および変動機構の解明が重要である。

本研究では、①萩と見島を結ぶ定期旅客船の航路上で水温モニタリングを行い、時空間的に密な水温データを得ること、そのデータ解析によって ②当海域での短期的な水温変動やそのメカニズムを明らかにすることを目的とする。

短期的な予報を求められる一方で、近年、長期的な変動について説明を求められることが多くなった。そのため、③40 年以上も蓄積されている航路上のポイント(34° 38’N, 131° 15’N)における観測資料を整理し、長期的な変動傾向を明らかにすることも目的とした。なお、本研究は、日本海の海洋研究に総括的に取り組み、かつ山口県沿岸の定置網を利用した海況モニタリングの実績のある応用力学研究所 千手智晴准教授に参加して頂き、共同で実施したものである。

モニタリングの概要

観測海域および定期旅客船「おにようず(258 トン)」の航路を図 1 に示す。旅客船に設置している水温計は、古野電気社製TI-20(分解能0.01℃、測定精度±0.2℃)である。水温の収録間隔は 2～3 秒に 1 回としており、それら取得データから緯度 1 分ごとに日平均水温を算出したものを、解析用のデータセットとして蓄積している。水温計は機関冷却水の取込口に設置されており、観測深度は海面下約 3～4m となる。

前年は頻繁に収録装置の不具合が起こったが、2011 年は少なかった。しかし、旅客船のエンジントラブルで、1 ヶ月以上の期間 (8 月 20 日～9 月 27 日)、ドックに入ったため、その期間が欠測となった。

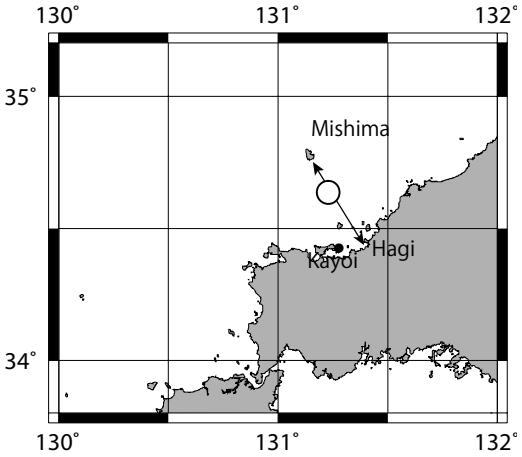


図 1 海域図. 矢印が旅客船の航路を示す. ○は長期間、観測が継続されているポイント.

結果

2011 年の水温変動

2011 年 1～12 月の水温の緯度-時間断面を図 2 に示す。冬季(1～3 月)には、34.5° N 以南に水温フロントが形成された。5 月以降になると、例年空間的に変動が複雑になるが、2011 年も同様の傾向がみられた。また、7 月中旬には航路の中央部で一斉に低温化する現象がみられた。これには 7 月 18～20 日にかけて西日本に接近した台風 6 号が関与していると考えられる。

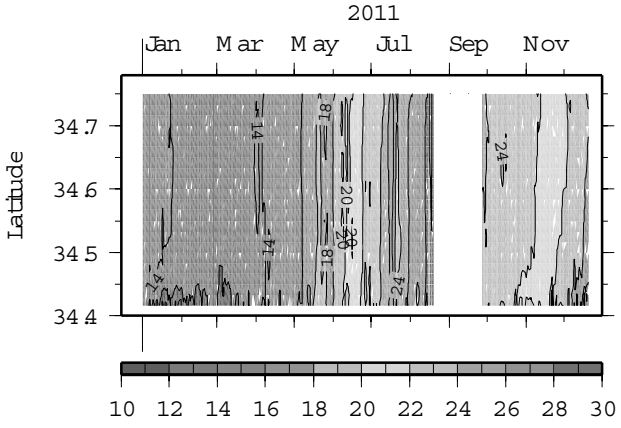


図 2 2011 年の水温緯度-時間断面図.

過去(2007～2009 年)の水温変動

2006 年 12 月に水温収録装置を取り付け、約 5 年が経過した。データ欠損の比較的少ない 3 年間(2007～2009年)のデータ(図3a)を用い、萩-見島間の平均的な季節変化(図 3b)および緯度別の 3 年間平均水温 (図 3c) を調べた。また、取得状況の最も良好な 2007 年 11 月 20 日-2008 年 11 月 4 日のデータ(31 日の移動平均値からの残差成分)で EOF 解析を行った。第 1 モードは、海域すべてが同位相で変動するモード(寄与率 83.8%)、第 2 モードは、34.5’N を境にして、その南北が逆位相で変動するモード(寄与率 5.9%)であった。

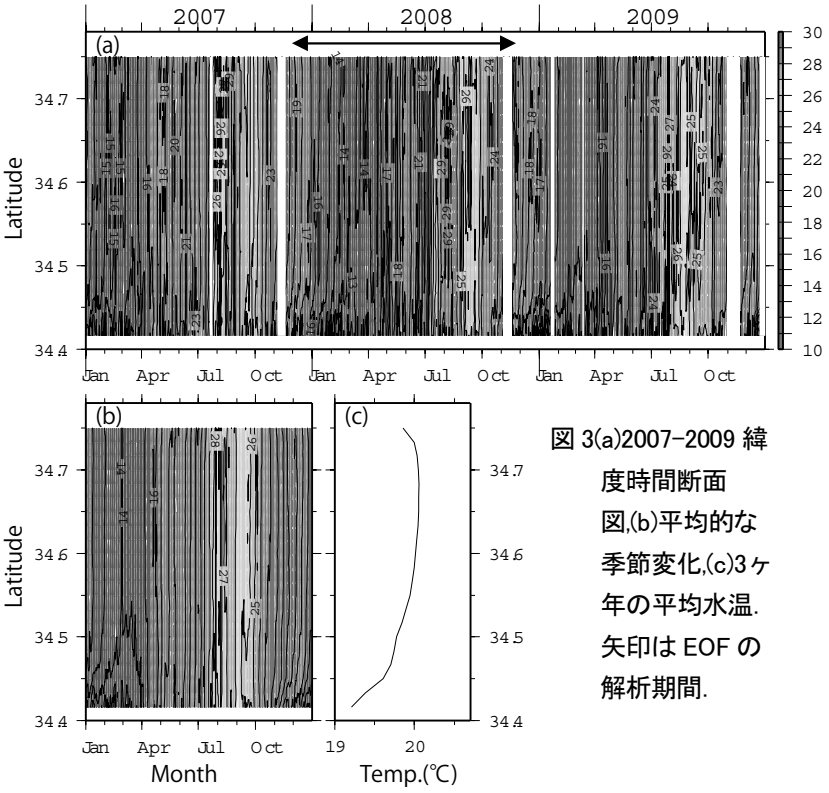


図 3(a)2007-2009 緯度時間断面図,(b)平均的な季節変化,(c)3ヶ年の平均水温. 矢印は EOF の解析期間.

長期の変動

収録装置による観測は、始まって日は浅いが、図 1 に示すポイントでは 40 年以上も観測が継続されている。そのうち 1964-2010 年(47 年間)の資料を用い、旬ごとの水温(10 日平均値)を求めて、各旬の値を平均値からの偏差で評価したのが図 4 である。1980 年代後半から冬季に高め傾向であること、また 1990 年代の後半からは、さらに高め傾向にあることがわかる。

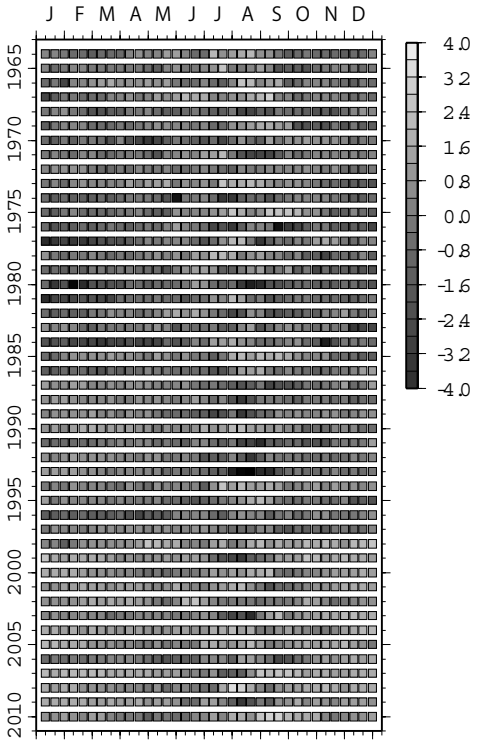


図 4 1964-2010 年の旬水温のタイルプロット.

成果報告

結果の一部を 2011 年 6 月 4 日下関市で開催された日本海甲殻類研究会および 2011 年 9 月 26 日福岡市で開催された西海ブロック海況情報分析検討会で発表した。

23 AO－6

定期旅客船を利用した能登半島輪島沖での対馬暖流モニタリング

石川県水産総合センター　大慶則之

目的

能登半島東岸では、沿岸の流れが突然速くなる「急潮現象」により、しばしば定置網漁具が大きな被害を被っている。「急潮現象」は、南西風に伴うエクマン輸送により半島西岸に堆積された沖合暖水の沿岸捕捉波あるいは沿岸密度流としての伝播と、沖合域での慣性振動が沿岸域に波及して生じる慣性周期帯の流速変動が重なった現象と理解されている。しかし、半島東岸での現場観測では、気象擾乱との関連性がみられない強流もかなり高い頻度で観測されている。

本研究は、対馬暖流水の富山湾への流れ込みと、能登半島東岸での強流発生とのかかわりを明らかにするとともに、対馬暖流水の流入をモニタリングする手法を開発することを目的とする。

本年度は、輪島～舳倉島間の定期航路で観測される表層水温データの対馬暖流の勢力指標としての利用可能性を評価するため、能登半島～舳倉島間の流量と輪島～舳倉島間の水位差の関係から、能登半島～舳倉島間の通過流量の時間変動を求めて、表層水温の変動との関係を調べた。

観測および観測資料

舳倉航路での水温データの取得方法とデータセットの作成方法は、前報(平成 21 年度研究成果報告書)に述べたとおりである。ここでは、長期間の連続データが得られた 2010 年 2 月～12 月の観測データを対象に EOF 解析を行い、流量変動に対応する変動の抽出を試みた。ADCP データは、半島北端と舳倉島の南西を結ぶ約 48km の定線観測区間（図 1）で、2008 年 10 月～2011 年 6 月に、石川県調査船「白山丸」に搭載した ADCP(RD 社製 150kHz BB-ADCP）で観測した 25 例のデータを使用した。ADCP 観測は第 1 層を 19m，観測層厚を 8mに設定して実施し、水深の 80%以浅のデータを解析に供した。通過流量は、1 分間隔で求めた観測線に直交する方向の各層の平均流速に層厚と 1 分間の観測距離を乗じて得た各層の流量の総和として求めた。なお、流量算出に際して、水面から第 1 層までは第 1 層、最下層から海底までは最下層の流速値を適用した。水位データは、九州大学応用力学研究所が舳倉島に設置した水位計と国土地理院輪島験潮所の毎正時のデータを輪島の海面気圧で補正した値を用いた。ここでは、水位差を各 ADCP 観測が行われた時間帯の輪島と舳倉島の水位偏差の差の平均値と定義した。得られた 25 組の水位差と流量の関係から、通過流量の時間変動を求めた。

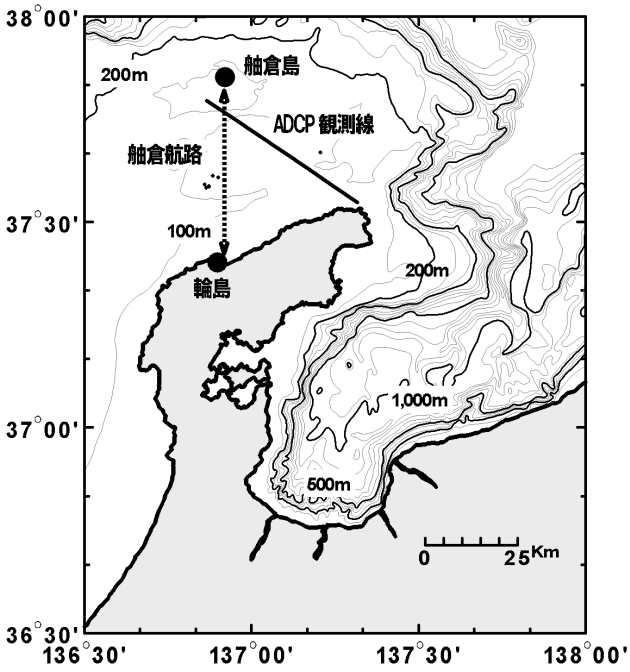


図 1　調査海域図　点線はニューへぐらの航路実線は ADCP 観測線を示す

結果と考察

輪島～舳倉島間の水位差と能登半島～舳倉島間の通過流量の関係を図 2 に示す。両者には、有意な高い正の相関が認められ、輪島～舳倉島間の水位差から、能登半島～舳倉島間の通過流量が推定できることがわかった。水位差の時系列データを用いて 2008 年 8 月～2011 年 6 月の能登半島～舳倉島間

の日平均通過流量の推移を求めた（図は省略）。日平均通過流量の 31 日移動平均は、緩やかな季節変動を示し、夏季に通過流量が増加する傾向がうかがわれた。これらのデータを用いて、2010 年に着目して日平均値から 31 日移動平均を除いた流量偏差を求めた（図 3 C）。次に、舳倉航路上の緯度 0.1 度ごとに 31 日移動平均値を差し引いて求めた水温偏差のデータセットに対して、EOF 解析を行い水温場の時空間変動特性を調べた。得られた EOF 第 2 モードの固有ベクトルの変動と時係数を図 3 A, B に示す。固有ベクトルは輪島側と舳倉島側で対称的な変動パターンを示している。このことから EOF 第 2 モードは、岸沖方向での暖水と冷水の分布パターン、すなわち水位差を示すと考えられる。EOF 第 2 モードの時間変動を表わす時係数と流量偏差の変動を比較すると、両者の変動パターンには類似性が認められる。以上の結果から、水温場にみられる EOF 第 2 モードの変動は流量変動に伴う変動であると推察される。EOF 第 2 モードの寄与率は 4.7%と小さく、この結果から、舳倉航路で観測される表面水温データは、通過流量の指標としての利用には適さないと判断される。今後は、水位差から求められる能登半島～舳倉島間の流量変動と、富山湾の沿岸流の変動について解析を試みたい。

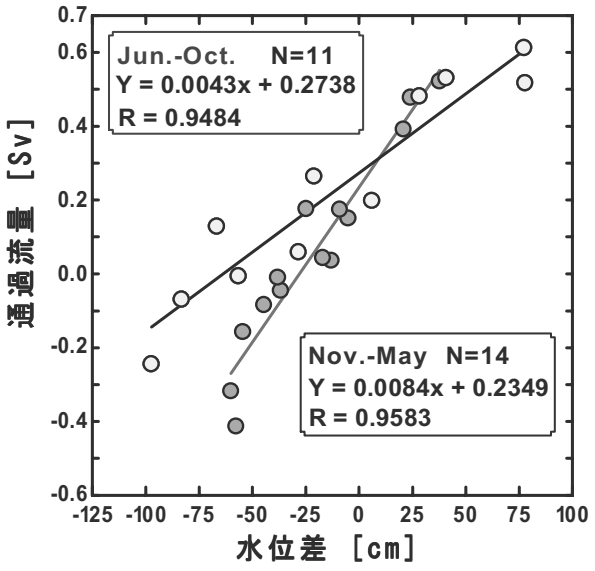


図 2　水位差と通過流量の関係
○：成層期（6-10 月）　●：非成層期（11-5 月）

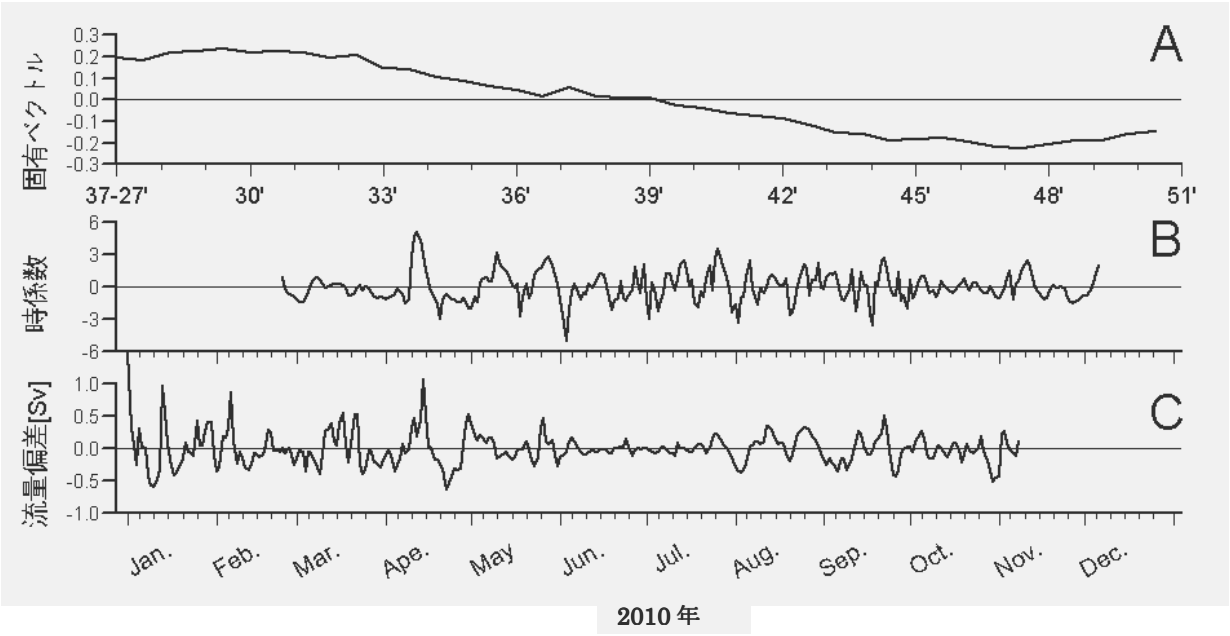


図 3　舳倉航路の水温場の日変動における EOF 第 2 モードの固有ベクトル分布（A）と時係数（B）および能登半島～舳倉島間の流量偏差の変動（C）

23 AO－7

越前沿岸域の表層流に関する研究

福井県立大学　海洋生物資源学部　兼田淳史

【研究の目的】

越前海岸の鷹巣（図１参照）では、7-10 日間にわたって一時的に流れが速くなり、地先で行われている定置網では操業ができなくなるときがある。この一時的な強流の発生は漁業者によって経験的に認識されているものの、観測事例が少ないため流速や発生期間といった基本的な特性でさえ十分に理解されていない。

本研究は、越前沿岸域の表層流の基本特性の解明を目的とし、日本海研究を先駆的に展開している九州大学応用力学研究所（所内世話人：千手智晴准教授）と、当海域で観測の経験を持つ福井県水産試験場（担当：鮎川航太、瀬戸久武氏）、福井県立大学の 3 機関が協力して実施した。初年度にあたる本年度は、今までに鷹巣の定置網近傍で実施された観測データを解析するとともに、同じ場所で現地観測を実施した。

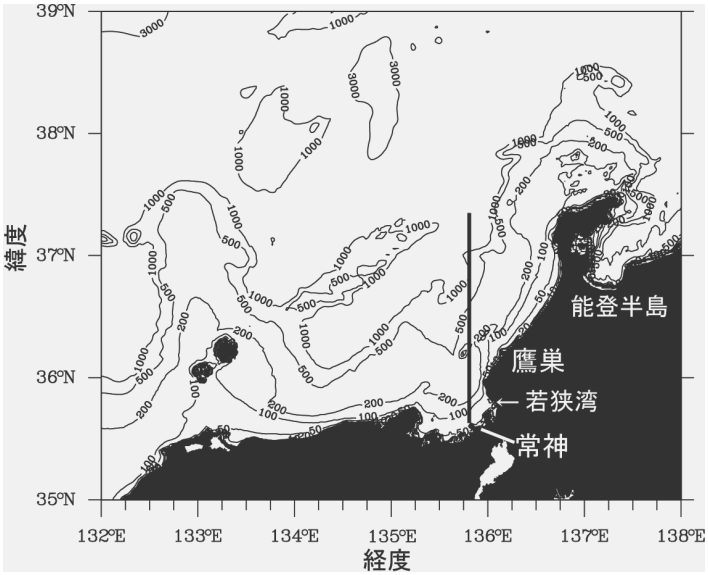


図１　若狭湾および周辺海域：等値線は水深を示している。越前海岸に面した鷹巣では、水温・塩分計を設置した。一方で、若狭湾奥から沖合にかけての定線観測（図中の直線）のデータを収集・解析した。

【データ解析および現地観測】

鷹巣の定置網は、若狭湾湾口から約 20km 東に位置する。この定置網の近傍では、いままでに福井県水産試験場によって流向・流速計を備えた観測用の係留ブイが設置されたことがあり、本研究では 2008 年のデータを解析した。さらに我々は 2011 年 4 月 23 日～10 月 12 日まで、同じ場所で流向・流速計、水温・塩分計を備えた観測ブイを設置し、回収したデータを解析した。ブイの設置および回収は、福井県水産試験場の調査船「若潮丸」を用いた。流向・流速計は海面下 10m と 40ｍに、水温・塩分計は海面下 5m に設置し、測定間隔は流向・流速計が 10 分、水温・塩分計は 20 分とした。なお、流向・流速データは機器の不調により 7 月 5 日以降は欠測であった。

【結果】

まず、2008 年 7-10 月の観測データの解析結果について述べる。鷹巣では岸に沿って北東方向へ向かう流れが最も卓越しており、岸に直行する流れの成分は弱かった(図は省略)。また、観測データは 8 月上旬から 20 日間程度にわたって 30cm/sec を超える流れが発生しており、8 月 15 － 25 日頃には約 3 日間おきに 50cm/sec を超える強流が発生していたことがわかった。

次に、2011 年の観測結果の一例として、4 月 23 日から 7 月 5 日までの流向・流速、水温、塩分の時系列を示す（図２）。流れのデータをみると、2008 年と同様に岸に沿う北東方向の流向の流れが卓越していた。そのため、流速の結果は海岸線に沿う方向（北東方向）と直交する方向（南東方向）の流速成分にわけてそれぞれ解析を進めた。ここでは岸と直交する成分は弱かったため省略し、岸と平行成分の

みを示している（図２(a)，(b)）。海面下 10m の流速の時系列（図２(a)）をみると、観測を開始した頃、海面下 10m の流速は 20cm/sec 程度であったが、5 月上旬から一時的に 30cm/sec を越える流れが測定されるようになり、5 月 10 日頃になると更に一時的に強い流れが生じるようになった。そこで、図 3 には 5 月 1 － 15 日の流速時系列を拡大して示している。5 月 1 日に一時的に 40cm/sec を越える強い流れが計測され、その後は次第に弱くなった。2 日後には南西方向（負の値）になった後、再び北東方向に流向は変化するとともに、流速は 40cm/sec 程度になった。その後も、2-3 日おきに流れは強くなり、5 月 7、10 日に 50cm/sec を越える流れが発生した。その後、しばしば 30cm/sec 程度の流れが発生する状態が 5 月末まで続いたあと、7 月 5 日までは 5-15cm/sec 程度の流れが比較的安定して続いていた。水温、塩分の時系列（図２c）の 5 月 10 日頃の変化をみると、13 日頃から塩分は一時的に低下したことを示していた。

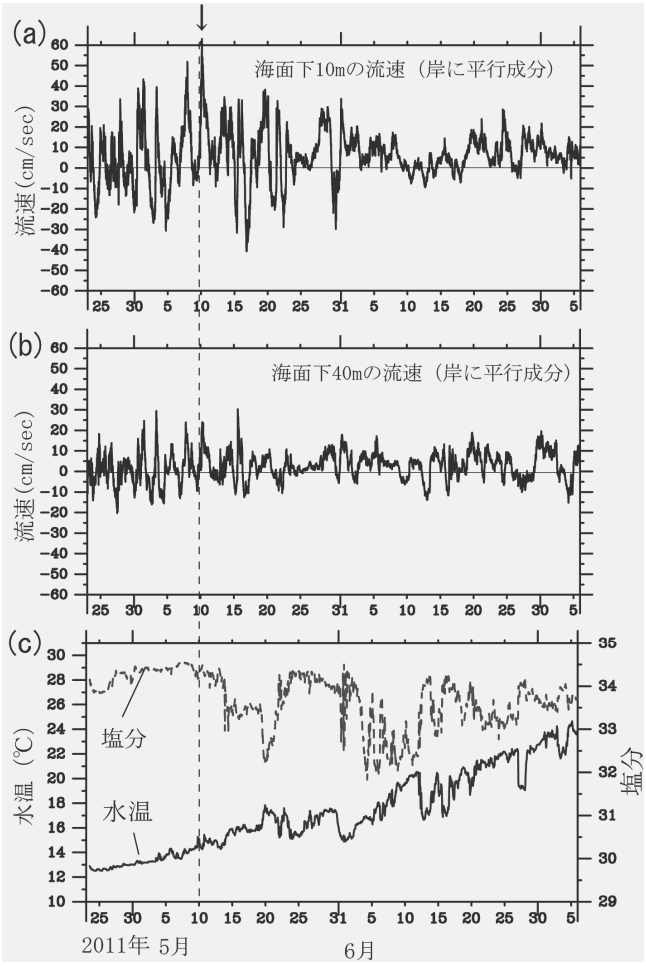


図２　鷹巣における 2011 年 5 月 23 日から 7 月 5 日までの海面下 10m の流速（岸に平行成分，(a)）、海面下 40m の流速(b)、海面下 5m の水温(実線)および塩分（破線）(c)の時系列.

これらの観測データがとらえた一時的な強い流れは、漁業者が経験的に発生することを認識していた「強い流れ」と考えられる。2008 年、2011 年に共通してみられた特徴は、50cm/sec を越える特に強い流れは連続的に発生するのではなく、約 3 日おきに繰り返し発生していたことであった。一方、2008 年と 2010 年の強流時の違いは、2008 年は安定して北東方向に流れていたが、2010 年は時々、逆向き（南西）方向に流れるなど流向が複雑に変化した点である。このような違いが生じた理由については、今のところよくわからない。今後は、さらにデータを蓄積して強流時のデータを収集するとともに、水温・塩分データや周辺の風や水位データなども利用しながら強い流れが発生する要因や過程について調べたいと考えている。

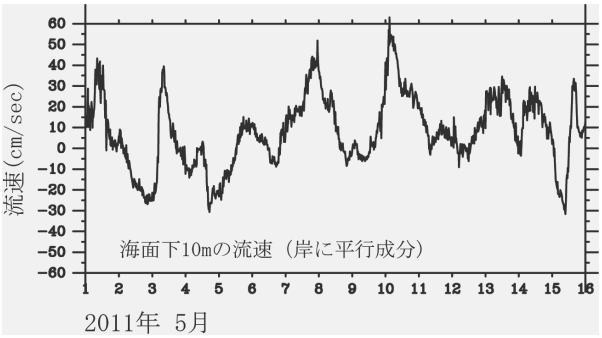


図３　鷹巣における 2011 年 5 月 1-15 日までの海面下 10m の流速（岸に平行成分）の時系列. 5 月 7 日、10 日には、50cm/sec を超える強い流れが一時的に発生した.

【謝辞】

最後に、観測にご協力頂いた福井県水産試験場の調査船「若潮丸」、鷹巣定置組合の皆様に厚くお礼申し上げる。

海洋環境モニタリングのためのグライダー型海中ロボットの研究開発

大阪府立大学・大学院工学研究科 有馬 正和

□研究目的

本研究の目的は，海洋環境のモニタリングを行うためのグライダー型海中ロボットの自律制御システムを確立することである。研究代表者らは，広範囲の海洋環境モニタリングや海洋探査に利用するための水中グライダーの実用化を目指して，高い運動性能を発揮することのできる「主翼独立制御型水中グライダー」の実験機 ALEX を開発した。ALEX には，水中での静止や後退，垂直降下，スパイラル回転をしながらの浮上／潜降，主翼による翼動推進などの高い運動性能のあることが実証されている。

中深層における海洋環境をモニタリングするために開発を進めているグライダー型海中ロボット SOARER（Fig.1）には実海域での高度な自律性が求められるので，その自律制御システムを確立するためには，深海水槽における多岐に亘る基礎データの収集・解析が必要不可欠である。研究代表者らの所属する大阪府立大学の船舶試験水槽（長さ×幅×深さ：70m×3m×1.5m）は，水中グライダーの性能評価を行うには幅と水深が不十分であり，九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実験水槽（長さ×幅×深さ：65m×5m×7m）を使用させていただくことが本研究の進展に最も有効であると判断した。同研究所・海洋大気力学部門・海洋流体工学分野は，海中ビークルの運動制御に関する研究において優れた実績があり，水中グライダーの研究をされている 九州大学大学院工学研究院・山口悟 准教授との情報交換によって，本研究の飛躍的な進展が図れると考えたことも共同利用研究の目的のひとつである。

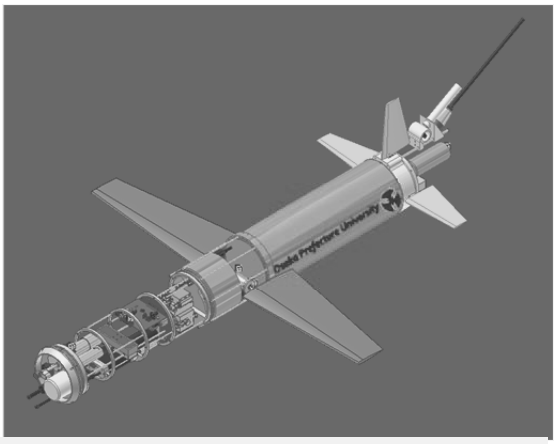


Fig.1　主翼独立制御型水中グライダー SOARER

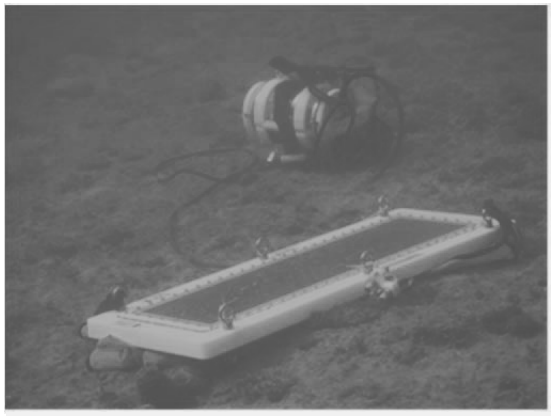


Fig.2　ソーラーパネルマウント（和歌山県・白浜沿岸にて）

また，搭載できる動力源に制約から運用時間に限界のあった海中ロボットに太陽光発電システムを導入することによって，実海域での長期間・広範囲の運用を目指す「ソーラー水中グライダー」の研究開発を進めている。本年度は，ソーラーパネルの海中での発電性

能を明らかにするために，Fig.2 のようなソーラーパネルマウントを設計・製作して，屋外プールおよび実海域での実験を試みた。

□研究の成果

主翼独立制御型水中グライダーSOARER の潜航試験は，本学・生産技術センターの日程の都合で部品の加工に時間がかかってしまい，組み立てが大幅に遅れてしまったことと，貴研究所の深海機器力学実験水槽の工事の都合のため，当初の予定通りの実験をすることができなかった。ソーラー水中グライダーは，亜熱帯海域では水中での発電も可能であることが明らかとなり，今後，運用方法などの詳細を検討することになった。また，貴研究所 中村 昌彦准教授との度重なる討論のお陰で，以下の研究成果を挙げることができた。次年度以降も引き続き共同利用研究の継続を希望するので，実海域で活躍できるグライダー型海中ロボットの研究開発を進めていきたいと考えている。

□研究成果報告

- M.Arima, K.Ishii and A.A.F.Nassirei: Development of the ocean-going underwater glider with independently controllable main wings, SOARER, Procs. of the twentyfirst (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2011), pp.274-278, CD-ROM, (2011.06).
- 有馬正和，岡島沢哉，山田智貴：自然エネルギーを利用したグライダー型海中ロボットの制御，第 12 回「運動と振動の制御」シンポジウム（12th MoViC）講演論文集，pp.506-509，（2011.06）
- M.Arima, T.Okashima and T.Yamada: Development of a Solar-powered Underwater Glider,Procs. of OCEANS'11 MTS/IEEE Kona, CD-ROM, (2011.09).
- M.Arima and H.Tonai; IFeasibility Study of an ocean-going solar-powered underwater glider, Procs. of the twentysecond (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2012), (2011.06).（投稿中）

□研究組織（教員のみ）

氏　名	所　　属	職 名	役割・担当分野
有馬 正和	大阪府立大学・ 大学院工学研究科	准教授	代表者・総括，システム計画
石井 和男	九州工業大学・ 生命体工学研究科	准教授	水中ロボットの自律制御
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人

23 AO－9

対馬海峡東水道における海洋環境変動

水産大学校海洋生産管理学科　滝川哲太郎

1. 目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ唯一の水路であり，対馬暖流は，東シナ海から対馬海峡を経て日本海に流入する．特に，夏季の対馬海峡には，中国大陸の長江起源の淡水が多量に流入する．本研究では，東シナ海から移流されてくる大陸起源の低塩分水を捉えることを念頭に，対馬海峡東水道における水温・塩分の連続測定を実施した．

2. 観測

対馬海峡東水道の 3 観測点(美津島，沖ノ島，蓋井島) に水温・塩分計を設置し，1 時間間隔で表層の水温と塩分を測定した．美津島と蓋井島の水温・塩分計は，ピストン式ワイパーで電気伝導度センサーを測定毎に自動清掃できる JFE アドバンテック社製の Compact-CTW または INFINITY-CTW を使用し，沖ノ島には，Sea-Bird 社製の水温・塩分計 SBE37-SM(生物付着防止アタッチメント付)を設置した．各測点における観測期間は以下の通りである．

美津島 2011/05/27 12:00 ～ 2011/11/15 13:00　　Compact-CTW
沖ノ島 2011/04/13 12:00 ～ 2012/01/18 11:00　　SBE37-SM
蓋井島 2011/04/24 11:00 ～ 2011/11/22 10:00　　INFINITY-CTW

蓋井島と美津島については漁業用定置網に，沖ノ島については海底からブイを立ち上げ，それぞれ 4～5 m 深に計測機器を設置した．蓋井島の水温・塩分計の回収時に，ピストン式ワイパーが故障しており，伝導度センサーの内外部に多くの生物が付着していた(写真 1)．蓋井島の塩分観測について，過去の観測事例を参考にしつつ報告する．

3. 結果と考察

美津島・蓋井島で得られた水温・塩分の時系列を図 1 に示す．美津島では，定置網の網替えのために夏季の水温・塩分データが得られなかった．この欠測期間は，8 月 10 日から 10 月 5 日であった．蓋井島では，8 月 8 日以降，塩分は正常な値を示さなかった．この頃から，ピストン式ワイパーの不具合が生じていたと考えられる．沖ノ島の水温と塩分の計測は，観測期間を通して成功した．

表 1 に，過去の蓋井島における水温・塩分観測の実施期間，塩分の欠測期間，使用測機を示す．例年，春に観測を開始し，秋から初冬に観測を終了する場合が多い．Compact-CTW を使用した場合には，塩分の欠測は少なかった．ただし，2005 年と 2006 年の観測期間後半の秋季に欠測となった．近年，JFE アドバンテック社では，Compact-CTW の後継機として，INFINITY-CTW を販売している．INFINITY-CTW による塩分の観測期間は，2010 年に 72 日間，2011 年に 77 日間であった．本研究では，対馬海峡の夏季の低塩分化に着目しているため，半年程度の期間，塩分を計測し続ける必要がある．この必要な観測期間に比べ，実際の INFINITY-CTW による塩分観測期間は短かった．

表 2 に，蓋井島で水温・塩分計を回収・設置した時の塩分のセンサー値を示す．回収時の塩分のセンサー値は，新たに設置したセンサー値と比べ，低い傾向を示した(2010 年 4 月 16 日を除く)．特に，2009 年 11 月 19 日の回収・設置時のセンサー値の差は大きく，2.281 であった．これらのセンサー値の差の要因として，生物付着とセンサー自体のドリフトの影響が考えられる．センサー値が低下する傾向は，夏の期間に観測した場合に顕著であり，夏季の生物付着量が多いと考えられる．実際，水温・塩分計には，多量の生物が付着していた(写真 1)．

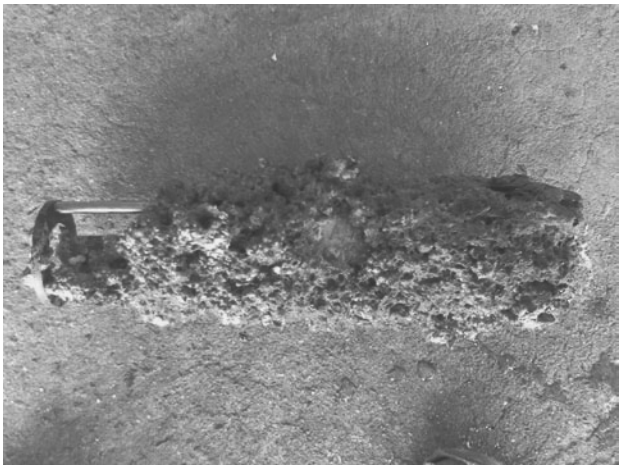


写真 1: 回収時の水温・塩分計(2011 年 11 月 22 日，蓋井島).

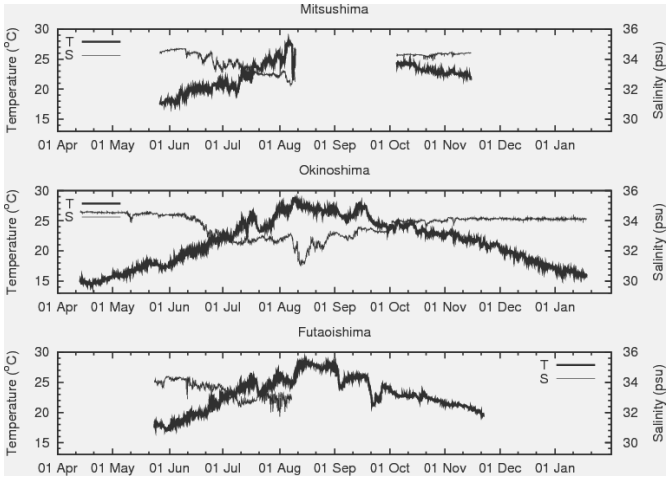


図 1: 美津島(上段)，沖ノ島(中段)，蓋井島(下段)における水温・塩分の時系列(2011 年).

表 1: 蓋井島における水温・塩分観測の期間，塩分の欠測期間，使用測機.

観測期間	塩分の欠測期間	測　機	備　考
2002/10/11-2003/05/22	不明	ACT-16K (現 JFE アドバンテック)	生物付着防止の対策なし．観測期間を通じて徐々に塩分低下
2004/04/16-2005/02/24	なし	SBE37-SM	
2005/02/24-2005/05/19	なし	Compact-CTW	
2005/05/19-2005/10/28	2005/10/09-2005/10/28	Compact-CTW	水温も欠測
2006/05/01-2006/11/21	2006/09/11-2006/11/21	Compact-CTW	
2007/05/09-2007/11/15	なし	Compact-CTW	
2008/05/16-2008/12/03	なし	Compact-CTW	
2009/05/26-2009/11/19	なし	Compact-CTW	
2009/11/19-2010/04/16	なし	Compact-CTW	
2010/04/16-2010/11/18	2010/06/26-2010/11/18	INFINITY-CTW	
2011/05/24-2011/11/22	2011/08/08-2011/11/22	INFINITY-CTW	

表 2: 蓋井島で水温・塩分計を回収・設置した時の塩分のセンサー値.

回収日時(JST)	塩分(psu)	設置日時(JST)	塩分(psu)
2005/02/24 10:00	34.269	2005/02/24 11:00	34.673
2005/05/19 10:00	34.480	2005/05/19 11:00	34.512
2009/11/19 10:00	31.740	2009/11/19 11:00	34.021
2010/04/16 10:00	34.411	2010/04/16 11:00	34.337

4. 研究組織

研究代表者	水産大学校	滝川哲太郎
所内世話人	九州大学応用力学研究所	千手　智晴
研究協力者	福岡県水産海洋技術センター	松井　繁明

23 AO－10

アジア大陸から輸送される反応性窒素酸化物およびその構成成分の動態に関する研究

大阪府立大学大学院　工学研究科　坂東 博

【はじめに】

近年の中国における経済発展に伴い、中国国内から排出される窒素酸化物量が増大し、日本国内を含むアジア大陸縁辺地域ではバックグラウンドレベルの反応性総窒素化合物 (NO_y) の濃度増大が今後問題となってくる可能性がある。

このような状況下、研究代表者および研究協力者ら (高見昭憲、清水厚、竹中規訓、定永靖宗、弓場彬江) はこのような状況下、我々は先行研究で NO_y, および全硝酸 (TN: ガス状硝酸 (HNO_3(g) および粒子状硝酸 (NO_3^-(p)) の和)の測定装置の開発を行い、現在五島列島福江島にある「大学・研究機関共同利用福江島大気観測施設」、能登半島珠洲にある「金沢大学能登スーパーサイト」および沖縄辺戸岬にある「独立行政法人国立環境研究所　大気・エアロゾル観測ステーション」おいてそれらの連続観測を行っている。

一方、九州大学応用力学研究所 (所内世話人: 鵜野伊津志) においては WRF/CMAQ 化学物質輸送モデルにより、東アジア地域での汚染物質濃度などが計算されている。本研究では、上記の定点観測および、このモデルを利用して、日本周辺域における NO_y およびその構成成分の広域分布および広域的な動態把握の解明が最終目標である。

平成 23 年度ではまず観測の面からのアプローチを試みた。具体的には、上記の 3 観測地点の中で、五島列島福江島と能登半島珠洲に着目し、これら 2 地点の NO_y,TN 濃度の時系列変化を比較することにより大陸から日本を通過する気塊における NO_y および TN の動態の解析を試みた。本報告書ではその結果について述べる。

【観測について】

NO_y, TN の濃度測定には Thermo Fisher Scientific 社製 NO_x 計を大阪府立大学で改良した NO_y, TN 計を用いた。これらの観測は五島列島福江島では 2008 年 11 月から、能登半島珠洲では 2009 年 11 月から継続して行なっている。また、後述するが本解析では CO データも用いている。CO については Thermo Fisher Scientific 社製の CO 濃度計により観測した。

【解析方法】

福江島と珠洲の 2 地点における汚染物質 (CO, NO_y, TN) の濃度変動を比較し、その中で福江から珠洲への気塊の移動が起こっている可能性があるピークの組を探した。まずはピーク位置の判別が比較的容易であった CO を用いてピークの組を探した後、その日時での NO_y, TN について調べ、最後に後方流跡線解析で福江から珠洲への気塊の移動を確認した。期間については解析に用いるすべての汚染物質が観測できている 2009 年 11 月～2010 年 6 月、2010 年 8 月、2010 年 10 月～2011 年 5 月を解析の対象とした。

次に 2 地点間の対応する CO ピークのずれの時間幅を輸送時間と定義し、NO_y の珠洲でのピーク面積を対応する福江でのピーク面積で除して珠洲/福江比を求め、福江での濃度に対する珠洲での濃度の増減の割合について調べた。ここで NO_y の増加に寄与する要因は日本からの排出の影響である。一方、減少に寄与する要因は大気の拡散と沈着であるが、単に NO_y 濃度の珠洲/福江比を見ただけではその増減をもたらす各要因の寄与の大きさを評価することはできない。NO_y と同じ人為発生の汚染物質である一方で濃度減少の要因が主に大気の拡散と考えられる CO を用いて NO_y/CO 比を求め、NO_y に対する拡散の

影響を排除した。その比と NO_y 値とを比較することにより NO_y に対する残り二つの要因について評価を試みた。TN についても同様な評価を試みた。

【結果および考察】

図 1 (a) に NO_y の珠洲/福江比と NO_y/CO の福珠洲/福江比との関係および、図 1 (b) に TN の珠洲/福江比と TN/CO の珠洲/福江比との関係を示す。図 1 (a) は全体の一部分を拡大したものである。NO_y の珠洲/福江比の多くは 1 以下であり、排出よりも拡散、沈着による影響が大きいことが分かる。また沈着が支配的な領域と拡散が支配的な領域に入る点はどちらも 13 件ずつであったので、福江から珠洲へ輸送中には沈着と拡散の影響を同程度で受けることが考えられる。季節別に見ると沈着が支配的な場合は冬季に多くみられた。また、排出や拡散が支配的な場合は春季によくみられた。一方、TN の珠洲/福江比の多くは 1 以下であり、生成よりも拡散、沈着による消失の寄与が大きいことが分かる。また、TN については NO_y と異なり、ほとんどの点が沈着が支配的な領域に入っている。これは、福江→珠洲と輸送される際の TN の消失過程として、沈着が支配的であることを示している。

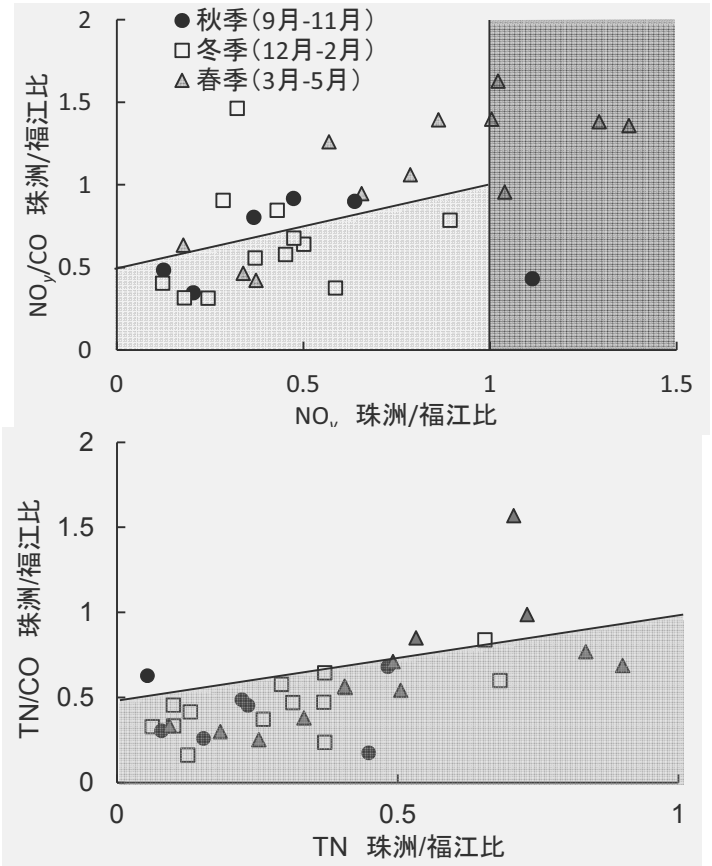


図 1. (a) NO_y の珠洲/福江比と NO_y/CO の珠洲/福江比との関係。および (b) TN の珠洲/福江比と TN/CO の珠洲/福江比との関係。白色の領域は拡散が支配的、薄い灰色は沈着が支配的、濃い灰色は排出が支配的な部分である。

【まとめ】

これまでおよび今回の解析結果から、大陸由来の窒素化合物について、日本の西端にある福江では大陸からの影響を強く受けている一方、珠洲ではその影響が相対的に弱まっている。その要因としては、NO_y、特に TN の沈着によるものが大きいと考えられる。今後は観測を継続しデータを蓄積する。一方、今回は気塊の移動の確認方法として後方流跡線解析を用いたが、より正確に気塊の輸送を確認するために、WRF/CMAQ モデルを用いた解析を行う。更にはモデルを用いて窒素化合物の日本上空の広がりについて解析により検証を行う予定である。

【論文目録】

- 清浄地域におけるガス状硝酸の日内変動要因解析、弓場彬江、定永靖宗、高見昭憲、清水厚、松井一郎、杉本伸夫、畠山史郎、竹中規訓、坂東博、大気環境学会誌, 47 (1), 26-32, 2012.
- 沖縄辺戸岬での長期連続観測による越境大気汚染物質の経年変動、重富陽介、弓場彬江、定永靖宗、高見昭憲、畠山史郎、加藤俊吾、梶井克純、竹中規訓、坂東博、大気環境学会誌, 47(1), 第 1 号, 46-50, 2012. 他 5 件

【学会発表など】 計 39 件

23 AO－11

海洋大循環の力学、とくに中深層循環に及ぼす海岸・海底地形の影響に関する研究

北海道大学大学院　地球環境科学研究院　水田元太

1. 目的

海洋の中深層循環は大気による熱塩強制や中規模擾乱の非線型作用により駆動され地形の複雑な影響を受けているが、その仕組みは十分には理解されていない。本研究では理論、観測、数値計算の各分野の研究者が集まり、最新の知見をまとめ、中深層循環に対する包括的な理解を得ることを目的とする。

2. 手法

2011 年 11 月に研究会を開き、以下の話題が提供された。各話題について十分な時間を取って発表が行われ、研究者間で活発に議論を行うことにより有効に研究が進められた。

(1) 「全球海洋-海氷モデルを用いた歴史実験に見られるウェッデル海の変動とその深層循環への影響」…… 平原 幹俊（気象研究所 海洋研究部）
(2) 「観測データから見た南極環海の深層循環」……蓮沼 啓一 （海洋総合研究所）
(3) 「再解析データにみられる親潮海域の流動：時間平均場」…… 西垣 肇（大分大学教育福祉科学部）
(4) 「風成循環の深層再循環に関する研究へ向けて」…… 水田 元太（北海道大学地球環境）
(5) 「海洋中の東西縞模様」…… 中野英之（気象研究所 海洋研究部）
(6) 「傾圧不安定を単純に表す方程式とその意味」…… 増田 章（九州大学応用力学研究所）

3. 結果と議論

話題(1)～(2)では南極深層・底層水の循環と年々変動について観測と数値モデルの立場から議論がなされた。(3)では親潮域の循環と海底地形、(4)～(5)では中規模擾乱と中深層循環の関係について考察がされ、(6)では中規模擾乱の発生要因である傾圧不安定の基本的理解について議論がなされた。

(1) 南極底層・深層水の形成に重要な影響を及ぼす Weddell ポリニヤの変動メカニズムを全球海洋海氷結合モデルによって調べた。1948－2006 年の大気強制を与えた結果 1955 年に Weddell 海中に大規模なポリニヤが形成され、それによって深層から底層の水が低温低塩化するという顕著な年々変動が見られた。この様なポリニヤが形成される必要条件として深層水が高温化し密度成層が弱まることがある。さらに 1955 年には Weddell 海の風応力カールに低気圧回りの偏差が存在し、海氷を発散させる方向に働くことがポリニヤの形成に寄与すると考えられる。実際この様な発散的な風を与えると他の年でもモデル中で大規模なポリニヤが形成されることが分かった。ポリニヤ形成による深層・底層の低温化は大西洋全域の深層の低温化をもたらす。また南極周極流の強化と太平洋の深層の高温化の原因ともなる。

(2) 南大洋の深層に存在する周極深層水の水平循環の挙動を水塊分布から調べた。周極深層水は中立密度で 28.00 から 28.12 の間の深層に塩分極大を持つ。この中立密度上の塩分は南米沖で最も高く、高塩分で特徴付けられる北大西洋深層水によって影響されていることに対応している。周極深層水の塩分極大は大西洋の経度帯では低緯度側に存在するが、南極周極流によって東へ移流されるにつれ高緯度へ移動し極向きの流れが存在して高塩分水を運んでいることを示唆する。Stommel の深層循環理論では海洋

の内部領域では深層水は赤道から極へ向かって流れることが示されているが、ここで示された周極深層水の塩分分布はStommelの理論を支持する（ただし周極深層水が東向きに輸送されことには風も影響している)。またオーストラリア東岸では高塩分の周極深層水が北向きに広がっており西岸境界流による太平洋への輸送を示している。

(3)親潮第1・第2分枝や近年の衛星海面高度計データから指摘されている北東向きのジェット（J1)など複雑な循環が存在する三陸・北海道沖の循環の水平・鉛直構造を海洋の再解析データを用いて調べた。再解析データ中では親潮分枝流やJ1に対応する流れが確認された。密度26.8から27.2シグマの表層から中層では親潮が渦位のフロントを伴いながら分岐している様子が見られた。一方、密度27.77シグマの深層では日本海溝に沿って海底が浅い方を右手に見る流れが顕著であった。この流れは水深が浅くなると共に次第に時計回りに方向を変え表層・中層では海溝を斜めに横切る。また表層・中層で親潮の分岐が起きている場所は深層に高気圧性の循環が存在する場所に対応する様に見えた。

(4) 西岸境界流の続流の深層に存在する再循環の形成メカニズムについて数値実験による考察を行った。再循環の形成についてはロスビー波の放射によって極向きの渦位輸送が生じることが重要であるという Haidvogel and Rhines (1983)の研究と、反対に渦によって赤道向きの渦位輸送が生じることが重要であるとするRhine and Young (1982)の研究がある。流入流出型の境界条件を与えた数値実験の結果、表層においてロスビー波の放射による極向きの渦位輸送は続流と内部領域の流れの互いに渦位の異なる流れの接続に寄与し、循環の維持に重要な役割を果たすことが示された。一方、深層では赤道向きの渦位輸送が存在した。再循環の渦位収支を診断的に見積もった所、平均流と渦による層厚輸送 u* の収束に伴う渦柱伸縮と平均渦度（惑星渦度と平均流の相対渦度の和）の移流が釣り合っていた。

(5) 近年、全球海洋の中深層には東向きと西向きの流れが交互に東西に細長く伸びた縞状に存在ことが指摘されている。この東西縞状構造の形成機構に関する研究のレビューと考察を行った。数値モデルによると東西縞状構造は中規模渦を解像する高解像度のモデルにのみ見られる。このことから地衡流乱流におけるRhine効果との関係が指摘されることがあるが十分な理解は得られていない。一方、衛星海面高度計のデータの解析から高気圧性と低気圧性の中規模渦の数には緯度によって偏りがあることが知られている。東西縞状構造はこれらの渦が西進しているものを時間的に平均した時に現れる統計操作上の産物であるとの説がある。しかしなぜその様な渦の符号の偏りがあるかは分かっていない。大気や惑星大気では渦位の分布が東西一様な階段状の構造をとることが知られているが、海洋の数値シミュレーションではこの様な渦位の階段構造は確認されていない。その原因は今後調べる必要がある。

(6) 海洋学、気象学の基本概念の一つである傾圧不安定を直感的に理解するために従来いくつか図解的な説明がされてきたが、例えば擾乱の安定性がなぜ水平スケールに依存するかといったことは十分説明出来ていない。そこで傾圧不安定の本質を表すなるべく簡単な方程式を導出した。二層の浅水波方程式を鉛直モードに展開すると水路中の擾乱の支配方程式を非常に単純な形で書き表すことが出来る。形が単純であることからこの方程式が不安定な解を持つこと、すなわち傾圧不安定が存在することや、不安定な擾乱のスケールは内部変形半径よりも大きいことが直ちに導かれる。不安定は境界面の傾斜によって生じ、擾乱はこの傾斜を弱めることなど傾圧不安定の基本的性質も最低限の式変形によって導かれる。

23 AO－12

水産資源量調査用グライダー型海中ビークルの開発

九州大学大学院工学研究院　山口　悟

1.　研究の目的

近年、乱獲による魚の個体数の減少や、魚種の絶滅危機などの水産食料資源問題が注目されており、「獲る漁業」から「つくり育てる漁業」への変遷を目指して、養殖漁業や人工漁礁の設置による漁場形成が実施されている。これらの試みにおいて、施設周辺の海洋環境を調査することは不可欠であり、調査には様々な方法が用いられている。一方で、近年開発が活発化しているグライダー型水中ビークルは省エネルギー性や静粛性に優れており、海洋環境の長時間の観測に適していると考えられる。そこで本研究では、グライダー型水中ビークルを水産資源量調査に用いることを考え、直進航行における縦運動の安定性と旋回運動の特性についての調査を実施し、機体の運動性能の向上を試みた。

2.　グライダー型海中ビークルの概要

水産資源量調査の対象となる海域は潮流や湧昇流などの流れが存在し、機体の運動に大きな影響を及ぼすことが想定される。また、海藻類や漁網、鋼やコンクリート製の人工魚礁が機体に接触し、運転の障害となることも考えられる。このような環境下での使用を想定して計画された、海中ビークル機体の写真を図 1 に、機体の耐圧殻内部に設置された浮力調節装置を図 2 に、機体の主要目を表 1 に示す。

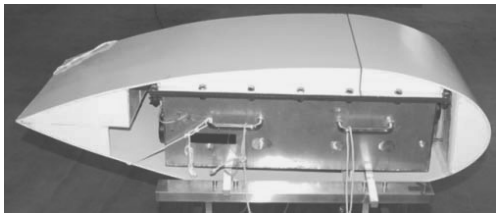


図 1　グライダー型海中ビークル機体

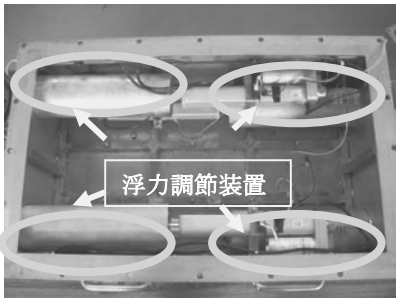


図 2　浮力調節装置

表 1　機体主要目

Length (m)	1.000
Breadth (m)	0.356
Height (m)	0.300
Weight (kg-f)	62.6

3.　直進滑空試験と旋回試験

直進滑空時の縦運動安定性及び旋回運動の特性を調査するため、直進滑空試験と旋回試験を応用力学研究所の深海機器力学実験水槽において実施した。実験では慣性センサを機体に搭載し、3 軸加速度と各軸周りの角速度を計測した。直進滑空試験の結果、図 3 に赤線で示すように、水中に投入後の機体のピッチ角は減衰振動を伴いながら一定の角度に収束して行くことが確認された。また、旋回試験の結果、機体浮力中心の横移動により機体のロール角が一定値で釣り合うと共に、機体にヨーモーメントが発生することが確認された。実験におけるヨー角の時刻歴を図 4 に示す。

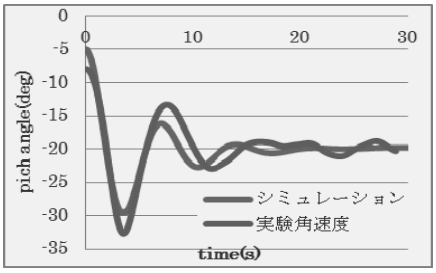


図 3 直進滑空におけるピッチ角変動

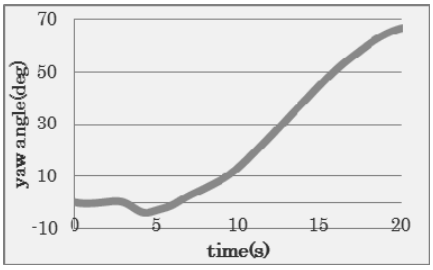


図 4 旋回時のヨー角

4. 機体運動のシミュレーション計算

実験で得られたピッチ角の時刻歴を 2 次の減衰振動系で近似し、機体の縦運動に関する流体力微係数の推定を行った。また、その他の流体力微係数は静的な流体力試験結果と推定式により算出した。得られた流体力微係数を用いた縦運動のシミュレーション計算結果を図 3 に青線で示す。また、旋回運動のシミュレーション計算を行った結果、実験と同様に正のロール角で右旋回を行うことが確認された。

従来の機体は浮力調節装置の操作による浮心位置、重心位置の変化量が小さく滑空時のピッチ角の制御幅が小さいため、潜降を基準として機体のバラストを調節した場合、浮上時においては安定した滑空状態を保つことが困難となる。この問題を解決するために、後方の 2 台の浮力調節装置に機体重量の 2.5%に当たる重錘を付加することでピッチ角制御幅を増大することを試み、その効果をシミュレーション計算により確認した。改良前後の状態を比較して、機体の縦運動のシミュレーション計算によるピッチ角の時刻歴を図 5 に示す。青線で示す従来の機体では、浮上時にピッチ角が次第に減少し滑空状態を保つことが出来ないが、改良により赤線で示すように浮上時にも安定した滑空が可能になることが確認できた。これにより、様々な調査海域において、より自由度の高い運動が可能になることが期待できる。

次に、改良機体による潜降・浮上時の旋回運動のシミュレーション計算を実施した。計算において機体は、潜降時は浮心を左舷方向に 0.68(㎜)移動させ右旋回を行う。潜降開始から 1000 秒後に浮上を開始するが、潜降時と同じく浮心を左舷方向に 0.67(㎜)移動する場合（条件①）と、これとは反対に右舷方向に 0.67(㎜)移動する場合（条件②）について計算を実施した。図 6 は条件①の場合の機体中心の軌跡、図 7 は条件②の場合の軌跡である。両条件において浮上時のロール方向が異なるが、機体は安定した滑空状態を保っていることが確認された。

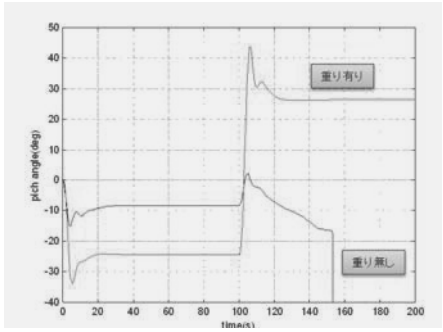


図 5 ピッチ角時刻歴

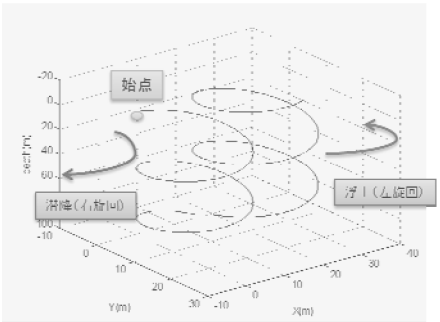


図 6 機体中心軌跡（条件①）

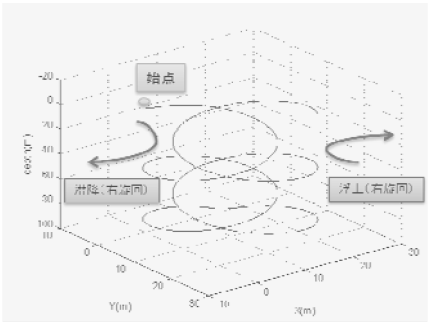


図 7 機体中心軌跡（条件②）

5. まとめ

水産資源量調査を目的としたグライダー型水中ビークルの直進滑空時の安定性を調査するために水槽試験を実施し、その滑空安定性を確認した。また、旋回運動の特性を調査するために旋回試験を行い、試験結果とシミュレーション結果を比較、検討することにより旋回運動のメカニズムを明らかにした。さらに、機体の滑空安定性の向上を目指した改良案の有効性を、シミュレーション計算により確認した。

23 AO－13

自律型無人探査機によるセンサ曳航の最適形態に関する研究

独立行政法人海洋研究開発機構　海洋工学センター
海洋技術開発部
百留　忠洋

研究目的：

自律型無人探査機の普及に伴い、探査機単体だけでなくセンサ等を曳航するような使用法が考えられている。探査機による曳航はこれまでにない新しい使用方であるため、どのような力が働いて、機体がどのような挙動をするのか解析がなされていない、そこで機体に働く流体力や曳航体、アクチュエーターが発生する流体力を試作模型による水槽試験で計測し、機体設計や最適な曳航形態を構築するためにフィードバックする。

方法：

実験に供したビークルを図１に示す。全長 2.5m、全幅 1m、空中重量 150kg である。このビークルを製作するための模型による機体形状の検討をするための実験と、実機の運動特性試験を実施した。模型による試験では、運動の安定性と方向制御性能を決めるための流体力特性を計測した。この流体力を基にシミュレータを構築し、運動性能をシミュレートして翼の形状を選択した。この結果、図１のような翼を採用した。実機試験では、静止した状態で機体の重心位置を制御することで、ピッチ運動とロール運動を制御出来ることを確認した。その１例を図２に示す。

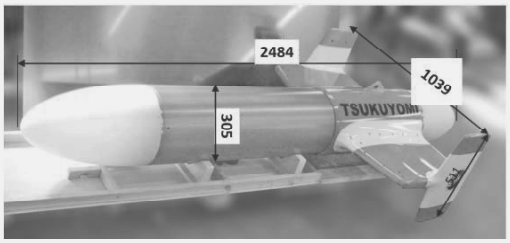


図１　ビークルの外観

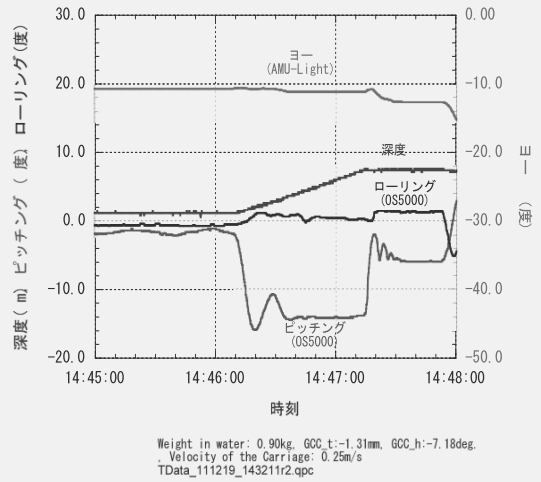


図２　水槽実験の測定データの一例

23 AO－14

対馬海峡近海の海面流速場の季節・経年変動に関する研究

名古屋大学地球水循環研究センター　森本　昭彦

１．研究の目的

対馬海峡通過後の対馬暖流の流路については、長年研究が続けられているにも関わらず未だ議論が続いている。これは、対馬暖流の流路変動が大きいこともあるが、日本海南西部では潮流の流速が対馬暖流のそれと同程度あるため、スナップショットの観測では対馬暖流の流路を決定できないためである。我々は 2010 年度の本共同研究により、人工衛星海面高度計データと漂流ブイデータから日本海南西部の平均海面流速場を計算し、それと海面高度計データから計算された海面流速場の時間変動成分を合成することで 1995 年～2010 年までの 7 日毎の海面流速場データセットを作成し対馬暖流流路の季節変化を明らかにした。今年度は、このデータセットを使い、対馬暖流流路の変動特性について解析する。

２．参加者

森本　昭彦　　（名古屋大学　地球水循環研究センター）
伊藤　雅　　（名古屋大学大学院　環境学研究科）
柳　哲雄　　(九州大学　応用力学研究所)

３．研究成果の概要

３－１．　日本海南西部の海面高度場の変動特性

人工衛星海面高度計と漂流ブイデータから計算した日本海南西部の平均海面流速場データから、解析範囲の北東端（北緯 40 度、東経 135 度）を基準として海面高度を計算し、海面高度計データと合成することで海面高度時系列データを作成した。海面高度計データの海面変動で最も卓越するのは海水の熱膨張に伴う水位変動のため、年周期の変動を取り除いた後に時間および空間に対する EOF 解析を行い日本海南西部の海面高度場の変動特性の把握を行った。

対象海域の海面高度空間平均からの偏差に対して行った EOF 解析（空間 EOF）と各グリッドでの海面高度時間平均からの偏差に対して行った EOF 解析（時間 EOF）それぞれの、第一モードを図 1，2 に示す。全変動に対するそれぞれの寄与率は 15%と 11%であった。両者を比べると詳細な空間構造や時定数の変化は異なるものの、韓国東岸に大きな負の偏差、北緯 37 度、東経 131.5 度に正の偏差、北緯 37 度、東経 134.5 度に負の偏差があり、このような空間パターンが経年的に変化しているという共通点がみられる。このことは、日本海南西部において上記のような空間パターンを伴った海面高度変化が卓越することを示している。空間分布で正負の大きな振幅を持つ場所は、海面高度の Root Mean Square (RMS)が大きい場所と一致し、過去の研究との比較から冷・暖水渦が頻繁に見られる場所であることが分かった。

３－２．　日本海南西部の渦の特徴

EOF 解析で振幅が大きな海域を西から①、②、③とし（図１）、それぞれの海域で見られる渦の寿命や移動を調べるためラグ相関解析を行った。

①の渦は平均寿命 4 ヶ月で、過去の研究で多くの報告があるウルルン暖水渦もしくは冷水渦に対応していた。②の渦は平均寿命 2 ヶ月、竹島冷水渦（Michell et al., 2005 では Dok Cold Eddy）に対応していると考えられた。③の渦は平均寿命 4 ヶ月、Kurita et al. (1999)や Watanabe et al. (2009)において渦が頻繁に発生するとされている海域であり、これらの渦の特徴を示していると考えられた。

３－３　日本海南西部の対馬暖流の変化

EOF 解析を行う前に除去した海面高度の年周期成分の空間分布をみると、時間平均海面高度場とほぼ一致していた。つまり、この海域で最も卓越するのは、対馬暖流が３つの分枝に分かれそれらの流れの強さが季節変化する現象である。一方、この平均的な成分以外の変動では本研究で示したように３つの渦構造をもつ分布が卓越する。平均場とこの EOF 解析の結果を併せて対馬暖流の流路を考えると、①の渦が冷・暖水渦になることで朝鮮半島に沿って北上する対馬暖流第三分枝（東韓暖流）の流路が大きく変化することがわかる。図１の時定数をみると、細かい変動をしながら、比較的長い時間正負の値が維持されている。したがって、第三分枝は経年的にその流路を変えていることがわかる。③の渦が冷水渦もしくは暖水渦になることで、日本列島に沿って流れていた対馬暖流が岸もしくは沖側へシフトする。これらについても経年変化することがわかる。

本研究では、日本海南西海域において３つの渦が分布する空間パターンが卓越すること、そしてそれらが対馬暖流の流路を比較的長い時間スケールをもって変えていることが示せた。しかし、なぜ３つの渦が連動するのか、また何が変化の時間スケールを決めているのかは分からない。今後は、これらの渦の生成・消滅要因に注目した研究を進めて行く予定である。

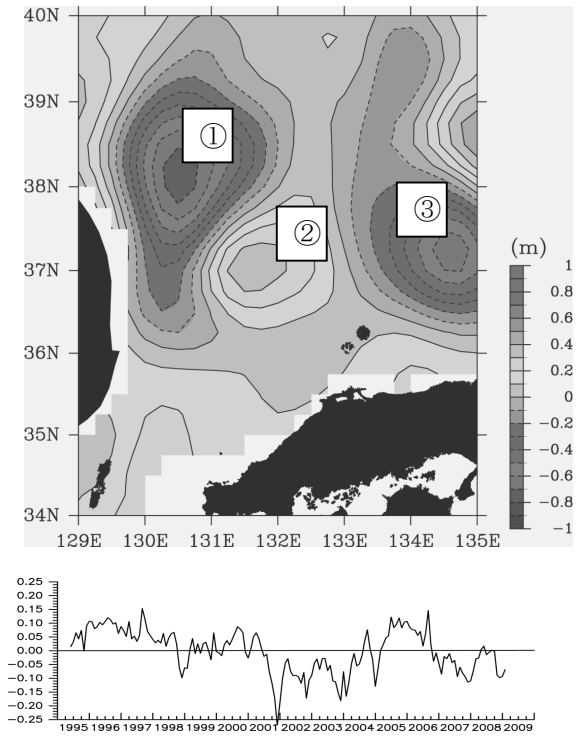


図 1. 空間 EOF の空間分布と時定数

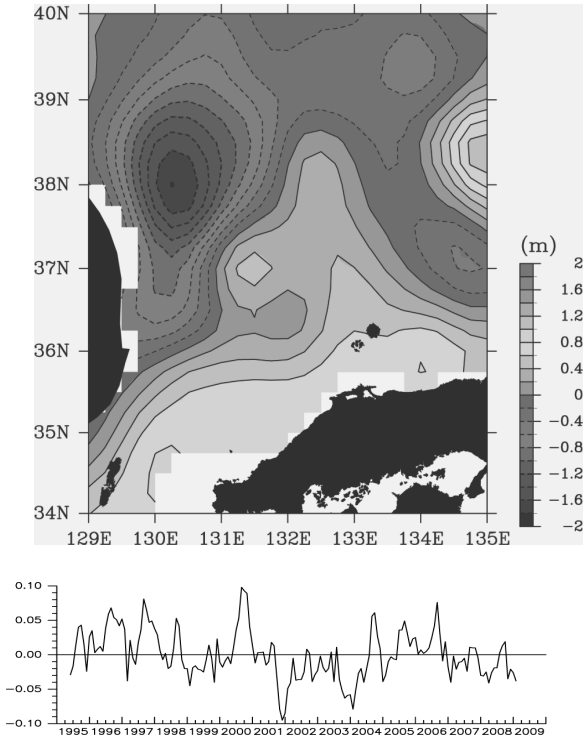


図 2. 時間 EOF の空間分布と時定数

流体工学的手法による絶滅遊泳性爬虫類の生体復元

東北大学 学術資源研究公開センター　　西 弘嗣

背景および目的

長頸竜類は，中期三畳紀から後期白亜紀にかけて生息していた爬虫類の一分類群で，その体は細長い胴体と鰭状の四肢が特徴である．長頸竜類が水棲動物であったことに疑いはなく，四肢を水中翼として用い，羽ばたいたり水中滑空したりしたと考えられる．長頸竜類の各種の体形の違いは主に頸と頭が占める長さで特徴付けられ，さらに頸が短いものほど頭が長いという傾向がある．

本研究では，長頸竜類の体形と安定性（運動性）の対応を流体工学的な手法を用いて定量することを目的とし，それに基づきこれら動物の行動の傾向や生態学的地位を推論してきた．過年度までの研究では，頸が長いタイプ（以下 L 型）についての性能評価を行ってきた．本年度の研究では頸が短いタイプ（以下 S 型）についての評価を行い，これらを比較した．

手法

長頸竜の体形を模したソリッドモデルを曳航し，それに作用する力とモーメントを測定した．模型の速度（Fig. 1）や胴体に対する翼の取り付け角を変更し，測定された力とモーメントの 6 成分から，流体力係数を求めた．また，圧力中心と重心の相対位置から静安定性を評価した．

曳航模型は，長頸竜を水中グライダーとして復元したもので，細長い回転体の胴体と，その下側に取り付けられた前後 2 組のテーパー翼から構成される．いずれの翼も対称翼で，1/4 翼弦線を軸に取り付け角を変更できるようにした．曳航体の形状は，*Brachauchenius lucasi* の骨格の寸法に基づき，縮尺を 1/5 として設計した．先行研究で用いた L 型の模型とは，頸部および翼以外が同じ寸法（Fig. 2）となる．

模型は完全に水没させ，胴体直径の 3 倍の深さを曳航した．曳航速度は現生脊椎動物の遊泳速度を参考に 0.5～1.0 m/s とした．胴体の長さを基準とした Froude 数は，0.148～0.296 である．

結果

翼を機体軸と平行に保ったままトリム角（Fig. 1）のみを与えて曳航する試験を行った. 失速角は機首上げ 9 度および機首下げ 9 度であり, その間で無次元化揚力はトリム角に比例した. 測定された縦方向の力とモーメントから圧力中心を求めたところ，浮心（体積中心）の前方に位置した（Fig. 2）．

同様に，斜航角（Fig. 1）のみを与えて曳航する試験を行った. 速度方向に対し頭を右に向けるとき右向きの揚力が生じ，圧力中心は浮心の前方に位置した（Fig. 2）．同時に，右翼を上げる向きのロールモーメントも生じた．

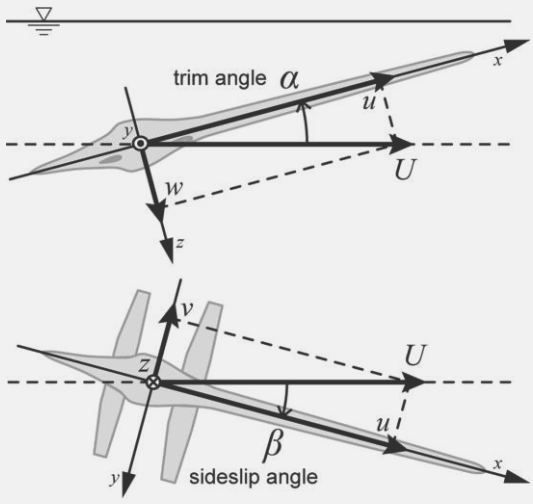


Fig. 1 Definition of trim angle and sideslip angle

考察

本実験で用いた模型は実際の長頸竜の臓器の配置や密度まで再現したものではないが, その重心と浮心の位置はほぼ一致していたと予想される. この仮定のもとで, S 型の模型は縦方向および横方向の運動それぞれに関し不安定である. 過年度の研究によれば, L 型の模型は縦方向に関し静安定, 横方向に関し不安定であり（Fig. 2）, その運動性に明らかな違いが認められる.

巨大な頭部や頸部は重心位置を決める重要な因子であり, それによって重心と翼との相対位置が異なる. いずれの模型においても後翼は重心より後方に位置して安定化に寄与するが, L 型では前翼は重心の前方にあって安定化に, S 型では後方にあって不安定化に寄与する. 2 つの模型では前後の翼面積が異なり, L 型では前翼の方が大きいのに対し S 型では後翼の方が大きく, 従来からこの翼面積の違いも安定性に影響すると考えられてきた. 本実験の結果から運動性を決める要因としては頸の長さの影響の方が強いことが分かった.

各タイプの長頸竜の運動性が互いに異なっていたことは, それぞれが異なる生態学的地位に収まっていたことを示唆する. 運動性の高い S 型が, 機敏に動きまわる獲物を追うことに長けていたことは容易に想像できる. 一方, 安定性の高い L 型の長頸竜は, 比較的長い距離を一定して移動する行動が多かったことが考えられる. たとえば, L 型の長頸竜化石には底生動物を食べたという直接的および間接的な痕跡が認められる. このことから, L 型の長頸竜には, 現生の脊椎動物と同様に海面と海底との間を滑空して往復する行動が予想され, 彼らの長い首はそれを効率良く実現したものとして解釈することができる.

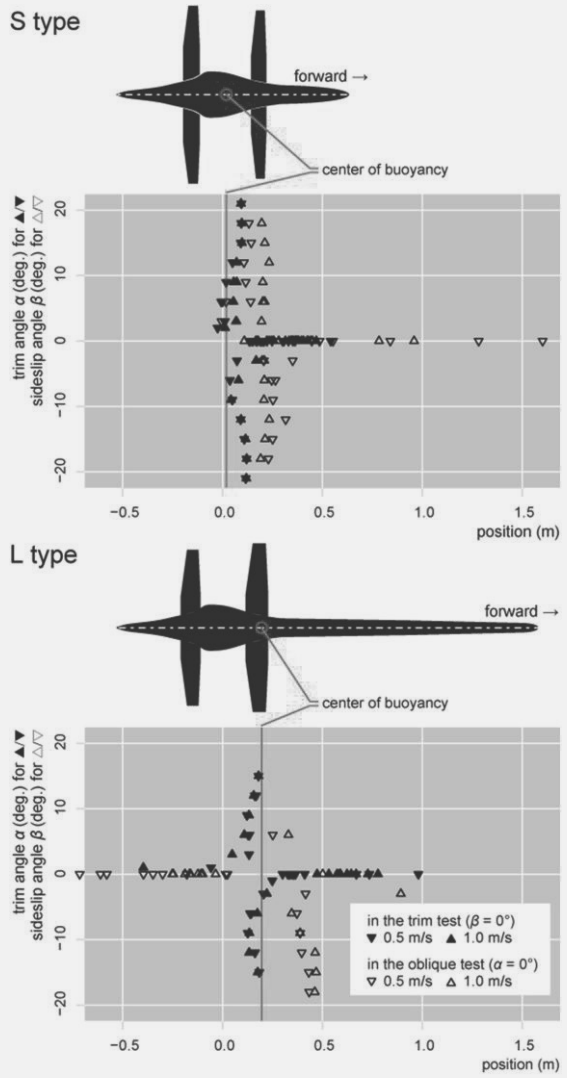


Fig. 2 Position of the center of pressure against the trim angle and the sideslip angle.

研究組織

西 弘嗣　（研究代表者，東北大学 学術資源研究公開センター）
中村 昌彦　（所内世話人，九州大学 応用力学研究所）
望月 直　（研究協力者，東北大学大学院 理学研究科）

多用途型コンパクト水中ロボットに関する研究

佐世保工業高等専門学校電気電子工学科　長嶋　豊

１．目　的

近年の地球温暖化の影響は陸上のみならず、海中でも顕著に現れており、環境悪化が一段と進んでいる。閉鎖性海域では夏期になると赤潮や青潮が多発して底生生物に深刻な被害が発生している。一方、地球科学や地下水文学の分野では、水中洞窟の形状や地下水系が学術対象として重要である。洞窟の内壁形状や内部の情報を得るには、人間が自ら赴かなければならないが、自然光や空気、緊急避難場所がない。その解決策として、専用の小型水中ロボットによる探査が考えられるが、視界低下は深刻であり、スラスタによる水流の影響は大きく、複数スラスタを搭載した従来型水中ロボットは使用できない。本研究では、海洋、河川のみならず水中洞窟のような特殊環境に対応可能な小型、コンパクトで多用途向き水中ロボットの開発をめざした。具体的には以下の内容について研究に取組んだ。

(1) チルト機構の改善による潜航・浮上速度の改善と航行評価実験を行う。

(2) 水中スラスタのカップリング部磁界による搭載電子機器への影響防止を検討する。

(3) ソナーハードウェアシステムを開発する。

(4) ロボットの航行状況を高精度でグラフィック表示できるコントローラソフトウェアの改善を行う。

(5) コンパス等を用いた自動制御プログラムの試作

以上の内容についてロボットシステムの開発・改善後、本校大型無響水槽、貴学深海機器力学実験水槽、大村湾、津水湾で性能評価実験を行ったので報告する。

２．多用途型水中ロボットシステム構成

海洋環境、水産資源、水中洞窟を対象としたため、筐体は透明アクリル製で設計・製作した。更に、海底付近の航行時には底質を巻上げてしまうと視界不良になり調査できなくなるので、本ロボットでは 2 個の推進用水平スラスタとチルト機構を組み合わせることで 3 次元の航行ができるように工夫した。その外観写真を図１に示す。カメラは前、後、下の３箇所に取付け、電子コンパス、深度センサ、今年度新規に開発した４チャンネルソナーを搭載した。本ロボットは基本的には遠隔操縦型（ROV）として図２のようなシステム構成とした。ROV 制御系、ROV 航行データ系及び映像系の 3 系統同軸ケーブルを用いて信号伝送を行った。操縦者は映像とセンサデータを見ながらコントロールできるように、制御基板を設計・製作した。それに伴ってパソコンを用いた多機能コントローラを改善し、スラスタの PWM 制御等きめの細かい操縦と各種情報をグラフィカルに表示できるように工夫し、使い勝手を向上させた。

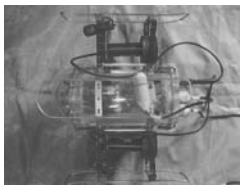


図１　外観写真

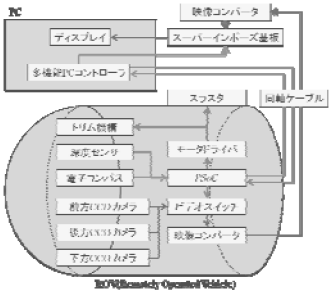


図２　システム構成図

３．実験結果及び考察

(1)チルト機構の改善と性能評価

潜航・浮上用スラスタを搭載する代わりに、チルト機構が必要であるが、昨年開発したステッピングモータ直結式ボールネジと錘の構成方式では、機能的には十分であったが、リードが２ｍｍと細かい仕様のものを使用していたために、潜航・浮上に時間がかかりすぎていた。それを改善するために、今年度は 5mm リードの製品を使用して大幅な速度向上が実現した。

(2) 水中スラスタカップリング部の磁界影響防止

昨年度使用したツカサ電工製水中スラスタは、内部モータと外部プロペラをつなぐ磁気カップリング部が強磁界のために電子コンパス等の搭載電子機器に悪影響を与えていた。そこで、今年度は新たに Seabotex 製の 110W スラスタに交換した。磁気の影響もなく、高出力なために、約 1.2 ノットの速度向上が実現した。

(3) 4 チャンネルソナーハードウェアの開発

安全航行、周囲の障害物確認及び水中洞窟内の概形調査のため今年度は新たに 4ch ソナーを導入した。図３にハードウェア写真と、図４に回路ブロックを示す。障害物までの測距ソフトウェアを作成して深海機器力

学実験水槽での測距実験結果を図５に示す。実測値にほぼ等しい結果が得られたが、測定距離が少し短い傾向があるので細かい調整を今後行う予定である。

図３　４チャンネルソナー取付図と送受波器

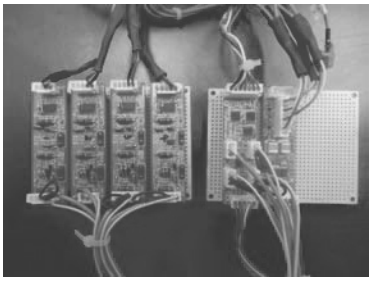


図４　４チャンネルソナー回路ブロック

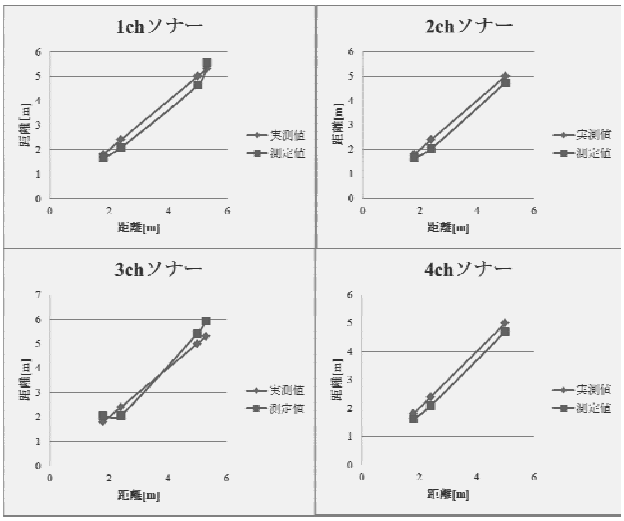


図５　４チャンネル測距結果

(4) 水中ロボット航行軌跡の高精度グラフィック表示

昨年度開発したパソコンを用いた多機能コントローラについて、操縦者の緊張を少しでも和らげることをめざして GUI 画面と機能を改善した。調査対象の全体的な表示をグラフィック的に行うと同時に、リアルタイムで各種データの確認ができる画面配置とした。図６に改善後の多機能コントローラ画面を示す。

(5) コンパス等を用いた自動制御プログラムの試作

広範囲の浅海域調査を行う場合、運用者の長時間ロボット操縦の負担軽減を図る必要がある。コンパスを用いた比例制御(P)実験を試みた。初期方位を 50 度、目標方位を 180 度とし、比例ゲイン Kp を１～３まで変化させた場合の応答変化を図７に示す。スラスタの PWM 駆動による制御量の飽和が影響していたので、今後改善し PID 制御を検討したい。

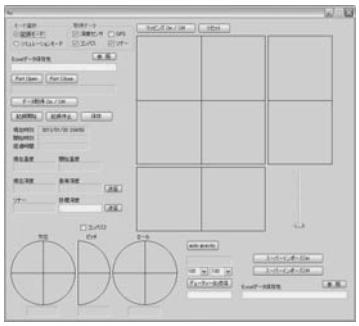


図６　多機能コントローラ画面

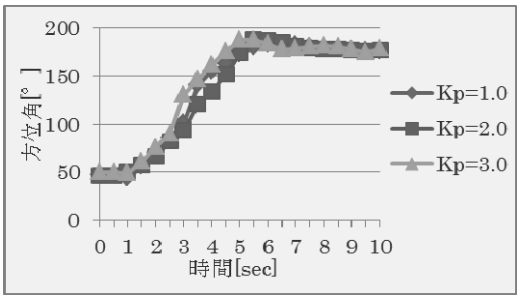


図７　コンパスによる方位自動制御結果

４．結　論

本年度はスラスタや多機能コントローラの改善、新たに 4 チャンネルソナーのハードウェアを実現した。海洋のみならず、水中洞窟など多用途に適用可能な水中ロボットの開発を進めることができた。今後の課題のとして、４チャンネルソナーを活用した高精度測距、形状計測システムの開発、PID 制御、無線操縦による負担軽減策の検討等が挙げられる。

最後に，本研究を推進するにあたり、九州大学応用力学研究所中村昌彦准教授には有益なご助言やご指導を頂きました、更に、水槽実験では稲田勝技術職員にたいへんお世話になりました深く感謝いたします。

５．研究組織

・研究代表者：長嶋豊, 佐世保高専電気電子工学科特任教授
・研究協力者：下尾浩正, 同校電気電子工学科助教
・同上：山口拓朗, 佐世保高専専攻科２年
・同上：柴田裕貴, 佐世保高専電気電子工学科５年
・同上：三宅飛翔, 佐世保高専電気電子工学科５年
・所内世話人：中村昌彦, 九州大学応力研准教授

23 AO－17

フェリーニューカメリアを利用した対馬海峡のクロロフィル変動に関する研究

No.3

名古屋大学地球水循環研究センター　石坂丞二

目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ海峡であり、最近東シナ海の環境変化に伴って、赤潮やエチゼンクラゲなどの問題がすでに起こっており、また長江に三峡ダムが建設されるなど、今後の環境変化も予想される。九州大学応用力学研究所では、博多と釜山間を運航するフェリーニューカメリアで流速、水温・塩分、クロロフィル蛍光などのモニタリングを行なっており、すでに数年分のデータが蓄積されている。この中でもクロロフィル蛍光は、生物海洋学的なデータであり、東シナ海の環境変化の指標になる可能性がある。そこで、本研究では、フェリーニューカメリアで取得されたクロロフィル蛍光データを中心として、その変動要因について明らかにする。

方法

前年度まではクロロフィル蛍光データのみを解析対象としていたが、今年度は水温と塩分のデータの解析にも取り組む。最新の計測データの補正作業が遅れているため、解析期間は、 2005 年から 2008 年までの 4 年間とする。ただし、塩分データについては生物活動等の影響により、バイアス誤差が生じているため、検定値をもとに、重回帰分析により補正したデータを用いる。

本解析では、観測ラインを 46 区間に分け（水平解像度 3.7km）、全期間にわたる平均を求めて、どの位置、どの時間に大きく変動しているかを解析する。また、スペクトル解析を行い、周波数依存性を調査する。

最後に、対馬海峡表層塩分の低下要因を明らかにするべく、東アジア域における月平均降水量(JRA25)と対馬海峡両水道における塩分変化の相関関係を調査した。

結果・考察

まず、2005 年から 2008 年にわたる夏季と冬季の平均水温と ADCP で計測された流速の平均値を比較した（図１）。西水道において、夏季は、水温のピークが流速のピークとほぼ一致し、対馬暖流に伴う移流の効果が強いと考えられる。一方、冬季では、流速のピークが水平温度勾配の大きい所に位置する傾向があり、地衡流平衡の関係を示唆する。一方、東水道では、年間を通して地衡流平衡が強い傾向にあった。

また、スペクトル解析を行った結果、どの地点においても年周期変化が卓越し、経年変化や季節変化は相対的に小さかった（図２）。 10 日以内の短周期変化をみてみると、東水道よりも西水道の方が強い変動をしていた。韓国沿岸（北緯 35 度以北）での対馬暖流の短周期変動の影響だと考えられる。

4 年間平均した塩分の経月変化においては、どの月も韓国沿岸で塩分が低下しており、特に秋季（ 9 月から 11 月）は著しい塩分勾配が認められた。これらは Senjyu et al. (2006)が示した、東シナ海からの低塩分水、特に長江に代表される陸水の影響が西水道に及びやすいという結果と整合的である。また、 2 月から 4 月は 34.6 という高塩分で、九州西方の暖流に伴う移流効果を示唆している。

水温と同様に、パワースペクトルを調べた所、年周期変化、経年変化、季節内変化の順に変動が卓越していたが、これらはいずれも博多湾側よりも韓国沿岸の方が強い結果となった（図３）。これは塩分変化が水温変化に比べて、正弦的な変化をしていないために生じた、いわばみかけの

変動だと考えられる。

最後に、東アジア域月平均降水量と対馬海峡西水道における塩分変化とのラグ相関解析の結果、東シナ海域の降水が、およそ 1 ヵ月で対馬海峡の塩分低下をもたらし（図４）、2 ヵ月ラグの相関は弱かった。長江流量だけでなく、海上降水量も、対馬海峡表層の塩分変化に影響を与えていることが示唆される。

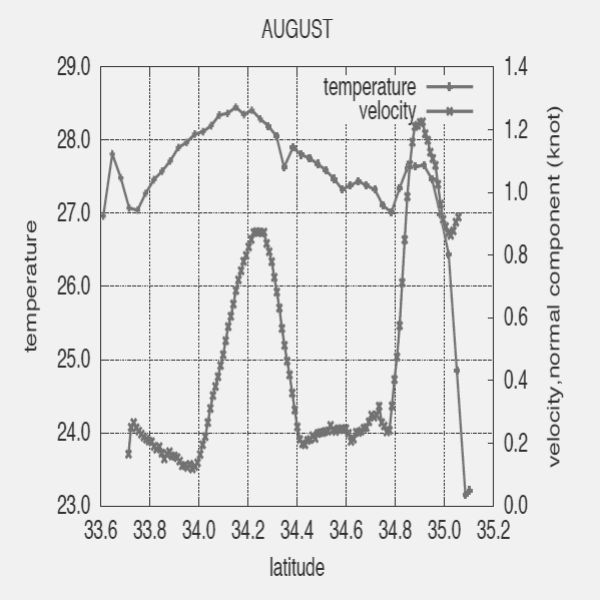


図１．８月の平均水温及び流速の比較図．横軸は緯度，縦軸（左）は水温，縦軸（右）は流速（観測ラインに直交する成分）を表す．

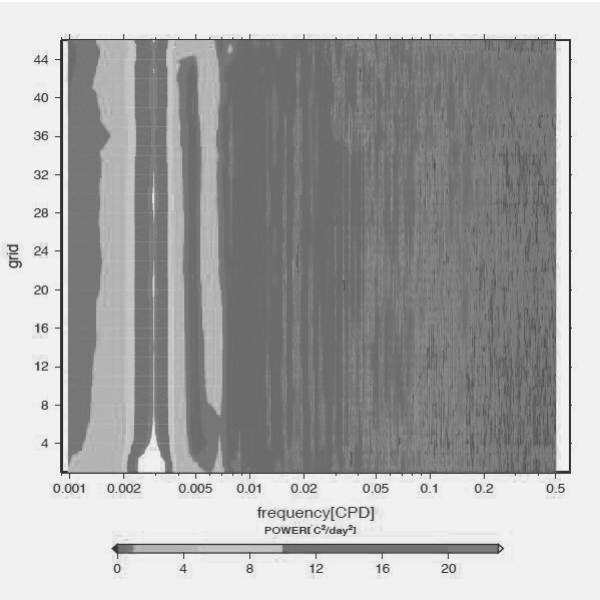


図２．水温のパワースペクトル（分散保存型）．横軸は周波数 [CPD]，縦軸は南北グリッド，カラースケール（対数形式）はパワー[$℃^2day^{-2}$]を表す．

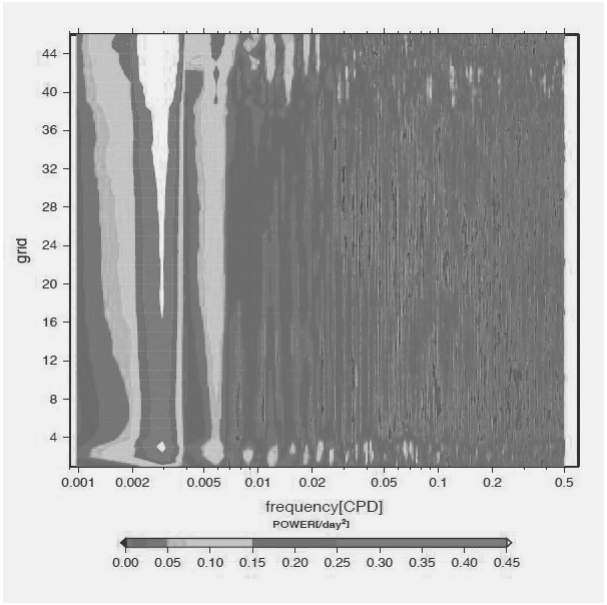


図３．塩分のパワースペクトル（分散保存型）.

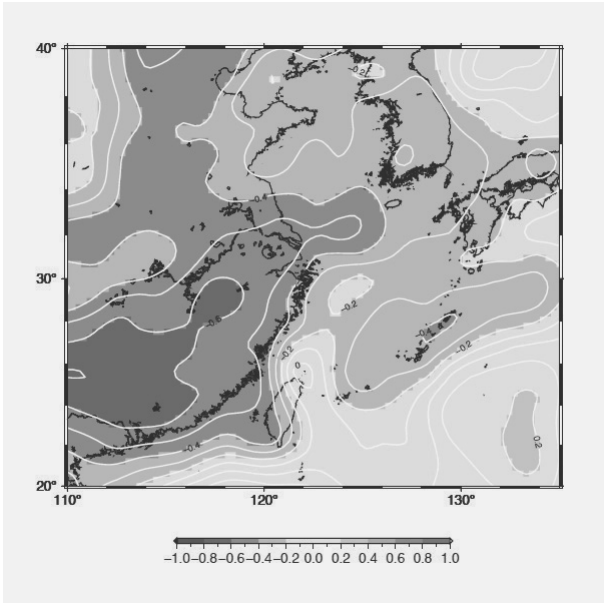


図４．東アジア域における月平均降水量と対馬海峡西水道の塩分変化の １ヵ月ラグ

23 AO－18

化学トレーサーを用いた日本海水塊構造と深層循環

富山大学大学院理工学研究科　張 勁

目 的

世界の海洋における動態や循環のメカニズム，大気と海洋の相互作用を解明するためには，世界の海洋大循環と同様の動態を持つ日本海が格好のフィールドである。我々は，日本海における水塊構造解明や，深層海洋循環の駆動力と考えられている沈み込み水について研究を行ってきた。特に，溶存酸素・希土類元素などの濃度を用い日本海の広域においてマッピングを行い，沈み込み水量の推定を行った。一方，希土類元素濃度等の複合型化学トレーサーは水塊を特徴づける有用性が高く，敏感に水塊区分ができる反面，短時間・広範囲調査による議論への展開には不向きであり，時空間的変化を捉える観測にも応用が難しい。

本研究課題の遂行には，物理データとリンクさせて解析する必要性から，日本海の海洋物理構造に関する研究を精力的に行い，豊富な経験をもつ九州大学応用力学研究所との共同研究を実施した。

研究方法の詳細

1.日本海の海水試料採取とその化学分析

a) 日本海において海水試料の採取を行い，塩分・栄養塩等ルーチン分析を行う。

b) 酸素同位体比及び溶存態希土類元素の濃度を測定する

2.日本海における詳細な水塊解析とその変動の解明

a) 化学分析データから，日本海の水塊構造と表層起源水の混合状況を把握し，移流水の流入経路も考察する

b) 化学分析データに，流速計から得られたデータと組み合わせ，より詳細な水塊解析とその変動解明を行う。

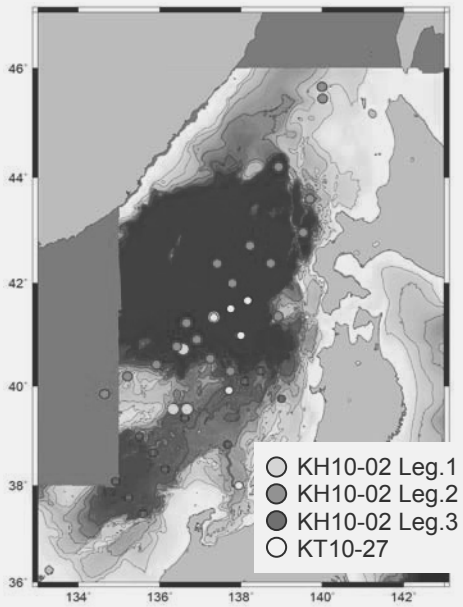


図１．希土類用海水試料の採取点

結果及び考察

本年度は、白鳳丸 KH-10-2 次航海、淡青丸 KT-10-27 次と KT-11-19 次航海の観測データに合わせ、溶存酸素・溶存希土類元素の濃度，日本海東部海域の深層循環および水塊構造の詳細解析を試みた。

KH-10-2 の CTDO 観測(64 測点)より、東部日本海全域における DO のマッピングを行った。海水は、等密度面に沿って移流しやすいことから、sigma-t = 27.20 以上の等密度面上での DO 分布図を作成した。その結果、日本海盆では DO 濃度が高く(最大約 321μM)、大和海盆で小さくなる(最小約 200μM)

ことがわかった。これより、大和海盆深層のDOは、日本海盆から供給されていると考えられた。日本海盆東部において、観測点 CR55とSt.Aの水深200〜1000mでDO極大層を確認した。両観測点の希土類元素濃度をオーストラリア平均頁岩(PAAS)で規格化したパターン(図2)が類似していることから、同一起源の海水と考えられた。軽希土類元素の1つである Ce は、海水中の粒子へ吸着、除去されることにより、本来海水に含まれる濃度よりも小さくなる負異常(*Ce:Anomaly)が生じる。この*Ceから、海水中の粒子の影響評価することができる。*Ce は、一般的に表層水で最も小さく、水深が深くなるにつれて(滞留時間が長い)大きくなる。DO 極大層の海水は、*Ce が小さく、表層水と類似した値であることから、日本海北部海域で沈み込んだ表層水が起源であると示唆される。深層水形成域付近における表層水、および比較対象海水近傍の酸素極大を示さない海域における同密度の海水の希土類元素パターンを用いて、各水塊の表層水起源割合を算出した。その結果、CR55、St.A の起源は、それぞれ最大46%、41%が表層水起源であることがわかった。同様に、他の観測点における水塊の表層水起源割合を算出した。また、St.A の観測はCR55の約5カ月後に行われた。両水塊が同一起源をもつことから、CR55 から St.A へ日本海盆外縁に沿って1.6〜1.8cm/sの速さで移動したと推算できる。表層水起源割合が大きい観測点が流入経路上にあると考え、DO 水平分布図へ起源割合を記載し、日本海深層海水循環の移流経路図を作成した(図3)。

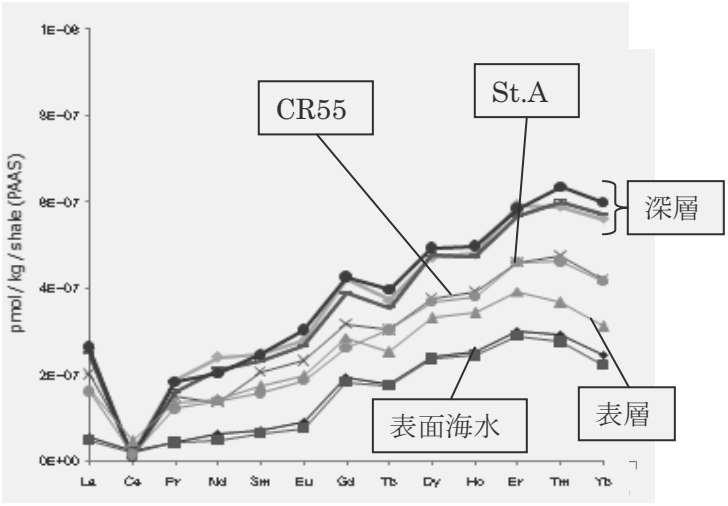


図2 .頁岩で規格した日本海試料海水の希土類パターン

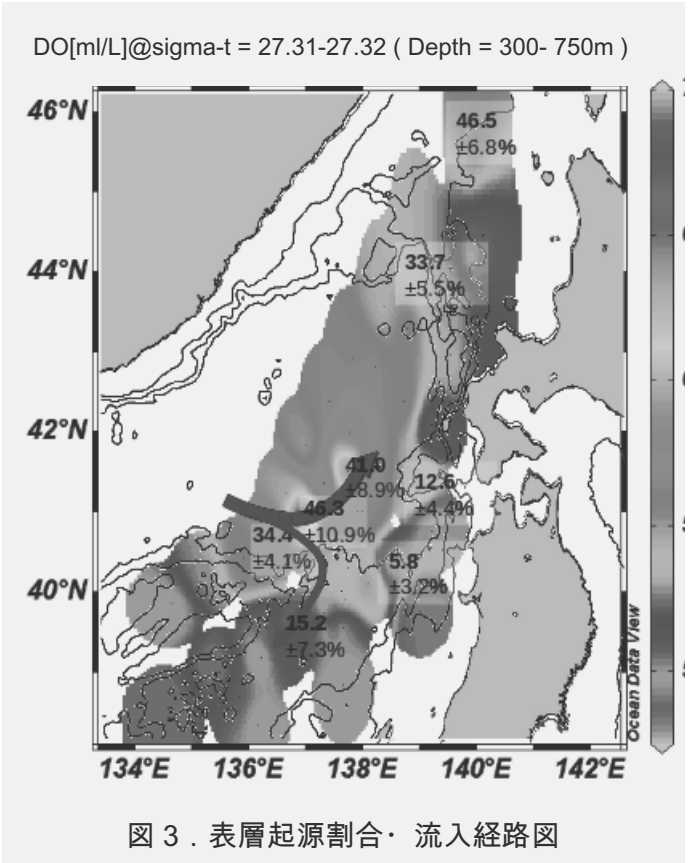


図3 . 表層起源割合・ 流入経路図

成果報告

佐々木俊次, 張勁, 千手智晴, 松野健, 溶存酸素・希土類元素分布からみる日本海海水循環と水塊構造の詳細, 2011年秋季日本海洋学会, 9月, 福岡

佐々木俊次, 張勁, 千手智晴, 松野健, 溶存酸素・希土類元素分布からみる日本海海水循環と水塊構造の詳細, 2012年 GEOTRACES シンポジウム, 3月, 千葉

23 AO－19

地形上を伝播する非線形内部波の平面 2 次元数値解析による研究

研究代表者　鹿児島大学大学院理工学研究科　柿沼太郎

研究の目的

辻・及川らは，2 層流体における弱非線形・弱分散モデルを用いて孤立波の 2 次元相互作用の数値解析を行ない，初期の孤立波の振幅の 4 倍を超えるような新しい波の生成が起こり得ることを示した．しかしながら，波の非線形性・分散性が共に強い内部波に対してもそのような結果が得られるかどうか不明であり，更に，底面地形が空間的に変化している場合の内部波の非線形挙動に関しては，未解明な点が多い．そこで，柿沼が導出した変分法による方程式系に基づく数値モデルを適用し，内部波の非線形性・分散性を十分に考慮して，底面地形の影響を受けながら伝播する表面波及び内部波の 1 次元，または，2 次元的挙動を数値解析的に研究する．強非線形数値モデルのベースを開発してきた柿沼・中山グループと，辻・及川グループとが協力してこの問題の解明にあたろうとするのが，本共同研究の目的である．

過去の共同研究において，まず，平成 19 年度に，計算手法の検討及び 1 次元波動を対象とした数値モデルの開発を行なった．次に，平成 20 年度に，平面 2 次元問題を対象とした数値モデルを開発した．そして，平成 21～22 年度において，孤立波解を初期条件として数値モデルに導入し，1 次元場における，潜堤や斜面上を伝播する内部波の数値解析を行なった．本年度は，平面 2 次元場を対象とし，地形の起伏や浮体の存在といった様々な条件における表面波及び内部波の 1 次元的，または，2 次元的挙動に関して研究する．

研究の方法

具体的には，reef や bump 等を含む地形上を進行する表面波及び内部波や，平面 2 次元場で相互干渉する内部波等を対象とし，次の各事項を目的として研究を進める．

(1) 初期値に解析解を用いることができない有限振幅の場合に対して，柿沼の方法に沿った形に及川が書き直した孤立波の 3 次理論解を 2 次元波動場で与えられるようにする．

(2) 柿沼の方法では，鉛直分布関数を適切に選択する必要があるが，各地形特性に応じて精度よく効率的に計算を進められるような分布関数を見出す．

(3) 各種底面地形と，表面波・内部波の挙動との関係について，数値解析を通して調べる．その際に，表面波・内部波の波形と流速の変化を追跡し，波の非線形性及び分散性に依存する伝播特性を明らかにする．また，複数の内部波の交差に関して，数値実験を行なう．

(4) 条件によっては，完全な Euler 方程式の代わりに，高次の非線形項を取り入れた簡単化した方程式を用いて議論できる可能性がある．この理論的アプローチも試みる．

これらの各段階において，数値解析や理論式に関する仕事を分担し，計画の遂行にあたる．全メンバが直接会う機会を持ち，議論を行なう．

主要な成果

本研究の主要な結論は，次の通りである．

(1) 平面 2 次元場を対象とした数値解析において，差分格子と平行でない鏡面壁面を扱う必要がある場合，完全反射の壁面境界で法線方向流束をゼロとする必要がある．本数値モデルにおいて，これを実現する境界条件の与え方を提案した．

(2) 平面 2 次元場を対象とし，3 次オーダの内部孤立波解を初期条件として与え，2 方向内部ソリトン波の干渉に関して数値解析を行なった．その結果，平面 2 次元場における内部ソリトン波の干渉に伴う stem の発生を確認し，KP 理論で示されるような増幅率 2 以上の stem を再現した．

(3) 薄板状浮体構造物と 1 層，または，2 層の流体との相互干渉問題に対して本数値モデルを適用し，速度ポテンシャルの展開項数を 2 以上とすることによって，既存の実験値を高い精度で再現できることを確認した．また，薄板状浮体構造物上に飛行機が着陸するときのような点荷重の移動に伴い生成される表面波及び内部波の特性を調べ，点荷重の移動速度が表面モード及び内部モードの波速と近い値であるとき，それぞれのモードの表面波や内部波が励起されることを示した．

(4) 海底地形の変化に伴う津波の生成問題に対して本数値モデルを適用し，底面隆起の速度及び加速度が比較的大きい場合，本モデルにより，tail に発生する短周期波を含む津波波形が正確にシミュレートできることを示した．また，遠地津波の波形に関して，本モデルの結果と，非線形浅水方程式系を基礎方程式とする数値モデルの結果とを比較し，後者が津波高さを過大に評価する等，適用されることの多い後者のモデルを使用する際の留意点を示した．更に，海洋の密度場は，津波の伝播に殆ど影響を与えないことがわかった．

研究成果報告

柿沼太郎・山下 啓・帖佐繁明・藤間功司・中山恵介, 津波の生成や伝播に対する流速分布及び密度成層の影響, 土木学会論文集 B3（海洋開発）, Vol. 67, 2011.

中山恵介・柿沼太郎・辻 英一・及川正行, ソリトン共鳴により発生する大振幅ソリトンの解析, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol. 67, No. 2, pp.6-10, 2011.

山下 啓・柿沼太郎・中山恵介, 薄板状浮体構造物上を移動する荷重により生成される表面波及び内部波の数値解析, 土木学会論文集 B3（海洋開発）, Vol. 67, 2011.

Kakinuma, T., Nakamura, K., Yamashita, K., and Nakayama, K., Influence of velocity distribution and density stratification on generation or propagation of tsunamis, Proc. 6th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, pp.1608-1615, 2011.

Kakinuma, T., Yamashita, K., and Nakayama, K., Interaction of surface and internal waves with very large floating structures, Proc. Int. Conf. Coastal Structures, 2011.

Nakayama, K., Kakinuma, T., Tsuji, H., and Oikawa, M., Large amplitude solitary waves due to solitary resonance, Proc. 6th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, pp.1770-1777, 2011.

Yamashita, K., Kakinuma, T., and Nakayama, K., Numerical analyses on propagation of nonlinear internal waves, Proc. Int. Conf. on Coastal Eng., No. 32, waves. 24, pp.1-15, 2011.

組　　織

研究代表者　柿沼太郎（鹿児島大学大学院理工学研究科　生命環境科学専攻）
研究協力者　中山恵介（北見工業大学工学部　社会環境工学科）
研究協力者　及川正行（福岡工業大学工学部　知能機械工学科）
所内世話人　辻　英一（九州大学応用力学研究所　地球環境力学部門）

里海創生のための沿岸海域の環境保全

広島大学大学院生物圏科学研究科　橋本俊也

１．目的

瀬戸内海をはじめとする沿岸海域は豊富な水産資源に恵まれた海域であり，この水産資源の持続的生産を実現することは重要な課題である．水産資源の持続的生産のためには，水産生物の生育環境とともに植物プランクトンの光合成からはじまる低次生産構造を定量的に把握することが重用である．さらに，柳哲雄教授が提唱した「里海」の重要な構成体として藻場・干潟を含めた沿岸海域は，物質循環機構と生物生産という役割のみならず，市民の憩いや環境学習などの役割をもっている．このような「里海」としての沿岸海域の環境保全と再生の重要性を明らかにするため，関係研究者のこれまでの研究成果を発表してもらい，活発な討論を行うことを目的とした．

２．研究集会の概要

日時：２０１１年１２月６日（火）１３：１０～１２月７日（水）１１：２０
場所：九州大学応用力学研究所西棟６階　多目的研究交流室　Ｗ６０１
発表者：山下栄次（岡山理科大学技術研）
藤井直紀（愛媛大 CMES）
郭　新宇（愛媛大 CMES）
鬼塚　剛（中央水研）
谷本照己（産業総合研究所）
児玉真史（中央水研）
一見和彦（香川大学農学部）
山口一岩（香川大学農学部）
香山美歩（香川大学農学部）
深尾剛志（香川大学農学部）
小森田智大（熊本県立大学環境共生学部）
吉江直樹（愛媛大 CMES）
小野　純（愛媛大 CMES）
山田真知子（福岡女子大）
樽谷賢治（瀬戸内水研）

発表プログラムを資料１に掲載した．

３．研究成果

発表会の様子（写真）を資料２に，要旨の一部を資料３に掲載した．研究集会では，関係者を含めて約４０名の参加があり，今後の沿岸海域の低次生産をめぐる物質循環と環境保全についての問題点や課題について活発な議論がなされた．

資料　1．研究集会プログラム

日時：２０１１年１２月　６日（火）１３：１０～２０１１年１２月　７日（水）１１：２０
場所：九州大学応用力学研究所西棟６階　多目的研究交流室　Ｗ６０１

第1日　２０１１年１２月　６日（火）

1. 河口干潟域に生息する高増殖珪藻　13:15-13:35
   一見和彦（香川大学瀬戸内圏研究センター）
2. 近年の瀬戸内海における底泥からの栄養塩溶出　13:35-13:55
   多田邦尚・香山未歩・山口一岩（香川大農）・一見和彦（香川大学瀬戸内圏研究センター）
3. 沿岸域物質循環回復のための里海創生実験(2)　13:55-14:15
   谷本照己（産業技術総合研究所）
4. 岡山県牛窓におけるCO_2の測定 -1993年～2007年-　14:15-14:35
   山下栄次・江國真幸・笘野倫弘・渡辺真士（岡山理科大学技術科学研究所）
5. Downstream nutrient transport by the Kuroshio in the East China Sea and its temporal variations　14:35-14:55
   Xinyu Guo, Xiao-Hua Zhu, and Qing-Song Wu
6. 内湾の富栄養化・貧栄養化と漁業生産の関係を考える　15:05-15:25
   児玉真史（中央水研）
7. 北九州市洞海湾における水質の長期変動と付着動物組成の変化　15:25-15:45
   梶原葉子・寺師朗子・佐々木恵子（北九州市・環科研）・宮崎喜子・桑野知美・山田真知子（福女大・人間環境）
8. 播磨灘における海水の光透過特性　15:45-16:05
   山口一岩（香川大農）
9. 瀬戸内海西部におけるミズクラゲ発生予測の試み～宇和海水温情報システムから　16:05-16:25
   藤井直紀[1]・吉江直樹[2]・郭　新宇[2]・小森田智大[3]・武岡英隆[2]
   (1 佐賀大・低沿セ, 2 愛媛大CMES, 3 熊本県立大・環境共生)
10. 水深可変型養殖生産システムの研究開発　16:25-16:45
    深尾剛志（香川大・農）・小泉喜嗣（愛媛県水産課）・多田邦尚（香川大・農）

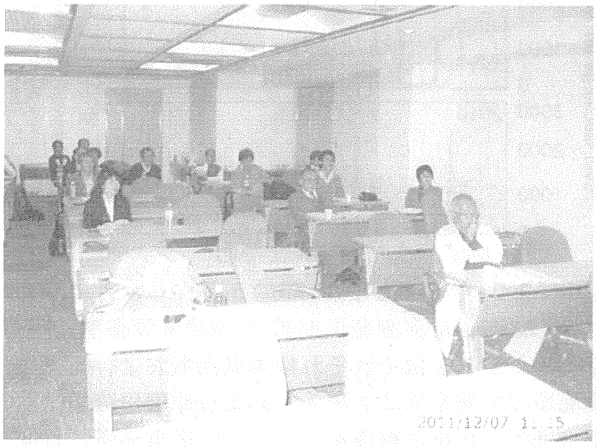
第2日　２０１１月１２月　７日（水）

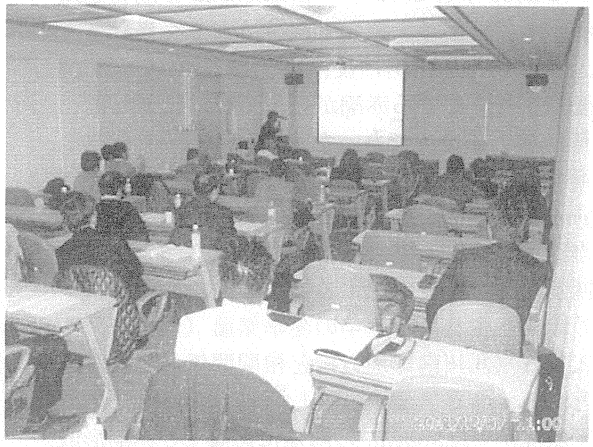
11. 夏季の豊後水道における急潮・底入り潮に伴う低次生態系の応答　9:30- 9:50
    吉江直樹[1]・藤井直紀[2]・奥田悠太[1]・園本拓彬[1]・郭　新宇[1]・小森田智大[3]・磯辺篤彦[1]
    (1 愛媛大CMES, 2 佐賀大・低沿セ, 3熊本県立大・環境共生)
12. 東シナ海における懸濁粒子のモデリング研究　9:50- 10:10
    小野　純・郭　新宇（愛媛大CMES）・田村　仁（海洋研究開発機構）
13. 2011年夏季に豊後水道で観測した急潮と栄養塩動態　10:10-10:30
    小森田智大[1]・吉江直樹[2]・藤井直紀[3]・郭　新宇[2]・横川太一[2]・濱岡秀樹[2]・磯辺篤彦[2]
    (1熊本県立大・環境共生, 2 愛媛大CMES, 3 佐賀大・低沿セ)
14. 瀬戸内海における植物プランクトン群集のサイズ組成　10:40-11:00
    樽谷賢治・中川倫寿・辻野　睦・阿保勝之（水総セ瀬戸内水研）
15. 八代海における*Chattonella*赤潮発生状況の年による違い　11:00-11:20
    鬼塚　剛（中央水研）

資料　2．研究集会の様子

第1日　２０１１年１２月　６日（火）

第2日　２０１１月１２月　７日（水）





資料　3

八代海における *Chattonella* 赤潮発生状況の年による違い

○鬼塚 剛[1]・青木一弘[1]・児玉真史[1]・清水 学[1]・櫻田清成[2]・安東秀徳[2]・西 広海[3]・田原義雄[3]・
松尾 斉[4]・耒代勇樹[4]・山本 剛[4]・落合宏紀[4]・松山幸彦[5]・吉田誠[5]・木元克則[5]
[1]中央水研　[2]熊本水研セ　[3]鹿児島水技セ　[4]東町漁協　[5]西水研

キーワード：八代海・*Chattonella* 赤潮・発生時期・*Chattonella* 動態モデル

【はじめに】

九州南西部に位置する八代海は、我が国の代表的な閉鎖性海域の一つで、南部を中心にブリ・タイ等の魚類養殖が盛んに行われている。近年、八代海では有害藻類による赤潮が頻発しており、養殖魚の斃死による漁業被害も報告されている。特に、2008年以降3年連続でラフィド藻 *Chattonella antiqua* の赤潮が大規模に発生し、2009年には約29億円、2010年には約53億円と2年続けて甚大な漁業被害をもたらした。八代海における本種赤潮の発生機構解明ならびに今後の被害軽減対策のためにも、本種赤潮の出現特性を把握しておく必要がある。

本研究では、まず、既存の観測データを用いて八代海における *Chattonella* 赤潮のこれまでの発生状況を整理し、*Chattonella* 赤潮が発生する夏季だけでなく、その前の冬季から春季にかけての気象条件・海洋環境との関係を検討する。次に、年による発生時期・発生規模の違いとそれらに関わる要因の絞り込みを行うとともに、*Chattonella* 動態を表現可能な数値モデルを開発・適用し、それらの要因が発生時期や発生規模にどのように影響しているか考察する。

【*Chattonella* 赤潮発生状況の年による違い】

図1に2008年と2010年の *Chattonella* 赤潮発生期間を示すが、両年で赤潮発生状況は大きく異なっていた。2008年は梅雨明け後、1ヶ月以上の晴天が続いた後に8月中旬ごろ赤潮が発生したのに対して、2010年は梅雨の最中であった6月末に赤潮を形成し、2008年よりも長期間続いた。同様の図を、八代海で *Chattonella* 赤潮による漁業被害が初めて報告された1988年以降について各年で作成したところ、赤潮発生時期が早いほど長期化する傾向が確認された。年ごとの赤潮発生日はその年の冬季気温（八代市）や梅雨入り日（九州南部地方）と相関関係が認められたことから、冬季気温を反映した水温環境や梅雨時期の光環境が *Chattonella* の増殖に影響し、赤潮形成時期を左右している可能性が示唆された。

また、過去の発生年を大別すると、長期間の晴天後に発生するパターン①（2008年型）と梅雨時期に発生するパターン②（2010年型）に分類され、パターン②の場合に、より長期化し、被害が大きくなる傾向があった。パターン①②の違いの要因として、赤潮形成への河川由来栄養塩の寄与の有無が考えられる。

【*Chattonella* 動態モデル】

栄養塩の細胞内への取り込み、細胞内栄養塩含量の変化、増殖速度の温度・塩分・光依存性、日周鉛直移動等の生物過程を組み込んだ鉛直一次元 *Chattonella* 動態モデルを開発した。栄養塩としては窒素・リンを考慮し、競合種として珪藻、捕食者として動物プランクトンを定義した。生物過程の定式化およびパラメータは Amano *et al.* (1998 *Limnol Oceanogr.*, 43, 117-128) 等の既往知見を参考にした。本研究では、このモデルを *Chattonella* の初期増殖海域とみられる八代海北部海域に適用し、2008年と2010年の発生時期・発生規模の違いの要因について検討を行った。結果の詳細については講演時に述べる。

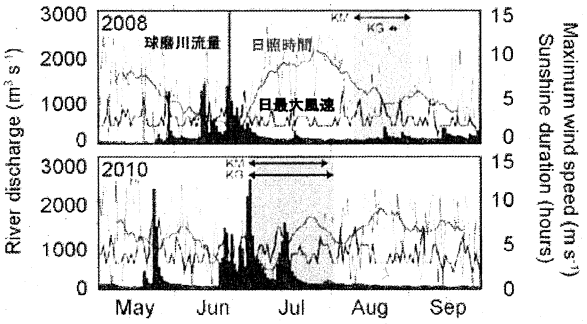


図1　2008年および2010年の5月から9月にかけての *Chattonella* 赤潮発生期間（九州漁業調整事務所、KM および KG はそれぞれ熊本県海域および鹿児島県海域での発生期間を表す）および球磨川流量（国土交通省九州地方整備局八代河川国道事務所）、日照時間・日最大風速（気象庁アメダス）の時系列。

23 AO－S2

乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性

研究代表者・吉田 恭（筑波大学数理物質科学研究科）

1　研究集会の開催目的

大気・海洋の流れ，プラズマ，工学的応用分野おける流れ，そして我々の身の回りの多くの流れは乱流である．これら多様な乱流現象の物理的理解および応用的予測・制御のため，各分野で理論的解析・実験・観測・計算科学などの様々な手法で精力的に研究されている．これら様々な分野で異なる手法を展開する研究者が，互いの情報を交換して議論を通して知識・問題意識を共有する場を設けることは，重要であると思われる．また，乱流が非平衡力学系の一典型であることを考えると，より幅広く様々な非平衡系の研究者と乱流研究者が交流を持ち，その多様な視点をそれぞれの分野に導入し，またそれぞれの問題の背後にある普遍性を探ることは，今後の乱流および非平衡系の研究の展開に有意義であると思われる．日本における国際会議やワークショップを見る限り，このような機会は少ないのが現状だと思われる．本研究集会では，異分野での理論，数値計算，実験・観測など異なる方法論の研究者が最新の知識を共有することにより，新たな知見を見いだすことを目的としたい．このような研究集会は，応用力学研究所の共同研究集会として開催することが最適と考えられる．

2　プログラム

１１月１０日（木）

13:30–14:30　乱流における揺動応答関係
大信田 丈志（鳥取大工），大槻道夫（青学大理工），後藤 晋°（岡大自然），中原明生（日大理工），松本 剛（京大理）

14:50–15:20　植物の葉の集団：動的スケーリング則に従う拡大成長
小山耕平（石川県立大生物資源），日高芳樹（九大工）

15:20–15:50　乱流の大規模スケール揺らぎの対数正規性に関するモデル
松本 剛（京大理），高岡正憲 (同大理工)

16:10–16:40　一様定常乱流の統計性における高分子の影響
杉本大輝，渡邊 威，後藤俊幸（名工大）

16:40–17:10　テイラークエット流れにおける高分子の影響
金 相佑，渡邊 威，後藤俊幸（名工大）

１１月１１日（金）

9:30–10:00　平均場と乱流磁気リコネクション
横井喜充（東大生研）

10:00–10:30　回転球殻内の **Boussinesq** 熱対流問題の安定性と分岐構造及び熱対流が両側球に及ぼす影響
木村恵二，竹広真一，山田道夫（京大数解研）

10:50–11:50　超水滴法による雲形成と降水の精密シミュレーション
島 伸一郎（兵庫県立大），長谷川 晃一（中電 CTI），S. Arabas (Univ. Warsaw)，草野完也（名大 STE 研）

13:30–14:30　非線形 **Schrödinger** 方程式が記述する世界—変分構造，特異点，基底状態—
名和範人（阪大基礎工）

14:50–15:20　量子流体乱流の完結近似に向けて
吉田 恭，有光敏彦（筑波大数理）

15:20–15:50　**3** 次元電磁流体乱流における **4/5** 則の検証
芳松克則（名大工）

16:10–16:40　平板乱流境界層における $\boldsymbol{Re_\theta}$ が小さいときの平均速度分布の対数領域に関する考察
和田裕貴（名大工），後藤克基，吉田 潤，川島英幹（海技研），辻 義之（名大工）

16:40–17:10　高レイノルズ数平行平板間乱流 **DNS** における小スケール統計
森下浩二，石原 卓（名大工，JST CREST），金田行雄（名大工）

１１月１２日（土）

9:30–10:00　$\boldsymbol{n}$ ヘプタンの簡略反応モデルを用いた乱流中の自己着火現象の直接数値計算
生田博也，石原 卓（名大工），寺地 淳（日産自動車）

10:00–10:30　渦流の **3** 次元不安定性に対するハミルトニアン分岐理論
福本康秀（九大 MI 研），彌榮洋一（九大 ITP）

10:50–11:50　南部-ゴールドストーン・モードの関与した時空カオス—ソフトモード乱流—
日高芳樹（九大工）

13:00–13:30　非双曲性と拡大率スペクトル
宮崎修次（京大情），小林 幹（合原最先端数理モデルプロジェクト），松井克仁（京大情）

13:30–14:00　少数自由度カオス系の時間相関関数の構造
富永広貴（佐賀大医），森肇（九大応力研），石崎龍二（福岡県立大人社），森 信之（九州看護福祉大），黒木昌一（福岡女子大）

14:00–14:30　**AC** トラップにおける少数帯電微粒子の配置の安定性
石崎龍二（福岡県立大人社），秦 浩起（鹿大理），庄司 多津男，古田洋輔（名大工）

3　講演内容の概要

乱流における揺動応答関係
大信田 丈志，大槻道夫，後藤 晋，中原明生，松本 剛

２時刻相関関数と応答関数の比例関係を揺動応答関係（ＦＲＲ）とよぶ．直接相互作用近似（ＤＩＡ）をはじめとする乱流の統計理論では，速度ゆらぎに対するＦＲＲが重要な役割を演じてきた．しかし現実の乱流やシェルモデル乱流におけるＦＲＲの成否，あるいはその破れの定量化は明らかではない．講演ではこの問題に関する最近の進展を報告した．

植物の葉の集団：動的スケーリング則に従う拡大成長
小山耕平，日高芳樹

草本ウバユリの葉の集団に於いて動的スケーリング則が観測された．個葉の大きさの個体内分布関数を適当に正規化すると，異なる大きさの個体の関数が１つに重なった．また，個体葉面積は個体葉数のべき関数であった．

乱流の大規模スケール揺らぎの対数正規性に関するモデル
松本 剛，高岡正憲

毛利ら (2006, 2008, 2009) の風洞実験によって乱流速度，速度差の２乗の粗視化量が，相関長程度の粗視化スケールの下で対数正規分布に従うことが見出されている．この大規模スケールでの対数正規性を Ornstein-Uhlenbeck 過程を用いてモデル化して解析した結果を報告する．

一様定常乱流の統計性における高分子の影響
杉本大輝，渡邊 威，後藤俊幸

多数のダンベルモデルを一様定常乱流中に分散させた直接数値シミュレーションを試みた．エネルギースペクトルや速度勾配，流体粒子の加速度の確率密度関数の振る舞いが高分子の存在によってどのような影響を受けるかを議論した．

テイラークエット流れにおける高分子の影響
金 相佑，渡邊 威，後藤俊幸

本研究では同心２円筒間の流体に鎖状高分子を添加した場合の不安定性や乱流状態の変化を，流れとダンベルモデルによる多数の高分子の直接シミュレーションにより解析する．特に，流体の中の個々の高分子の運動を並列計算を用いて直接計算し，高分子が流れに及ぼす影響を流れの可視化と内側円筒表面でのトルクの変化で評価した．

流れ場の計算は非圧縮性 Navier–Stokes 方程式の右辺に高分子による外力項を加えた式を用いた．高分子の計算にはダンベルモデルの高分子の重心ベクトルと末端間ベクトルの時間発展の式を用いた．これらの式から計算された個々の高分子からストレス場を求め，流れ場に反映させた．

上述した方法で数値計算を行った結果，流体に薄い濃度の高分子を添加することで内側円筒の表面上でのトルクが減少した．特に，Wi (Weissenberg number) の値によって高分子の運動が変わり，その影響で流れ場と円筒表面のトルク減少率が変わった．しかし本研究では高分子の濃度による違いは見られなかった．高分子は流れの不安定性にも影響を及ぼしたが，実験の結果とは異なったのでその原因の究明と計算手法の改良が必要である．

平均場と乱流磁気リコネクション
横井喜充

磁気リコネクションは最も重要な電磁流体現象のひとつである．当初のモデルでは十分なリコネクション率を達成できず，太陽表面での磁気リコネクションの説明が困難である．このため，さまざまな改良モデルが提案されてきた．そのひとつに乱流リコネクションがあるが，その理論は必ずしも整備されてはいない．本研究では，大局的な速度や磁場の構造が乱流の統計的性質を決めるという立場からリコネクション現象を捉え，乱流によって効率的なリコネクションが生じる条件を考察する．リコネクション周りには，クロス・ヘリシティが四重極的に分布し，結果としてリコネクションの生じる領域が局在し，効率的なリコネクションが生じることが示される．

回転球殻内の **Boussinesq** 熱対流問題の安定性と分岐構造及び熱対流が両側球に及ぼす影響
木村恵二，竹広真一，山田道夫

回転球殻内の Boussinesq 熱対流問題について，臨界点から分岐する，経度方向に伝播する定常進行波を Newton 法によって求め，その安定領域を定めた．またこの定常進行波が両側球面に及ぼすトルクを計算し，その大きさは内側球の回転角速度を変化させるのに十分な大きさであることを見出した．さらに両側球がトルクを受けて三軸回転するモデルを構築し数値計算を行った結果，臨界点から分岐する定常進行波の安定領域および熱対流パターンは両側球が同期回転する場合とほとんど変化が

ないが，Rayleigh 数を増大させると定常進行波が不安定化し，内側球と外側球の回転軸が同方向の状態から有意な角度をもつ状態へと遷移することを見出した．

超水滴法による雲形成と降水の精密シミュレーション
島 伸一郎，長谷川 晃一，**S. Arabas**，草野完也

雲の精密なシミュレーションは気象学・気候学的に重要な課題である．特に，エアロゾルの振る舞い等を表す雲微物理過程が複雑で難しい．我々は超水滴法という， 粒子法による， 確率的な雲微物理モデルを開発した．比較的少ない計算コストで正確に雲の振舞いを数値計算できると考えられる．

非線形 **Schrödinger** 方程式が記述する世界—変分構造，特異点，基底状態—
名和範人

非線形 Schrödinger 方程式は，物理・工学などの様々な分野で現象のモデル方程式として登場する：非線形光学のレーザービームの自己集束 (Kerr 効果) のモデルや，Bose-Einstein 凝縮を記述する Gross-Pitaevskii 方程式として知られる．この方程式は様々な解を持つが，とりわけ，定在波解の中でも最小な「作用」をもつ基底状態と呼ばれる解が，解全体の構造と深い関わりを持って現れる．この講演では，基底状態を定める変分構造と，その（メタ）安定／不安定性について特異点生成の観点も交えて概観する．

量子流体乱流の完結近似に向けて
吉田 恭，有光敏彦

液体ヘリウムの超流動成分やボーズ凝縮体のような量子流体乱流は適切な近似のもと Gross-Pitaevskii 方程式に従う．講演者が先に行った GP 方程式の数値シミュレーションで得られたエネルギースペクトルを説明する完結近似の試みについて解説する．

3 次元電磁流体乱流における **4/5** 則の検証
芳松克則

3 次元電磁流体乱流の 3 次構造関数に関する 4/5 則を，大規模直接数値計算データを用いて検証した．カルマン・ハワース方程式を 3 次元一様非等方乱流に対して一般化し，外力の影響，粘性散逸の影響，並びに，非等方性が 4/5 則に与える影響を定量的に調べた．非等方性の影響が，電気伝導性ない流体の乱流に比べ，強いことが分かった．

平板乱流境界層における $\boldsymbol{Re_\theta}$ が小さいときの平均速度分布の対数領域に関する考察
和田裕貴，後藤克基，吉田 潤，川島英幹，辻 義之

圧力勾配のない平板乱流境界層における平均速度分布において，Re_θ が小さいときには明確な対数領域が現れないとされている．そこで，$1100 < Re_\theta < 6010$ において実験を行い，バッファー領域と後流領域との間の直線領域を準対数領域と定義し，クラウザー線図法を用いて局所抵抗係数を求めた．その結果と Chauhan らによって示されている Composite Profile を用いて求めた局所抵抗係数，DNS による結果および先行研究データとの比較を行った．それにより準対数領域の定義，およびクラウザー線図法に用いることの妥当性を検証した．そして準対数領域の範囲を明らかにし，境界層パラメータとの関係を示した．また，対数則におけるカルマン定数と切片定数の組み合わせについても検証した．

高レイノルズ数平行平板間乱流 **DNS** における小スケール統計
森下浩二，石原 卓，金田行雄

高レイノルズ数平行平板間乱流の直接数値シミュレーション (壁摩擦速度に基づくレイノルズ数 $Re_\tau = 2560$) を用いて，対数領域における小スケールの統計（エネルギースペクトル）について調べた結果を報告する．

$\boldsymbol{n}$ ヘプタンの簡略反応モデルを用いた乱流中の自己着火現象の直接数値計算
生田博也，石原 卓，寺地 淳

本研究では，n ヘプタンの自己着火過程 (着火前の温度上昇を伴う低温酸化反応) における化学反応・乱流の相互作用，及び温度分布の変化を，簡略化学反応モデルを用いた直接数値計算により調べた結果について報告する．

渦流の **3** 次元不安定性に対するハミルトニアン分岐理論
福本康秀，彌榮洋一

楕円形にひずんだ流線をもつ回転流の線形不安定性は縮退する 2 個の Kelvin 波のパラメータ共鳴で，ハミルトニアンホップ分岐を起こして新たな 状態に移行する．弱非線形安定性を調べるとき，オイラー的記述の枠内では，Kelvin 波の非線形相互作用によって誘導される平均流を完全に決め ることができない．ラグランジュ変数を用いて渦なし撹乱に制限することによって，Kelvin 波が誘導する平均流をあいまいさ無く決めることがで きる．これをとっかかりとして Kelvin 波の弱非線形振幅方程式を導き，それがハミルトンの正準形式になることを示す．

南部-ゴールドストーン・モードの関与した時空カオス—ソフトモード乱流—
日高芳樹

液晶を電極に対して垂直に配向させた Homeotropic 系では，連続回転対称性の自発的破れに伴う南部-ゴールドストーン・モードと電場による対流の相互作用によって，対流発生と同時に時空カオス「ソフトモード乱流」が生じる．これまでの液晶電気対流では，液晶配向を異方的で静的な媒質と見なしてきたが，ソフトモード乱流の発見によって，配向自体が対流と相互作用してダイナミクスを示すことが明らかとなった．また，印加電圧の周波数の変化によって，長距離秩序をもたない Oblique Rolls から，長距離秩序をもつ Normal Rolls への秩序—無秩序転移が生じることや，対流場と配向場の相互作用に

おける対称性の破れに伴う線状欠陥（Black Line）が存在することなどのソフトモード乱流の性質を紹介する．

非双曲性と拡大率スペクトル
宮崎修次，小林 幹，松井克仁

安定多様体と不安定多様体が接する非双曲性が局所軌道拡大率（有限時間リヤプノフ指数）のレート関数をはじめとする大偏差統計関数に非解析性（q 相転移）をもたらすことが知られている．近年，Covariant Lyapunov Vector (CLV) を用いたローレンツ系の双曲領域と非双曲領域の区別がなされたが，これらの先行研究との比較検討を行いたい．また，藤坂は大偏差統計関数に現れる母関数を二時間相関関数に見立て，射影演算子法を用いた大偏差統計関数の数値解析法を提案したが，これについても具体例を用いて議論したい．

少数自由度カオス系の時間相関関数の構造
富永広貴，森肇，石崎龍二，森 信之，黒木昌一

少数自由度カオス力学系にはカオスの２重性を反映した構造が時間相関関数に現れるが，その長時間領域における構造は系の特性時間と記憶関数の特性時間との関係で exponential 型，stretched exponential 型，べき型の減衰を示すことが考えられる．

AC トラップにおける少数帯電微粒子の配置の安定性
石崎龍二，秦 浩起，庄司 多津男，古田洋輔

帯電微粒子を交流電場によって閉じ込める実験において，少数個の帯電微粒子の運動には，秩序のある結晶配置や乱れたカオス状態が観測される．私たちは，こうした実験結果を非線形力学系の観点から理解するために，理論および数値実験を進めている．

１粒子の運動については，散逸項を加えた Mathieu 方程式を拡張した数理モデルにより，固定点が不安定化すると安定周期運動を，更に，安定周期運動からカオスが生じることがわかった．特に，カオスが発生するパラメータ領域では，カオスにより確率的に回転方向が変わる，回転方向の拡散運動が発生することがわかった．２粒子の帯電粒子の運動は，線形安定性解析により，重心は静止し，相対運動には交流電場による強制振動，そしてカオスが発生することを示した．３粒子の帯電粒子の運動では，重心は静止し，３つの粒子が三角形配置をとる安定配置をとり，交流電場による周期で強制振動をする．線形安定性解析により，カオスが起きるパラメータ領域を特定した．カオスが発生する場合，三角形配置のまわりでカオス的に揺らぐカオス，そして配置転換を間欠的に起こすカオスがあることが数値計算によりわかった．

4　開催日程，場所

開催日程　2011 年 11 月 10 日（木）– 11 月 12 日（土）
開催場所　九州大学応用力学研究所西棟 6 階多目的研究交流室（W601 号室）
講演数　19 件
参加者数　26 人

RIAM 研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」

日程： 2011 年 11 月 10 日（木）– 12 日（土）
場所： 九州大学応用力学研究所西棟 6 階多目的研究交流室（W601 号室）
代表者： 吉田 恭（筑波大学） 所内世話人： 岡村 誠（九州大学）

講演のときに使ったパワーポイントなどのファイルを 11 月の下旬から 1 ヶ月程度の間
http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/fluid/okamura/riam_turb/riam2011turb.htm
でご覧になることができます．ユーザ名は riam2011，パスワードは s2 です．

１１月１０日（木）

13:30–14:30 **乱流における揺動応答関係** 大信田 丈志（鳥取大工），大槻道夫（青学大理工），後藤 晋°（岡大自然），中原明生（日大理工），松本 剛（京大理）

14:30–14:50 休憩

14:50–15:20 **植物の葉の集団：動的スケーリング則に従う拡大成長**
小山耕平（石川県立大生物資源），日高芳樹（九大工）

15:20–15:50 **乱流の大規模スケール揺らぎの対数正規性に関するモデル**
松本 剛（京大理），高岡正憲 (同大理工)

15:50–16:10 休憩

16:10–16:40 **一様定常乱流の統計性における高分子の影響**
杉本大輝，渡邊 威，後藤俊幸（名工大）

16:40–17:10 **テイラークエット流れにおける高分子の影響**
金 相佑，渡邊 威，後藤俊幸（名工大）

１１月１１日（金）

9:30–10:00 **平均場と乱流磁気リコネクション**
横井喜充（東大生研）

10:00–10:30 **回転球殻内の Boussinesq 熱対流問題の安定性と分岐構造及び熱対流が両側球に及ぼす影響**
木村恵二，竹広真一，山田道夫（京大数解研）

10:30–10:50 休憩

10:50–11:50 **超水滴法による雲形成と降水の精密シミュレーション**
島 伸一郎（兵庫県立大シミュレーション），長谷川 晃一（中電 CTI），S. Arabas (Univ. Warsaw)，草野完也（名大太陽地球環境研）

11:50–13:30 昼休み

13:30–14:30 **非線形 Schrödinger 方程式が記述する世界—変分構造，特異点，基底状態—**
名和範人（阪大基礎工）

14:30–14:50 休憩

14:50–15:20 **量子流体乱流の完結近似に向けて**
吉田 恭，有光敏彦（筑波大数理）

15:20–15:50 **3 次元電磁流体乱流における 4/5 則の検証**
芳松克則（名大工）

15:50–16:10 休憩

16:10–16:40 **平板乱流境界層における Re_θ が小さいときの平均速度分布の対数領域に関する考察**
和田裕貴，後藤克基，辻 義之（名大工）

16:40–17:10 **高レイノルズ数平行平板間乱流 DNS における小スケール統計**
森下浩二，石原 卓（名大工，JST CREST），金田行雄（名大工）

17:45 懇親会（W601 号室に集合）

１１月１２日（土）

9:30–10:00　**n ヘプタンの簡略反応モデルを用いた乱流中の自己着火現象の直接数値計算**

生田博也，石原 卓（名大工），寺地 淳（日産自動車）

10:00–10:30　**渦流の 3 次元不安定性に対するハミルトニアン分岐理論**

福本康秀（九大 MI 研），彌榮洋一（九大 ITP）

10:30–10:50　休憩

10:50–11:50　**南部-ゴールドストーン・モードの関与した時空カオス—ソフトモード乱流—**

日高芳樹（九大工）

11:50–13:00　昼休み

13:00–13:30　**非双曲性と拡大率スペクトル**

宮崎修次（京大情），小林 幹（合原最先端数理モデルプロジェクト），松井克仁（京大情）

13:30–14:00　**少数自由度カオス系の時間相関関数の構造**

富永広貴（佐賀大医），森肇（九大応力研），石崎龍二（福岡県立大人社），
森 信之（九州看護福祉大），黒木昌一（福岡女子大）

14:00–14:30　**AC トラップにおける少数帯電微粒子の配置の安定性**

石崎龍二（福岡県立大人社），秦 浩起（鹿大理），庄司 多津男，古田洋輔（名大工）

23 AO－S3

（研究集会）

地球流体における波動と対流現象の力学

研究代表者
新野 宏（東京大学 大気海洋研究所）

研究集会の目的

近年の計算機技術の著しい進歩により，地球・惑星大気や海洋の小規模渦から大規模循環まで，計算機の上で再現できるようになった．そして，人工衛星による宇宙からの観測は，地球・惑星全域での広域情報の入手を可能にした．今日では，地球科学は再現と検証の手段を得て，先端科学のひとつに変貌しつつある．そのような状況に於いて，地球流体力学は数値計算の結果や衛星観測の厖大なデータを整理し統一的な理解を得るのに，重要な役割を担う学問である．本研究集会の目的は，複数の分野の地球流体力学に関連した研究者が一堂に会し，相互に最新の情報を交換し，新しい学問の展開を模索するものである．

研究集会の日時・場所

日　時: 2011 年 12 月 14 日（水）～12 月 15 日（木）
会　場: 九州大学筑紫キャンパス　応用力学研究所　本館３階　講義室

講演プログラム

１２月１４日（水）

12:50-13:00　代表者挨拶　新野 宏（東京大学 大気海洋研究所）

13:00-13:25　三村 和男（東海大学　教養学部）
半球規模傾圧不安定波動実験において現れる中立惑星波

放物面状底を持つ、半球規模回転水槽実験装置に、赤道・北極間に温度差を加えるという、傾圧不安定波動実験を行うと、結果として、西進惑星波動が現れる。この西進惑星波動が発生するメカニズムを探るため、赤道・北極間に温度差を一定に保ち、系の回転速度を極めてゆっくり変化させてゆく連続変化実験を行い、その速度場解析を行った。西進惑星波動の東西波数が、0 から 1、1 から 2、2 から 3 に変わっていく様子を紹介した。

13:25-13:50　渡邊俊一、伊賀啓太、横田祥、新野宏、三澤信彦(東京大学 大気海洋研究所)
円筒容器内で回転する水の表面の変形とその履歴現象

円筒容器に水を入れ、底に取り付けた円盤を回転させることで水を駆動するという室内実験を行った。円盤の回転数が小さいときには水面は軸対称であるが、大きな回転数では多角形のパターンが現れる。特に多角形のパターンに移り変わる回転数領域において、二つの興味深い現象が観察された。一つは、水面が大きく振動する状態と、おだやかで軸対象となる状態を周期的に繰り返す「振動現象」であり、もう一つは、回転数を上げるときと下げるときで同じ回転数でも異なった状態となる「履歴現象」である。さらに簡単な力学モデルを考え、そのモデルを用いて実験の結果を考察した。

13:50-14:15　松田 慧（東京学芸大学)、佐藤 尚毅（東京学芸大学)
領域モデル WRF による関東における豪雨の予測可能性

一般に、豪雨は数値モデルによる予測が困難と言われている。領域モデル WRF でアンサンブル手法を用いて、都市型豪雨、台風、温帯低気圧による豪雨の予測実験を行った。都市型豪雨ではアンサンブルメンバー同士で強雨域の予測のバラつきが大きかったのに対して、台風、

温帯低気圧による豪雨の事例ではそのバラつきが比較的小さかった。よって、豪雨の予測誤差としては、都市型豪雨ではランダム誤差、台風、温帯低気圧による豪雨では系統的誤差の寄与が大きいと考えられる。

14:15-14:40　本田 匠（九大院理)、川野 哲也（九大院理）
スーパーセルストーム発達に適した環境場についての数値的研究

スーパーセルストーム発達に適した環境場の条件を数値実験によって調査した。対流圏中層(高度 2-4 km)に乾燥層が存在していると、ストームがあまり発達しなくなった。流跡線解析の結果、ストーム発達の抑制には下層の上昇流内への低相当温位気塊流入、および対流圏中層でのエントレインメントという２つのメカニズムが寄与していた。これらのメカニズムの鉛直シアー依存性を調べるため、鉛直シアーを変えた追加実験もいくつか行った。

14:40-15:00　Break

15:00-15:25　圓井 拓哉、伊藤 久徳（九州大学大 学院 理学府）
アリューシャン低気圧・アイスランド低気圧と移動性高低気圧との関係

アリューシャン低気圧（AL)・アイスランド低気圧（IL)の強弱(年々変動)は、北半球冬季の気候に大きな影響を与える。本研究では、これらの変動要因として移動性高低気圧に注目した。まず、AL・IL の強化(弱化)年における高度偏差、移動性低気圧経路、非定常擾乱の高度傾向偏差のコンポジット解析を行い、次に非定常擾乱を強化(弱化)させるために SST の南北傾度を変える感度実験を行った。これらの結果より、移動性高低気圧が AL・IL の変動を強化、維持することが分かった。

15:25-15:50　横田 祥、新野宏、柳瀬亘（東京大学　大気海洋研究所）
ITCZ breakdown に伴って生じる台風の発生・発達過程

太平洋の熱帯収束帯が下層風の不安定性により崩壊して熱帯擾乱になることを ITCZ breakdown という。本研究では非静力メソスケールモデルを用いた理想化実験により、このプロセスで生じる台風の発生・発達過程を調べた。エネルギー収支解析の結果、下層の初期渦の形成にはシア不安定が寄与しているが、breakdown 後は潜熱開放の寄与が大きいことが分かった。発表では breakdown 前後の渦の構造の変化等について詳しく述べた。

15:50-16:15　前島 康光（名古屋大学地球水循環研究センター）
全球静力学-雲解像結合モデルの開発

地球大気は大局的には静力学平衡が良い近似で成り立つが、台風や梅雨前線域など活発な対流を伴う領域では非静力学成分を考慮しなくてはならない。そこで、局所的に高解像度な全球シミュレーションを行うことを目的に、雲解像モデルに全球静力学モデルを結合した数値モデルを開発した。本講演では結合モデルを用いた台風や冬季日本海のメソ擾乱の再現実験を紹介し、総観スケールとメソスケールそれぞれの現象の相互作用について議論した。

16:15-16:40　林 未知也、伊藤 久徳（九大院・理）
熱帯での積雲対流に関連した大規模運動における Nontraditional Coriolis 項の重要性について

惑星渦度水平成分に由来するコリオリ項（Nontraditional Coriolis 項）が、熱帯での積雲対流に関連した大規模運動に与える寄与を定量的に調査した。線形化した赤道 β 面準静力学方程式系に非断熱強制を与えて計算した結果、鉛直渦度（水平風）と圧力・温位・密度摂動に10%程の寄与が確認された。その寄与は強制の西側で大きい。また、鉛直渦度と圧力 摂動へ

の寄与は等価順圧的構造を持ち、強制の南北勾配が大きい場合に寄与はさらに大きい。これらは鉛直流南北勾配による惑星渦度水平成分の立ち上 げにより統一的に説明される。

16:40-17:05　伊藤 純至（東大大気海洋研）、新野 宏（東大大気海洋研）、中西 幹郎（防衛大学校）
塵旋風のスケーリング

対流は一般的に相似的な構造をもつため、いくつかの物理量によってスケーリングが可能である。本研究では地表面近くの対流混合層に生成される小スケールの鉛直渦である塵旋風（ダストデビル）に着目し、塵旋風に対してもスケーリングができることを示した。

17:05-17:30　河谷 芳雄（JAMSTEC）、Kevin Hamilton（ハワイ大学 IPRC）、野田 彰（JAMSTEC）
赤道準 2 年振動の将来変化に対する二酸化炭素濃度と海面水温の役割

QBO を表現可能な MIROC-AGCM を用いて、現在の二酸化炭素濃度＋将来の海面水温（FS 実験）、及び将来の二酸化炭素濃度＋現在の海面水 温（FC 実験）の理想実験を行い、QBO 変化に対する海面水温と二酸化炭素濃度変化の影響を個別に評価した。将来の海面水温変化は QBO の周期を 1-3 か月、二酸化炭素濃度変化は 1 か月長くする効果があった。FS 実験においては、赤道域上昇流は下部成層圏で顕著に増加する。FC 実験では 80hPa 付近の上昇流が弱まり、QBO は成層圏最下層まで下りやすくなる。

18:00-　　**＊＊懇親会＊＊**

１２月１５日（木）

9:00-9:25　栃本 英伍、川野 哲也（九州大学大学院理学府）
梅雨前線帯の低気圧の発達過程と環境場

梅雨前線帯では多くの低気圧が発生・発達する。本研究では、その低気圧の発達過程について、梅雨前線帯の東西の環境場の違いに着目して調査した。梅雨前線帯の環境場は、西側領域では弱い傾圧性と強い水蒸気傾度で特徴づけられるのに対して、東側では相対的に強い南北温度傾度で特徴づけられる。このような環境場の違いが低気圧の発達に及ぼす影響についてデータ解析・数値シミュレーションによって調査した。

9:25-9:50　佐藤 尚毅（東京学芸大学/JAMSTEC 地球環境変動領域）、齊藤 崇裕（東京学芸大学）、城岡 竜一（JAMSTEC 地球環境変動領域）
黒潮/黒潮続流域周辺における冬季の降水量の経年変化

関東地方の冬季の降水量の過去 30 年間の変動を調べた結果、太平洋沿岸で、12 月、1 月の降水量が、2000 年代に増加していることがわかった。降水量の増加は、黒潮/黒潮続流域においてもみられた。短周期じょう乱に伴う対流圏上層の気圧場の変動や、下層の南北熱輸送を調べたところ、どちらも増加傾向にあり、低気圧活動の強化が示唆された。黒潮/黒潮続流域での海面水温の上昇や亜熱帯ジェットの強化・北上が低気圧活動の強化に寄与している可能性が考えられる。

9:50-10:15　佐藤 由布子 （東京学芸大学）、佐藤 尚毅 （東京学芸大学）
東京・名古屋・大阪の気温・風向風速の日変化とその経年変化

アメダスデータを用いて気温と風向風速の 30 年平均の日変化を東京・名古屋・大阪の 3 都市について解析した。一般に、気温の日変化は、沿岸部で小さく、内陸部で大きいことが確かめられた。また、気温の地域差は、夜間に大きくなり、日中に小さくなる傾向が見られた。

この傾向は冬季に顕著である。こうした気温の日変化に対応した風向風速の日変化の地域性や、それらの経年変化についても調べる。

10:15-10:40　山崎 哲、伊藤 久徳(九大院・理)
大気ブロッキング持続メカニズムにおける渦と渦の相互作用（その 2）

我々は、大気ブロッキングの持続メカニズムに関して、渦と渦の相互作用に注目した研究を行っている。これまでの研究では、ブロッキングと移動性擾乱との相互作用において、渦と渦の相互作用メカニズムが重要であることを、流跡線解析やチャネルモデル実験などを用いて示すことができた。今回の発表では、渦と渦の相互作用の効果を定量化する解析や 2010 年夏のロシアブロッキングの事例解析を通して、予報に関係した上記メカニズムの重要性について述べた。

10:40-11:00　Break
11:00-11：25　安永 数明（海洋研究開発機構）
赤道波動擾乱における降水特性の違い

衛星搭載のマイクロ波計や降水レーダのデータを用いて、降水特性・雲の組織化と赤道波動の関係について調べた。赤道波をその特徴から、周期の長い回転に特徴的な波(混合ロスビー重力波や赤道ロスビー波)と、周期の短い収束・発散に特徴的な波(慣性重力波や、ケルビン波)に分類した。後者の発散的な波では組織化した降水システムが顕著で、対流圏上層に極大を持つ層状性加熱が特徴的であることを示した。一方で、前者の回転的な波に関しては、水蒸気変動が顕著で、対流性加熱(降水)が特徴的であることを示した。

11:25-11:50　山田 道夫、竹広 真一（京都大学 数理解析研究所）
Rossby 波による平均流加速 ---定量的予測について

Rossby 波と平均流の相互作用は古くから論じられている問題であるが、平均流加速については、流体方程式の数値実験によるものか、臨界層を用いた定性的説明が多いようである。ここではベータ面上の２次元流について、波束がシアー流域に入射するときの平均流加速の程度を定量的に議論し数値実験結果と比較検討する。

11:50-13:00　LUNCH

13:00-13:25　杉本 憲彦（慶大日吉物理)、小林 宏充（慶大日吉物理)、下村 裕（慶大日吉物理)、
石岡 圭一(京大理)
浅水系における回転渦糸対からの自発的な重力波放射

f 平面浅水系において、同軸回転する渦糸対からの自発的な重力波放射過程について調べた。まず、遠方場の解析解を、2 次元の渦音理論（ライトヒル理論）を援用し、グリーン関数を用いて求めた。次に、同じ枠組みで非線形数値実験を行い、地球の自転(ロスビー数)と成層(フルード数)の効果を変化させて、重力波放射を定量的に評価した。発表では、特に高低気圧渦からの重力波放射の非対称性を議論した。

13:25-13:50　伊賀 啓太（東京大学 大気海洋研究所）
折れ線速度近似した基本流のシアー不安定につながる中立波

基本流の渦位が一様でないシアー流の不安定モードにつながる中立波は、基本場の一部の渦位を一様にして現れる中立波を調べるという手法で取り出すことができる。ところが、この基本流を折れ線速度分布で近似した時に、不安定モードにつながる中立波のそれとは対応し

ない。折れ線の区画を細かくした時の振舞いを調べたところ、分散曲線の「湾曲」をつなげた曲線の極限として表現できることが示された。

13:50-14:15　岩山 隆寛（神戸大・理）、渡邊 威（名工大・工）、末吉 雅和（気象研・気候）
一般化された 2 次元流体系における渦列・渦層の線形安定性解析

地球流体力学で知られたいくつなの 2 次元流体系を統一的に記述する方程式系として、一般化された 2 次元流体が提唱されている。この系の研究は、乱流研究ばかりが行われてきた。流体力学、地球流体力学的にも重要な問題である、平行流の安定性の問題は扱われてきていない。本講演では一般化された 2 次元流体の渦層の線形安定性問題を取り上げ、系に含まれるパラメターαに対する安定性の性質の変化について述べた。

14:15-14:40　佐々木 英一、竹広 真一、山田 道夫（京都大学数理解析研究所）
回転球面上の帯状流の線形安定性

我々は非回転、回転球面上で球面調和関数で表される帯状流の安定性、分岐構造を数値的に調べた。非粘性帯状流の安定性を再吟味したところ、Baines(1976)で得られている臨界回転角速度と約 10%異なる結果が得られた。この差異は極付近の臨界層がスペクトル法では解像困難になることによると考えられる。またベータ平面上での半円定理を回転球面上に拡張した。

14:40-15:05　松尾 花枝（九大院理）、中島 健介（九大院理）
同期回転惑星の海洋循環についての基礎的考察

同期回転する系外惑星における昼夜半球での極端な気候の違いは、東西方向の熱輸送があればより穏やかなものになるだろう。本研究では海洋循環による熱輸送に着目し、その第一歩として線形浅水波方程式を用いた数値計算を行った。昼半球でのみ蒸発と降水がある場合は東西一様な成分が卓越し、その強度は時間に比例していた。この振る舞いは解析的にも求めることができた。

15:05-15:30　Break

15:30-15:55　木村 恵二、竹広 真一、山田 道夫（京都大学数理解析研究所）
回転球殻内の Boussinesq 熱対流問題の安定性と分岐構造及び熱対流が両側球に及ぼす影響

回転球殻内の Boussinesq 熱対流問題について、臨界点から分岐する、経度方向に伝播する定常進行波を Newton 法によって求め、その安定領域を定めた。また両側球がトルクを受けて三軸回転するモデルを構築し数値計算を行った結果、臨界点から分岐する定常進行波の安定領域および熱対流パターンは両側球が同期回転する場合とほとんど変化がないが、Rayleigh 数を増大させると定常進行波が不安定化し、内側球と外側球の回転軸が同方向の状態から有意な角度をもつ状態へと遷移することを見出した。

15:55-16:20　山下 はづき、伊藤 久徳（九州大学大学院　理学府地球惑星科学専攻）
テレコネクションパターンの成因 －中立特異モードと純粋な低周波変動からのアプローチ－

北半球冬季中高緯度対流圏において卓越するテレコネクションパターンは、その時間・空間スケールの大きさから気候全体に大きな影響を 及ぼす重要な現象であるといえるが、その力学的成因はいまだに解明されていない。本研究では、時間フィルターを用いたモデルにより移動性 高低気圧を抑制した「純粋な」低周波変動を作り出し、そこに現れるテレコネクションパターンを特異値分解解析により得られる中立特異モー ドとして解釈することを試みた。

16:25-16:50　加藤 亮平（九大院理)、杉山 耕一朗（北大低温研)、中島 健介（九大院理）
3 次元モデルによる木星大気大規模渦の数値実験- 統計的定常状態における 渦の振る舞いと生成メカニズム-

木星の大赤斑を念頭に置き、 大規模渦の振る舞いを 3 次元モデルを用いて調べた。 平均場と擾乱場が統計的定常状態に至ることを期待して、東西風が南北に交代する複数ジェット構造を維持するような強制を様々な強さで加えた。統計的定常状態が得られた場合における大規模渦の振る舞いは強制の強さによって 2 通りに分かれた。強制が強い場合は大規模渦が生成され常に存在するが、 強制が弱い場合は大規模渦の生成は間欠的であり、生成される期間と形成されない期間が存在した。 本発表では、 大規模渦の生成メカニズムに焦点をあてて議論した。

最後に

各発表は十分な時間を確保し討論を活発に行うことができた．若手研究者の発表や参加も数多くあり，本研究集会が将来を担う若手研究者育成の一助になればと考える．また，本研究集会は，毎年中心となるトピックを選びながら，九州大学・応用力学研究所と東京大学・大気海洋研究所の間で，原則として交互に１年交代で開催している．

開催の期間　平成２３年１２月１４日（水）～１５日（木）
代表者　組織名　　新野宏　　東京大学・大気海洋研究所
参加者　４０名

23 AO－S4

「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」報告

水産大学校海洋生産管理学科　滝川哲太郎

2011 年 12 月 15 日から 12 月 16 日にかけて，九州大学筑紫キャンパスにおいて，応用力学研究所共同利用研究集会「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」が開催された．大学および試験研究機関を中心に 42 名が参加し，合計 13 題の講演があった(プログラム参照)．例年通り，一題あたり質疑応答を含め 30 分の時間を割いたため，非常に活発な議論が行われ，時には講演時間を超過することもあった．

講演内容は，宗谷海峡域の潮流の季節変化，山陰沖の日周期潮流，日本海固有水，東シナ海混合層の熱収支，九州東方沿岸域における透明度，2011 年 9 月の台風による瀬戸内海の異常潮位，風洞水槽による波浪の実験結果，対馬海峡西水道の内部潮汐，対馬海峡の流動構造の短周期変動，海底エクマン境界層の渦粘性係数分布，丹後半島東岸の近慣性内部波，台風通過に対する上層海洋の応答(数値モデルと力学)についてと非常に幅広いものであった．本研究集会に特に関連するモニタリングでは，宗谷海峡の HF レーダ(2003 年～)，津軽海峡のフェリーADCP(1999 年～)，対馬海峡のフェリーADCP(1997 年～)と HF レーダ(2002 年～)による観測があり，それぞれ 10 年前後のデータを蓄積している．これらのモニタリングデータに加え，各大学および試験研究機関で行っている貴重な観測データも数多く存在する．近年，調査船や練習船の減船が進む中で，各々が行っている現場海洋観測の重要性を改めて感じた．

本研究集会では，観測データに基づいたモニタリングや数値モデル等の他の様々な手法によって行われた日本周辺海域の海況に関する研究発表があった．また，近年，講演数が少ない波浪に関する研究発表もあった．今後とも，日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わっている研究者が集まり，活発な議論を行う場となることを期待する．最後に，本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所，集会を開催するにあたりお世話して頂いた東アジア海洋大気環境研究センター・海洋力学分野の増田章教授をはじめとする諸氏に感謝する．

プログラム

期間: 平成 23 年 12 月 15 日(木)～12 月 16 日(金)
場所: 九州大学筑紫キャンパス　共通管理棟 3F 大会議室
所内世話人: 増田 章
研究代表者: 滝川哲太郎(水産大学校)

------- 12/15(木) -------

13:00-13:10 趣旨説明
滝川哲太郎(水大校)

13:10-13:40 宗谷海峡域の潮流の季節変化
江淵直人・深町 康・大島慶一郎(北大低温研)

13:40-14:10 日本海山陰海岸沖で観測された日周期潮汐流の空間構造
井桁庸介・渡邊達郎・奥野 章・山﨑恵市(水研セ日水研)

14:10-14:40 日本海深層における水温一様層について
西村誠次(九大院総理工)・松野 健・千手智晴(九大応力研)・
堤 英輔(九大院総理工)・日比谷紀之(東大院理)

14:40-15:10 東シナ海混合層の熱収支
万田敦昌(長崎大)・茂木耕作(JAMSTEC)

15:10-15:30 休憩

15:30-16:00 九州東方沿岸域における透明度の季節・経年変動特性
渡慶次 力(宮崎水試)・柳 哲雄(九大応力研)・行平真也(大分水研)・
橋田大輔(愛媛水研セ)・市川忠史(水研セ中央水研)・林田秀一・
福田博文・甲斐史文(宮崎水試)

16:00-16:30 瀬戸内海における 9 月の異常潮位について
石崎士郎(気象庁海洋気象情報室)

16:30-17:00 造波機による正弦波が風速分布と流速分布に及ぼす効果
水野信二郎(元広島工業大学)

------- 12/16(金) -------

09:00-09:30 対馬海峡西水道における内部潮汐の伝播特性
滝川哲太郎・荻原友美・練合千夏(水大校)・森本昭彦(名大水循環セ)・
宮地邦明(水大校)

09:30-10:00 対馬海峡における短周期変動
姜 分順・尹 宗煥(九大応力研)・中小原拓也(九大院総理工)

10:00-10:30 海底エクマン境界層における渦粘性係数分布の推定と対馬海峡への適用
青山皓介(九大院総理工)・吉川 裕(九大応力研)

10:30-10:50 休憩

10:50-11:20 丹後半島東岸で観測された近慣性内部波の周期特性－台風経路による違い－
山崎恵市(水研セ日水研/海洋大科)・北出裕二郎(海洋大科)・
井桁庸介・渡邊達郎(水研セ日水研)

11:20-11:50 Upper ocean responses to Typhoon Abby in the northwestern Pacific using a three-dimensional primitive equation numerical model
Hong Chul-Hoon(釜慶大学校), Masuda Akira,
Yoon Jong-Hwan(九大応力研)

11:50-12:20 台風通過に対する上層海洋の応答－その基礎力学－
増田 章(九大応力研)・洪 鉄勲(釜慶大学校)

12:20-12:50 総合討論

参加者

	氏　名	所　属
1	川相　隆	三菱電機（株）
2	鐘ヶ江誠一	三菱電機（株）
3	田中　朗	長野日本無線（株）
4	平野圭蔵	長野日本無線（株）
5	桑田浩二	朝日航洋
6	灘井章嗣	ＮＩＣＴ
7	水野信二郎	自宅
8	市川　香	応力研
9	中村浩昭	九大総理工
10	井手喜彦	九大総理工
11	滝川哲太郎	水産大学校
12	吉川　裕	応力研
13	江淵直人	北大低温研
14	花土　弘	ＮＩＣＴ沖縄
15	石崎士郎	気象庁
16	川村誠治	ＮＩＣＴ
17	藤井智史	琉球大学
18	井桁庸介	日水研
19	山崎恵市	日水研
20	千手智晴	応力研
21	万田敦昌	長崎大学
22	姜　分順	応力研
23	西村誠次	九大総理工
24	久木幸治	琉球大学・理学部
25	洪　鉄勲	釜慶大学校
26	李　根淙	応力研
27	油布　圭	応力研
28	松野　健	応力研
29	橋本　晋	長崎海洋気象台
30	福留研一	応力研

	氏　名	所　属
31	馬田俊雄	応力研
32	広瀬直毅	応力研
33	渡慶次　力	宮崎水産試験場
34	登内茂樹	海上自衛隊
35	増田貴仁	第七管区海上保安本部
36	柴田　愛	第七管区海上保安本部
37	増田　章	応力研
38	石橋道芳	応力研
39	丸林賢次	応力研
40	吉川　裕	応力研
41	光易　恒	自宅
42	青山皓介	九大総理工

23 AO－S5

研究集会「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」報告

研究代表者
琉球大学工学部　藤井 智史

海洋レーダを用いて沿岸域の海況を高い時空間分解能で監視するシステムの構築に向けて、海洋レーダ技術の発展と観測結果の活用などを議論するために、標記の研究集会を 2011 年 12 月 14 日午後(13:30～17:30)および 15 日午前(9:30～11:30)において、九州大学筑紫キャンパス共通管理棟 3 階大会議室にて開催された。今回の研究集会では 10 件の講演があり、参加者は４７名であった。

以下に各講演に関する概要等をまとめた。

１.「13MHz 海洋レーダの混信について」　江淵（北大低温研）ほか、

13MHz レーダと ADCP 観測との差が大きい場合があり、その原因として、ノイズが影響しているかどうかについて検討し、ノイズの発生源の簡単な方位探査にも言及した。また、ノイズの大きい部分を取り除いて作成した流速データに関しても報告があった。

２.「複数の短波海洋レーダを用いた流速ベクトル計測について」　灘井（NICT）

２台の視線方向流速のベクトル合成についての誤算分布形状については既に報告されているが、３台の視線方向流速を使ってベクトル合成する場合に、各視線方向流速に含まれる誤差が合成後の誤差分布のどのように影響するかを数式により明らかにした。レーダ普及により同一地点を 3 台以上のレーダで観測する領域が多くなる場合に、誤差評価に利用できることが期待される。

３.「海洋レーダのリアルタイムデータ処理に関する一検討」　平野（長野日本無線）ほか

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の際に、AD 変換データ収録モードに変更するにあたっての具体的な方法や作業が報告された。この作業によって、湊局（和歌山市）ほかでは津波到来時の流速変動をとらえることができた。これらの経験から、現在一般的な 1 時間程度間隔でのデータ収集だけでなく、より短時間間隔でのデータ収集系についての必要性とその提案が行われた。

４.「Observations of the March 11, 2011 Japan Tsunami Using HF Radars on Two Continents」
Ramp（Soliton Ocean Services）ほか

同じく東北地方太平洋沖地震の津波を、北海道恵山沖での 41.2MHz レーダで観測された流速から波高分布を求め、短時間間隔で演算した結果をアニメーション化して、津波によるダイナミックな海面変動を二次元場として明らかにした。また、アメリカ西海岸に設置された海洋レーダ群でも津波到来をとらえたとの報告があった。その結果、陸棚に津波が到達した後の海洋レーダでの津波検知の可能性を示した。

５.「紀伊水道における津波観測結果について」　日向（国総研）ほか

３の講演で得られた湊局の流速データから、津波到来時の流速変動について、ＧＰＳ波高計、海底設置波高計、検潮記録と対比して示した。また、津波で励起されたと考えられる副振動について、陸棚での増幅率が通常時より大きいことを明らかにした。また、その挙動について、湊局の視線方向流速観測領域全体での時間・空間の変化をアニメーションで表し、短時間観測の有用な応用例として示した。

６.「与那国における海洋レーダのバイスタティック受信実験」　川村（NICT）ほか

与那国島で台湾から発せられた海洋レーダの信号を受信し、バイスタティック観測を行うための基礎検討を行った。直達波信号成分から参照信号を再構成するにあたって、FMICW での各送受切替ごとの直達信号波形から参照信号を作り受信信号を復調した場合に、距離特性分離が出来るようになることを示した。また、同一周波数で４局が掃引開始時間ずらしで李お湯している場合でも、同様な処理で対応可能であることも示した。

７.「VHF 帯海洋レーダによる若狭湾東部海域観測」　坂井（電中研）ほか

VHF 帯 42MHz レーダを若狭湾に設置し厳しい環境下での連続観測を実施した。観測領域での ADCP 観測との比較を行い、湾内流動の解析を行った。長期間観測が乏しい海域のため、観測結果は今後の若狭湾内の物理過程の検証に利用が期待される。

８.「Synergistic Approach for Stokes Drift Estimation」

Matthews（Environmental Sattelite Application/JSPS）ほか

ALOS に搭載された PRISM センサーを用いて、ATSSG(Along Track Sun Stereo Glitter)観測結果から表層流速を求める手法について解説した。対馬海峡において、ATSSG から求めた表層流速と、42MHz と 13MHz の海洋レーダの周波数に応じた深度での流速ならびに ADCP 観測の結果を合わせて、鉛直プロファイルを示し、ストークスドリフトを見積もった。また、ATSSG で内部波や島影の沿岸フロントが観測可能であることも示した。

９.「風向変化に対する波向きの変化と,遠距離海洋レーダによる海上風向補正の試み」

久木（琉大理）ほか

受信信号の一次散乱スペクトル形状から海上風向を求めるにあたって、グラッグ共鳴波浪の波向きを見積もることにより補正する方法について述べた。一次散乱ピークの比と海洋レーダデータ検証用のブイで観測された波高および波向きを比較し、方向分布の時間変化と散布図から風向きの変化に伴うブラッグ波の変化はある程度再現できることを示した。

１０.「短波海洋レーダ観測データのエネルギー補正による波浪推定精度の向上」

永松（国際航業）ほか

二次散乱スペクトルから波高を求める方法について、五島沖観測のデータからバリック法とベイズ法によって得られた結果と WAM でのシミュレーションと比較した。ベイズ法で合致しない部分があることに対しては、バリック法での２局間の違いを補正する係数を導入して同じの結果が出るように調整したスペクトルに対してベイズ法を施すという補正手法が提案された。その結果が WAM の計算結果によく合致することも示された。

今回研究集会では、海洋レーダの観測技術についてかなり広い分野の内容での発表が行われた。特に、レーダ観測におけるノイズ、ベクトル合成、バイスタティック受信などの技術的課題に関する話題が議論された、また、ADCP や ATSSG などの他の観測方法との比較・統合した解析、ならびに海上風向、波高計測の改善に関する議論も行われた。さらに 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震による津波検知の実例から短時間観測の有用性が示された。このような多岐にわたる研究成果は、海洋レーダ研究の進展によるものであり、今後の発展も期待できる研究集会であった。

23 AO－S6

地形のダイナミクスとパターン及び境界領域

研究代表者・柳田達雄（大阪電気通信大学）

1　研究集会の開催目的

多くの地形変化のダイナミクスは流体運動とそれに伴う物質移動からなっている．物質移動は，流体運動を規定している境界条件を変化させ，その変化が流れにフィードバックする極めて非線形性の強い現象である．地形変化の代表的な例は，河川流路変化・河岸変化・砂丘移動・鍾乳石形成・熱収縮割れ目の形成などと多岐にわたり，各分野で異なる対象・異なる方法論で取り扱われてきた．

本研究集会では，これらの現象を流れとそれに伴う物質移動による境界の自発的運動として捉え，異分野での理論，数値計算，実験・観測など異なる方法論の研究者が最新の知識を共有することにより，新たな知見や方法論を見出すことを目的としたい．

このような流体の流れ場による固体移動，また，それに起因した流れ場へのフィードバックのダイナミクス及びパターン形成の研究集会は，応用力学研究所の共同研究集会として開催することが最適と考えられる．

2　プログラム

１１月４日（金）

14:00–14:45　渦輪の衝突による粒状体表面上のパターン形成
吉田隼也，佐野 理（農工大工）

14:45–15:30　物理過程に基づいた地形形成モデル
岡村 誠（九大応力研），佐伯 亜由美（地圏環境テクノロジー）

15:45–17:15　地球内部のダイナミクスと物質循環
岩森 光（東工大理工）

17:15–18:00　**2** 次元ランダム表面とループ統計—宇宙マイクロ波背景放射を例として—
小林 奈央樹（中大理工），山崎義弘（早大理工），國仲寛人（三重大教育），
香取眞理，松下 貢（中大理工），松下聡樹，L.-Y. Chiang (台湾・中央研究院)

18:15–19:00　**SPH** 法を用いた乾燥破壊シミュレーションとその統計的性質
伊藤伸一，湯川 諭（阪大理）

１１月５日（土）

9:30–10:15　波打ち際の斜め交差模様のでき方
遠藤徳孝，村上貴志（金沢大理工），泉 典洋（北大工）

10:15–11:45　断層の摩擦法則と粉体ダイナミクス
波多野 恭弘（東大地震研）

13:00–13:45　レイリーテーラー不安定性条件下で形成される表面パターン
下川倫子（千葉大先進科学セ）

13:45–14:30　流体力学的相互作用を組み込んだ粒子法による粉体なだれのパターン形成
新屋啓文，粟津暁紀，西森 拓（広大理）

14:30–15:15　液膜流下の結晶成長
上之和人（ＷＤＢ）

3　講演内容の概要

渦輪の衝突による粒状体表面上のパターン形成
吉田隼也，佐野 理
渦輪が粒状体表面に衝突すると，渦輪の強さや衝突までの並進運動距離，粒状体の粒径や材質などに応じた特徴的な衝突痕を形成する．この衝突痕は，衝突した渦輪が半径を増大させつつ粒状体表面を掘削することでクレーター状の窪みが形成され，粒状体表面上に形成された二次渦輪が波状変形しつつクレーターの外周部に花弁状の窪みを形成していると推測される．本研究では，渦輪の強さおよび粒状体の粒径・材質を変化させ，衝突痕の形状や形成に必要な渦輪の強さについて実験的に研究を行った．

物理過程に基づいた地形形成モデル
岡村 誠，佐伯 亜由美
地形形成の基本的な物理現象である土砂の浸食，輸送，堆積を物理過程に基づいてモデル化する．さらに，輸送と地形の特徴的な時間スケールの大きな違いを解決する方法を提案する．また，このモデルは柳田，西森，小西のモデルと似ているので，両者を比較検討する．

地球内部のダイナミクスと物質循環
岩森 光
数値シミュレーションや地球物理学的・化学的データの解析に基づき，プレート運動とマントル対流の特徴と仕組み，およびそれらにともなう物質循環について，レビューと最新の研究成果について発表を行う．

2 次元ランダム表面とループ統計—宇宙マイクロ波背景放射を例として—
小林 奈央樹，山崎義弘，國仲寛人，香取眞理，松下貢，松下聡樹，**L.-Y. Chiang**
地形などのランダム界面において，その揺らぎを特徴づける方法の一つとしてマンデルブロの経験則に従い，その等値線や断面を解析する手法が知られている．本研究では，宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ図から得られる等温線ループ集団・およびその断面について，そのパターンとしての性質に着目し，2次元ランダム表面で得られた知見を用いて揺らぎの特徴づけを試みた．

SPH 法を用いた乾燥破壊シミュレーションとその統計的性質
伊藤伸一，湯川 諭
我々は日常的に干上がった湖や田んぼ等で乾燥破壊による亀裂パターンを見かける．今回それらのような乾燥破壊パターンを，粒子法の一種である SPH 法を用いて数値シミュレーションで再現し，その統計的な性質について調べたので報告する．

波打ち際の斜め交差模様のでき方
遠藤徳孝，村上貴志，泉 典洋
砂浜の波打ち際に出来る，斜面最大傾斜方向に対して斜め 2 方向に伸び交差する細い溝地形（リル）の形成過程を検討した．斜面傾斜とリル交差角とは正の相関を示し，流水下の砂面に対する線形安定性解析の結果は定性的に一致した．

断層の摩擦法則と粉体ダイナミクス
波多野 恭弘
地震は地殻のすべり破壊であり，岩石の摩擦特性がその破壊伝播ダイナミクスに決定的な影響を与える．そのすべり速度は年間数センチ程度 (クリープ) から 1 メートル毎秒程度 (地震すべり) に至るまで実に 10 桁にわたって変化する．地震発生過程の研究ではこのような幅広い速度レンジにおける摩擦特性を系統的に解明することが必要である．しかし精度よい実験は技術上なかなか困難であり，定性的な実験結果はこれまでいくつか知られていたものの，統一的かつ定量的な経験則はこれまで知られていなかった．我々は圧力・すべり速度・温度を精度よくコントロールできる回転式摩擦 実験装置を用いて，幅広い速度レンジにおける岩石の摩擦係数の系統的測定にまず成功した．実験結果の解析を通じて，摩擦特性がすべり速度に応じて定性的に異なる 3 つのステージに分類されることを示し，複数ステージ間の移り変わりが微視的物理過程のクロスオーバーに起因することを論じる．各ステージにおける物理過程についての微視的理論も簡単に紹介する．定常状態間の移り変わりを記述する緩和方程式も理論的に導出できることを紹介する．

レイリーテーラー不安定性条件下で形成される表面パターン
下川倫子
軽い溶液の表面に重い溶液の滴を静かに置くと，二つの溶液界面でレイリーテーラー不安定性が起こり，二つの溶液の境界にフラクタル構造，もしくはセル構造が観察される．円筒容器の半径 r と溶液の深さ h を変化させた実験で，$r > h$ のときセルパターン，$r < h$ ではフラクタルパターンが出現することが分かった．また，表面パターンの変化に伴い，$r = h$ を境に垂直方向の流れも変化することから，垂直方向の流れが表面パターンを決定していることが実験で明らかになった．

流体力学的相互作用を組み込んだ粒子法による粉体なだれのパターン形成
新屋啓文，粟津暁紀，西森 拓
なだれは，雪崩に限らず，岩屑流や火砕流などの重力流や密度流といった異なる流れで幅広く用いられており，頭部-尾部構造と呼ばれる共通の構造を持つことが知られている．例えば，ポリスチレン粒子を斜面上に流した場合，なだれ前端が不安定化し，波状のパターン（複数の head）が形成すると報告されている．実験では低密度粒子を用いているため，head の形成要因は，なだれの駆動力である重力と空気抵抗であると考えられる．そこで，我々は空気抵抗が粉体なだれへ及ぼす影響を調べるため，粉体-流体間相互作用を組み込んだ粒子法を構築した．その結果，なだれ前端が不安定化し，複数の head が形成され，head 内部で渦対が発生した．さらに，粒径と head の厚さ，幅にスケーリング則が成り立つことを確認した．

液膜流下の結晶成長
上之和人
(1) 過冷却の液膜で覆われた氷柱，Aufeis，航空機翼前縁への着氷，雹，(2) 過飽和の炭酸カルシウム水溶液の液膜で覆われた鍾乳石や石灰華棚，(3) 過飽和のショ糖溶液の液膜で覆われた金平糖などは，液膜が重力や表面張力，風による摩擦力の作用で流れるとき，固液界面上に数ミリから数センチメートルスケールの凸凹が現れるときがある．液膜の厚さは供給する流量，流れる斜面の角度，風速によって変化し，界面の成長率や波長と液膜の厚さには相関が見られる．結晶化の際の潜熱や溶質の拡散過程と表面張力による Gibbs-Thomson 効果を取り入れた従来の Mullins-Sekerka 理論ではこのような長波長スケールの凸凹を予測することはできず，上述の現象を統一的に説明できる新しい理論体系が必要である．氷柱上の凸凹や Aufeis の初期形態に関する理論モデルを構築したので，実験結果との比較を行い上述の現象との関連を示す．

4 開催日程，場所

開催日程　2011 年 11 月 4 日（金）– 11 月 5 日（土）
開催場所　九州大学応用力学研究所西棟 6 階多目的研究交流室（W601 号室）
講演数　10 件
参加者数　22 人

（研究集会）

非線形波動研究の進展 – 現象と数理の相互作用 –

研究代表者　　立教大学理学部　筧 三郎

研究集会の目的

本研究集会の目的は,「非線形波動」というキーワードの下に，理論面に関心を持つ研究者，現象面に関心を持つ研究者が一堂に会して議論することで，新たあ相互作用を引き出し，さらなる発展の新たな可能性を探ることである。非線形波動は，流体力学，プラズマなどを始めとする多彩な系で観測され，それを通して応用の可能性も追求されている。また，それぞれの分野における実験的研究に基づく理論的アプローチから新たな概念が生み出され，さらにそこから新たな展開が広がってきた。近年では,「交通流」とか「疫病の伝播」などのような，広い意味での地球環境をとらえる際に重要となる社会現象にまでも，非線形波動の研究で培われた手法が使われるようになってきている。

非線形波動現象から生まれて，大きく発展した分野の一例として「ソリトン」がある。流体における孤立波の伝搬を記述する理論から生まれた「ソリトン」という概念は，プラズマ中の非線形波動，固体中の電荷密度波など，物理学を貫く一つの視点として広がってきただけでなく,「逆散乱法」をはじめとする理論的解法も，多くの応用数学者の関心を得てきた。日本においては，広田良吾氏による「広田の方法」，および佐藤幹夫氏ら京都スクールによる KP 階層の理論などのように，ソリトン研究において世界的な研究がなされてきた。さらに，それらの理論に基づいた離散化の手法が，現在でも盛んに研究されており，離散ソリトン方程式から新たな数値計算アルゴリズムも生まれてきている。また，ソリトン現象を示すセル・オートマトン系から生まれた「超離散化」と呼ばれる手法は，偏微分方程式モデルとセル・オートマトンモデルとを直接つなぐ方法論を与えた。さらに，そこから交通流を解析する新たなモデルが提案され，逆にそのモデルがソリトン理論を拡張する一つの動機となっている。

「ソリトン」という話題に関して，このように現在でも活発に研究が進められているが，一方で数学理論，数値計算および実験の乖離が見受けられるのも事実である。非線形波動研究初期の頃はこれらが，より有機的に関連していた時期があり，そのことがお互いの進展に相補的に貢献していた。そこで現在の状況を鑑みて，共通の「非線形波動」というキーワードの下に，理論から実験まですべての研究者が一度に会して議論し，お互いの問題意識を確認して話し合う場が必要である。

開催予定地の応用力学研究所は，非線形波動研究の創成期以来，一貫して関連分野の研究における国内外の拠点の一つである。過去にも継続して関連した研究集会が行われてきており，活発な議論が繰り広げられ，そこから生まれた新しい研究分野も多い。本年度もまた多数の研究者の参加によって，さまざまな分野のテーマの有機的なつながりを目指すために，本研究集会の企画に至ったものである.

成果の概要

本研究集会は，平成 23 年 10 月 27 日から 29 日までの 3 日間にわたって開催され，特別講演 3 件と一般講演 33 件（口頭発表 17 件，ポスター発表 16 件）の講演が行われた．さらに，平成 23 年 9 月に急逝された和達三樹氏の非線形波動理論に対する貢献を偲んで，追悼講演が行われた．追悼講演を合わせると，計 37 件の講演が行われた.

特別講演は,「数理的側面」と「実験的側面」をつなぐ話題を選んだ上で，3 名の講演者を選定して依頼を行った。まず流体現象からの話題として,

- 浅水域における 2 次元弱非線形孤立波の相互作用の解析：Mach 反射における Benney-Luke 方程式と KP 方程式
- 界面成長とランダム行列の不思議な関係 – 液晶乱流が示す実験証拠 –

という講演が行われ，2 次元孤立波，および液晶乱流に対する近年の知見が紹介された。液晶乱流での実験結果は，統計物理学の基礎的問題である普遍クラスの分類とも関係する話題であり，その方面からの話題として

- KPZ 普遍クラスにおける厳密解

というタイトルでの講演も行われた。これらの内容は，非線形波動現象およびそれを記述する数学モデルに関して，今後の研究の指針となるべき興味深い内容であった。

一般講演については，関連研究分野の先進的な内容に関する報告が主に行われた。提供された話題は数学や物理の純理論的なものから，実験やシミュレーションの話題を始め，工学的な応用を含んだ多彩なものとなり，聴衆の幅広い興味を集めた。内容を大別すると,

- 非線形波動・非線形力学系の実験と理論
- 離散系の理論と理工学上の諸問題への応用
- 可積分系の数理と応用

であった。2 日目の午後にはポスターセッションを行い，大学院生などの若手研究者をはじめとして多くの研究者が参加して，幅広い内容のプレゼンテーションが行われた。一般講演においては，総じて実験から理論までのレベルの高い講演がなされ，それを元に活発な討論が繰り広げられた。

本年度は，文部科学省グローバル COE プログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」との共催となった。同プログラムおよびその周辺には，本研究集会の研究協力者をはじめ，関連分野の研究者が在籍しており，それらの方々の参加によって研究集会がより活発なものとなった。昨年度までも同様の試みがなされており，良好な関係性が継続的に築き上げられつつある。

本研究集会は，数学や物理の理論的な話題から工学的な応用問題にいたるまで多彩なテーマを扱いつつ，講演が公募されて自由に発表できることが大きな特色である。しかも，その内容は単に羅列的に提供されているのではなく，多くの研究者が講演ごとに各自の視点から積極的に討論を行って議論を深め，また関連する話題についての情報交換も活発に行われた。非線形波動に関連する研究分野における多くのテーマの有機的なつながりは研究集会の当初の目的であるが，それは充分に果たし得たのではないかと思われる。本研究集会では大学院生や学部生をはじめとした若手研究者の発表の場としても有意義であった。彼らによる新鮮な視点からの発表や討論が行われたことは，特筆しておかねばならない。非線形波動の研究のような，さまざまなテーマが密接に関係し合う研究分野では，本研究集会のような場の存在が大変重要である。このような場を提供して頂いた応用力学研究所の存在意義を，あらためて実感させて頂いた。参加者を代表して心から感謝を申し上げたい。

講演プログラムと概要

10 月 27 日（木）

12:40-13:10　二項係数と **Sierpinski** 三角形
岩尾慎介（立教大学），増田哲（青山学院大学）
よく知られているように，Pascal の三角形を 2 を法として読み換えると，フラクタル図形のひとつである Sierpinski 三角形が得られる．本講演では，任意の素数べき p^q を法とした Pascal の三角形を考察し，そのハウスドルフ次元が $\dfrac{\log p(p+1)/2}{\log p}$ であることを示す．

13:10-13:40　超離散反応拡散系
村田実貴生（青山学院大学）
我々は微分方程式に対して超離散化を行う系統的な方法を確立した．その方法は 1 階の微分方程式や反応拡散方程式に適用できるものである．今回は 1 成分の反応拡散系として知られている Allen-Cahn 方程式について，その手法で得られる方程式とその定常解や進行波解などの厳密解について報告する．また，可能であれば 2 成分系についても言及したい．

13:40-14:10　**max-min** 束と **ECA**
池上貴俊（早稲田大学），高橋大輔（早稲田大学），松木平淳太（龍谷大学）
今まで ECA の時間発展則を max-plus 表現によって表記し，解析してきた．ところが，解けたルールにおいては max と＋でなく，max と min を基本演算とした構造でまとめられることがわかった．講演ではこの束と呼ばれる構造の定義，および ECA への通用について述べる．

14:20-15:20　【特別講演】浅水域における **2** 次元弱非線形孤立波の相互作用の解析：**Mach** 反射における **Benney-Luke** 方程式と **KP** 方程式
丸野健一（The University of Texas-Pan American）
２次元孤立波の相互作用の研究は、様々な物理現象に関連して、種々の解析的、数値的方法を用いて研究されてきた。弱非線形性・弱２次元性の仮定の下、浅水域における流体波の方程式、または、イオンプラズマ音波の方程式から KP(Kadomtsev-Petviashvili) 方程式が導出されたが、その KP 方程式は可積分系であり、可積分系研究において重要な役割を果たしてきた。近年、児玉と Chakravarty により KP 方程式のソリトン解の分類が成され、様々なソリトン相互作用を示す厳密解が見つかった。KP 方程式は流体波の方程式から弱非線形性・弱２次元性の仮定の下に導出されるため、これらの厳密解が実際の流体の孤立波相互作用をどの程度まで記述できるかを調べる事が必要である。より現実に近いモデル方程式のひとつとして、弱非線形近似ではあるが回転対称性を持つ Benney-Luke 方程式が考えられている。しかしながら、この方程式は非可積分であり、可積分系理論を、直接適用することはできない。2 本講演では、Benney-Luke 方程式の孤立波相互作用を調べるための手法を解説し、それによって得られる結果を報告する。解析手法は広田の方法と摂動法を基本にしたもので、これを用いて Benney-Luke 方程式の（近似的）２ソリトン解の具体的な表示を求め、孤立波が壁に対し斜め入射して起こる Mach 反射の問題を考える。この解から入射角に対し異なった相互作用パターンが得られ、その臨界角度を求める。次に、Benney-Luke 方程式の直接数値計算を行い、解析的に得られた臨界角度が数値的にも非常に良く一致する事を示す。この結果を KP 方程式の場合と比較し、KP 方程式の厳密解は実際の浅水域での Mach 反射における２次元弱非線形孤立波の相互作用を非常によく記述できることを示す。本講演の内容は児玉裕治氏（オハイオ州立大)、辻英一氏（九大・応力研)、Baofeng Feng 氏 (UTPA) との共同研究である.

15:30-16:00　**Korteweg** 力によって発生する流体現象の実験的アプローチ
伴貴彦（大阪大学)，山田 智博（同志社大学)，高木 洋平（大阪大学)，岡野 泰則（大阪大学)
2 溶液の相互溶解過程で発生する Korteweg 力は，100 年以上前に理論的に予測されながら，包括的な実験例がほとんどなされていなかったが，我々は組成依存型の流動現象を実験的に実現することに成功した.

16:00-16:30　ソリトンの有効相互作用：　ソリトン粒子力学の構築に向けて
角畠浩（富山大学)
ソリトン相互作用を記述する粒子力学にゲージ場的な相互作用を導入し，近似的に並進不変性を保たせることを試みる。

10 月 28 日（金）
9:30-10:00　離散半線形波動方程式の解の爆発に関する定理
松家敬介（東京大学)
非線形項が累乗関数の形をした非線形波動方程式の離散化を報告する。この離散方程式は元の偏微分方程式の解の爆発に対応した性質をもつ解が存在する。元の偏微分方程式が爆発解をもつ条件として空間次元に依存したものが知られており、その離散アナログが得られたことをあわせて報告する。

10:00-10:30　**Spiral** な境界条件を持つ離散 **KdV** 方程式とその有限体上への拡張
神吉雅崇（東京大学)，時弘哲治（東京大学)，間田潤（日本大学)
本講演では、spiral と呼ばれる境界条件のもとで離散 KdV 方程式を考察する。まず保存量の構成方法を紹介し、それらが超離散化できることをみる。次に方程式を有限体上で取扱い、特殊な孤立波現象が観測されることを紹介する。

10:30-11:00　R_{II} 格子と対応する箱玉系について
前田一貴（京都大学)，辻本諭（京都大学)
有限超離散戸田格子と箱玉系との対応関係が知られている．本講演では，直交多項式からの離散戸田格子の導出を一般化した，R_{II} 多項式からの（減算のない）R_{II} 格子の導出を考え，さらにこれを有限格子境界条件の下で超離散化することで得られる超離散系と，対応して現れる箱玉系について議論する.

11:15-12:15　【特別講演】界面成長とランダム行列の不思議な関係〜液晶乱流が示す実験証拠〜
竹内一将（東京大学理学部）
液晶乱流を舞台に、成長界面の揺らぎがランダム行列理論の様々な統計則に従うという実験結果を紹介する。数理モデルが示す固有値分布やエアリー過程が、スケール不変性のために成長界面の普遍的性質としてロバストに現れる様は極めて非自明である。

13:40-14:10　線形化可能な超離散 **QRT** 系の厳密解と特異点閉じ込めテストについて
三村尚之（青山学院大学），薩摩順吉（青山学院大学）
保存量を持つ 2 階非線形差分方程式として、QRT 系がある。一方、超離散方程式の可積分性判定法として、超離散特異点閉じ込めテスト (uSC) が提案されている。本発表では、線形化可能な超離散 QRT 系の厳密解を構成し、uSC を適用した結果との関連について紹介する。

14:10-14:40　超楕円曲線の加法と可積分系ー差分および超離散ー
野邊厚（千葉大学）
周期戸田格子などの可積分系の時間発展は超楕円曲線のヤコビ多様体における平行移動（＝加法）であることが知られている．このような加法は超楕円曲線と適当な曲線との交叉を用いて実現できるため，可積分系を平面の写像力学系として解釈可能である．本講演では差分系と超離散系を比較しながらこれらについて議論する．

14:40-15:10　**Periodic phase solitons: N-**ソリトン解と超離散化
広田良吾（早稲田大学名誉教授），太田泰広（神戸大学），長井秀友（早稲田大学）
周期的位相を持つソリトンを記述する双線形差分方程式の N-ソリトン解と超離散化を議論する。

10 月 29 日（土）
9:30-10:00　符号付き超離散 **Bessel** 方程式とその特殊解について
奈良　史貴（青山学院大学），儀島伸（青山学院大学），薩摩順吉（青山学院大学）
符号付き超離散化は符号が一定でない解を持つ差分方程式を超離散化する手法である。本講演では Bessel 方程式の符号付き超離散類似を提出し、その特殊解の構造を議論する。

10:00-10:30　**Darboux** 変換の一般化と準可換微分作用素
松島正知（同志社大学），大宮眞弓（同志社大学）
Dirac 作用素と Schrödinger 作用素は Miura 変換で結びついているが、この事を用いて Dirac 作用素に関する準可換微分作用素環を構築し、定常 KdV 階層に関する Darboux 変換の一般化を得た。

10:30-11:00　離散可積分系と線形回帰モデルの **D-optimal design**
關戸啓人 (京都大学)
回帰モデルが与えられたとき，最も精度よく推定できる説明変数の組を D-optimal design と呼ぶ．離散可積分系の時間発展が，回帰モデルにおいて事前情報を与えることに対応することを説明し，D-optimal design の構成法を述べる．

11:10-12:10　【特別講演】**KPZ** 普遍クラスにおける厳密解
今村卓史（東京大学先端科学技術研究センター）
KPZ 普遍クラスは界面成長等の非平衡系に現れ、その物理量 (界面の高さ等) の揺らぎは、時間の 1/3 乗に比例するという特徴をもつ。この性質は普遍的で、さまざまな数理モデル (各種界面成長モデルや、ASEP などの粒子モデル、ランダム媒質中のポリマーのモデルなど) に現れる。Kardar, Parisi, Zhang は 1986 年に非線形の確率微分方程式 (KPZ 方程式) を提唱し、上記の指数 1/3 等を解析的に導出した。KPZ 普遍クラスの数理的な理解は最近急速な進展を見せている。2000 年に RSK 対応等の組み合わせ論的な手法を駆使して ASEP におけるカレント分布の厳密解が得られた。また 2010 年からは、KPZ 方程式の厳密解も得られ注目されている。これらの厳密解は Fredholm 行列式を用いて表わされ、長時間極限においてランダム行列理論における最大固有値分布 (Tracy-Widom 分布) に等しくなる。また Painleve 方程式とも深く関連している。本講演では、厳密解のアプローチに基づいた KPZ 普遍クラスの数理的な側面を、我々の最近の研究を中心としてご紹介する。

13:30-14:00　反復関数の共役性および準共役性による **Sakaki-Kakei** 方程式の解の構成
近藤弘一（同志社大学）
Sakaki-Kakei 方程式は超幾何関数で表される保存量をもつ 12 種類の 2 次元非可逆離散力学系である．本論文では，Sakaki-Kakei 方程式の解の構成法を解説する．保存量を求め，方程式を 1 次元化し，その反復関数がもつ共役性または準共役性を利用し一般解または特殊解を構成する．

14:00-14:30　q 離散ドリンフェルト・ソコロフ階層と q パンルヴェ方程式
鈴木貴雄 (大阪市立大学)
本講演では、A 型リー代数に付随するドリンフェルト・ソコロフ階層の q 離散化について考察し、その相似簡約として神保・坂井による q パンルヴェVI 方程式の高階化となる差分方程式系が導かれることを示す。

14:30-15:00　古典直交多項式における **Bannai-Ito** 多項式について
辻本諭（京都大学），Luc Vinet(Centre de Recherches Mathématiques Universite de Montréal, Canada)，Alexei Zhedanov(Donetsk Institute for Physics and Technology, Ukraine)
Bannai-Ito 多項式の持つ古典性および Askey スキームにおける位置づけを明らかにした後，その他の古典直交多項式と異なる固有の性質について，代数的な観点から議論する．

ポスターセッション概要

(1)　超離散系におけるカルマンフィルター
白瀬裕己（三菱 UFJ 信託銀行），礒島伸（青山学院大学），薩摩順吉（青山学院大学）
カルマンフィルターは，線形系の誤差を伴う観測量から実際の物理量を推定するアルゴリズムとして広く用いられている．本講演では，線形系と同様の考え方で超離散系（区分線形系）に対するカルマンフィルターを提案し，その性質や非線形問題への適用可能性を考察する．

(2)　中心多様体理論を用いた積型離散ハングリーロトカ・ボルテラ系の局所解析
飛田明彦（東京理科大学），福田亜希子（東京理科大学），石渡恵美子（東京理科大学），岩崎雅史（大阪市立大学），中村佳正（京都大学）
力学系の局所的な解挙動を調べる際，中心多様体理論が有効である．本発表では積型の離散ハングリーロトカ・ボルテラ系に対し中心多様体が存在することを示し，収束の最終局面において，解が平衡点に単調に近づくことを示す．

(3)　シフト付き **LR** 変換に付随する離散ハングリー系について
濱洋輔（東京理科大学），福田亜希子（東京理科大学），石渡恵美子（東京理科大学），岩崎雅史（京都府立大学），山本有作（神戸大学），中村佳正（京都大学）
非自励な離散ハングリー戸田方程式及び離散ハングリーロトカ・ボルテラ系に対し，シフト付き LR 変換との関連を明らかにすることで，ベックルント変換を導出する．さらに，離散ハングリーロトカ・ボルテラ系における差分間隔がシフト量に対応することを示す．

(4)　**s2s-OVCA** の複数の渋滞が共存する定常解
宇治野秀晃（群馬工業高等専門学校），矢嶋徹（宇都宮大学），小熊和仁（東京大学）
超離散化された最適速度模型にスロースタート効果を取り入れた s2s–OVCA について，同じ速度を持つ複数の渋滞が共存する定常解を構成する．また定常解がこの模型の基本図を再現することを示す．

(5)　**s2s-OVCA** の線形化連続極限の定常解と安定性
矢嶋徹（宇都宮大学），宇治野秀晃（群馬工業高等専門学校），小熊和仁（東京大学）
スロースタート効果を取り入れた最適速度 CA において，各変数の時間発展が漸近安定なものであるかどうかを調べるため，連続モデルとしての s2s-OV モデルを取り上げ，線形化して定常解まわりの平面波状の摂動の振る舞いを調べる．この摂動が安定に伝わる場合と，不安定成長が観察される場合とに分類し，安定な解が存在する条件を検討する．

(6) **A study of Hopfions and vortices in the extended Skyrme-Faddeev model**
戸田晃一 (富山県立大学)，澤渡信之（東京理科大学)，L. A. Ferreira（サンパウロ大学）, Juha Jaykka
Skyrme-Faddeev 模型（Skyrme 項をもつ SO(3) 非線形 σ 模型）はグルーボールを記述するとされる模型である。今回は，この Skyrme-Faddeev 模型に新たな項（高階微分項）を追加した，extended Skyrme-Faddeev 模型の，4 次元ミンコフスギー時空での Hopfion 解と渦解に対する厳密解析および数値解析の結果を報告した。

(7) 離散可積分系による非交叉歩道の数え上げ
上岡修平（京都大学）
離散戸田方程式等の離散可積分系は、直交多項式等の直交関数系や連分数との関係を通じて、格子上の歩道（径路）等の組合せ論的対象の数え上げ問題に結び付く。本講演では離散戸田方程式とその行列式解（分子解）に着目し、それを用いて三角格子上の非交叉歩道（non-intersecting walks）の数え上げ問題を解く。

(8) 超離散化された線形波動方程式と戸田格子方程式
儀保伸吾（九州大学）
線形波動方程式は音波や電磁波など多くの現象を記述するために重要な方程式である. 本研究では, 線形波動方程式の超離散化を試みた. また, 得られた結果と戸田格子方程式との関係についても議論する。

(9) 口蹄疫伝染パターンと変形 **SIR** モデル
松島弘典（同志社大学)，大宮眞弓（同志社大学）
口蹄疫の伝染パターンの数理モデルとして、インフルエンザの流行の数理モデルである SIR モデルを改良し、2010 年に宮崎県内で流行した口蹄疫の実際のデータに限りなく近い変形 SIR モデルを構成した。

(10) **A Combinatorial Method for the Vanishing of the Poisson Brackets of an Integrable Lotka-Volterra System**
伊藤栄明（統計数理研究所）
The combinatorial method is useful to obtain conserved quantities for nonlinear integrable systems, as well as the Lax representation. Here we extend the combinatorial method and introduce an elementary geometry to show the vanishing of the Poisson brackets of the Hamiltonian structure for a Lotka-Volterra system of competing species.

(11) **Van der Pol equation for the oscillation of stock price by majority orienting traders**
伊藤栄明（統計数理研究所）
We consider an interacting particle system for the stock price fluctuation. The change of the stock price with a feedback by the price gives the van der Pol equation as a deterministic approximation (H. Takahashi and Y. Itoh (2004)). Considering the investment position of each trader, we introduce the delayed van der Pol equation. The history of investment positions, for example sell or buy, of each trader for a stock makes a memory effect, which is modeled by using the time retardation (T. Yamashita and Y. Itoh (2007)).

(12) **Bottom Up and Top Down Design of Ultra Discrete Burgers Cellular Automata for Simulating Traffic Flow**
中田一紀（九州大学 INAMORI Frontier Research Center）
We propose bottom up and top down design for digital VLSI implementation of multiple-value cellular automata for simulating traffic flow. Recently, a family of the Burgers cellular automata (BCA) has been extremely extended for modeling multi-lane traffic flow using the ultra discrete method. The family of BCAs is suitable for digital VLSI implementation because of the discreteness in time and space, and state values in addition to the logical update procedure represented as max and min operators. As a first step, we designed unit circuits for implementing the elementary BCA, and verified fundamental operation in networks with the circuit simulator SPICE. Based on the results, we discuss the bottom up and top down design for large-scale integrated circuit implementation of the family of BCAs.

(13) **(n+1,n)** 型分割に付随した **Painleve** 系
山本聖爾（立教大学）
本研究では、分割 $(n+1, n)$ に対する A 型 Drinfeld-Sokolov 階層を相似簡約することで、新しい高階 Painlevé 型常微分方程式系を導く. この方程式系は $2n$ 階 Hamilton 系として記述され、$A_{2n}^{(1)}$ 型 affineWeyl 群対称性を持ち、超幾何解を持つ.

(14) 区分線形型 **FitzHugh-Nagumo** 方程式の逆超離散化
大川豪（立教大学），筧三郎（立教大学）
神経細胞のモデルである FitzHugh-Nagumo 方程式においては，非線形項の選び方にいくつかのバリエーションがある。その 1 つである区分線形型非線形項の場合 (McKean model) に対し，方程式の持つ定性的な性質を保つような逆超離散化を提案する。

(15) 連立 **Euler-Poisson-Darboux** 方程式の対称性
三澤彰宏（立教大学），筧三郎（立教大学）
いわゆる “Euler-Poisson-Darboux 方程式” が sl2 対称性を持つことは良く知られている。本研究では，1 つの拡張として連立型 Euler-Poisson-Darboux 方程式を考察し，それが sl2 対称性を持つことを示す。また，連立型の場合の昇降作用素についても，具体的に構成できる。

(16) 立体魔方陣と有限体
宮川文香（立教大学）
白川俊博氏は、魔方陣に関する懸賞問題の 1 つである「積で成立する立体魔方陣で３６４未満の数からなるもの」という問いを、サイズ 4 に対して解いた。本研究では、白川氏の魔方陣の背後の幾何的構造について解析する。

開催の期間　　平成 23 年 10 月 27 日 ～ 平成 23 年 10 月 29 日

参加者　　69 名

平成23 年度 九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会

「非線形波動研究の進展　－現象と数理の相互作用－」

期間：　2011 年 10 月 27 日(木) 12:30 ～ 29 日(土) 15:10
場所：　九州大学筑紫地区総合研究棟(C-CUBE) 1F 筑紫ホール
共催：　文部科学省グローバル COE プログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」

１０月２７日（木）

12:30-12:40　諸連絡

12:40-13:10　岩尾慎介（立教大学），○増田哲（青山学院大学）
二項係数と Sierpinski 三角形

13:10-13:40　○村田実貴生（青山学院大学）
超離散反応拡散系

13:40-14:10　池上貴俊（早稲田大学），○高橋大輔（早稲田大学），松木平淳太（龍谷大学）
Max-min 束と ECA

14:10-14:20　休憩

14:20-15:20　○丸野健一（The University of Texas-Pan American）
【特別講演】浅水域における２次元弱非線形孤立波の相互作用の解析： Mach 反射における Benney-Luke 方程式と KP 方程式

15:20-15:30　休憩

15:30-16:00　○伴貴彦（大阪大学），山田智博（同志社大学），高木洋平（大阪大学），岡野泰則（大阪大学）
Korteweg 力によって発生する流体現象の実験的アプローチ

16:00-16:30　○角畠浩（富山大学）
ソリトンの有効相互作用： ソリトン粒子力学の構築に向けて

１０月２８日（金）

9:30-10:00　○松家敬介（東京大学）
離散半線形波動方程式の解の爆発に関する定理

10:00-10:30　○神吉雅崇（東京大学），時弘哲治（東京大学），間田潤（日本大学）
Spiral な境界条件を持つ離散 KdV 方程式とその有限体上への拡張

10:30-11:00　○前田一貴（京都大学），辻本諭（京都大学）
R_{II} 格子と対応する箱玉系について

11:00-11:15　休憩

11:15-12:15　○竹内一将（東京大学理学部）
【特別講演】
界面成長とランダム行列の不思議な関係 ～液晶乱流が示す実験証拠～

12:15-13:40　休憩

13:40-14:10　○三村尚之（青山学院大学），薩摩順吉（青山学院大学）
線形化可能な超離散 QRT 系の厳密解と特異点閉じ込めテストについて

14:10-14:40　○野邊厚（千葉大学）
超楕円曲線の加法と可積分系　ー差分および超離散ー

14:40-15:10　○広田良吾（早稲田大学名誉教授），太田泰広（神戸大学），長井秀友（早稲田大学）
Periodic phase solitons: N-ソリトン解と超離散化

15:10-15:20　休憩

15:20-16:00　矢嶋徹（宇都宮大学），宇治野秀晃（群馬工業高等専門学校）
【追悼講演】和達三樹先生を偲んで

16:00-16:10　休憩

16:10-17:50　ポスターセッション

18:00 ～　懇親会

１０月２９日（土）

9:30-10:00　○奈良﨑史貴（青山学院大学），礒島伸（青山学院大学），薩摩順吉（青山学院大学）
符号付き超離散 Bessel 方程式とその特殊解について

10:00-10:30　松島正知（同志社大学），大宮眞弓（同志社大学）
Darboux 変換の一般化と準可換微分作用素

10:30-11:00　○關戸啓人(京都大学)
離散可積分系と線形回帰モデルの D-optimal design

11:00-11:10　休憩

11:10-12:10　○今村卓史（東京大学先端科学技術研究センター）
【特別講演】KPZ 普遍クラスにおける厳密解

12:10-13:30　休憩

13:30-14:00　○近藤弘一（同志社大学）
第１型および第１２型 Sakaki-Kakei 方程式の自己準共役性と特殊解

14:00-14:30　○鈴木貴雄(大阪市立大学)
q離散ドリンフェルト・ソコロフ階層と qパンルヴェ方程式

14:30-15:00　○辻本諭（京都大学），Luc Vinet, Alexei Zhedanov
古典直交多項式における Bannai-Ito 多項式について

15:00-15:10　諸連絡

ポスターセッション（１０月２８日（金），16:10-17:50）

1 白瀬裕己（三菱 UFJ 信託銀行），○儀島伸（青山学院大学），薩摩順吉（青山学院大学）
超離散系におけるカルマンフィルター

2 ○飛田明彦（東京理科大学），福田亜希子（東京理科大学），石渡恵美子（東京理科大学），岩崎雅史（大阪市立大学），中村佳正（京都大学）
中心多様体理論を用いた積型離散ハングリーロトカ・ボルテラ系の局所解析

3 ○濱洋輔（東京理科大学），福田亜希子（東京理科大学），石渡恵美子（東京理科大学），岩崎雅史（京都府立大学），山本有作（神戸大学），中村佳正（京都大学）
シフト付き LR 変換に付随する離散ハングリー系について

4 ○宇治野秀晃（群馬工業高等専門学校），矢嶋徹（宇都宮大学），小熊和仁（東京大学）
s2s-OVCA の複数の渋滞が共存する定常解

5 ○矢嶋徹（宇都宮大学），宇治野秀晃（群馬工業高等専門学校），小熊和仁（東京大学）
s2s-OVCA の線形化連続極限の定常解と安定性

6 ○戸田晃一（富山県立大学），澤渡信之（東京理科大学），L. A. Ferreira（サンパウロ大学），Juha Jäykkä (University of Leeds)
A study of Hopfions and vortices in the extended Skyrme-Faddeev model

7 ○上岡修平（京都大学）
離散可積分系による非交叉歩道の数え上げ

8 ○儀保伸吾（九州大学）
超離散化された線形波動方程式と戸田格子方程式

9 ○松島弘典（同志社大学），大宮眞弓（同志社大学）
口蹄疫伝染パターンと変形 SIR モデル

10 ○伊藤栄明（統計数理研究所）
A combinatorial method for the vanishing of the Poisson brackets of an Integrable Lotka-Volterra system

11 ○伊藤栄明（統計数理研究所）
Van der Pol equation for the oscillation of stock price by majority orienting traders

12 ○中田一紀（九州大学 INAMORI Frontier Research Center）
Bottom up and Top down design of ultra discrete Burgers cellular automata for simulating traffic flow

13 ○山本聖爾（立教大学）
(n+1,n)型分割に付随した Painleve 系

14 ○大川豪（立教大学），筧三郎（立教大学）
区分線形型 FitzHugh-Nagumo 方程式の逆超離散化

15 ○三澤彰宏（立教大学），筧三郎（立教大学）
連立 Euler-Poisson-Darboux 方程式の対称性

16 ○宮川文香（立教大学）
立体魔方陣と有限体

共同利用研究集会

「東シナ海の循環と混合に関する研究」

"Workshop on the vertical processes in the shelf region of the East China Sea"

研究代表者　石坂丞二（名大地球水循環研究センター）

１．目的と開催経過

東シナ海の生物環境は、長江起源の栄養塩に大きく依存していると同時に、陸棚域の下層に分布する栄養塩の寄与も小さくないと考えられている。下層に分布する栄養塩は表層で生産された有機物が沈降して分解されたものの他に、黒潮亜表層以深から輸送されたものも含まれる。これらの栄養塩が東シナ海の生物生産に大きく寄与していることを考えると、陸棚域の基礎生産を念頭に置いて海水の循環と混合過程を議論することは、当海域の海洋環境を理解する上で必要不可欠である。

研究集会には名古屋大学地球水循環研究センターと九州大学応用力学研究所の他、愛媛大学、長崎大学、富山大学からの参加者があった。6 日は物理過程と生物・化学過程の２つのセッションを設け、物理過程では混合層中での乱流エネルギーの見積もり、黒潮への渦や台風の影響、海洋の海上風の励起に関して、生物・化学過程は主に亜表層クロロフィル極大と栄養塩躍層、低酸素水塊、栄養塩の循環に関して話題提供があり、議論を行った。7 日は今年予定されている共同研究航海に関して打ち合わせを行った。

２．研究集会の概要

日時：2012 年 2 月 6 日（月）　13:00～17:00
　　2 月 7 日（火）　9:30～12:00
場所：九州大学応用力学研究所 6F　W601

研究集会では東シナ海における循環と混合過程に焦点を当て、以下の２つのセッションを設けた。

（１）　東シナ海およびその周辺海域における物理過程について
（２）　東シナ海陸棚域における生物・化学過程について

１つ目のセッションでは、物理過程を中心に風の影響など、主として大気と関係した海洋の循環・混合過程の話題提供があった。九州大の遠藤は、九州大と名古屋大の研究グループで継続的に実施している東シナ海陸棚域での共同観測から、2007 年 10 月に東シナ海陸棚上で行われた乱流微細構造の時系列観測データを用いて、対流混合層内における乱流運動エネルギー収支の見積もった結果について報告した。散逸項には、乱流微細構造観測プロファイラーの測定値を用い、浮力生成項は、鉛直一次元の密度保存式を鉛直積分することにより計算し、シアー生成項は相似則を仮定して見積った。これらの項の残差として見積もられた輸送項は、混合層上部から混合層下部への乱流運動エネルギーの輸送に相当し、混合層深度と同じオーダーの密度逆転が生じていたという観測事実と整合的な結果を示した。この結果は観測に基いて表層混合層における乱流過程を評価したもので、かなり物理的専門性の高いものである

が、有光層内のプランクトンや物質の挙動の理解に繋がるものでもある。

愛媛大の Guo は、太平洋規模の PDO など気候インデックスと東シナ海周辺域の水位変動の関係という大規模な現象について話題を提供した。東シナ海における黒潮流量の変動は、2003 年を境にその特徴の変化を示し、2003 年以前には PDO に対応した変動が見られたのに対し、それ以降では特に台湾南東海域で形成される顕著な中規模渦に対応した変動が卓越するようになったことを示した。2003 年以降は渦に対応した変動が大きく、PDO に対応した変動は目立たなくなっている。このような大規模なスケール、またレジームシフトのような気候変動と陸棚域の生物環境との関連は現時点では明らかではないが、今後重要なテーマになる可能性が高い。

愛媛大の加古は気候値を用いて SSS と SST に相関があることを示し、そのことから低塩分水の存在が混合層直下の成層を強くして、それによって表層水温を上昇させていることを示した。さらにその表層水温の上昇が海上風を強化することを示し、その海上風の強まりがエクマン輸送を増加させることから、水温上昇によってエクマン輸送が 10%程度上昇することを示した。今後更に検討すべき点も議論されたが、長江希釈水の広がりが大気変動を経て更に表層循環に影響を与える可能性があることが示され、興味深い。

名古屋大の森本は台風の通過にともなって台湾の北東部の陸棚縁辺域で顕著な冷水域が発達する現象に注目し、大気海洋結合モデルを用いて、遠距離海洋レーダにより黒潮の移動が観測された 2005 年と 2009 年の台風通過を例に取り、黒潮の移動と基礎生産増加に関係する低水温水塊の動きに注目して行った解析の結果を示した。具体的には、低水温水塊は強い南東風による台湾の北での沿岸湧昇により陸棚上に供給され、台湾海峡付近の北東風により励起された台湾に沿った強い流れにより台湾海峡へ輸送されたこと、黒潮がなくても高気圧性の渦が生じること、沿岸湧昇や沿岸流の形成には台湾の存在が重要なこと、黒潮は陸棚上に供給された低水温水塊の鉛直輸送に重要なこと、などが示された。この研究では、台風通過に伴う正味の陸棚上への栄養塩供給は大きくない可能性が示されたが、台湾北東域での下層水の湧昇は陸棚域に供給される外洋起源の栄養塩の挙動と密接に関連しており、個々のプロセスを整理して理解する必要がある。

二つ目のセッションでは、特に陸棚域での最近の観測結果に基づいた生物・化学過程を含んだ話題提供が 5 件あった。最初に富山大の張は、2000 年以降に東シナ海陸棚縁辺部および外部陸棚域で行われてきた観測データを整理し、低酸素水とクロロフィル極大層の分布と挙動の特徴を示した。特に 2003 年以降のデータからクロロフィル濃度を海域で積算し、単位面積あたりのクロロフィル量が同じ季節では比較的一定していることを示した。年によって長江希釈水の分布が異なることを考慮すると興味深いが、これが何を意味しているか、今後検討する必要がある。さらに、次年度以降に計画している広範囲の白鳳丸の観測や、中国海洋大学の観測計画などが紹介された。

九州大の松野は、昨年 6 月の名古屋大学における研究集会での報告に引き続いて、主として 2011 年 7 月に長崎丸で観測されたクロロフィル極大の特徴について、2010 年以前の特徴と比較しながら紹介した。2009、2010 年の 7 月には 20m付近にクロロフィル極大があったのに対し、2011 年にはクロロフィル（蛍光光度）の極大は 30m付近に見られ、それは成層の下部（それ以深は海底混合層）に位置していたことを示した。前年までとの相違の理由については、栄養塩の分布や光の条件との比較など、今後の検討が必要である。

長崎大の梅澤は 2009 年から 2011 年の観測航海から得られた東シナ海陸棚域における窒素とリンの分布と挙動について、特に硝酸と酸素同位体に注目した報告を行った。生物生産の高い表層・亜表層で、

軽い硝酸が生物に取り込まれることによって重い窒素同位体の比率が高くなることを示し、同位体組成の計測から生物生産活動を把握する視点を紹介した。有光層内での再生産の量的評価に応用できる可能性についても議論されたが、何を基準にするかなど難しい問題もあり、今後の研究の進展が期待される。

長崎大の武田は枯渇状態にある表層での栄養塩のナノモルレベルでの観測の試みと、鉛直的に解像度の高い栄養塩の分布測定の結果について紹介した。航走中に実施された表層栄養塩の測定では比較的高栄養塩も見られ、浮遊していた青のりとの関連が示唆された。また、1～3m毎の採水から計測された栄養塩は、非常に顕著な栄養塩躍層や非常に薄いクロロフィル極大層の存在を明らかにしたが、これはクロロフィル極大の形成や鉛直拡散の寄与の評価について再検討が必要になるような興味深い結果であった。

最後に名古屋大の鋤柄は、2010 年,2011 年 7 月に長崎丸によって実施された漂流ブイを追跡しながらのセディメントトラップの結果について報告した。そして、東シナ海夏季の沈降粒子について、20m 以浅では有光層中の生物起源粒子、30m 以深では堆積物由来の粒子が多く含まれていたことから、海面下 30m 程度まで海底からの再懸濁の影響があることを示し、また、沈降粒子の有機成分は、2010 年と 2011 年で大きく異なり、海域の成層構造や栄養塩環境に強い影響を受けていたことを示す結果を紹介した。実際、上述のように 2010 年と 2011 年とでは成層構造に大きな相違があり、クロロフィル極大の深さも 10m程違っていた。今後、成層構造や栄養塩の分布と各層における有機物の沈降量との比較から、栄養塩循環に対する沈降有機物の寄与の割合が明らかになってくることが期待される。

総合討論では、これらの最近の研究成果を踏まえて、今年夏季および秋季に計画されている長崎丸と淡青丸の航海で、どのような観測をすべきかなどについて議論を行った。

具体的な観測計画については、特に観測に関心のある参加者が改めて翌日に議論の場を設け、様々な視点から観測の方向性などについて検討を行った。これらの議論に基づいて、それぞれの観測の担当者から、測線・測点図の案を作成し、さらに観測計画を詰めていくことが確認された。

プログラム

2012 年 2 月 6 日（月）

13:30－13:50　遠藤 貴洋・松野 健・吉川 裕・堤 英輔
夜間の対流混合層内における乱流運動エネルギー収支の見積もり

13:50－14:10　Endro SOEYANTO, Xinyu GUO○, Jun ONO,Yasumasa MIYAZAWA
Interannual variability in the sea level and Kuroshio transport in the East China Sea detected by a data assimilation ocean model

14:10－14:30　加古真一郎・磯辺篤彦
長江希釈水が励起する東シナ海陸棚上における海上風の変化

14:30－14:50　森本昭彦・相木秀則・吉岡真由美・坪木和久
台風通過に伴う台湾北東陸棚上での低水温域の発生

14:50－15:10　休憩

15:10－15:30　張勁・藤城義久・松野健
最近 10 ケ年の東シナ海観測結果からみる低酸素水塊及び Chl-max 水塊の挙動

15:30－15:50　松野　健・遠藤貴洋・吉川 裕・堤 英輔・石坂丞二
2011 年夏の長崎丸航海における Chl-max と鉛直混合の観測結果

15:50－16:10　山口聖・梅沢有
東シナ海の窒素・リンの分布と挙動－2009 年～2011 年航海のまとめ

16:10－16:30　武田重信・江藤祐輔・迎 雄一
夏季の東シナ海表層における長江起源水の拡がりと栄養塩の動態

16:30－16:50　鋤柄　千穂・三野　義尚・Sarat Chandra Tripathy・石坂　丞二・松野　健
夏季東シナ海中央部における粒子状物質の生成・沈降過程について

16:50－17:20　総合討論とまとめ

2012 年 2 月 7 日（火）

09:30－　2012 年の観測計画（長崎丸・淡青丸）について

平成２３年度

核融合力学分野
共同研究成果報告

23 FP－1

透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発

京都大学工学研究科・高木郁二

課題番号：23FP-1
研究課題：透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発
研究期間：H23 年 4 月 1 日－H24 年 3 月 31 日
所内世話人：図子秀樹
協力者：6 名（澤田憲一、古田美憲、図子秀樹, Sanjeev Kumar Sharma, A. Rusinov, 井上雄貴）
配分額：校費（5 万円), 旅費（15 万円）

目的：

QUEST の水素リサイクリングモニターの構築と粒子バランスの定量評価法の確立を目指す。特に壁粒子吸蔵と放出の遷移条件の背景物理を調べるために、壁への水素束モニターの開発を行う。これまでの Ni 薄膜での透過計測に加えて、Pd 薄膜を用いたプローブ計測を行い、拡散・再放出モデルの正当性を評価する。

実施方法：

QUEST 装置並びにプラズマのリサイクリングの研究のために２つの方法を用いる。第１は設置済みの透過プローブを用いた水素束の絶対評価と時間応答計測である。本年度は Pd 薄膜による透過束の計測を行い、特に壁での散乱水素束の効果を調べるとともに、拡散・再結合モデルの適用を図り、リサイクリング過程における再放出の評価への基礎とする。第２は放電管内の粒子総量の収支を調べるためにバッファータンクとバラトロン差圧計による入射粒子数の評価、ポンプヘッドでの圧力計測と排気速度を用いた排気量の評価及びクライオ再生時の圧力上昇を用いた積算排気粒子総量評価を行う。

実験結果：

１）　透過プローブを用いた水素束の絶対評価

真空容器内壁に入射する局所水素原子束を評価するため図１に示す PDP probe 計測を行う。Pd 薄膜（直径 16 φ、厚さ 0.1mm）を透過した水素透過量を QMA (Quadrupole mass analyzer: 四重極型質量分析計)で測定する。大気開放中に H_2O として壁表面に吸着した多量の水素原子の除去過程を放電洗浄プラズマ中の H_2O 分圧低下と合わせて壁への水素束変化を PDP として系統的に調べた。文献１で示すように Ni 薄膜を用いた透過束計測により、１）透過束が水素発光強度と３桁程度の dynamic 範囲で正相関を示すこと、２）透過曲線が Ni 物性値（拡散係数、再結合係数）の温度依存性を考慮した、拡散・再結合モデルで再現できること、３）これらより壁へ実効入射水素原子束が評価可能であること　を明らかにした。さらに実験当初に透過薄膜直前の仕切り板の開閉により直接及び散乱原子束の比較を行い、ほとんど入射束が散乱原子束で支配されていることを明らかにした。今回 Pd 薄膜に変えることにより新たな物性値で透過曲線を取得し、１）薄膜によらない透過・再結合モデルの正当性の確認、２）壁面散乱原子束の薄膜入射束への寄与の評価　を中心に観測を

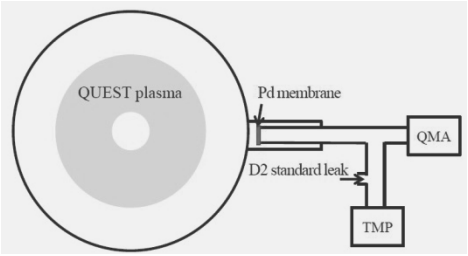


図１　PDP probe 概要

行った。２つのシステムの違いは薄膜の違いだけでその他は全く同じである。図２に 15 分の ECR 放電洗浄プラズマを間隔を置いて 2 回繰り返したときの透過曲線をしめす。第１の波形は薄膜前面に仕切り板を置き、直接入射束の寄与をなくしたものであり、第２は仕切版を取り除き、直接入射成分＋散乱入射成分の双方の寄与を調べたものである。第１放電での透過束が完全に薄膜内を透過完了以前に、第２の放電を行っているため、薄膜内初期値は異なっているがこのシーケンスを逆にしても同様な結果が得られている。即ち透過束は直接入射成分の存在によって増大している。どの程度仕切版によって入射成分が遮られているかは、拡散・再結合モデル計算によって評価した。図２は Pd の物性値を用いて計算した結果と観測値の比較を行ったものである。ここで、上流(plasma 側)、下流（裏面）の再結合係数は約３倍程度の比を仮定し、拡散係数は文献値を用いた。両者の比較は非常によく、この比較から入射束の比が 1.65-1.8 であると見積もることに成功し、入射束として 1.65×10^{17} H/m²/s を得た。

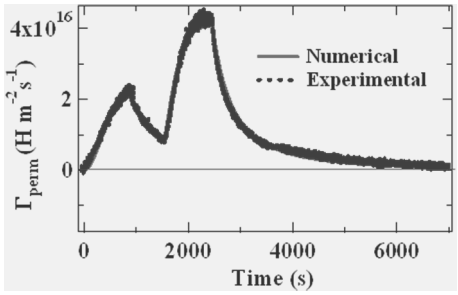


図２　First Pulse: F_1 = 1E17　H/m²s,Ku = 5×10^{-31}m⁴/s,Kd = 1.7×10^{-31}m⁴/s, T = 500 K,D = 2.9×10^{-7} exp(-0.230/kT), Second Pulse :F_2 = 1.65 * F_1

２）　総粒子数収支の絶対評価[2]

QUEST 装置における水素の壁吸蔵・放出量を評価するために，以下の三つの方法をもちいる．　(1) CRYO ポンプ吸蔵圧測定法, (2) 静的粒子バランス測定法, (3) 動的粒子バランス測定法 それぞれに利点・欠点がありこれらを組み合わせて、精度よく粒子バランスを計測する。(1)では排気を CRYO ポンプのみでおこない，再生時の圧力測定により積分量を測定し、積分した粒子注入量との差より壁排気を評価する。実験装置全体での長時間スケール(一日から一週間程度)の水素吸蔵･放出量を測定することができる．（２）は排気がない状態で，プラズマ生成前後の真空容器内の圧力測定をおこなうことによって，静的な水素の壁吸蔵・放出量を評価する．入射したガス量に対する水素の壁吸蔵・放出を，プラズマ 1 ショット単位の時間スケールで評価することができる．（３）は通常の実験を行いながら、注入量とポンプの排気速度・圧力から排気量を評価するものである。一例を図 3 に示す。

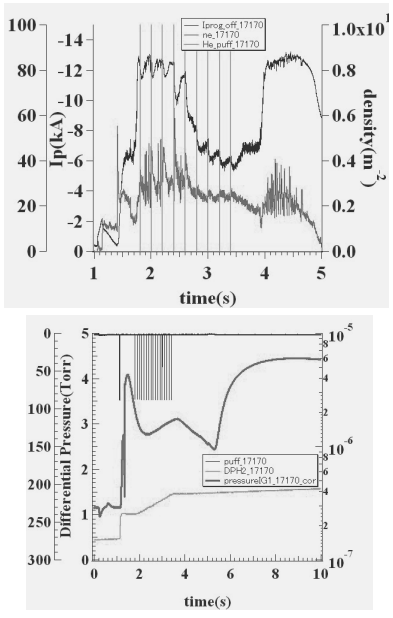


図 3（上）ガス注入時の密度と電流の時間発展 (下)注入粒子数、排気圧力の時間発展

今後の課題と予定：

今後は本格的な定常放電で計測を行い，壁での粒子束の時間変化、リサイクリングの時間変化を調べる。

参考文献

[1] S.K.Sharma,　I. Takagi: Journal of Nuclear Materials **420** (2012) 83-93

[2] 井上雄貴,高木郁二他、プラズマ核融合学会九州支部　2011 12

23 FP－2

金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響

京都大学原子炉実験所　徐　虬　　義家敏正
九州大学応用力学研究所　渡辺英雄

1．目的

フェライト系ステンレス鋼は核融合炉構造材料の候補材として挙げられてきた。一方、核融合炉開発のための技術の発展と共に、金属中のヘリウムの挙動についての研究が盛んになってきた。プラズマ対向材料中のヘリウムは核融合プラズマから材料表面に侵入するものと材料内部で核反応(n,α)により生成したものである。これらのヘリウム原子が中性子照射によって形成された原子空孔と結合し、材料のスエリングを起こし、材料の力学特性が劣化する。本研究では、フェライト系ステンレス鋼の最も単純なモデル金属と考えられる純鉄に対して、ヘリウムと転位、原子空孔型欠陥の相互作用を調べることを目的とする。

２．実験方法

試料はφ5mm×0.1mm の純鉄（99.999%、昭和電工製）の 3 種類試料（良く焼鈍された試料、転位と原子空孔が導入された試料）を実験に用いた。10%の圧延により転位を導入した。圧延した時に導入された原子空孔は高温での焼鈍により、陽電子寿命が検出できない程度まで消滅させた。焼鈍温度は 673K で、焼鈍時間は 1 時間であった。原子空孔は室温で電子線照射により導入した。電子照射エネルギーと照射量はそれぞれ 8MeV と $9.25\times10^{20}e^{-}/m^{2}$ である。陽電子寿命測定により電子線照射によって格子間原子集合体がほとんど形成されず、微細な原子空孔集合体だけが形成されたことが確認された。その後、すべての試料に対して、マグネットセパレータ付 He イオン銃（オメガトロン社製）を用いてヘリウム注入をした。イオン注入装置においては、バリアブルリークバルブで He ガスの流量を調整し、イオンガンコントローラーでフィラメントの電流や加速電圧等を調整した。He イオンカレントは、ファラデーカップによりを測定した。He イオンビームを均一にするために、ファラデーカップは Φ3 mm と Φ6 mm の 2 つを用いた。その後、試料に He イオンを注入した。なお、He 注入前の真空度は 10^{-5} Pa オーダーで He 注入中はおよそ 2×10^{-4} Pa である。ヘリウム注入は室温で、弾き出し損傷がほとんどできない加速電圧 100eV で行った。ヘリウム照射量は 1.0×10^{20} He^{+}/m^{2} であった。注入後、1523K まで昇温脱離ガス分析法（TDS）によりヘリウムの放出を調べた。昇温速度は 1K/s であった。

３．実験結果と考察

表 1 にヘリウム注入前後の良く焼鈍をした試料、転位を導入した試料及び原子空孔導入した試料の陽電子寿命を示している。陽電子寿命測定値から良く焼鈍した試料に欠陥がほとんどないこと、転位を導入した試料に転位だけが入っていること、原子空孔を導入した試料に 4 個前後の原子空孔集合体が入っていることが分かった。また、ヘリウム注入しても原子空孔導入した試料以外に陽電子の寿命はほとんど変わらなかった。原子空孔導入した試料はおそらくヘリウムが原子空孔集合体に入ることにより陽電子寿命は短くなった。

ヘリウム注入前後の陽電子寿命測定値

条件	平均寿命τ_m(ps)	短寿命τ_m(ps)	長寿命τ_m(ps)	長寿命成分の Intensity (%)
良く焼鈍した試料	106.5	—	—	—
ヘリウム注入後の良く焼鈍した試料	106.3	—	—	—
転位導入した試料	117.6	—	—	—
ヘリウム注入後の転位導入した試料	120.1	—	—	—
原子空孔導入した試料	168.2	82.1	263.1	41.2
ヘリウム注入後の原子空孔導入した試料	158.4	105.3	238.4	40.1

図 1 から 3 まではヘリウム注入した焼鈍材、転位導入材、原子空孔導入材のヘリウム放出と昇温温度の関係を示している。図 1 に示している TDS の結果からは 500K にヘリウムの放出ピーク A が得られた。これは試料の表面によりトラップされたヘリウムである。図２に示すように転位のヘリウム放出ピークは 920K である。図 3 に微細な原子空孔集合体(約 4 個)にトラップされたヘリウムの放出ピークは 1100K

である。室温で純 Fe 中に単原子空孔の移動ができるので、単原子空孔だけが存在する試料を作れない。従って、単原子空孔によりトラップされたヘリウムピークが得られなかった。

４．まとめ

本研究では、陽電子消滅寿命測定法を用いて、試料の組織を制御しながら、ヘリウムと転位、微細な原子空孔集合体の相互作用を調べた。TDS の結果から転位と微細な原子空孔集合体（約 4 個）から放出されたヘリウムのピークはそれぞれ 920 と 1100K であった。

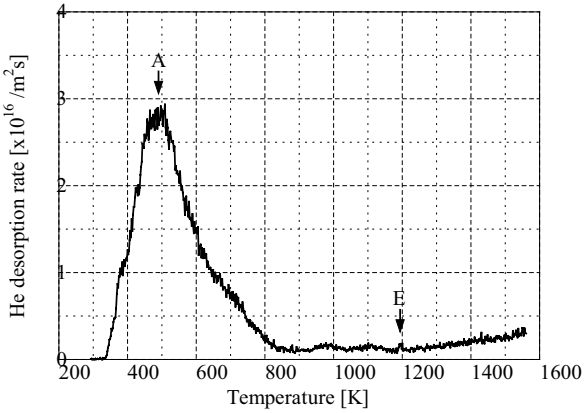


図１　良く焼鈍した Fe のヘリウムの放出

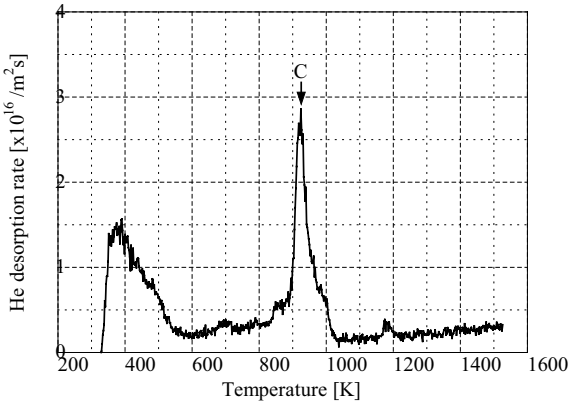


図２　転位が導入された Fe のヘリウムの放出

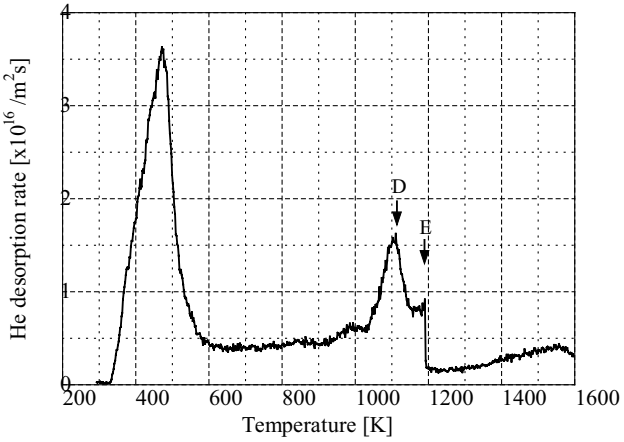


図３　微細な原子空孔が導入された Fe のヘリウムの放出

23 FP－3

タングステン中の水素同位体保持特性に及ぼす照射欠陥の影響

富山大学　水素同位体科学研究センター　波多野雄治

１．はじめに

核融合炉プラズマ対向材料としてタングステン(W)が有望視されており、安全性の観点からトリチウム保持特性の解明が急務となっている。著者らは日米科学技術協力事業 TITAN 計画のもとで中性子照射 W 中の水素同位体保持特性を調べ、欠陥の捕獲効果により照射前に比べ水素同位体保持量が著しく増大することを見出し、保持量低減とトリチウム除去法の開発に向けた研究の必要性を提言している[1,2]。一方、中性子照射は照射条件の制約が大きく、試料の放射化などの問題もあり、実験精度には限界がある。また、照射キャプセル体積の制限から、試験できる材料種もおのずと限定される。そこで、並行したイオン照射による広範かつ精緻な実験が不可欠と考え、本共同利用研究を推進している。今年度は粉末冶金法で作製した W 試料にイオン照射で欠陥を導入したのち、その損傷組織を極力変化させないようガス吸収法で重水素（D）を導入し昇温脱離測定を行った。その結果、照射により脱捕獲エネルギーが 2 eV 程度の強い捕獲サイトが形成されていることを明らかにした。加えて、粉末冶金材と比べ構造材上への施工が容易な真空プラズマ溶射 W（VPS-W）について、照射前の水素同位体保持特性を調べた。

２．実験

(1) イオン照射粉末冶金 W 中の水素同位体保持特性

粉末冶金法で製造された再結晶 W に 20 MeV の W 自己イオンを室温で照射し、0.5 dpa の損傷を導入した。中性子照射とイオン照射で最も大きく異なる点の一つに、照射欠陥の深さ方向分布が挙げられる。すなわち、中性子照射では欠陥がバルク中に均一に導入されるのに対し、イオン照射では表面極近傍のみで損傷が起こる。20 MeV の W 自己イオンを用いた場合の損傷領域の厚さは約 2 μm である。一方で、プラズマ曝露等により W 中に水素同位体が高濃度に導入されると、ブリスタや亀裂等が発生し、表面近傍の微細組織が大きく変化する。そこで本研究では、W 自己イオン照射で形成された損傷組織を極力変化させずに水素同位体を導入することを目的として、照射試料を 673 K で 1.2 または 100 kPa の D_2 ガスに 10 時間曝露した。そののち、D 保持量を昇温脱離法（TDS）により測定した。

(2) VPS-W の水素同位体保持特性

VPS 法は構造材料上に比較的容易に W 層を形成できるが、W 層が多孔質になりやすいという問題点もある。これまでに水素同位体プラズマへの曝露試験等が行われているが、プラズマは直接気孔中には浸入せず主に表面と相互作用するだけなので、気孔の影響を含むバルクの水素同位体保持特性は十分には解明されていない。本研究ではガス状水素同位体が開気孔中に容易に浸入することに着目し、(1)の場合と同様に VPS-W 試料を D_2 ガスに曝露し保持量を調べた。試料には約 873 K で低放射化フェライト鋼 F82H 上に形成された厚さ 0.6 mm の VPS-W 層(気孔率 0.6% [3])を用いた。まず真空中で 600、800、1000 ℃に加熱することで脱ガス処理したのち、400 または 600 ℃で 10 kPa の D_2 ガスに 2 時間曝露し、D 保持量を TDS により評価した。

３．結果及び考察

図 1 に W イオン照射再結晶 W を 100 kPa の D_2 ガスに曝露したのちの TDS スペクトルを示す。D 保持量

は 3×10^{20} m^{-2} であり、損傷領域中の平均濃度は D/W = 4×10^{-3} 程度に達していることが明らかとなった。また脱離ピークが 670℃付近に現れており、これは脱捕獲エネルギーが 2 eV 程度の強い捕獲サイトの存在を示している。中性子照射でも同様の強い捕獲サイトが形成されることがわかっており、イオン照射で中性子照射と同等の捕獲サイトが形成され得ることが確認できた。Van Veen ら[4]はボイドの内壁に吸着した水素同位体の脱捕獲エネルギーが約 2 eV であると報告している。実際に再結晶 W に室温で 2.4 MeV の Cu イオンを照射した場合にナノボイドが高密度に形成されることが観察されており、ボイドが照射 W 中の水素同位体捕獲に重要な役割を担っている可能性が高い。すなわち、合金化や組織制御でボイドの生成を抑制できれば、トリチウム保持量を低減できるはずである。そこで 2012 年度は合金化の効果を調べる予定である。なお、1.2 kPa で曝露した際には D 保持量は 1/7 程度に低下した。ジーベルツ則から固溶 D 濃度は約 1/9 に減少すると予測されるが、これに対応して捕獲 D 濃度が低下したものと考えられる。すなわち、高温では捕獲-脱捕獲平衡により水素同位体保持量は固溶濃度に依存して変化する。プラズマ曝露下では入射と再放出のバランスで固溶濃度が決まるため、表面を極力清浄に保ち再放出を活性化させることでもトリチウム保持量を低減できる可能性がある。

VPS-W 中の D 保持量を図 2 に示す。600℃で脱ガス処理したのちの D 保持量は 2×10^{21} m^{-2} であった。VPS-W 中に均一に D が分布しているとすると、平均濃度は D/W = 10^{-4}～10^{-5} 程度となる。本実験条件下での固溶濃度は溶解度[5]から D/W = 10^{-9}～10^{-11} 程度のはずであり VPS-W 中の欠陥や不純物に D が捕獲さていることがわかる。一方で、1000℃で脱ガス処理すると D 保持量は 2 桁減少した。加熱の効果により欠陥が回復し、捕獲サイト密度が低下したと考えられる。成膜工程を確立することで微細組織を最適化すれば、VPS-W 中のトリチウム保持量を低減できる可能性がある。照射効果については今後の課題である。

謝辞

本研究で用いた再結晶 W 試料は日本原子力研究開発機構より、また VPS-W 試料は核融合科学研究所 LHD 計画共同研究（NIFS09KOBF017）において製作されたものの提供を受けた。謝意を表する。

参考文献

[1] M. Shimada et al., J. Nucl. Mater. **415** (2011) S667.

[2] M. Shimada et al., Phys. Scr. **T145** (2011) 014051.

[3] Y. Yahiro et al., J. Nucl. Mater. **386–388** (2009) 784.

[4] A. Van Veen et al., J. Nucl. Mater. **155-157** (1988) 1113.

[5] R. Frauenfelder, J. Vacuum Sci. Technol. **6** (1969) 386.

国際会議発表

[1] Y. Hatano et al., Effects of Neutron and Ion Irradiations on Retention of Hydrogen Isotopes in Pure Tungsten, 15th Int. Conf. Fusion Reactor Mater. (ICFRM-15), Oct. 16-22, Charleston, SC, USA.

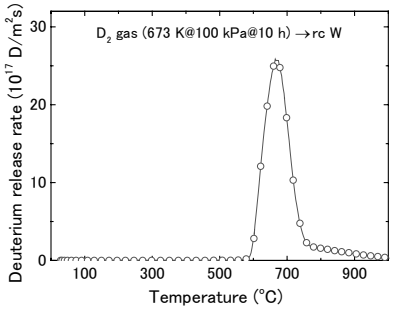


図 1　W 照射再結晶 W を 400℃で D_2 ガスに曝露したのちの TDS スペクトル

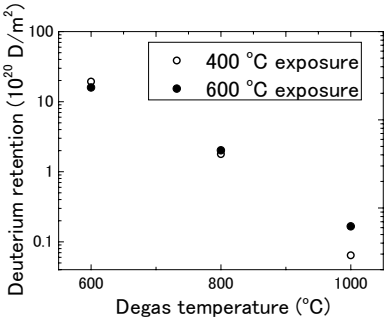


図 2　VPS-W の D 保持量の脱ガス処理温度依存性

23 FP－4

QUEST 装置における VUV 分光法による不純物の振舞いに関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

課題番号：23FP-4
研究課題：QUEST 装置における VUV 分光法による不純物の振舞いに関する研究
研究期間：H23 年 4 月 1 日－H24 年 3 月 31 日
所内世話人：図子秀樹
協力者：４名（図子秀樹，Sanjeev Kumar Sharma，董春鳳，王二輝）
配分額：校費（３万円），旅費（１０万円）

目的：

磁場閉じ込め装置・QUEST の不純物挙動を VUV 分光計測法を用いて調べ，プラズマ制御に関する知見を与えると共にプラズマ性能の向上に貢献する．

実施方法：

QUEST 装置に背面照射型 CCD 検出器付２０ｃｍ直入射真空紫外分光器を設置し，300-3000Å域に存在する不純物発光線を観測することにより，不純物の振舞いを調べる．

実験結果：

QUEST 装置でのオーミック及び ECH の高速電子を用いた電流駆動時の不純物の振舞いを調べた．図１にオーミック放電時の典型的な VUV スペクトルを示す．図から明らかなようにプラズマ中の不純物は炭素及び鉄が支配的である．酸素の発光は弱くその他窒素等の不純物も明瞭には確認できない．ちなみに LHD ではこのような低電離の鉄スペクトルは観測できないが，電子温度の違いで発光体積が異なっているのも一因と思われる．これ以上の価数のイオンは観測できないので，おおよそ電子温度は 50－100eV 程度と推測される．密度が低い（おおよそ $10^{11}cm^{-3}$）為か水素発光線（Lyα）が不純物発光線に比べて非常に強いのも特徴的である．通常のトーラス放電では CIV（1550Å）の強度がもっとも強くなる．

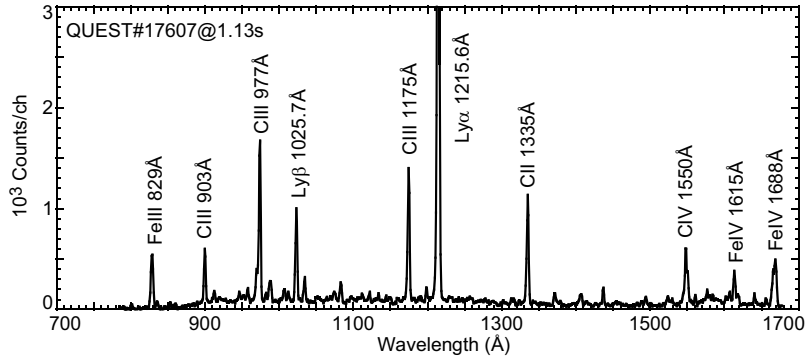


図１オーミック放電の VUV スペクトル

実際の電流駆動実験時のスペクトル観測には CCD に入射する硬 X 線の非常に大きな背景ノイズを処理する必要がある．一般に硬 X 線はエネルギーが大きく CCD 内で１個の光子が多量の電子，つまり大

きな計数率発生させる．まず大きな計数率を差分して得たスペクトルを図２a に示す. CIII 強度の時間変化が硬 X 線のパルスと共に認識できる．次にこのスペクトルを周波数分析し，パルス状の信号を除去した結果を図２b-f に示す．CCD のスペクトル位置に同時刻に大量の硬 X 線が観測される場合があり，完全には除去しきれない時間帯が存在するが，おおむねデータ処理で不純物の時間変化を得ることができた. 2 秒手前でオーミック放電から電流駆動へと放電が変化している．プラズマ中心の炭素の発光量（CIV）は一定であるのに対し，流入束を示す CII は時間と共に減少している．また，プラズマ中心部の FeIV も放電の時間発展に対して一定値を示している．これらの結果からプラズマと対向材料との大きな相互作用は発生していないと推測できる．

CCD で検出される硬 X 線の計数率の時間変化を図２g に示す．縦軸は CCD 内の硬 X 線による電子数であり, 硬 X 線の出力に比例する．硬 X 線出力は電流駆動開始後から連続的に増加している．この硬 X 線出力のエネルギースペクトルを図３に示す．入射 X 線は CCD 中で光電効果によりそのエネルギーを失い, 放出された電子は 3.6eV ごとに１個の電子を Si から電離させるので，ADC でデジタル変換する電子数と計数率の関係が分かれば入射 X 線のエネルギーを推測することができる．変換計数は LHD の結晶分光器を用いて計測している．現在の CCD を用いた計測ではおおよそ 100keV までの硬 X 線が観測されている. ただかなりエネルギーの低い X 線も同時に観測されているので, プラズマから直接分光器に入射してくる X 線も検出している可能性がある．

CCD 検出器で観測した硬 X 線出力とスペクトル強度との関係を図４に示す．図２からも明らかなように，炭素の場合にはその流入量と硬 X 線量とは逆の相関が見られる. 磁気面の形成との関係を示唆しているのかも知れない．プラズマ中心部に存在する不純物の場合には，硬 X 線出力に関わらず一定値を示しており，図４b で示す鉄の場合も同様である．主プラズマが有意な閉じ込め性能を有し，高エネルギー電子が相互作用する対向材領域との明確な区別が示唆される．

リミターにタングステンを使用しているが，タングステンからのスペクトルは明瞭には観測できなかった．X 線計測ではタングステンの特性 X 線が観測されているが, スパッタリングされている様子はなさそうである．

今後の課題と予定：

今回は電流駆動プラズマを解析したが，次回は本格的なオーミック放電で計測を行い，比較検討する．

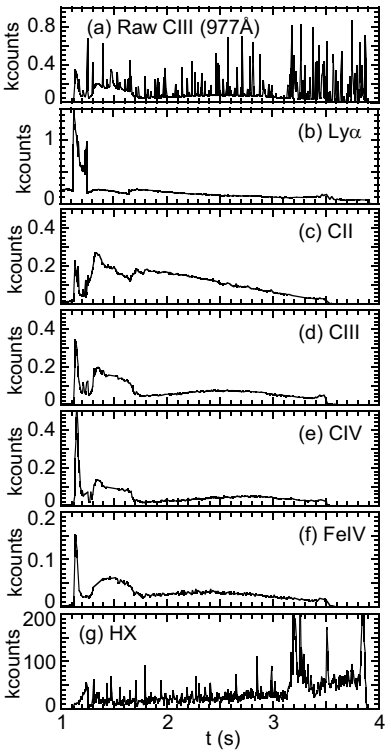


図２不純物時間変化

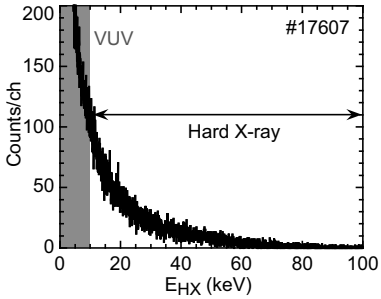


図３硬 X 線スペクトル

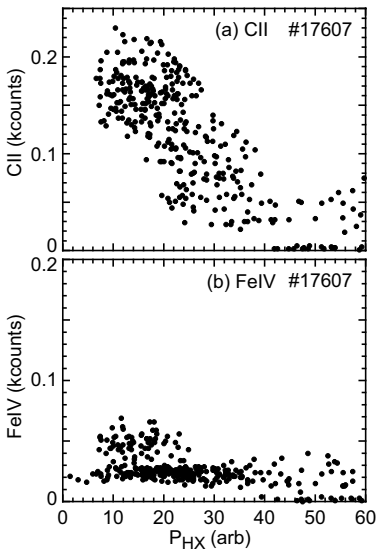


図４硬 X 線と不純物相関

23 FP－5

ドリフト波乱流中の渦構造に関する非線形シミュレーション研究

Nonlinear simulation on vortex structures in drift wave turbulence

高知高専・電気情報工学科　成行 泰裕

研究目的：

核融合プラズマ中には圧力・密度・温度勾配が普遍的に存在し、それらによってドリフト波乱流が励起される。このようなドリフト波乱流を記述する基本的な方程式としては、Hasegawa-Mima 方程式がよく知られている。 近年、熱の輸送現象に大きく寄与するドリフト波のミクロスケールの揺動の「寄り集まり(バンチング)」によって生じる周方向の流れの塊(ストリーマー)が 実験室プラズマ中で観測され、さらにこのストリーマー構造が Hasegawa-Mima 方程式から導かれる非線形方程式のソリトン解（渦構造）に対応していることが指摘された。しかし、Hasegawa-Mima 方程式では温度を0とした単一粒子種の運動を仮定しているため、温度比やイオン組成が構造の振る舞い・発展にどのような影響を与えるかは明らかにされていない。 本研究では、ドリフト波乱流中の渦構造における有限温度比およびイオン組成効果についての理論・シミュレーション研究を行う。

研究方法：

本研究の推進に当たっては、それぞれの研究グループが理論的・数値的に発展させた結果について、定期的に筑紫キャンパスに参集して議論を行うことを基本としている。

研究成果：

本年度はまず始めに、(1)反磁性ドリフトを考慮した Hasegawa-Mima 方程式、(2) 多種イオンプラズマ中の Hasegawa-Mima 方程式の導出を行い、それぞれの方程式系から KdV ソリトン解を導出した。その結果、(1)からはイオン-電子温度比 τ に対してソリトン解の振幅が $(1+\tau)^{-2}$ で減少すること、(2)からは密度比 η に対してソリトン解の振幅が $(1-z\eta+m\eta)^{-2}$ で減少することが分かった。ただし、z、m はそれぞれ陽子に対するイオンの電荷比、質量比である。

本年度は次に、ドリフト波乱流の非線形発展を詳細に議論するために、反磁性ドリフトを考慮した Hasegawa-Wakatani 方程式からイオン-電子温度比 τ を含む少数自由度モデル(VZSC モデル)の導出を行った：

$$\dot{X} = v\{(1+\tau)R - 1\} + \frac{1}{2(1+\tau)} fZU - \frac{1}{1+\tau} XY \qquad (1)$$

$$\dot{Y} = -eY + \frac{X^2}{2(1+\tau)} \qquad (2)$$

$$\dot{Z} = -\frac{e}{16} Z - \frac{(1+f)}{4(1+\tau)} XU \qquad (3)$$

$$\dot{U} = fv\{(1+\tau)R - f\}U - \frac{1}{2(1+\tau)} XZ \qquad (4)$$

式(1)-(4)は$\tau = 0$の時に通常の VZSC モデルと一致する（Figarella et al, Plasma Phys. Control Fusion, 2003)。このときの不安定性の閾値は$(1+\tau)R = 1$(R ：レイノルズ数)である。

考察・展望：

今後はイオン−電子温度比を含む VZSC モデルの詳細な解析を行うと共に、ドリフト波乱流中の渦構造の形成と不安定性の非線形発展の関係について議論するため、直接数値計算を行う。

公表状況：

[1]福永航平、成行泰裕、“ドリフト波乱流中の渦構造におけるイオン組成の効果”，地球惑星科学連合合同大会，PEM026-P05, 2010.

研究体制：

研究代表者：成行　泰裕（高知高専・電気情報工学科）
nariyuki@gm.kochi-ct.jp

所内世話人：矢木　雅敏
yagi@post.riam.kyushu-u.ac.jp

研究協力者：羽田　亨　（九州大学大学院総合理工）
hada@esst.kyushu-u.ac.jp

研究協力者：福永　航平（高知高専・専攻科）

23 FP－6

重水素イオン照射に伴う金属堆積層中水素同位体挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院　片山一成

【緒言】　核融合炉は、天然にはほとんど存在しないトリチウムを燃料とするため、燃料自己生産型システムとなる。従って、燃料サイクルシステムにおけるトリチウムの蓄積速度が生産速度を上回れば、一定期間の連続運転に必要なトリチウム量が不足する恐れがある。もっとも懸念されているのがプラズマ対向壁へのトリチウム蓄積である。トリチウムの蓄積機構は、対向壁への入射・拡散による蓄積と、再堆積層やダストなどの炉内生成物への蓄積に分けられる。プラズマ対向材料における水素同位体蓄積挙動に関しては古くから研究されており、多くの知見が得られている。一方、炉内生成物における水素同位体蓄積挙動については、実験データも少なく、蓄積機構も十分には解明されていない。本研究グループでは、金属再堆積層における水素同位体挙動の把握を目的として、スパッタ法を用いてステンレス鋼やタングステン等から堆積層を作製し、水素同位体蓄積及び脱離挙動に関する研究を行ってきた[1-3]。その結果、金属堆積層には多量の水素同位体が蓄積しうることがわかってきた。また、微細構造観察により、堆積層は数 nm の微細な結晶粒から構成され、多数の空隙が存在することも明らかとなっている。しかしながら、水素同位体プラズマ照射下での金属原子堆積過程において水素同位体がどのように捕捉されているのか、その解明には至っていない。本研究では、捕捉機構解明に向けた基礎データの取得を目的として、軽水素プラズマにより形成されたタングステン堆積層に高エネルギー重水素イオンを照射し、水素同位体捕捉量の変化を昇温脱離法により調べた。

【実験】容量結合型 RF プラズマによりタングステン(ニラコ社製)をスパッタリングして、基板上にタングステン堆積層を作製した。RF プラズマスパッタ装置の概略図を Fig.1 に示す。タングステン板(5cm×5cm,厚さ 0.1cm)を RF 電極に設置し、基板としてタングステン箔(2cm×0.5cm、厚さ 0.02cm)及び石英片(1cm×0.5cm、厚さ 0.1cm)をグランド電極に設置した。ターゲットを除く部分はステンレス製のメッシュでアースシールドをし、電極構造材の損耗を防いだ。また、グランド電極及び真空容器はアースした。ターゲットと基板間の距離は 10cm に設定した。放電前には、真空容器を 120℃、10^{-4}Pa 以下で真空加熱し、内壁に付着した水蒸気を除去した。吸着材充填塔を通過させてボンベ中の不純物水蒸気を除去した軽水素ガスをマスフローコントローラーにより流量を制御して、真空容器に導入した。圧力はピラニー真空計にて測定した。マスフローコントローラー及びピラニー真空計は、軽水素ガスにより事前に校正した。ガス圧が安定した後、100W の RF 電力を印加し放電を開始した。放電は 672 時間継続した。放電前後の基板質量変化をマイクロ天秤で測定し、堆積量を算出した。作製した試料への酸素混入率は、SEM-EDX により測定した。

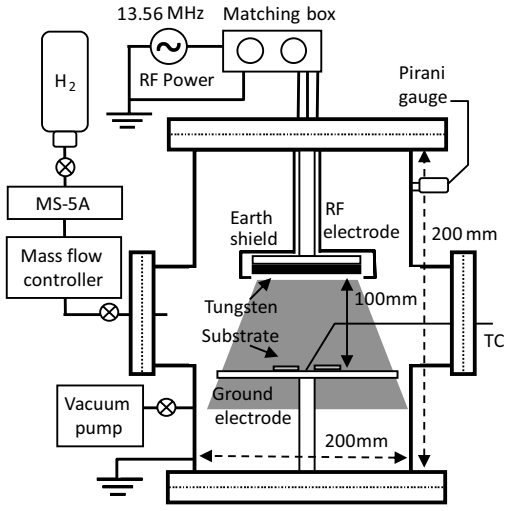


Fig.1 RF プラズマスパッタ装置概略図

各条件で作製した堆積層は、基板とともに 2 つにカットされ、一方を重水素イオン照射した。照射は、室温、300℃、500℃にて 2keV D_2^+を $1.0\times10^{21}D_2^+/m^2$ の照射量まで行った。照射時間は、イオンフラックスの変動により試料ごとにやや異なるものの 60 分程度であった。照射試料、非照射試料を真空雰囲気で加熱し、放出ガス成分を質量分析計にて測定した(TDS 実験)。TDS 実験では、昇温速度 1°C/s で 1000℃まで真空加熱した。

【結果及び考察】SEM-EDX による元素分析を行ったが懸念されていた不純物酸素は検出されなかった。図 2 に示すように堆積層表面には、5~15μm のブリスターが形成されていた。ブリスターは、金属中に高濃度で水素が注入されている場合に形成されると考えられており、堆積層形成時においてプラズマから水素が高濃度に注入されていることを示唆する。断面観察から、ブリスターの厚みは数 100nm であることがわかった。このことは、堆積層形成時にプラズマから入射した軽水素が数 100nm の深さまで拡散浸透していることを示唆する。

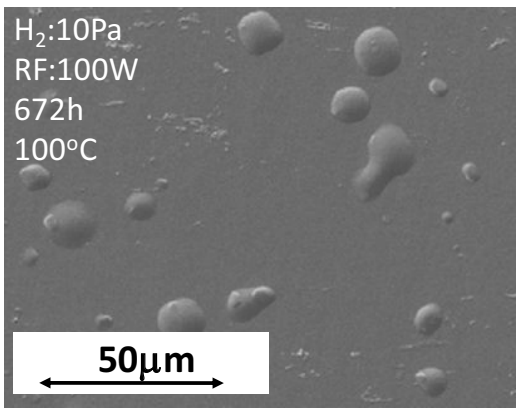


Fig.2 タングステン堆積層表面 SEM 像

Fig.3 に室温、300℃、500℃で重水素イオン照射した試料からの HD 及び D_2 の放出挙動を示す。いずれの照射温度においても、重水素の放出が観測された。このことは、堆積層形成過程においてターゲットから反射する高エネルギー水素が堆積層成長表面に入射され、内部に拡散浸透している可能性を示唆する。室温照射試料からは、昇温開始直後から放出が見られた。D_2 の大きなピークは堆積層表面の酸化膜に捕捉されていた重水素と考えている。HD と D_2 の放出ピーク位置が異なるが、HD のピークは H_2 の放出開始時間と一致しており、脱離表面において D 原子に比べて H 原子の割合が急増したため、D 原子の多くが HD として放出したものと言える。HD の放出は 400℃程度まで続いた。300℃照射試料からは、照射温度よりも低い 150℃程度から HD の放出が始まった。これは、照射中に可動性の重水素(捕獲されておらず堆積層内を拡散移動できる重水素)が多く存在し、照射後温度降下中に気相中に脱離できず残留したものによると考えている。室温照射に比べて、500-600℃で脱離する重水素量が増加した。500℃照射試料からも、照射温度より低い 400℃程度から HD の放出が始まっており、照射中に可動性の重水素が存在していたことを示す。500-600℃で脱離する重水素量は、300℃照射試料よりもさらに増加した。Fig.4 に各照射温度での軽水素と重水素の放出積算量を示す。軽水素・重水素とも室温と 300℃での放出量の差は小さく、500℃で大きく減少することがわかる。室温照射時は、入射された重水素の拡散速度が遅いため、堆積層深部への捕捉が生じなかった可能性がある。つまり、より長時間照射を続ければ、300℃照射試料に比べて遥かに高い重水素放出量となると推定される。来年度はより長時間の照射実験を行い、堆積層中の水素同位体飽和測量を定量する予定である。

【結言】　軽水素プラズマ照射下で形成されたタングステンに高エネルギー重水素イオン照射を行ったところ、重水素が高濃度で捕捉されることがわかった。このことは、堆積層形成過程においてターゲットから反射する高エネルギー水素が堆積層成長表面に入射され、内部に拡散浸透している可能性を示唆する。

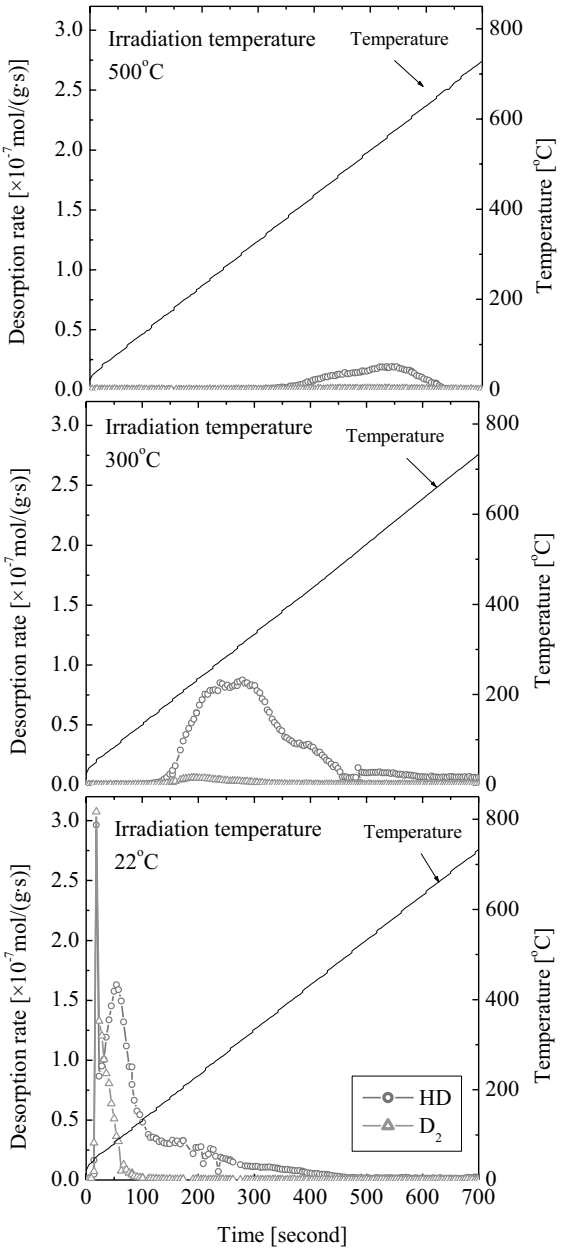


Fig.3 重水素イオン照射したタングステン堆積層からの HD,D_2 放出挙動

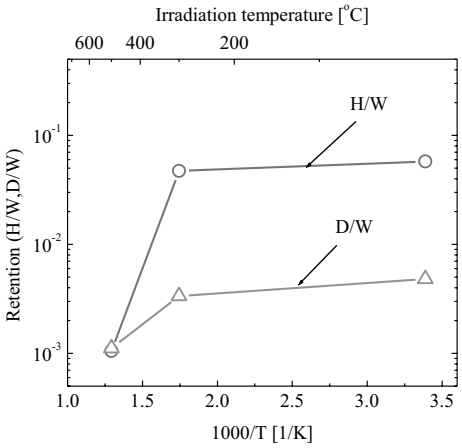


Fig.4 タングステン堆積層の水素同位体捕捉量の照射温度依存性

【成果報告】

[1] S.Ishikawa, K.Katayama, et al., “Desorption behavior of hydrogen isotopes from tungsten deposits caused by plasma exposure,” 10th ISFNT, 9/11-16 in Portland, USA.

[2] 石川進一郎,片山一成, 渡辺英雄 他, “タングステン堆積層における水素同位体挙動,”日本原子力学会秋の年会,9 月 20 日-22 日, 北九州市.

[3] 山口恭平,片山一成,石川進一郎 他, “核融合炉プラズマ対向壁における水素透過挙動に関する研究,”日本原子力学会九州支部会,12 月 17 日, 九州大学.

【参考文献】

[1] K.Katayama, K.Imaoka et al., Fusion Sci and Tech. 54 (2008) 549

[2] T.Fujiki, K.Katayama et al., Fusion Eng and Des. 85 (2010) 1094.

[3] K.Katayama, et al., Fusion Eng and Des. 86 (2011) 1702.

23 FP－8

第一原理計算によるタングステン中のガス元素吸蔵および拡散の研究

日本原子力研究開発機構　山口正剛

【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)ではプラズマ制御などの目的としてダイバータが導入される。しかし、このダイバータは炉材料の中で最も激しいプラズマ粒子の照射を受けるため、高い耐摩耗性、耐熱特性、低い水素溶解度といった優れた特性を持つタングステンで被覆される予定である。そこで、照射でタングステン中に侵入する水素と格子欠陥の相互作用は核融合炉の安定な運転に対して重要であると考えられ研究がされてきた。ところで、本研究でこれまで明らかになった重要な結論はタングステン中の空孔に捕獲された水素は他の金属空孔中の水素とは非常に異なる性質を持つことである。つまり、同じBCC構造を持つ鉄などの空孔に捕獲される水素の最大個数は6個であるのに対し、タングステン空孔に捕獲される水素は12個である。そこで、今年度はタングステンの特殊性を明確にするために、BCC構造を持つ遷移金属(V、Nb、Ta、Cr、Mo、W、Fe)の空孔と水素との結合エネルギーを計算した。

【BCC金属の族による類似性】

BCC金属は周期表（図1）を見るとある場所にかたまって存在することがわかる。V族とVI族の遷移金属と鉄、およびほとんどのアルカリ金属がBCC構造をしている。しかし、アルカリ金属は本研究では扱わないことにする。

BCC構造の遷移金属は水素に関しては元素が所属する族によって似た性質を持つことが知られている。V族の金属（V、Nb、Ta）は水素溶解度が高く発熱反応で多くの水素を固溶する。一方、VI族の金属（Cr、Mo、W）には水素は固溶しにくく、大きな溶解エンタルピーが必要な吸熱反応である。鉄（Fe）は強い磁性のためVIII族では例外的にBCC構造をしており、VI族よりも水素溶解度は高いが吸熱反応である。

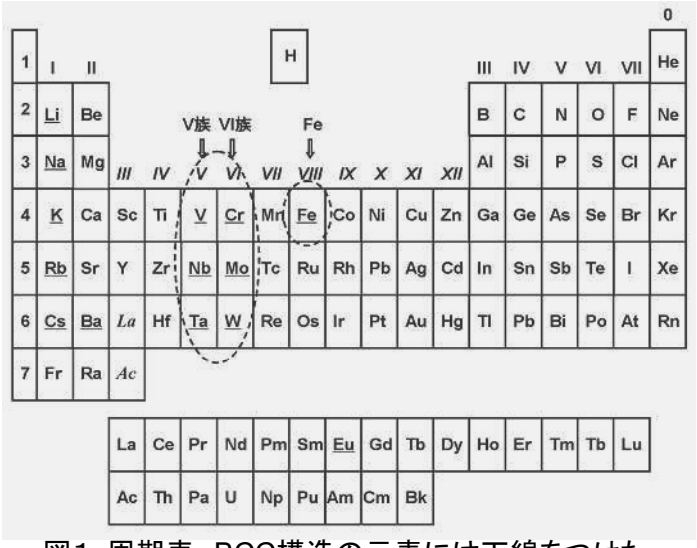


図1：周期表。BCC構造の元素には下線をつけた。

【第一原理計算】

本研究では第一原理計算の汎用コードであるVienna ab-initio simulation package (VASP)を使った。ポテンシャルは一般化勾配近似タイプ(GGA)のもの、K点の密度は5×5×5、原子緩和は各原子に働く力のが 0.003 eV/Å 以下になるまで緩和を繰り返した。スーパーセルはBCC格子で原子54個のものを使った。セルの体積も変化するセル緩和も行った。

【主な格子間原子サイト】

BCC結晶の主な格子間原子サイトは図2で示すようにOサイトとTサイトであるが、計算の結果Tサイトが水素原子の安定位置である。

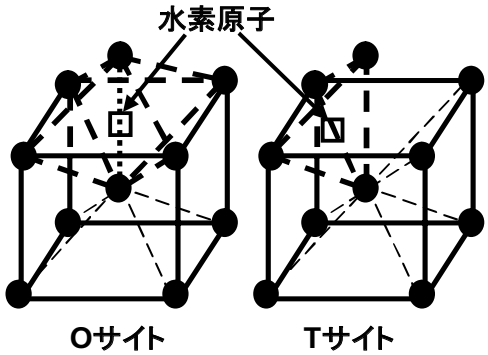


図2：BCC金属の主な格子間原子サイト

【水素の初期配置】

本研究では慎重に単空孔中の水素の安定構造を調べるために、水素の初期配置を多くとって緩和計算をした。従来の計算では水素は空孔内表面のOサイト近傍が安定であると言われてきた。そこで図3のようにOサイト付近を調べたが、乱数を使い水素の初期配置をある範囲で分布させるようにした。水素の個数が6個以上に増えた場合はTサイト近傍にある可能性も調べた。この計算法では正しい基底状態や予期しなかった多くの準安定構造を得ることができた。

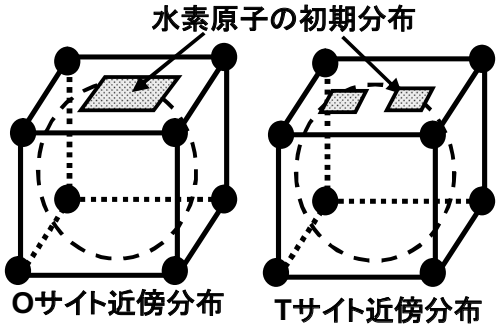


図3：乱数による水素の初期配置の分布範囲

【総結合エネルギーと空孔での水素の最大捕獲数】

図4は空孔内のm個数の水素が基底状態をとったときの空孔と水素の総結合エネルギーである。

$$E_{tot} = \{E(\mathrm{M}_{53}\mathrm{H}_m) - E(\mathrm{M}_{53})\} - m\{E(\mathrm{M}_{54}\mathrm{H}^{\mathrm{T}}) - E(\mathrm{M}_{54})\}$$

ここでEはスーパーセルの凝集エネルギー、MはBCC金属を表す。この式は空孔に水素が捕獲されたときのエネルギーの利得を表している。図4より総結合エネルギーが最初に極大になるまで水素が捕獲されるとすると、V族の遷移金属とクロムと鉄の空孔には最大で6個、モリブデンとタングステンの空孔にはそれぞれ10個と12個の水素が捕獲される。また、m=14のとき空孔中では水素分子が生成される。

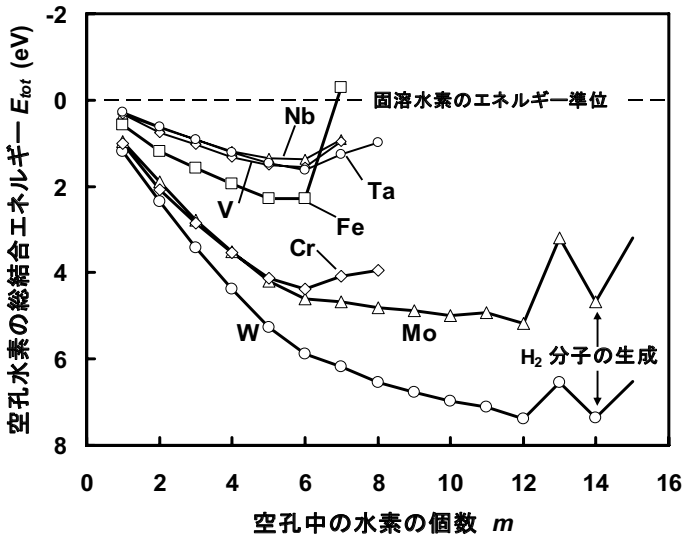


図4:水素の個数(m)と空孔水素の結合エネルギー(E_{tot})

【BCC金属空孔中での水素の構造】

空孔中の水素の構造は縮退した基底状態や数種類の準安定状態が存在する場合がある。以下に例を示す。

(1)水素6個の構造

図5の(a)と(b)は6個の水素の縮退した基底状態で、水素の位置はOサイトから少しずれている。(c)のように水素がOサイト近傍を占有している構造が以前は安定と報告されてきたが、実際は準安定構造である。

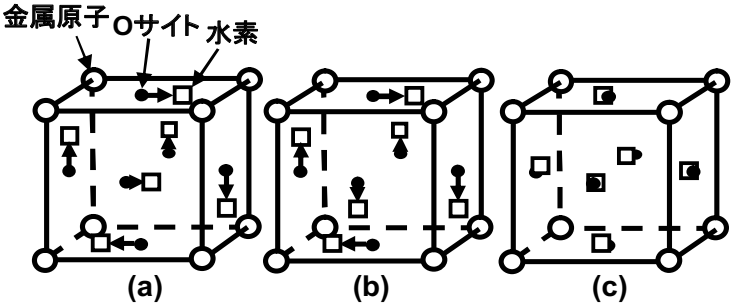


図5:(a)と(b)水素6個の縮退した基底状態。(c)準安定構造。

(2)水素6個以上の構造

図6のように(a)モリブデン空孔には10個、(b)タングステン空孔には12個まで水素が安定に捕獲される。

(3)モリブデン空孔中の水素の安定位置

図7にモリブデン空孔中の水素安定な位置の{001}面上への投影図を示す。中心がOサイト、格子定数は(d)である。1個の水素が捕獲されたとき、ほぼOサイトの付近に存在する。しかし、水素が4個、6個と増えるに従って安定な位置がずれ始め、10個捕獲されたときにはほぼTサイト付近にまで変位する。図6(a)にも示されている。

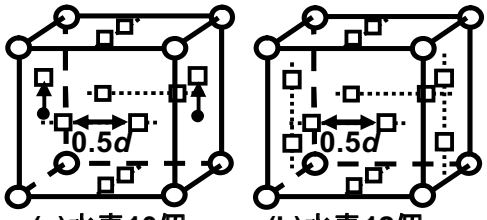


図6:(a)空孔内の水素10個と(b)12個の基底状態

【考察とまとめ】

BCC金属の空孔には6個まで水素が捕獲されると報告されてきた。しかし、正しく基底状態を計算するとタングステンとモリブデンの空孔には他のBCC金属より多くの水素が捕獲される(図4)。この原因はVI族の水素溶解度が極めて低いことと関係がある。つまり、無理に内部に侵入した水素は空孔のような隙間に移動することで高い溶解エネルギーを解放する。計算では水素1個あたり約1eVも安定化し、そのため空孔には多くの水素原子が集まると考えられる。

図7のように空孔内の水素は元々Oサイトが安定な位置である。しかし、水素間には反発力が働くために、空孔のような狭い場所ではお互いに距離をとるような配置を求めOサイトから大きく変位する。

タングステンやモリブデンは核融合炉の重要な材料である。しかし、以上に示したように水素との相互作用が特別な金属であることを考慮すべきである。

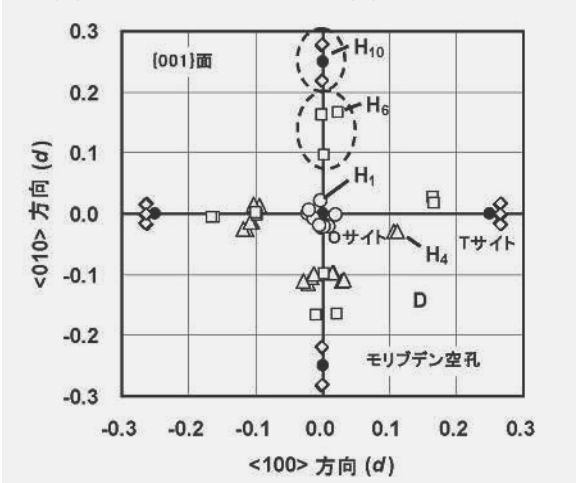


図7:モリブデン空孔内の水素の位置。○、△、□、◇は水素1、4、6、10個の捕獲に対応する。

【関連論文】K. Ohsawa, K. Eguchi, H. Watanabe, M.Yamaguchi and M. Yagi, Phys. Rev. B 85 094102 (2012).

23 FP－9

タングステン被覆低放射化材料の接合界面における微細組織–力学特性相関

京都大学エネルギー理工学研究所　木村　晃彦

１．目的

核融合炉ブランケットの第一壁では、低放射化構造材料の表面に、耐熱負荷特性や耐スパッタリング特性に優れ、さらに水素同位体リテンションの少ないタングステンを被覆・接合し、アーマ材として使用することが計画されている。しかし、タングステンと代表的な低放射化構造材料であるフェライト鋼の接合・被覆については、両者の熱膨張係数が大きく異なるため、熱疲労による破壊を考慮した適切な界面強度設計が必要となっている。

本研究では、真空プラズマ溶射法あるいは液相拡散接合（ろう付け）法によって、タングステン被覆・接合材を作製し、低放射化材料の接合界面における微細組織–力学特性相関を調べることで、優れた接合強度を得るための各接合条件を微細組織学的アプローチにより明らかにすることを目的とする。

２．方法

液相拡散接合に用いた材料は、市販の純タングステン(99.95%)板材(30x30x2mmt)および京都大学において開発されたフェライト系の酸化物分散強化（ODS）鋼(15Cr-2W-0.2Ti-0.35Y_2O_3)である。液相拡散接合条件は、接合温度 1250 ℃、接合圧力 10 MPa、接合時間 1 h および真空度 $4x10^{-3}$ Pa である。用いた１軸加圧ホットプレスの外観と内部の模式図を図１に示す。使用したインサート材は、液相拡散接合の要素も取り込んだ汎用のアモルファスインサート箔（A 箔：Fe-3B-5Si Wt%）、および固相拡散接合のための酸化物分散微細結晶粒バナジウム合金（ODSV：V-1.4Y-8W-0.8TiC）であり、厚さはそれぞれ 0.025-0.1mm と 0.2-1.0mm である。得られた接合材の接合組織を観察・分析し、界面強度を室温でのせん断試験により評価した。

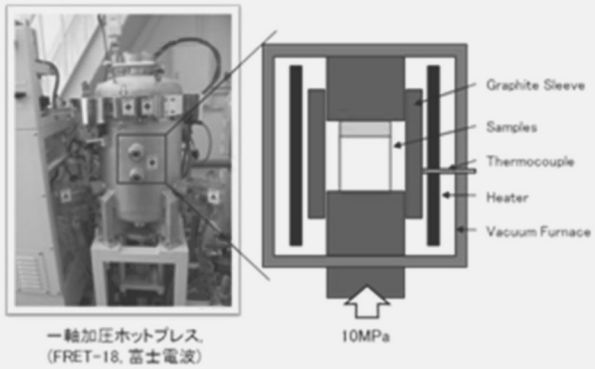


図１：加圧ホットプレスの外観と内部の模式図

図２に、インサート材を用いた W-ODSS の接合例を示す。インサート材の厚さは、接合前は 25μm であったが、接合後は 15μm に減少している。EPMA による接合後の接合界面近傍における元素分析結果は、接合界面に W、Cr および Fe が高濃度に分布する相互拡散相が存在すること、W が相互拡散層及びインサート材を超えて ODS 鋼側に拡散していることおよびインサート材中の B が相互拡散層及び ODS 鋼に拡散していることが明らかとなった。B の拡散は、接合時におけるインサート材およびインサート材に接する相互拡散層及び ODS 鋼の溶融に伴うものであり、B 化合物の形成が懸念される。また、W がインサート材を透過して ODS 鋼に拡散することが明らかになった。W は鉄中では脆化に寄与するとされている Fe_2W-Laves 相を形成するため、この場合も脆化が懸念される。

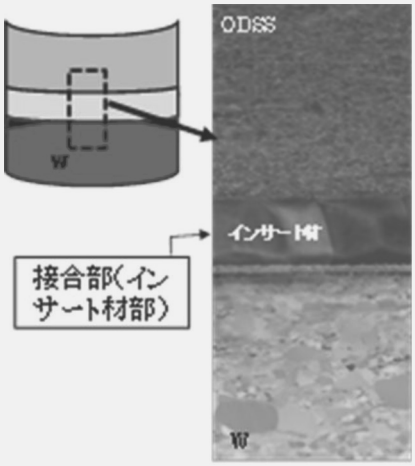


図２：インサート材を用いた W-ODSS 接合例

真空プラズマ溶射装置の外観と溶射条件をそれぞれ、図 3 および表 1 に示す。溶射の基板には低放射化フェライト鋼（F82H）を採用した。真空プラズマ溶射法によって作製したタングステン被覆材料に対し、接合界面におけるせん断強度評価試験および組織観察を行った。

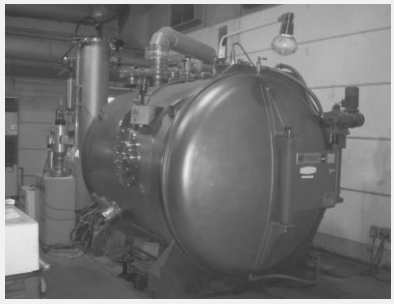


図 3：真空プラズマ溶射装置の外観

表 1：真空プラズマ溶射条件

Substrate	F82H steel (Fe-8Cr-2W)
Surface treatment	blast treatment
Bulk temperature	873 K
Average size of the W powders	18 μm(中粒)
Thickness of the coating layer	1.0 mm
Dimension	50 × 50 × 5 mm^3
spray distance	275 mm

３．結果と考察

液相拡散接合法により作製した接合材に対して実施した圧縮型せん断試験の結果を図 4 に示す。試験片の断面は 1.5 ㎜ x 1.5 ㎜である。接合界面強度との比較のために W に対してもせん断試験を実施した。グラフに見られる試験開始後の緩やかなせん断応力の上昇は試験片と治具の滑りによるものである。

破断強度は、いずれの試験片においても W より低い値を示している。一方、破断後の試験片の破断位置を観察すると、W 部で破断しており、測定された破断応力は、接合材の W 部の破断応力に相当しており、せん断試験中に曲げモーメントが発生した可能性を示している。すなわち、試験片に曲げが作用すると固定端から荷重の負荷点にかけてせん断力、曲げモーメントが作用し、厚さの小さい試験片では曲げによる影響が大きくなるため、試験片サイズ依存性を調査する必要がある。

W に比べ、接合部近傍の W の破断強度が小さくなる理由としては、接合時の残留ひずみの影響やインサート材の B の拡散が考えられる。接合による残留ひずみの発生は W の変形能を減少させ、靭性の劣化を齎すことから、接合部近傍の W の破断強度が低下する可能性がある。一方、接合部近傍の W の組成分析を実施した結果、B が検出された。この B は鉄中では融点降下元素であり、Fe インサート材に含まれていたもので、接合時に一旦溶融するが、周辺部への B の拡散により、インサート材の融点が上昇し、凝固する過程で W 中に取り込まれると考えられる。W 中での B の溶解度は低いため、ホウ化物が形成されて、W の靭性劣化を引き起こすと予想される。今後、微細組織観察を行う予定である。

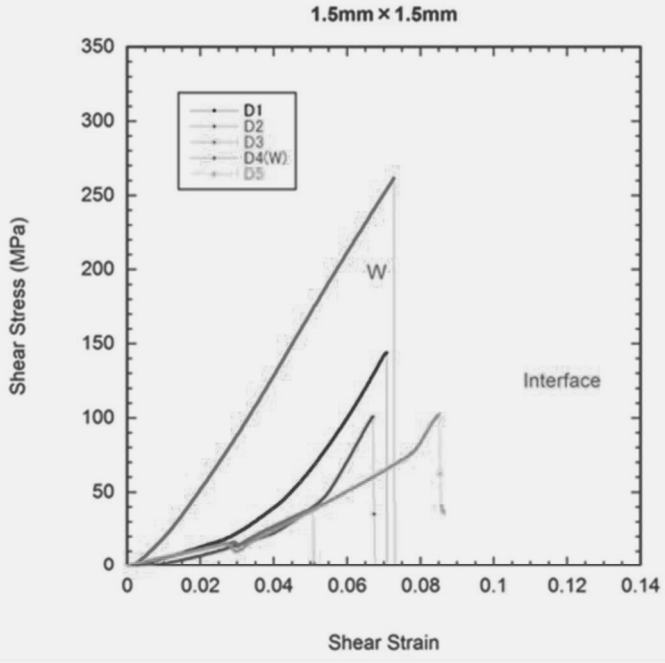


図 4：W-ODSS 接合材（1.5 ㎜ x1.5 ㎜）のせん断試験結果

４．結論

本研究により、W-ODS 鋼の液相拡散接合材においては、接合部よりも接合界面近傍の W 部がせん断変形に対して最弱部であることが分かった。接合時の W 母材への熱応力を減少させる適切な中間層の厚さを決定することと、W 母材部に強度低下をもたらさないインサート材を選定することが重要である。

次年度は、接合部の硬さや微細組織に及ぼすイオン照射の影響について調査し、耐照射性に優れた接合組織に関する基礎的知見を得る。

タングステン被覆低放射化材料の高熱負荷特性

京都大学エネルギー理工学研究所　笠田竜太

1. 諸論

原型炉以降の第一壁・ブランケットの構造材料及びダイバータ冷却管には、低放射化材料が使用される。低放射化材料の中でも、低放射化フェライト・マルテンサイト鋼が第一候補材料となっており、さらにスパッタリング及び熱特性に優れているタングステンを被覆・接合して使用することが検討されている。しかし、一般的に接合界面における強度は弱い場合があり、またタングステンと低放射化フェライト・マルテンサイト鋼は、熱膨張率が異なるため、熱負荷によって発生する熱応力により亀裂や剥離が発生することが考えられる。

本研究では、優れた「W被覆第一壁コンポーネント」の実現のための要素技術基盤の確立を目的として、プラズマ溶射法により試作した試料に対する熱負荷実験を行うと共に、有限要素法を用いた熱・応力解析を行い、熱特性を定量的に評価した。

2. 実験方法

試料は、低放射化マルテンサイト・フェライト鋼(F82H、Fe-9Cr-2W)の表面に減圧プラズマ溶射法(VPS 法)により W を 0.6mm 被覆することによって作製した。試料サイズは 10× 10× 5.6mm である。

本実験では、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷実験装置を用いた。使用した電子ビームエネルギーは 20keV、ビームサイズは 2.5~3.0mmφ で、試料表面の中心部分にビームを照射することで熱負荷を与えた。

実験は、ビーム照射時間が 210s(立ち上げ 30s、定常 180s)で、W 表面の温度が約 700℃(F82H 部分は 500℃)の定常熱負荷(実験 A)に加え、ビーム照射時間 60s、冷却時間約 140s(F82H の温度が 100℃に下がるまで冷却)、照射回数 30 回の繰り返し熱負荷(実験 B)を行った。また、ビーム照射時間 7s、冷却時間 200s 程度(F82H の温度が 100℃に下がるまで冷却)、W 表面の初期最高温度が約 1300℃(F82H 部分は 500℃)で照射回数 30 回の繰り返し熱負荷実験(実験 C)を行った。

熱負荷実験の模式図を Fig.1 に示す。試料は Cu 製の試料台に W 製の押さえ板を用いて機械的に固定した。ビーム照射中、VPS-W の表面温度を二色放射温度計を用いて測定すると共に、F82H の温度を熱電対を用いて測定した。さらに、照射前後の試料を光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡(SEM)、エネルギー分散型 X 線分析(EDS)を用いて観察及び分析を行った。

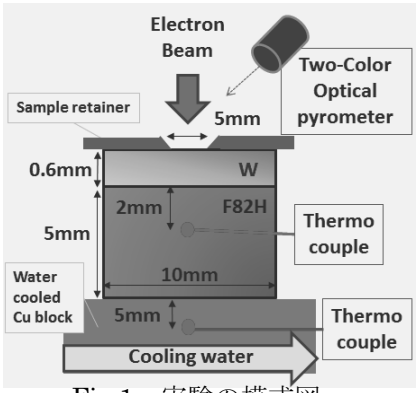


Fig.1　実験の模式図

3. 熱・応力解析方法

定常熱負荷実験時(実験 A)における定量的な熱特性の評価を行うために、有限要素法を用いた熱解析及び応力解析を行った。モデルは対象性を考慮して、実験で使用したモックアップの 1/4 モデルを使用した。さらに、温度依存性を考慮した熱伝導率、熱膨張率、弾性係数及びポアソン比を VPS-W 及び F82H モデルに定義した。これらの条件で、W 表面温度が約 700℃となった場合の温度分布を再現した。さらに、その際の温度分布図及び応力分布図を作成した。

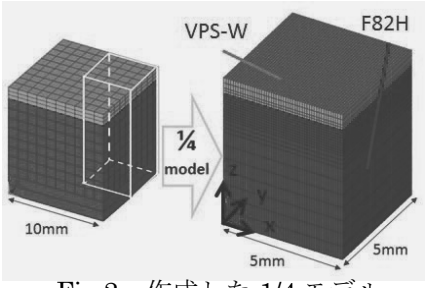


Fig.2　作成した 1/4 モデル

4. 実験結果

実験Aについて、VPS-W表面温度が700℃、F82H温度が500℃となり定常状態となった。F82Hの最高使用温度(550℃)を超えることなく実験を行うことができた。また、熱負荷後の損傷観察では、マクロ及びミクロな亀裂や剥離等は発生せず、健全性が保たれていることがわかった。

実験Bについて、30回の繰り返し熱負荷後も

各材料に温度変化は見られず、また照射後の損傷観察においても、VPS-W表面部には、ミクロな形状変化が発生していたが、マクロな亀裂や剥離等は発生せず、健全性は保たれていた。

実験Cについては、ビームの熱流束は30回ともほぼ同じであるが、10回目程度の熱負荷からW表面の温度が上昇し始め、同時にF82Hの温度が下がり始めていた。これはVPS-WとF82H間での剥離によるものと考えられる。一方、熱負荷実験後の損層観察では、VPS-WとF82Hの界面より約50μm上部のVPS-W部の層間で剥離が発生していることが分かった。

5. 熱・応力解析結果

Fig.3に、熱解析によるWの表面温度が約700℃時のW表面からの深さと温度の関係を示す。熱解析では、VPS-Wの熱伝導率(TC)をWの30%とした場合、VPS-W及びF82Hの温度は実験値とほぼ一致した値を得ることができた。この値は、レーザフラッシュによるVPS-Wの熱伝導測定結果とほぼ一致している[3]。また、VPS-WとF82Hの間には、熱抵抗は存在せず良好に接合されていることがわかった。

Fig.4 及び Fig.5 に、応力解析による界面近傍(W:0.6mm、F82H:1mm)の X 軸及び Z 軸方向の応力分布図を示す。熱膨張率が大きい F82H 部は膨張しようとするが、F82H より小さな熱膨張率が小さい W がそれを妨げる力として働くため、界面下部の F82H では材料の中心方向の応力が生じ、逆に界面上部の W では材料の側面方向の応力が生じていることが分かる。また、W では試料側面部に近づくにつれて外部方向への応力は大きくなっている。Z 軸方向の応力分布図より、試料の側面部かつ界面付近では、F82H から W の方向に応力が生じている。また、Mises 応力分布図からは界面下の F82H 部分に 541MPa の Mises 応力が生じていることが分かった。

6. まとめ

タングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(VPS-W/**F82H**)について、熱負荷実験及び熱・応力解析を行った。W の表面温度が 700℃での定常熱負荷及び繰り返し熱負荷では各材料の温度変化の様子及び SEM 観察の結果、熱負荷後も健全性は保たれていることが分かった。熱解析では、VPS-W の熱伝導率及び接合界面部の熱抵抗の様子や負荷される応力分布が明らかとなった。

到達表面温度が 1300℃での繰り返し熱負荷では、界面近傍に近い VPS-W 部分の層間で剥離が生じた。このことは、接合界面部より VPS-W の層間が弱いことを示しており、VPS-W 層間の強度を向上させる必要がある。

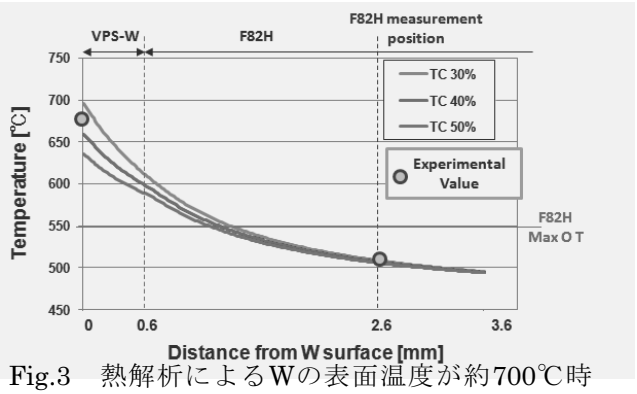


Fig.3　熱解析によるWの表面温度が約700℃時のW表面からの深さと温度の関係

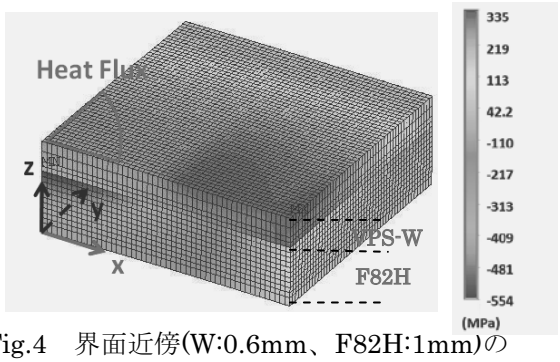


Fig.4　界面近傍(W:0.6mm、F82H:1mm)のX軸方向の応力分布図

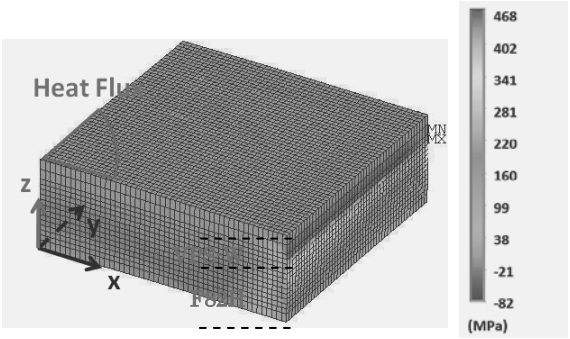


Fig.5　界面近傍(W:0.6mm、F82H:1mm)のZ軸方向の応力分布図

成果発表

(1)T.Hotta, K.Tokunaga,K.Araki, T.Fujiwara, Y.Miyamoto, M.Hasegawa, K.Nakamura, K.Ezato, S.Suzuki, M.Enoeda, M. Akiba, R.Kasada, A.Kimura, High heat loading properties on tungsten coated low activation material, Plasma Conference 2011, Nov., 2011, Kanazawa, Japan

(2)堀田智宏、徳永和俊、荒木邦明、藤原正、宮本 好雄、長谷川真、中村一男、江里 幸一郎、鈴木哲、榎枝幹男、秋場真人、長坂琢也、笠田竜太、木村晃彦、減圧プラズマ溶射タングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼の高熱負荷特性、日本原子力学会春の年会、平成 24 年 3 月（福井）

23 FP－11

核燃焼プラズマ周辺における磁力線垂直方向輸送のモデリング研究

大阪大学 大学院工学研究科　滝塚知典

目的

全日本的な核燃焼プラズマ統合コード計画（BPSI）を大学/核融合研/原子力機構が協力して推進しており、九大応力研はその中心として機能し、平成18-20年度に九大応力研特定研究「核燃焼プラズマ統合コード計画」を遂行した。滝塚はサブテーマの「周辺プラズマモデリング」の研究代表者を務め、統合コード開発に一定の進展を得ることが出来た。平成21-22年度には一般研究として滝塚は、周辺プラズマモデリングにおける精密な物理モデルの構築のために「沿磁力線輸送の運動論シミュレーション研究」を行った。九大博士課程学生が粒子コードPARASOLを用いてシミュレーション研究を行い、周辺プラズマ沿磁力線輸送のモデリングに有効な結果を得た。今年度からは、周辺プラズマの磁力線垂直方向輸送について共同研究を行う。応力研で開発された非線形流体シミュレーションコードを用いてブロブ輸送のシミュレーション研究を進め、その知見を活用しつつ、核燃焼プラズマ統合コード開発における周辺プラズマモデリングを発展させる。応力研の共同研究として実施することの価値は非常に高い。

研究方法

1）周辺プラズマの磁力線垂直方向のブロブ輸送の物理モデルの調査
2）ブロブ輸送の新物理モデルの構築
3）２次元非線形流体コードによるブロブ輸送のシミュレーション
4）シミュレーション輸送特性のモデル依存性の研究
5）統合コードのための周辺プラズマの磁力線垂直方向輸送モデリングの検討

研究結果

SOL プラズマ中でブロブと同様な振る舞いをする ELM フィラメントの径方向伝搬速度について、ASDEX Upgrade (AUG)のフィラメントプローブ計測実験結果［A. Kirk et al., Plasma Phys. Control. Fusion **53** (2011) 035003］をもとに検討を行った。ブロブの伝搬速度 V_r に関して、大きく２つの理論モデルが提唱されている。ブロブ径方向伝搬は、ブロブ中のイオンと電子の∇B ドリフト方向の違いで生じる電場による E×B ドリフトである。(i) 電場の強さが、ブロブの磁力線方向終端に生じるシースを通る電流制限で決まるとすれば、伝搬速度は、$V_r \sim C_s (\rho_i/\Delta)^2 (L_b/R)$ のように、ブロブサイズ Δ が大きくなると、Δ の２乗に反比例して遅くなる（C_s: 音速, ρ_i: イオンラーマ半径, L_b: ブロブ縦長, R: 磁場曲率半径）［S.I. Krasheninnikov, Phys. Lett. A **283** (2001) 368］。一方、(ii) ブロブは交換型不安定性現象であるとすれば、伝搬速度は、$V_r \sim C_s (\Delta/R)^{1/2}$ のように、サイズが大きくなると Δ の 1/2 乗に比例して速くなる［O.E. Garcia, Plasma Fusion Res. **4** (2009) 019］。この２モデルに加え、(iii) Kelvin-Helmholtz 不安定性効果を考えると、ブロブサイズと伝搬速度はほぼ一定値に収斂するというモデルも提示されている［S. Sugita, M. Yagi, S.-I. Itoh, K. Itoh, J. Pys. Soc. Japan **79** (2010) 044502］。今回の研究では、どのモデルが実験結果と矛盾が少ないかを調べた。

AUG 実験結果から、$V_r \sim \Delta^{1/2}$ を示した解析［A. Schmid et al., Plasma Phys. Control. Fusion **50** (2008) 045007］があるが、そこではプラズマ条件の多様性が解析にどのように影響を及ぼしているか明確でない。今解析ではデータとして、 AUG の１ショット中の１ELM 後の数 100

μs 間に観測された数フィラメントに対するプローブ信号(Kirk 論文 Fig.2)を採用した。各パルスの時間幅 τ と径方向伝搬速度 V_r は、$\tau \sim 1/V_r^k$ ($k = 1.5 \pm 0.6$) の関係性を持つことが分かった。時間幅 τ と径方向サイズ幅 Δ には $\tau \sim \Delta/V_r$ の関係があるので、$V_r^{k-1} \sim 1/\Delta$ が得られる。つまり、k の中心値が 1/2 にあるので、モデル (i) $V_r \sim 1/\Delta^2$ が正しそうであることが分かった。一方、誤差を考えても k が負になることは無いので、モデル (ii) $V_r \sim \Delta^{1/2}$ は排除されることが明らかになった。

研究成果報告

[1] K. Hoshino, K. Shimizu, T. Takizuka, N. Asakura, T. Nakano, "Improvement of the detachment modelling in the SONIC simulation", J. Nucl. Mater. **415** (2011) S549-S552.

[2] H. Kawashima, K. Hoshino, K. Shimizu, T. Takizuka, S. Ide, S. Sakurai, N. Asakura,"Evaluation of heat and particle controllability on the JT-60SA divertor", J. Nucl. Mater. **415** (2011) S948-S951.

[3] N. Hayashi, V. Parail, F. Koechl, N. Aiba, T. Takizuka, S.Wiesen, P.T. Lang, N. Oyama and T. Ozeki, “Integrated simulation of ELM triggered by a pellet through energy absorption and transport enhancement”, Nucl. Fusion **51** (2011) 103030 (8pp).

[4] S. Azuma, A. Fukuyama, T. Takizuka, “Analysis of the Bohm criterion for two-ion-species plasmas using PARASOL”, 13th Int. Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (PET-13), 19-21 Sep, 2011, South Lake Tahoe, USA.

[5] M. Yagi, K. Shimizu, T. Takizuka, M. Honda, N. Hayashi, K. Hoshino, A. Fukuyama, “Simulation study of L/H transition with self-consistent integrated modelling of core and SOL/divertor transport”, PET-13.

[6] K. Hoshino, K. Shimizu, N. Asakura, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Tobita, “Simulation study of an extended divertor leg for heat control in SlimCS DEMO reactor”, PET-13.

[7] T. Takizuka, N. Oyama, T. Fukuda, “Helical ferritic steel inserts for resonant magnetic perturbation to suppress ELMs in tokamak DEMO reactor”, Plasma Conference 2011, Nov. 22-25 Nov, 2011, Kanazawa.

[8] S. Azuma, A. Fukuyama, T. Takizuka, “Analysis of the Bohm criterion for two-ion-species plasmas using PARASOL”, Plasma Conference 2011.

[9] K. Shimizu, T. Takizuka, M. Honda, N. Hayashi, K. Hoshino, A. Fukuyama, M. Yagi, “L/H transition simulation with integrated modeling of core and SOL/divertor transport”, Plasma Conference 2011.

[10] K. Hoshino, K. Shimizu, M. Nakamura, T. Takizuka, N. Asakura, T. Nakano, “Investigation of the detached divertor model in the SONIC simulation”, Plasma Conference 2011.

[11] H. Kawashima, K. Shimizu, K. Hoshino, T. Takizuka, S. Sakurai, “Improvement of edge-plasma modeling and its impact on the SONIC simulation for JT-60SA divertor”, Plasma Conference 2011.

[12] S. Togo, M. Nakamura, Y. Ogawa, T. Takizuka, K. Hoshino, "Effects of radial losses of particle and energy on the stability of detachment front in a divertor plasma", 21st Int. Toki Conference, 28 Nov- 1 Dec, 2011, Toki.

[13] T. Takizuka, “Radial speed of ELM filament in SOL”, NIFS Collaborative Research Meeting on Modeling of Integrated Core and Peripheral Plasma for DEMO, 21-22 Feb, 2011, NIFS, Toki.

[14] T. Takizuka, “New concept for DEMO reactor”, 10th BPSI Meeting, 15-16 Dec, 2011, RIAM Kyushu Univ., Kasuga.

研究組織

研究代表者　滝塚知典（大阪大学 H23 年 10 月から、原子力機構 H23 年 9 月迄）
所内世話人　矢木雅敏（九州大学）
研究協力者　清水勝宏（原子力機構）、杉田　暁（九州大学）

23 FP－12

タングステン中の水素同位体挙動に及ぼすヘリウム同時照射影響

大阪大学　大学院工学研究科　上田良夫

１．目的

タングステン中の水素の拡散・捕獲挙動は、タングステンプラズマ対向材料の水素吸蔵、水素透過、水素脆化（ブリスタリングなども含む）と密接な関係を持ち、そのメカニズムや、タングステン材料組織の影響を明らかにしておくことは大変に重要である。この目的のため、従来タングステンに水素ビームや水素プラズマを単独で照射する実験等が行なわれている。しかしながら、水素イオンとヘリウムイオンの同時照射実験はほとんどなく、これらのイオンが同時に照射されることによって生じる相乗効果は全く分かっていない。さらに、エッジプラズマ冷却のために入射するイオン（ネオン、アルゴン等）の場合もほとんど研究例がない。

そこで、本研究では、大阪大学の水素イオンとヘリウムイオンのエネルギーを独立に制御して照射できる定常高粒子束複合イオン照射装置（HiFIT）や、混合プラズマ照射が可能な ECR プラズマ装置を用いて、重水素イオン、ヘリウムイオン、及び不純物イオン（アルゴン、ネオン、窒素など）を同時照射し、タングステン材料中の重水素吸蔵量や、ヘリウムによって誘起される表面状態を調べる。材料の分析を行うにあたり、応用力学研究所の複合表面分析装置や水素動態観測装置を活用して、ヘリウムバブルの大きさや密度などを測定し、混合照射の影響を詳しく調べる。

２．実験方法・結果

今年度の実験では、ヘリウムとネオン、窒素を同時照射して、タングステン表面に発生するヘリウムバブル構造、あるいはナノ構造を FE-SEM や TEM を用いて測定を行なった。イオンの同時照射は、ECR プラズマ装置（Laplex）を用いて行なった。

図 1 に温度 1200K、エネルギー120 eV でヘリウム・窒素混合プラズマを照射したタングステンの表面近傍の断面図を示す。最大 10 nm 程度の He バブル層が形成されていることが分かる。この温度では、He バブルは移動することが可能であり、結合して成長することが知られている。このような表面状態は、He イオンのみの照射とほぼ同じであり、窒素の混合照射による窒化タングステン影響はほとんど見られない。

次に、温度を 1000 K に下げて混合照射を行なった場合を図２に示す。この温度では、He バブルの拡散は遅く、He バブルの結合による大きなバブルは見られない。この様な表面状態も、He 単独照射で見られる微細構造であり、窒素イオン同時照射の影響は明確には見られなかった。過去の研究で、炭素イオンを同時照射した場合も、炭素とタングステンの混合層中に He バブルが観測されたことから、He バブルの生成に関して、付着性不

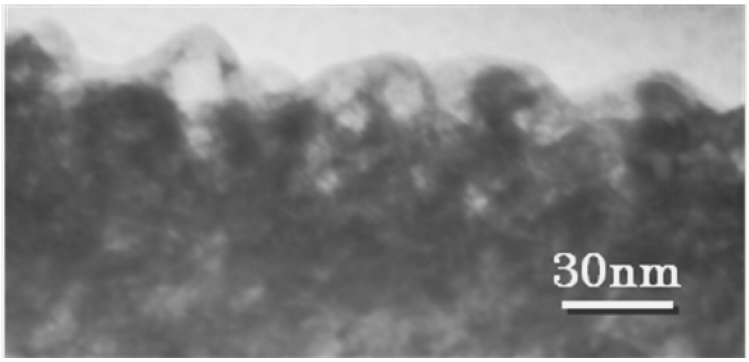


図１　He・窒素混合プラズマ照射後の表面の断面TEM像。実験条件は以下の通り。He/N_2(35/2mTorr)、温度1200K、フルエンス$5x10^{24}/m^2$、エネルギー120eV。

純物イオンの影響はあまり大きくないものと推察される。今後、この混合層中の He バブルが水素同位体挙動に及ぼす影響を明らかにする。

次に、損耗が影響するエネルギー（170eV）で Ne イオンを混合してプラズマ照射を行なった例を図３に示す。ここでは、(a)から(c)にかけてフルエンスを増加させている。表面温度は、1300 K でいわゆるタングステンナノ構造が形成されうる温度である。フルエンスが小さいとき(a)では、ネオンイオンによるスパッタリング損耗が大きく、ナノ構造はあまり成長しない。しかしながら、フルエンスを増やすと、スパッタリングの影響を受けにくい直線的なナノ構造が成長することが分かった。今後、ナノ構造の応用を考えるに当たり、ナノ構造の形状制御は重要な課題と考えられる。本研究では、混合イオンを用いて、従来作成することができなかった直線的なナノ構造を形成する可能性が示されたことで、ナノ構造の応用が広がることが期待される。

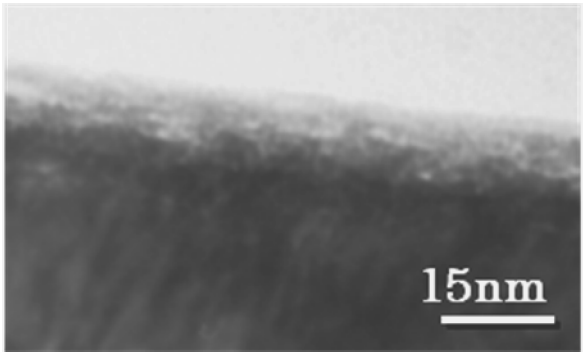


図２　He・窒素混合プラズマ照射後の表面の断面TEM像。He/N_2(45/3mTorr)、温度1000K、フルエンス5x10^{24}/m^2、エネルギー70eV。

３．まとめと今後の課題

ヘリウム･窒素混合イオンをスパッタリングの無視できる条件でタングステンに照射し、表面の微細構造を観察したが､窒素混合の影響は明確には認められなかった｡一方、ヘリウム・ネオン混合イオンをスパッタリングが顕著なエネルギー条件でタングステンに照射することで、直線的なナノ構造の形成が可能となることが示された。今後は、これらの研究を元に、水素同位体挙動に与える影響や、新たなタングステンナノ構造の応用を探る。

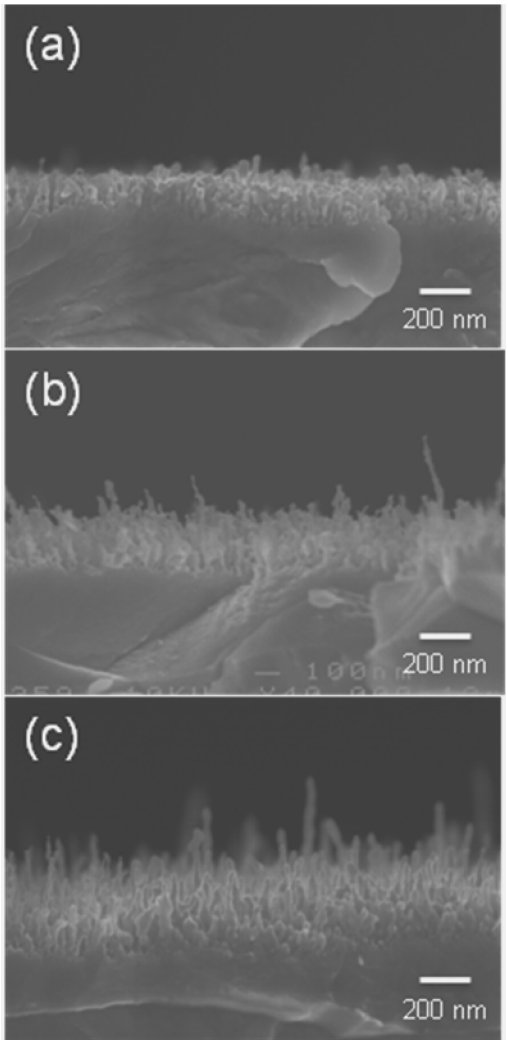


図3　He・Ne混合プラズマ照射によるナノ構造の形成。He/Ne(30/1mTorr)、1300 K。フルエンス：(a)9x 10^{24} m^{-2}, (b)1.8x 10^{25} m^{-2}, (c)2.8x 10^{25} m^{-2}。

４．研究成果発表

1. H.T. Lee, H. Tanaka, Y. Ohtsuka, Y. Ueda, “Ion-driven permeation of deuterium through tungsten under simultaneous helium and deuterium irradiation”, J. Nucl. Mater. 415 (2011) S696-S700.
2. H T Lee, E Markina, Y Otsuka and Y Ueda, “Deuterium ion-driven permeation in tungsten with different microstructures”, Phys. Scr. T145 (2011) 014045
3. H Y Peng, H T Lee, Y Ohtsuka and Y Ueda, “Ion-driven permeation of deuterium in tungsten by deuterium and carbon-mixed ion irradiation”, Phys. Scr. T145 (2011) 014046.

平成23年度 応用力学研究所 共同研究

「プラズマ輸送理論」成果報告書

代表者　核融合科学研究所 伊藤公孝

研究目的

核融合燃焼プラズマ実験の実現にむけて計画が進展している現在、トロイダルプラズマの輸送理論を一層進展させ、統合コードなどへ成果を糾合することによって定量的予言力を検証することは世界的な急務と認識されている。

本研究では、トロイダルプラズマの乱流に対し、繰り込み理論に基づく遷移理論を構成し、乱流輸送と構造形成の理論基盤を研究することを目的とする。あわせて、輸送コードに用いられる理論式を最新の理論展開に沿ったものへと高度化することを目的とする。

研究基盤と進展の概観

プラズマの構造形成や乱流状態では、エネルギー等分配則が成り立たない事が知られており、従来の統計力学では十分解析できない。本共同研究では、そのようなプラズマに相応しい、エネルギー分配やダイナミックスを解明するため、非平衡系プラズマの統計力学を構築する研究を続けている[1]。

「遠非平衡」という概念がしばしば用いられる。遠い・近いを議論するためには「熱平衡状態への距離」の尺度が必要になる。ここでは、ドリフト波・帯状流乱流を対象に、非平衡の度合いを示す尺度が議論された。プラズマパメタ $g = 1/n\lambda_D^3$ を及び不均一性の度合いを示すパラメタ（L_n: density gradient scale length）を用い、熱平衡状態での揺動強度と比較し、増大比を、ドリフト波－帯状流乱流の「熱平衡状態からの距離」として定義し導入する事が出来る[2]。この結果は従来ドリフト波－帯状流の系に適用され定式化が行われた。この系は磁場閉じ込めプラズマの乱流と異常輸送を考察するための基本的な体系であるが、実験観測による検証を進めるための具体的構成も同時に進める必要がある。微視的揺動と多数のメゾスケール揺動との競合の研究が進展したのでその成果を紹介する。

多種の揺動構造の競合の理論

微視的揺動とメゾケール揺動の競合等が存在し実験でも観測されている。実際の実験ではメゾスケールの場としては帯状流の他 GAMs や帯状磁場等が存在しており、それらの競合も実在する。通常の理論的取り扱いでは、多くの場合、微視的揺動と一種類のメゾスケール揺動の二体の競合が解析されて来た。二体の競合という問題設定は理想化されており、更に多自由度の構造の動的な競合を研究する必要がある。そのため、ドリフト波－帯状流－GAMs（または帯状磁場）の三体系での競合を研究した。通常行われている定常解の探査ではなく、広いパラメタ空間での大域的な解の振る舞いを解明した。

ドリフト波－帯状流－GAM のそれぞれのエネルギー密度を無次元化した量（それぞれ W, Z, M と標記）で表現して、揺動のエネルギー発展方程式を

$$\frac{\partial}{\partial t} W = \gamma_L W - \Gamma_w W^2 - \alpha Z W - \beta M W$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Z = -\gamma_Z Z - \Gamma_z Z^2 + \alpha Z W$$

$$\frac{\partial}{\partial t} M = -\gamma_M M - \Gamma_M M^2 + \beta M W$$

と表す。記号は次の通り: γ_L: ドリフト波線形成長率, γ_Z , γ_M: 帯状流と GAMs の線形減衰率や衝突減衰率, Γ_w:ドリフト波非線形減衰率, Γ_Z , Γ_M: 帯状流と GAMs の非線形減衰率, α と β: ドリフト波による帯状流と GAMs の準線形励起率。(詳細は[3]を参照。)

この系の Lyapunov function を構成する事が出来る。メゾスケール揺動の共存の仕方としては、線形成長率と非線形減衰率の大きさによって三つの場合がある。すなわち、三者いずれもが有限振幅を持つ定常解(W_0, Z_0, M_0)が存在するか、あるいは微視的揺動と一種類のメゾスケール揺動が有限振幅(Z_0 と M_0 のいずれかがゼロ)の定常解を持つ場合と、微視的揺動のみの定常解の場合である。三者いずれもが有限振幅となる定常解がある場合、

$$F \equiv H_W + H_Z + H_M \quad (H_w \equiv W - W_0 \ln W, H_Z \equiv Z - Z_0 \ln Z, H_M \equiv M - M_0 \ln M)$$

は任意の初期状態について

$$dF/dt \leq 0$$

を満たす。すなわち、解は大域的に安定であり、その状態が realizable state である[3]。一種類のメゾスケール揺動のみが有限振幅を持つ定常解の場合は、従来の理論のように、同様の Lyapunov function を構成する事が出来、その定常解が realizable state である。競合による状態の選択則を図１にまとめる。

ドリフト波—帯状流—GAMs の共存状態が CHS プラズマで観測されている[4]。図２に示される実験で観測された競合関係について、本理論の結果を踏まえ今後具体的に理解を与え、メゾスケール揺動を繰り込んだ輸送理論の構築を進める。

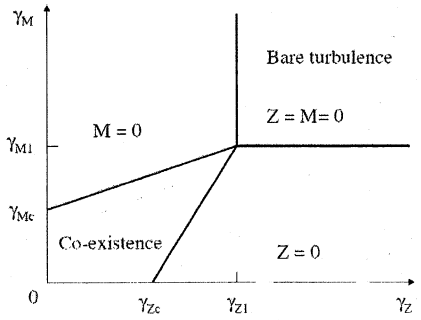


図１：乱流、帯状流、GAMs の共存状態や選択的発生を示すダイアグラム。

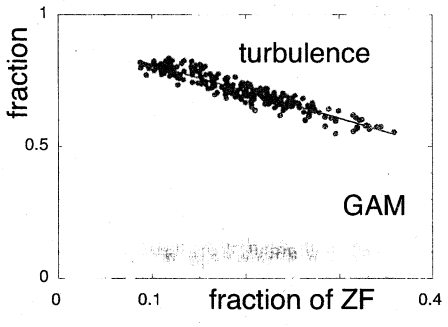


図２:CHS における実験観測。乱流、帯状流、GAMs の共存状態が観測された。乱流と帯状流は反相関を示すが、GAMs 強度は弱い相関を示した。

引用文献

[1] P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas*, (Cambridge University Press, 2010) 570 pages

[2] S-I. Itoh, K. Itoh: J. Phys. Soc. Jpn., **79** 124501 (2010)

[3] S-I. Itoh, K. Itoh: Plasma Phys. Control. Fusion **53** 015008-1-8 (2011)

[4] A. Fujisawa, et al.: J. Phys. Soc. Jpn. Vol.**76** (2007) 033501

23 FP－14

圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果

岩手大学工学部マテリアル工学科　鎌田康寛

目的

原子力発電プラントの高経年化問題の一つに圧力容器の照射脆化があり、脆化機構の解明とそれに基づく健全性評価法の確立が求められている。我々は磁気利用による脆化の非破壊評価の可能性を検討しており、そのためには磁気特性に与える照射欠陥形成の影響の解明が必要で、照射材料の磁区・磁壁の直接観察が望まれる。しかし、原子炉を使う中性子照射では系統的な実験が難しく、さらに放射化するため通常の設備で試料を扱えないという問題があった。それらを解決する実験法としてイオン照射と単結晶薄膜試料の組み合わせに着目した。カスケード損傷が起こるイオン照射では中性子照射と似た損傷組織が得られると同時に、試料が放射化しない利点を有する。損傷深さが浅いという欠点があるが、試料全体が損傷を受ける薄膜の利用で照射領域の物性測定が容易になる。さらに単結晶を利用することで複雑な粒界の影響を除くことができ、相関機構の解明が容易になる。このような考えに基づき、単結晶鉄クロム薄膜における Fe-Cr 二相分離の照射促進現象の可能性を H22 年度に報告した。本年度は、鉄クロム合金の実験結果の継続的な検討に加え、より高効率的・効果的な研究を進めるためのコンビナトリアル型実験を新たに提案し（科研費・基盤研究 B、No23360418）、メタルマスク及び直線駆動シャッターを用いた鉄単結晶微小磁性体の作製、磁気光学カー効果による磁区観察の実施と、磁化過程に与えるイオン照射の影響を調べた。

方法

新しく導入したコンビナトリアル型成膜装置を用いて鉄単結晶薄膜・微小磁性体を作製した。1×10^{-7}Pa の超高真空中で、MgO(001)単結晶基板上に、Fe 膜を電子ビーム蒸着した後、873K で熱処理を行い、120nm 厚の鉄薄膜を作製した。VSM による磁化測定から単結晶成長の確認を行った。その後、以下のようなコンビナトリアル型実験を行った（図 1）。直径 150μm の穴を複数あけたメタルマスクと直線駆動シャッターを用いて膜厚の異なる微小磁性体（58～10nm 厚）を一度に作製した。作製した微小磁性体の一部をアルミ箔で覆い、応用力学研究所のタンデム型加速器により 2.4MeV Cu^{2+}を室温で照射した。SRIM 計算により 58nm 深さで損傷度は 0.17dpa と見積もられた。なお、銅イオンの大部分は薄膜を貫通するため、磁性への残留銅イオンの影響は無視できると考えた。磁気光学カー効果顕微鏡により磁場下での磁区構造を観察・解析し、未照射・照射の微小磁性体の磁化過程を調べた。

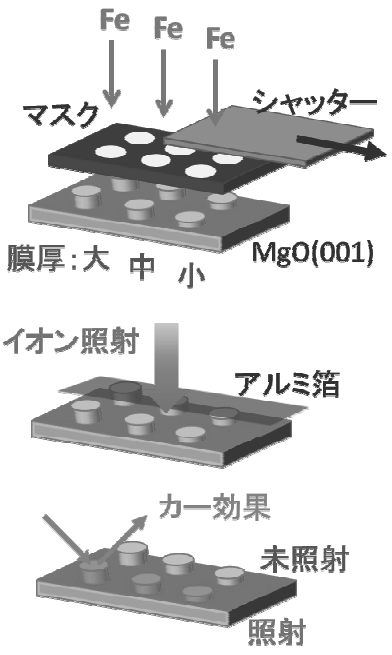


図 1　コンビナトリアル型実験

結果および考察

鉄薄膜の磁化測定の結果、MgO[110]・[100]が、それぞれ磁化容易・困難方向であった。バルクの鉄の結晶磁気異方性定数を用いた計算結果と一致したことから、MgO に対して 45 度回転した方位関係の単結晶の形成を確認した。次に鉄単結晶微小磁性体の磁区をカー効果顕微鏡で調べた。磁場-100Oe を磁化容易方向に印加して BG 画像を取得し、±50Oe 間を 0.5Oe ステップで撮影し、BG 画像を差し引き、動画を作成した。図 2 に膜厚 58nm の微小磁性体の各磁場での磁区と磁化曲線を示す。右方向が Fe[100]で、この場合 4 種類の磁区が存在すると考えられ、観察して得られた磁区画像を 4 色で色分けした。各画像で印加磁場の正（右）方向の磁区面積から負（左）方向の面積を引き全面積で割ることで規格化した磁化曲線を求めた。10nm 厚試料と比較した結果、膜厚の減少で保磁力・残留磁化の増加を確認した。

図 3 に未照射、照射の微小磁性体の磁化曲線を示す。両者で磁区構造および磁化曲線に顕著な違いは見られなかった。今回の照射条件では、高密度なサブナノサイズの空孔クラスターが形成していると考えられるが（文献 1)、それらは鉄微小磁性体の磁区・磁壁に大きな影響を与えないことが確認された。

試料組成および照射条件を限定した形であるが、コンビナトリアル型実験に初めて成功した。今後、作製・照射条件を系統的に変えて実験を進めることで、照射脆化の磁気利用の非破壊評価技術の開発につながる成果が得られると期待される。

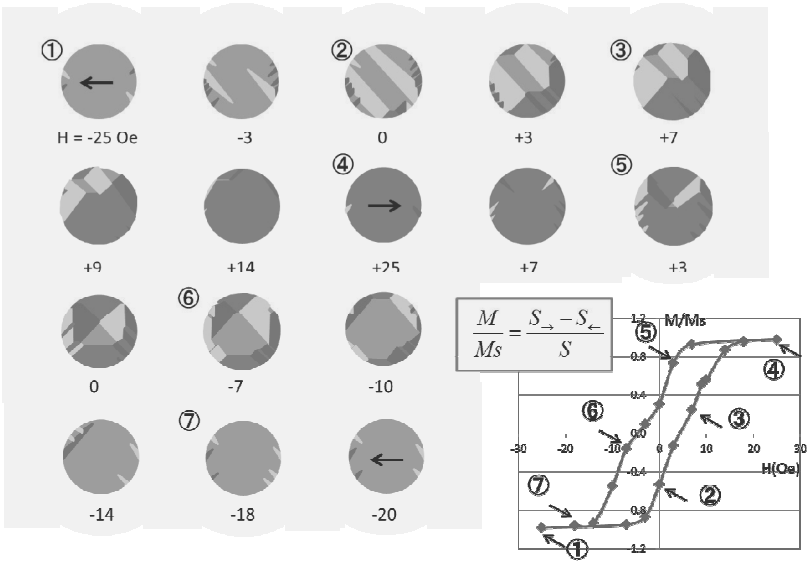


図 2　58nm 厚鉄単結晶微小磁性体の磁区と磁化曲線

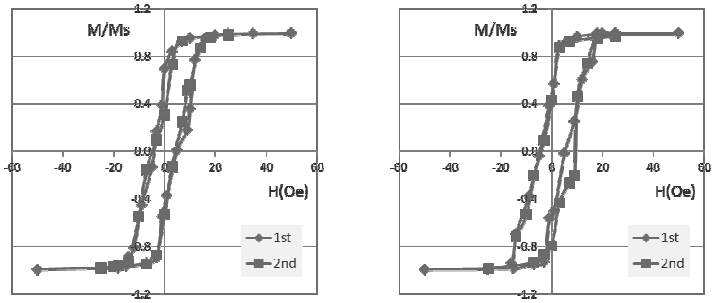


図 3　未照射（左）および照射（右）微小磁性体の磁化曲線

文献

[1] Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Echigoya, H. Kikuchi, S. Kobayashi, N. Yoshida and K.Takanashi : Mater. Trans., Vol. 50, No. 9 pp. 2134-2138, 2009

成果報告

Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi, M. Mizuguchi and K. Takanashi : Ion-Irradiation Enhancement of Materials Degradation in Fe-Cr Single Crystals Detected by Magnetic Techniques, The 15th ICFRM, 15-341, D-74, Charleston, USA, Oct. 16-22, 2011

研究組織

鎌田康寛，菊池弘昭，小林悟，村上武:岩手大学工学部マテリアル工学科

渡辺英雄 ： 九州大学応用力学研究所

23 FP－15

核融合炉材料の高温変形および液体増殖材腐食による内部組織発達過程

核融合科学研究所　室賀健夫

１．　目的

核融合炉ブランケット構造材として期待されるバナジウム合金や低放射化フェライト鋼の高温使用限界温度を決めるのは熱クリープ特性と考えられている。熱クリープ変形は、転位のすべり運動、粒界拡散と粒界すべりにより引き起こされ、これを抑えるための組織制御として、転位の固着や粒界の強化などが考えられる。また最近では酸化物分散強化材料が試作され、より高温使用が検討されている。高温では強度とともに冷却材との共存性が大きな問題となる。特に液体増殖材料は腐食性が強く、液体ブランケットの重要課題となっている。

核融合科学研究所では、「微小試験片高温クリープ試験装置」と「液体増殖材腐食試験装置」を製作し、核融合炉候補材料の高温クリープ変形実験及び浸漬腐食試験を進めている。

これまでの共同研究で、クリープ変形試験、腐食試験を行った V-4Cr-4Ti 合金（NIFS-HEAT-2)、低放射化フェライト鋼（JLF-1）の組織を応用力学研究所の透過電子顕微鏡で観察することにより、クリープ変形特性及び腐食特性と組織変化の関係を明らかした。 本報告では、V-4Cr-4Ti 合金について、クリープ変形を抑制する熱加工処理の効果とその内部組織発達から見た機構について報告する。

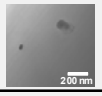
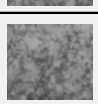
２．方法

V-4Cr-4Ti 合金（NIFS-HEAT-2）について、表１に示す５つの熱機械処理を施した。STD は共通熱処理条件で、析出は発生させるが、加工転位は回復している。STD-CW は冷間加工材、SA-A は、溶体化処理後再熱処理により微小析出を高密度に発生させたもの、SA-A-CW はさらに加工転位を加え、微小析出による転位の安定化を狙ったもの、SA-CW-A は、冷間加工後に微小析出を発生させたもの（歪焼鈍処理）である。これらを 1023K、176 または 250MPa で、ほぼ 3%までのクリープ変形を与え、TEM 用試料として切り出し、応用力学研究所の JEM-2000FX 電子顕微鏡により転位組織の観察を行った。特に、$\boldsymbol{g}\times\boldsymbol{b}=0$ の手法を用いて転位のバーガースベクトルを求めた。

３．結果と考察

図１、図２にバーガースベクトルの分析例を示す。STD 材では、ほとんどの転位が a/2<111>型と判定されるが、特定の方向の g ベクトルの場合転位がほとんど見えなくなる（右端の図）ことにより、転位が特定の面上に偏在していることが分かる。STD-CW では、a<100>型と a/2<111>型が共存している。前者は、a/2<111>型の転位同士の反応で生じるもので、材料の強化に寄与する”不動転位“である。

表１　V-4Cr-4Ti の熱処理条件

Abbreviation	Treatment	Conditions	TEM
STD	Standard Maximum precipitation for ductility	1273 K, 2h	
STD-CW	Standard and Cold-worked Strengthening by dislocations	STD + 20% Cold Rolled	
SA-A	Solution Annealed and Aged High density of fine precipitates	1373 K, 1 h + 873 K, 20 h	
SA-A-CW	Solution Annealed, Aged and Cold-rolled Fine precipitates and dislocations	SAA + 20% Cold Rolled	
SA-CW-A	Solution Annealed, Cold-worked and Aged Decoration of dislocations with precipitates (Strain Aging)	1373 K, 1 h + 20% Cold Rolled + 873 K, 20 h	

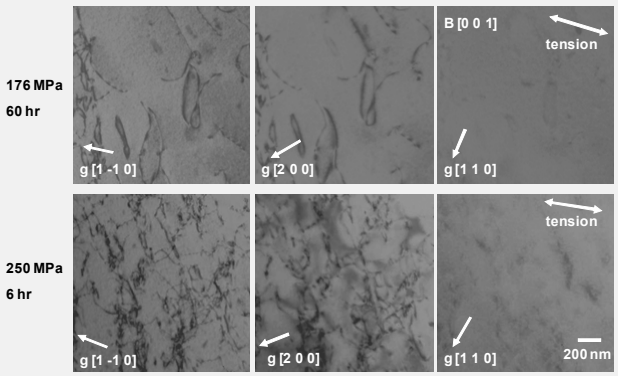


図１　STD 材の 178MPa、250MPa のクリープ変形後転位組織のバーガースベクトル解析。観察される転位はほとんどが a/2<111>型であることが分かる。

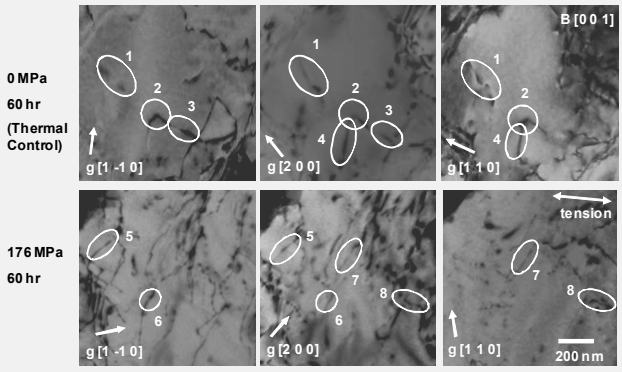


図２　STD-CW 材のアニーリングおよびクリープ変形後転位組織のバーガースベクトル解析。図中の 1,2 は、a<100>型、そのほかは a/2<111>型と判定される。

図３に、転位密度とバーガースベクトルの分析結果をまとめて示す。STD では、クリープ変形で発生する転位はほとんどが a/2<111>型である。STD-CW では、加工で生成した a<100>型の転位がクリープ変形によって減少してゆく。SAA-CW も同様な結果である。このように、a<100>転位の減少がクリープ変形の増大につながっているものと予想される。

SA-CW-A は、図４に示すようにクリープ変形後も転位密度が高く、バーガースベクトルの分析は不可能であった。以前の研究により SA-CW-A 材は、他の熱加工処理材よりもクリープ変形が低いことが示されている。SA-CW-A では、高い転位密度が維持されることが、クリープ変形の抑制機構として働いていると予想される。

今後は、SA-CW-A（歪焼鈍材）のクリープ低減機構とその限界について明らかにしていく予定である。

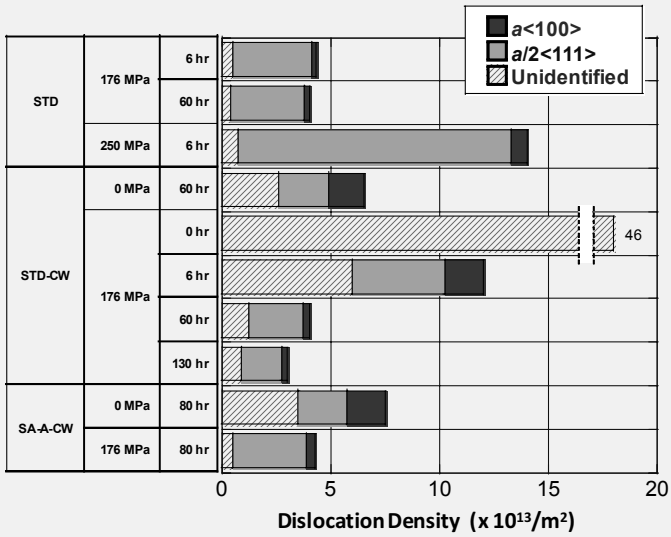


図 3　転位密度とバーガースベクトル分析の結果のまとめ。

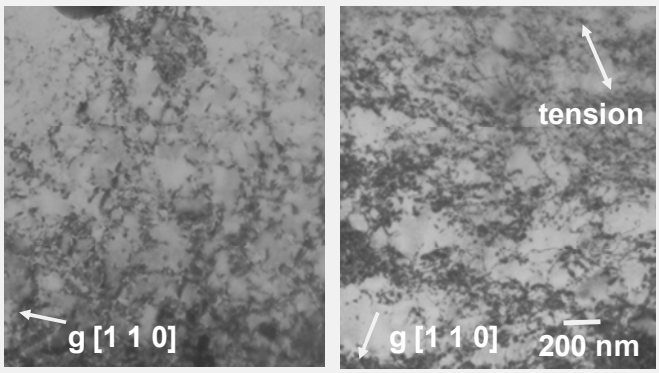


図 4　SA-CW-A 材の組織。
左：試験前、右：クリープ試験後（1023K, 176MPa, 60h）

４．研究組織

室賀健夫、長坂琢也、李艶芬（核融合科学研究所）鄭鵬飛（総合研究大学院大学）
渡辺英雄、荒木邦明（九州大学応用力学研究所）

５．国際会議での発表

(1) T. Muroga, T. Nagasaka, P.F. Zheng, Y.F. Li and H. Watanabe, Dislocation Evolution during Thermal Creep Deformation in Annealed and Cold Worked V-4Cr-4Ti, 15th International Conference on Fusion Reactor Materials, Oct. 17-21, Charleston, USA

23 FP－16

核融合炉用高靭性タングステン材料の高熱負荷特性

東北大学金属材料研究所　栗下 裕明

Ⅰ、目　的

タングステン（W）は、核融合炉等の極限環境下での使用において他の材料が追随できない数多くの優れた特性をもつため、核融合炉の最も厳しい熱負荷に晒されるダイバー部位に使用される計画であるが、Wは熱負荷を受けると融点よりはるかに低い温度で再結晶して脆化するという大きな問題がある。この脆化は、再結晶により形成される粒界が極めて弱いことによる粒界脆化（再結晶脆化）である。そこで研究代表者らは、Wの再結晶脆化の克服に取り組み、まず、結晶粒が極めて微細（50～100nm）で再結晶組織をもつ W-1.1%TiC（W-1.1TiC）を作製し、それに GSMM 法（粒界すべりを活用した新しい高靭性化処理法）を適用することにより、再結晶粒界が極めて強化され、延性脆性遷移温度が室温付近にある高靭性ナノ組織 W-1.1TiC を開発した。そして、ダイバータ材料に必要な熱負荷特性を評価するために、平成22年度から九州大学応用力学研究所（九大応力研）およびドイツのユーリッヒ共同研究機構（FZJ）との共同研究を開始した。

九大応力研との平成22年度共同研究では、電子ビームによる熱負荷試験（1700℃/3分間の熱負荷とそれに続く繰り返し熱負荷（450～1250℃/360 サイクル））を行い、市販の純 W では全表面に顕著な起伏と粒界に沿う亀裂や剥離が生じたのに対し、高靭性 W-1.1TiC ではそのような表面損傷は観察されないことを明らかにした。この結果は、高靭性 W-1.1TiC が、純 W に比べ、核融合炉の ELM のような繰り返し高熱負荷下における熱機械的特性に極めて優れていることを示唆しており、実際、ITER―ELM の条件下で実施したFZJの熱衝撃試験において、高靭性 W-1.1TiC の表面には起伏や亀裂は観察されなかった。

平成23年度の本共同研究では、平成22度の研究成果を踏まえ、高靭性 W-1.1TiC と市販の純W材料について電子ビーム熱負荷による放出ガス挙動、表面組成の変化、表面吸着水素の挙動、および光反射特性の変化を明らかにすることを目的とした。

Ⅱ、実験方法

① 試験片

酸素濃度が異なる 2 種類の高靭性 W-1.1TiC 試料（A 材：850 ppm、B 材:170 ppm）を作製した。いずれも結晶粒径が約 1.5 μm で粒界のほとんどがランダム方位の等軸結晶粒をもつ。この 2 種類の W-1.1TiC、および比較材としての市販の純Ｗ板材（応力除去処理材）から、熱負荷特性評価用の試験片（寸法：10mmx10mmx1mm）をワイヤーカットにより切出し、2 枚の上下表面を研磨仕上げした（W-1.1%TiC：バフ研磨、純 W：電解研磨）。純 W 板材では、照射される試料表面が圧延面に平行な試験片（$W_{//}$）と垂直な試験片（$W_{\perp}$）を用意した。

② 熱負荷試験および観察・分析

これらの試験片を電子ビーム熱負荷装置（最大電圧：20kV、最大電流：150mA）の水冷銅ホルダー上に置き、真空下（$< 4 \times 10^{-6}$torr）で試験片表面に電子ビーム（直径：約6mm）を照射し、以下の高熱負荷試験を行った。

1、定常熱負荷試験： W-1.1TiC の A 材と B 材、純 $W_{\perp}$ および 2 枚の純 $W_{//}$（1 枚はダミー試験片）の計5枚の試験片を同時にセットし、ダミー試験片、純 $W_{//}$、純 $W_{\perp}$、A 材、B 材の順に 1 枚ずつ電子ビームを照射し、試料表面温度が約 1700℃に到達後、180 秒間、保持した。昇温を容易にするために、試験片は冷却ホルダー上に固定せず、置くだけとした。

2、繰り返し熱負荷試験： 上述の照射後の A 材と B 材、純 $W_{//}$（ダミー試験片を含む）とともに、未照射の純 $W_{//}$ を冷却ホルダーに固定し、ダミー試験片、未照射の純 $W_{//}$、純 $W_{//}$、A 材、B 材の順に、2 秒間の照射/8秒休止の照射を 360 サイクル（計 1 時間）繰り返した。この照射による試験片表面温度の変化は 450～1250℃であった。

以上の試験では、試料表面温度は電流値により制御し、2 色放射温度計で計測した。また、照射に伴う放出ガスの計測は4重極質量分析器により、照射前後の試験片重量の計測は精密電子天瓶により、照射前後の試験片表面状態の観察は走査電子顕微鏡（SEM）により行った。さらに、電子ビーム照射前後の表面の組成を SEM-EDS を用いて調べると共に 2.8MeV $^4He^{2+}$ ビームを用いてラザフォード後方散乱法(RBS)および弾性反跳粒子検出法(ERD)の同時分析を行い、表面吸着水素の挙動を調べた。また、分光光度計により 190nm～2500nm の光反射スペクトルについて調べた。

Ⅲ、主な結果および考察

定常熱負荷実験における電子ビーム照射中の QMS 測定では、主に、質量数 m/e = 2(H_2)、12(C)、18(H_2O)、28(CO_2)、32(O_2)、44(CO_2) の上昇が観察された。**図1**に、純 $W_{//}$、A 材、B 材について、各質量数の時間変化を示す。放出量は照射開始と共に上昇し、照射終了と共に徐々に減少している。とくに、A 材と B 材では照射初期の放出量が多く、中でも酸素量の多い A 材からの放出が大きいことがわかる。また、酸素濃度の低い B 材では、図 1(c) に見られるように、A 材（図1(b)）と比較して放出量が少ない。照射の初期では W 製試料ホルダーの温度が低いことから、照射初期の放出は加熱された試料からの放出によると考えられる。

図 2 に、A 材における電子ビーム照射前後の SEM－EDS による組成分析結果を示す。照射前では、W に加え、Ti、Mo、O、C が検出されている。一方、照射後では、Mo と C の変化はほとんどみられないが、Ti と O はバッククラウンド以下に減少している。これは、表面層に固溶していた Ti と O が 1700℃加熱により離脱した結果であると推定される。電子ビーム照射中の QMS 分析では、照射初期に m/e = 32(O_2) の放出が観察されており、EDS 分析の結果と対応している。また、これらの結果は、酸素濃度の低い B 材でもほぼ同様であった。組成分析については、軽元素の感度が高い XPS 分析を進め、さらに詳細を検討する予定である。

図 3 に、A 材の電子ビーム照射前後における表面近傍の H の ERD 分析結果を示す。未使用の試料では表面近傍に H が吸着している。照射後は表面吸着量が減少しているが、深部への拡散は観察されない。B 材に対しても同様であったが、未照射試料では、H の吸着量が A 材より少なかった。**図 4** に、未照射の純 $W_{//}$と照射前後の A 材について測定した反射スペクトルを示す。純 $W_{//}$と比較して、照射前の A 材は短波長側での反射率が小さいことがわかる。また、純 $W_{//}$に見られるように、一般に純 W 材で見られるバンド間遷移による光吸収によると考えられるディップが A 材では異なっており、関係する電子の状態密度が異なっているためと考えられる。さらに、照射後の A 材では、スペクトルの構造は照射前とほとんど同じであるが、低波長部分での反射率の低下および長波長側での反射率の上昇が観察される。

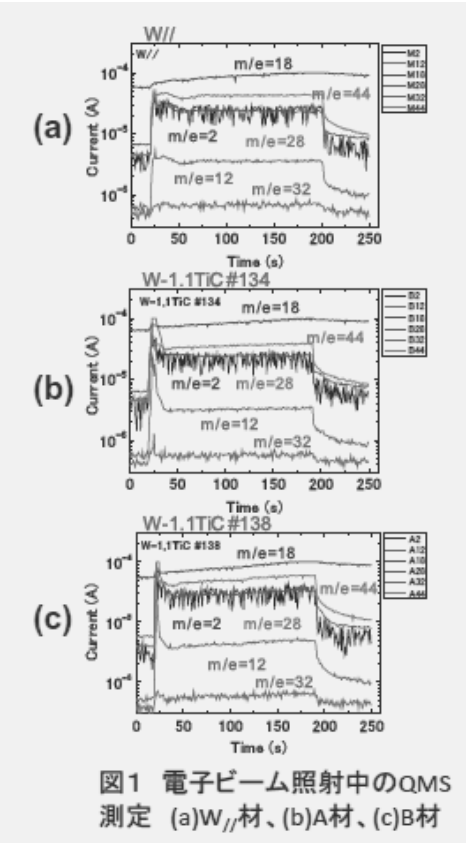


図1 電子ビーム照射中のQMS測定 (a)$W_{//}$材、(b)A材、(c)B材

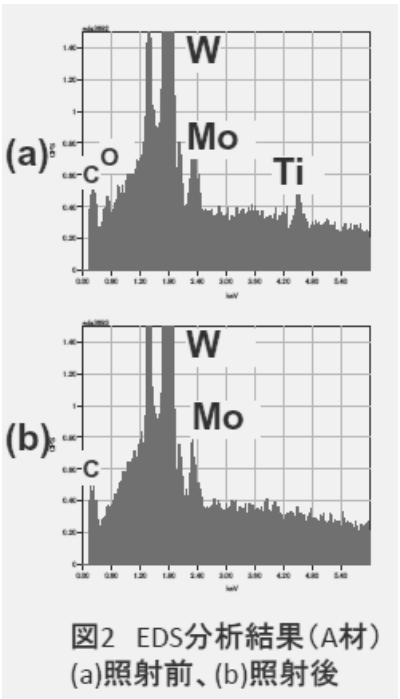


図2 EDS分析結果（A材）
(a)照射前、(b)照射後

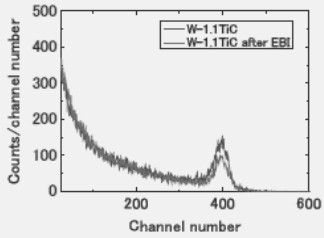


図3 ERD分析結果（A材）
(a)照射前(青)、(b)照射後(赤)

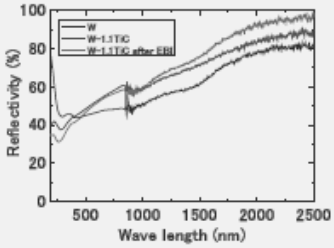


図4 反射スペクトル測定結果
(a)$W_{//}$(黒)、(b)A材照射前(青)、
(c)A材照射後(赤)

Ⅳ、結言

電子ビームを用いた定常および繰り返し熱負荷試験では、製造温度よりも高温の 1700℃定常加熱により W−1.1TiC の表面層の組成や反射スペクトル等の物理的性質が変化する。例えば、この加熱により、厚さ数 μ 程度の表面層では Ti や O が選択的に減少することから、これらの組成変化が機械的性質に及ぼす影響を調べる必要がある。また、H の吸着挙動や光反射スペクトルも変化する。さらに、加熱により発生する水素同位体の吸着特性変化の機構および光学的性質の変化がプラズマ閉じ込め装置に及ぼす影響についても検討を進める。

23 FP－17

巨視的運動論的 MHD 現象解析用の
トロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発

山口大学大学院理工学研究科　内藤裕志

目的

トカマク実験で観測される MHD 的現象の理解には、従来の MHD 理論を超えた運動論的 MHD 理論に基づくシミュレーション研究が必須である。ジャイロ運動論を基礎とする粒子（PIC: Particle-In-Cell）シミュレーションは、第一原理シミュレーションであるため莫大な計算機資源を必要とするが、流体系のシミュレーションで用いられるモーメント方程式を求める際の”closure”の問題から自由である特徴がある。我々は、MHD 解析に特化した円柱版のジャイロ運動論的粒子コード Gpic-MHD（Gyrokinetic PIC code for MHD simulation）を開発した。高度計算科学に対応した超高並列化は本コードを実行するために必須である。本研究の目的は超高並列コンピュータに対応したトロイダル版の Gpic-MHD を開発し、ITER 等の高温・高密度の核燃焼を含むトカマクプラズマの巨視的・運動論的 MHD 現象を解明することである。

シミュレーションモデル

円柱版 Gpic-MHD の概要は以下のとおりである。デルタエフ法を用いたジャイロ運動論的 PIC コード。半径方向は差分法を用い、非一様メッシュに対応している。ポロイダル方向とトロイダル方向は高速フーリエ変換を用いてモード展開している。擬スペクトル法を用いる。フーリエ空間で不必要なモードを消去することにより、時間ステップ幅を大きくしている。スレッド並列（自動並列コンパイラ使用）とプロセス並列(MPI 使用)を併用したハイブリッド並列コードになっている。プロセス並列は、領域分割と粒子分割（場の量のレプリカを用いる）を併用する。

研究成果の概要

A. 現在までの研究成果

標準的な Gpic-MHD により、鋸歯状振動の崩壊過程に関連する運動論的内部キンクモードの線形・非線形のシミュレーションが可能であることを示した[1]. Gpic-MHD は「クロージャー」の問題がないため、流体コードの結果の正当性・健全性をチェックするためにも有用である。

２次元版 2D-Gpic-MHD は、SMP 自動並列化と場の量のコピーを用いた MPI 並列化のハイブリッド並列化により、8192 論理コアまで良好な並列化性能が得られることを実証した[2]。

３次元版 3D-Gpic-MHD は、場の量の計算が増大するため、並列化のため領域分割を利用している。トロイダル方向のみの１次元領域分割の場合 [1,2]、トロイダル方向と半径方向の２次元領域分割の場合 [2,3]に対して良好な並列化スケーリングを得た。

標準的なジャイロ運動論的 PIC コードは、大規模・高ベータのプラズマを取り扱う場合、電流

密度から磁場を求める際に大きな誤差が生じることが知られている（「キャンセレーション」の問題)。この問題の解決法として split-weight-scheme があるが、我々は場の量の計算に渦方程式と磁力線方向の一般化オームの法則を用いる方法を提唱し、この方法による新しい 2D-Gpic-MHD を作成した。また、新しい 2D-Gpic-MHD を用いて大規模・高ベータの領域でも精度良く運動論的内部キンクモードがシミュレーションできることを実証した[4,国際会議発表 6]。

B. 本年度の研究成果

前述の論文［２−４］が出版された。また、新しい Gpic-MHD のトロイダル版の基礎方程式の導出を完了した。この基礎方程式に基づくトロイダル版 Gpic-MHD は次年度に申請している共同研究で開発を完了したい。

成果報告

論文

[1] H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, S. Tokuda, M. Yagi, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 8 (2009) pp.1158-1161.

[2] H.Naitou, H. Hashimoto, Y. Yamada, S. Tokuda, M. Yagi, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, 2 (2011) pp.657-662.

[3] H. Naitou, Y. Yamada, S. Tokuda, Y. Ishii, M. Yagi, Plasma and Fusion Research, 6 (2011), pp.2401084-1-4.

[4] H. Naitou, Y. Yamada, K. Kajiwara, W.W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, Plasma Science and Technology, 13 (2011) pp.528-534.

口頭発表

1) 伊藤一希、内藤裕志、矢木雅敏、徳田伸二、トロイダル版ジャイロ簡約 MHD 方程式の導出について、プラズマ・核融合学会　九州・沖縄・山口支部　第１５回支部大会，平成２３年１２月１７、１８日、大分大学工学部。
2) 梶原健司、内藤裕志、矢木雅敏、徳田伸二、新しい Gpic-MHD コードによる運動論的内部キンクモードのシミュレーション、プラズマ・核融合学会　九州・沖縄・山口支部　第１５回支部大会，平成２３年１２月１７、１８日、大分大学工学部。
3) H. Naitou, M. Yagi, S. Tokuda, Recent progress of tokamak MHD simulation by using gyrokinetic PIC code, JIFT Workshop 2011, “The Next Stage in the Progress of Simulation Science in Plasma Physics”, Dec. 2-3, 2011, NIFS, Toki, Japan.
4) 篠田佳祐、内藤裕志、田内泰，原田直幸、矢木雅敏、徳田伸二、トカマクシミュレーションのための３次元ジャイロ簡約 MHD コードの開発、平成２３年度（第６２回）電気・情報関連学会中国支部連合大会，2011 年 10 月 22 日、広島工業大学。
5) 高木脩至、内藤裕志、田内泰，矢木雅敏、徳田伸二、２次元領域分割を用いた Gpic-MHD コードの並列化、平成２３年度（第６２回）電気・情報関連学会中国支部連合大会，2011 年 10 月 22 日、広島工業大学。
6) H. Naitou, M. Yagi, S. Tokuda,”Global MHD simulation by the gyrokinetic PIC code”, Twenty-Second International Conference on Numerical Simulations of Plasmas, Long Branch, NJ, Sep. 7-9 (2011).
7) H. Naitou, M. Yagi, S. Tokuda, Recent progress of the kinetic internal kink simulation by using Gpic-MHD code, 6th Japan-Koria Workshop on Theory and and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, NIFS, Toki, Japan, 28-29 July 2011.

希ガスプラズマ照射によるタングステンの表面損傷

研究代表者 名古屋大学大学院工学研究科 大野哲靖

１． はじめに

近年，Heプラズマに曝されたW表面にフィラメント状の構造やHeバブル・ホールといった損傷が形成されることが分かった。国際熱核融合炉実験炉（ITER）では炉壁への熱負荷低減を目的として，放射冷却用にArやNeなどの希ガスを導入する可能性がある。しかし希ガスであるArやNeもW中の熱空孔に捕捉され，He同様，ナノ構造等の照射損傷を形成する可能性があるが，それらのWの照射効果は十分にわかっていない。そこで本研究ではW－希ガスプラズマ相互作用も同じく調査した。

２． 実験方法

本実験では厚さ0.2 mmの純度99.95 %の株式会社ニラコ製W試料を使用した。直径5 mmで切り出したW試料の表面を研磨により鏡面に仕上げた。NAGDIS-IIにおいて，試料にバイアスを印加することで入射イオンエネルギーおよび試料温度をコントロールし，様々な条件下でArおよびNeプラズマを照射した。照射条件は表1に示す。プラズマ照射後，試料の照射面を走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscopy, SEM)を用いて観察した。また，試料を集束イオンビーム(Focused Ion Beam, FIB)装置によって切り出し，透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscopy, TEM) を用いて試料の断面観察を行った。

表1 照射条件

試料	W1	W2	W3
ガス種	Ne	Ar	Ar
入射イオンエネルギー	30 eV (E_{th} 以下)	30 eV (E_{th} 以下)	45eV (E_{th} 以上)
試料温度	2150 K	1550 K	1600 K
粒子束	1.2×10^{23} /m²s	3.5×10^{22} /m²s	3.5×10^{22} /m²s
照射量	1.3×10^{27}/m²	5.0×10^{26}/m²	5.0×10^{26}/m²
照射時間	10800 s	14400 s	14400 s

３． 実験結果

図 1 (a) - (c)にそれぞれ W1 - W3 の照射面の SEM 画像を示す。W1 および W2 はスパッタリング閾値以下でそれぞれ Ne および Ar 照射した試料。W3 はスパッタリング閾値以上で Ar 照射した試料になる。どの試料も結晶粒界の形成が確認されたものの，ナノ構造およびバブルもしくはホール等の照射損傷の形成は確認できなかった。また，W1 以外の W2 および W3 の照射面で筋状またはうろこ状の凹凸模様（スパッタリング）の形成が確認された。W2 がスパッタリング閾値以下でありながらスパッタリングが発生したのは，プラズマの浮遊電位の影響によると考えられる。図 2 (a) に W2，図 2 (b) に 1400 K，50 eV， 5.5×10^{25} m^{-2} で He 照射を行った試料の断面観察結果を示す。どちらの試料もスパッタリング閾値以下で照射を行ったものになる。

Ar照射試料ではHe照射で見られるようなバブル・ホールやナノ構造といった照射損傷の形成が確認されなかった。また，他の入射イオンエネルギー条件（スパッタリング閾値以上，あるいははじき出し損傷閾値以上）およびNe照射試料においても同様にHe照射のような照射損傷は確認できなかった。

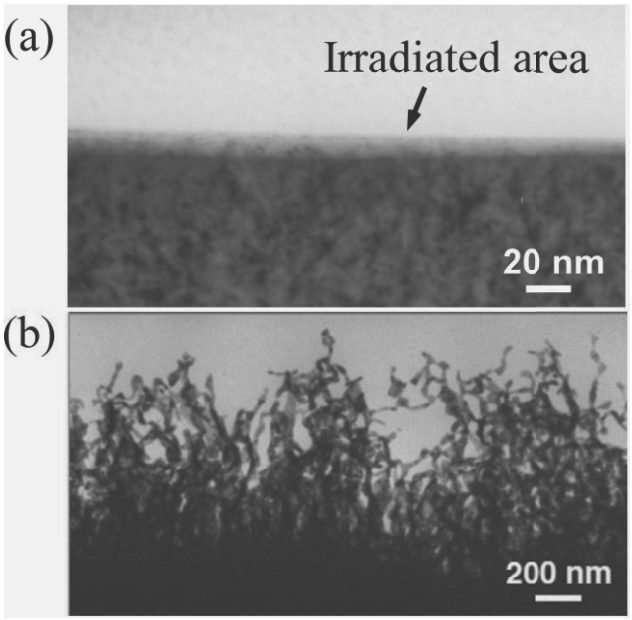


図2　(a) W2, (b) 1400 K, 50 eV,　5.5×10^{25} m^{-2}でHe照射を行ったW。

希ガスプラズマ照射でガス種によってWに対して異なる挙動を示した理由として，同じ入射イオンエネルギーであってもArおよびNeの飛程がHeより短くなってしまうため，ArやNeはW中の熱空孔にトラップされる前に脱離してしまうのではないかと推察される。ArおよびNeの照射では，バブル及びナノ構造形成のために必要な飛程を与える入射イオンエネルギーでは，スパッタリングが発生するため，バブル・ホール/ナノ構造形成とスパッタリングが競合し，スパッタリングが優勢になり，ナノ構造が形成されなかったのではないかと考えられる。

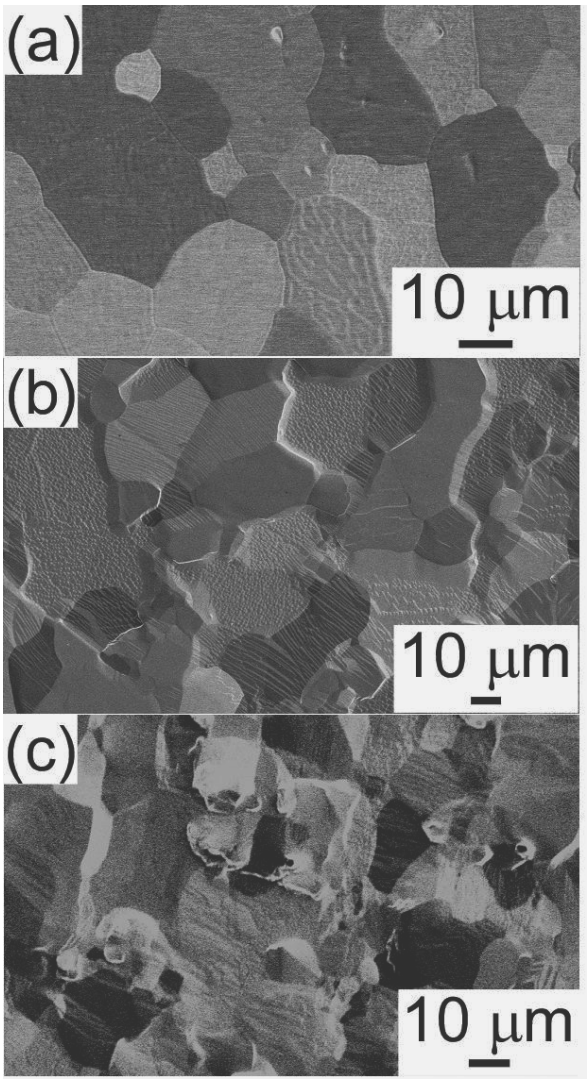


図1　(a) W1, (b) W2, (c) W3の照射表面

成果報告（論文，学会発表等）

(1) M. Yajima, M. Yamagiwa, S. Kajita, N. Ohno, M. Tokitani, A. Takayama, S. Saitou, A. M. Ito, H. Nakamura, Naoaki Yoshida, “Comparison of Damages on Tungsten Surface Exposed to Noble Gas Plasmas”, 8th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association in 2011 (Guilin, China, Nov. 1-4, 2011).

(2) M. Yajima, M. Yamagiwa, S. Kajita, N. Ohno, M. Tokitani, A. Takayama, A. M. Ito, H. Nakamura, S. Saitou, Naoaki Yoshida, “Gas Retention in Tungsten Exposed to Noble Gas Plasmas”, Plasma Conference 2011 (Kanazawa, Japan, Nov. 22-25, 2011).

ナノ構造タングステン上でのアーク痕のＴＥＭ観察

研究代表者 名古屋大学エコトピア科学研究所　梶田信

１．　はじめに

核融合炉実現において，プラズマと材料の相互作用は重要な課題の一つであり，対向材としてタングステンなどの高融点金属材料の使用が不可避である。核融合炉内でのアーキングの問題が，近年，ＥＬＭなどの間欠的現象に伴い，世界各国の装置でアーキング現象の発生が報告され始め，核融合炉におけるアーキングやホットスポットの重要性が世界的に再認識され始めている。しかしながら，これまでの知見では，核融合炉でのアーキングに伴う不純物発生量の予測ができていない。本研究においては，名古屋大学の直線型装置NAGDIS-IIにおいて観測されたヘリウム照射損傷を受けたアーク痕をFIB-TEMで観察することにより，アーキングにより放出された不純物発生量を評価した。

２．　実験方法

名古屋大学の直線型装置NAGDIS-IIにおいて，タングステンに定常プラズマ（ヘリウムプラズマ）を照射し，ヘリウム照射損傷を受けたタングステンに対して，パルス的熱負荷（パルスレーザー）を与えし，単極アークを発生させた。Figure 1に示すように表面上にはアーク痕がはっきりと観察される。Figure 1に示すAとBの場所において，アーク痕が残ったタングステン試料をFIB装置で加工し，TEM観察を実施した。Aはシングルスポットの痕跡であり，Bはグルーピングしているスポットの痕跡である。

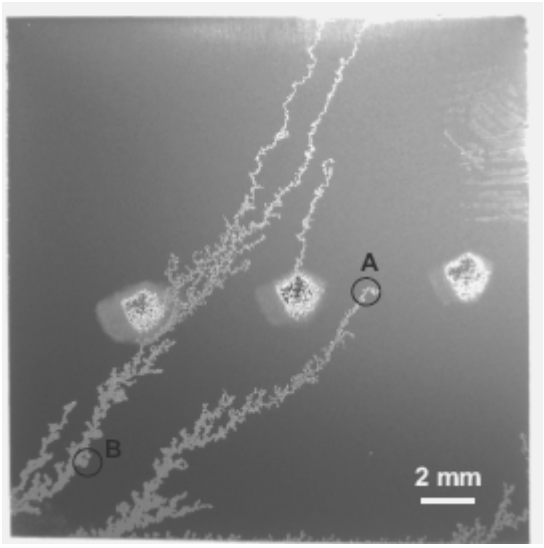


Figure 1: A picture of the arc trails on tungsten specimen.

３．　実験結果

Figure 2にFIBで加工しTEM観察を行ったアーク痕の断面図を示す。アークが通った跡は，ナノ構造が消滅している様子が分かる。しかし，Figure 2(d)に示すように，アーク痕のあとにおいても，バブルが残っている層が残っており，ナノ構造が完全には壊されていないことが分かった。TEM画像をディジタル化して，ナノ構造の消滅量を評価したところ，アークによっておよそ半分程度のナノ構造を形成しているタングステンは消滅しているものの，およそ半分は，表面に残っていることが明らかになった。

アークによるタングステンの放出量の算出に当たっては，観測結果をもとに以下の仮定を導入した。

（１） ナノ構造タングステンの密度は，通常のタングステンの1/10。

（２） アーク痕の太さは10 μm。

（３） アークにより40%のナノ構造に含まれるタングステンが放出される。

（４） アークスポットの速度は，グローバルには~100 ms^{-1}であり，ローカルな速度はその10倍。（この仮定は，高速カメラによる観測と，シミュレーションによるスポットの動きと痕跡のフラクタル解析に基づいている。）

以上の仮定をもちいると，おおよそ，アーキングにより放出されるタングステンは10 mg/sと算出された。これは，理論的に予測されている値に比べて大きな値であり，今後より詳細な検討が必要となる。またスパッタリング等との比較が必要となる。さらに，Figure 1のBにおいては，ナノ構造がFigure 2のようには残っておらず，より多量のタングステンが放出されていると考えられた。アークスポットがグループを組んでいる場合には，上記のタングステンのエロージョンレートは増加する可能性がある。

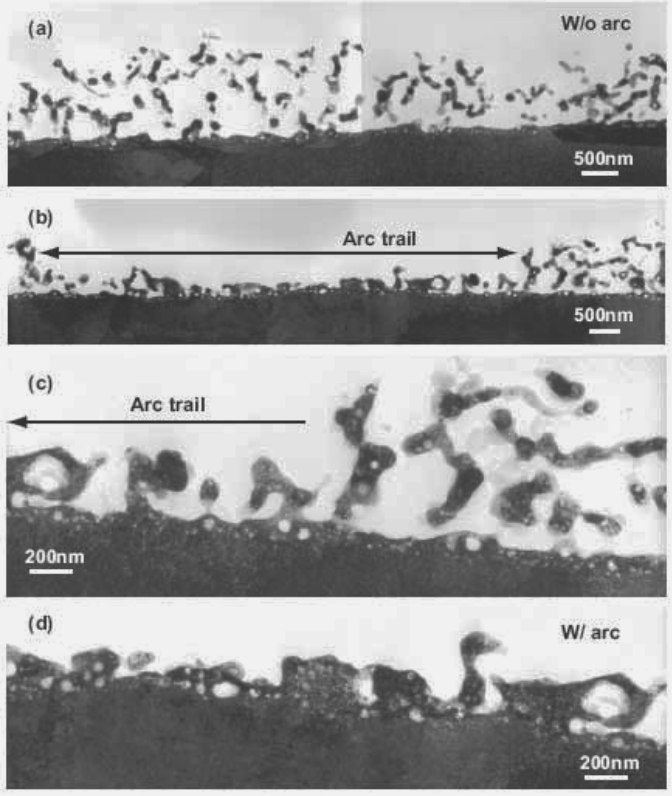


Figure 2: TEM micrographs of the nanostructured tungsten. (a) Without an arc trail, (b) with an arc trail. (c) and (d) are the enlarged images of the TEM micrographs.

成果報告（論文，学会発表等）

(1) Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Naoaki Yoshida, Reiko Yoshihara and Shuichi Takamura “Arcing on tungsten subjected to helium and transients: ignition condition and erosion rate”, Plasma Physics and Controlled Fusion **54** (2012) in press.

(2) S. Kajita, N. Ohno, N. Yoshida, S. Takamura, “Tungsten Erosion by the Initiation of Unipolar Arcs in Nuclear Fusion Devices”, in proceedings of 30th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (Belfast, U.K., Aug. 28, 2011).

(3) Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Shuichi Takamura, Masayuki Tokitani, Suguru Masuzaki, Naoaki Yoshida, Takaki Hatae, Masakatsu Fukumoto, Kiyoshi Itami, “Revival of Arcing Issue in Fusion Reactors”, Plasma Conference 2011 (Kanazawa, Japan, Nov. 22-25, 2011).

23 FP－20

LHD 第一壁トロイダルアレイ試料による対向材料の損耗/損傷および水素同位体捕捉量分布の評価

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 時谷 政行

【目的】

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマ対向壁は，SUS 製第一壁と炭素製ダイバータタイルで構成されている．LHD は 3 次元ヘリカル構造であるため，対向壁の構造も複雑であり，それ故，材料の損耗率のみならず，損耗物質の蓄積で形成される堆積層の物理特性も，場所によって大きく異なることが以前より考えられてきた．近年の表面分析研究より，損耗/堆積の情報が次第に明らかになってきたが，年度によって試料の位置，種類，照射条件が異なり，トーラス全体の現象を系統的に把握するには至っていなかった．そこで本研究では，損耗/堆積評価用の試料と第一壁へのイオンフラックス評価用の静電プローブを一体化した専用ホルダー(10 セット)で第一壁連続トロイダルアレイ試料を形成し，その後の材料分析から，損耗/堆積のトロイダル分布の導出を目的とした．さらに，イオンが直接壁を叩くグロー放電と，荷電交換反応を経た中性粒子の飛来が主である主放電との差を明確にするため，試料をそれぞれ壁電位から浮かせた Floating 試料ホルダーと，接触させた Ground 試料ホルダーに分けて設置した．前者では，グロー放電時にエネルギーを持った粒子が入射できないため，主放電時のみの材料損傷と飛来する不純物元素の組成と絶対量を導出できる．

【実験方法】

図 1 に，Ground 試料ホルダーと Floating 試料ホルダーのトロイダル方向の設置位置を示す．各試料ホルダーには Si，SUS316L，W のバルク試料と SUS316L の TEM 試料を設置した．また，表 1 に，本実験において曝露した LHD プラズマのフラックス，照射時間についての情報をまとめて示す．取り出した後の試料は，応用力学研究所に持参し，集束イオンビーム加工観察装置(FIB)によるナノ微細加工後，透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた微細構造解析を実施した．さらに，プラズマ粒子によるスパッタリング損耗量のトロイダル分布を導出することを目的とし，SUS316L の試料の損耗量の計測を，原子間力顕微鏡(AFM)を用いて実施した．

また，本実験のデータをより正確に解析するために，東北大学においてラザフォード後方散乱法(RBS)による表面組成分析も並行して実施された．

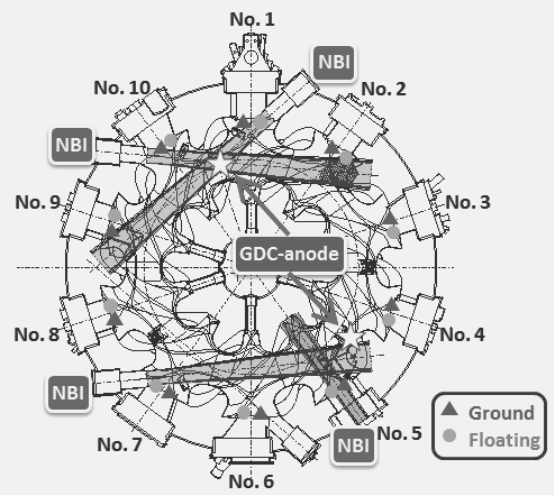


図 1 第一壁トロイダルアレイ試料の LHD トーラス位置の設置場所

Discharge type	Expected average flux to the first-wall [ions/m^2]*	Typical discharge time for one shot [s]	Total shot [count]	Total discharge time [h]
Main plasma (almost H)	~$10^{18\sim19}$	2	6230	
H-GDC	~10^{17}	—	11	132
He-GDC	~10^{17}	—	13	43
Ne-GDC	~10^{17}	—	2	15

表 1. 本実験における LHD プラズマ実験パラメータ．
Expected average flux to the first-wall は，Ref. [1]を参照

【結果および考察】

図 1 は，No.1 troidal section における Floating と Ground の Si 試料表面からの RBS スペクトルである．Floating 試料には，Fe，C を主成分とする多量の堆積物が確認できる．図 2 は，No. 1, 3, 5, 7 の断面の透過

型電子顕微鏡(TEM)像である. No. 1 の Floating 試料表面には層状の Mixed-material 構造の堆積層が形成されており, 厚さは約 450nm に達することが確認された. 対照的に, Ground 試料の RBS スペクトルでは, 表面に僅かに Fe の堆積が見られ, 断面 TEM 観察では, 厚さ 50nm 未満の薄い金属堆積層が確認された. No. 3, 5, 7 の Ground 試料では, He バブルによる欠陥形成も見られ, 激しい粒子損傷が起きていることが明らかである. このことから, 第一壁損耗の主要因はグロー放電洗浄であり, トーラス外側第一壁ではそのスパッタリング損耗率が, Fe, C を主成分とする不純物元素の堆積率を凌いでいるために, 本来の金属表面がほぼ維持され続けていると考えられる.

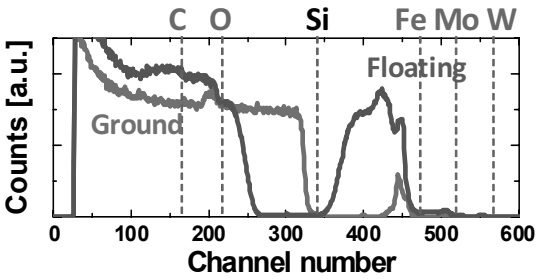


図 2 Floating と Ground Si 試料の RBS スペクトル

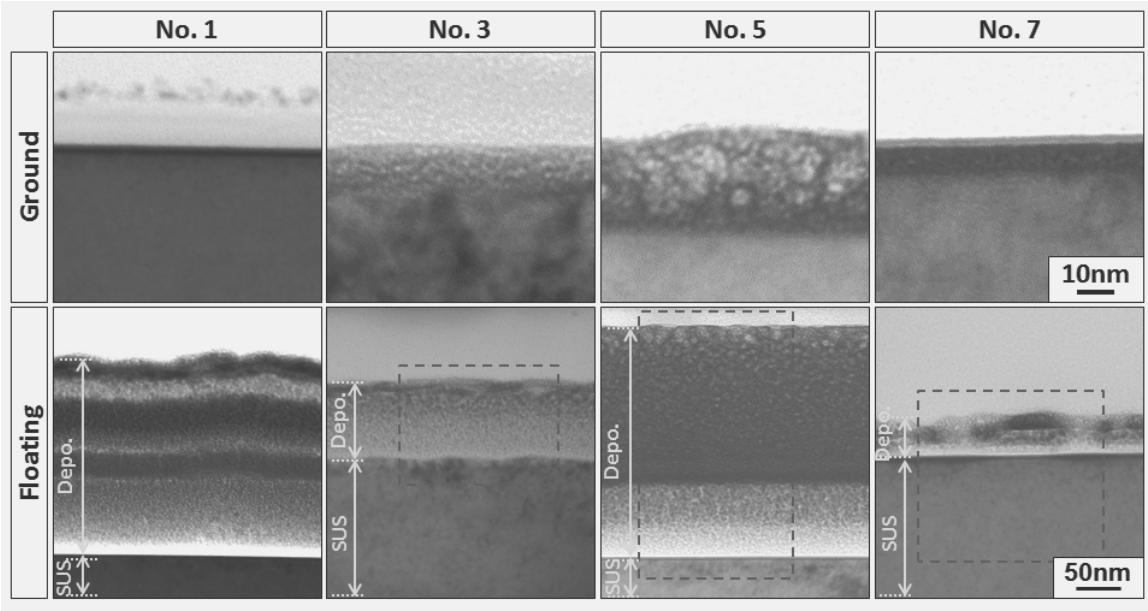


図 3 Floating と Ground Si 試料の断面 TEM 像 No. 1, 3, 5, 7 の試料

また, 図 2 は, AFM で求めた Ground SUS316L 試料の損耗深さのトロイダル分布を示している. グロー放電による損耗率は一定でなく, Troidal section ごとに 200nm~1000nm の範囲で大きな差があることがわかる. 以上の結果より, LHD 第一壁の損耗率はトロイダルに不均一であり, 損耗/堆積の機構には, グロー放電洗浄時の PWI が深くかかわっていることが明らかになった. 来年度は継続研究として, 図 3 の Ground 試料のような表面状態において水素同位体捕捉特性がどのように変化するのかについて実験的検証を予定している.

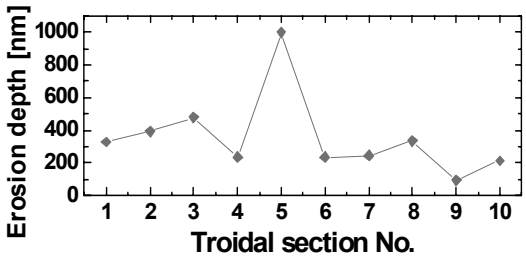


図 4 Ground SUS316L 試料の損耗深さのトロイダル分布

Reference
[1] M. Tokitani et al., J. Nucl. Mater. 386–388 (2009) 173

【成果報告】
“Evaluation of the Microscopic Damage and Erosion/Deposition Profiles on the LHD First-Wall by Using Toroidal Array Probes”, M. Tokitani et al., 15th International Conference on Fusion Reactor Materials Charleston, South Carolina USA, October 16-22, 2011

酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

九大工 安田 和弘, 高木 聖也(院), 濱崎 義之(院), 松村 晶, 九大 HVEM 山本知一

1. 目的

酸化物および窒化物セラミックスは、高融点、化学的安定性などの特長により核融合炉の各種要素材料の候補材料や、軽水炉核燃料や長寿命核種核変換のための不活性母相の候補材料となっている。報告者らは、これらのイオン・共有結合性結晶中の照射欠陥の形成過程とその照射下安定性に及ぼすはじき出し損傷と電子励起の重畳効果を明らかにすることを目的とし、これまでにマグネシア・アルミネート・スピネル($MgO{\cdot}nAl_2O_3$)、アルミナ（α-Al_2O_3）、イットリア安定化立方晶ジルコニア(Y_2O_3-ZrO_2)、セリア(CeO_2)、窒化ジルコニウム（ZrN）などの酸化物・窒化物セラミックスを対象として、各種イオン、電子の単独あるいは重畳照射下での照射欠陥の形成・成長過程を調べてきた。本報告では、CeO_2 の酸素イオン副格子の選択的はじき出し損傷に起因する照射欠陥形成と成長について報告する。

蛍石型酸化物セラミックスは、金属イオンの質量が酸素イオンに比べて著しく大きく、かつはじき出しエネルギーは金属イオンおよび酸素イオン副格子で異なる値を示し、金属イオン副格子のはじき出しエネルギーは酸素イオン副格子の 2 倍程度大きい。したがって、電子照射のように比較的小さいエネルギーを格子原子に伝達する照射環境では、酸素イオン副格子にのみ選択的なはじき出し損傷が生じ、酸素イオンが集合した格子間型転位ループが形成されると考察されている。核融合炉や原子炉照射環境では、幅広いエネルギースペクトルを持つ一次はじき出しが生成されるため、そのエネルギーに依存して酸素イオン副格子にのみはじき出し損傷が誘起されたり、両イオン副格子にはじき出し損傷が誘起される。従って、酸素イオン副格子にのみはじき出し損傷が誘起される場合や、両イオン副格子にはじき出し損傷が生じる場合の微細組織発達過程を明らかにすることは、核融合炉や原子炉照射環境下での照射下安定性を明らかにするために重要である。本研究では、幅広いエネルギー範囲の電子照射により、蛍石型構造の CeO_2 中に形成される転位ループの性状ならびに形成・成長過程を電子照射下「その場」観察法により調べた。

2. 実験方法

CeO_2 焼結体から透過電子顕微鏡用薄膜試料をイオン研磨法（Ar イオンエネルギー:1~6 keV, イオン入射角度:7°~15°）により作製した。電子照射実験および微細組織変化の「その場」観察は超高圧電子顕微鏡（JEOL JEM1300NEF）および汎用電子顕微鏡(JEOL JEM-2100HC)を用いて行った。電子エネルギーは 40 keV~1250 keV, 照射強度は約 1×10^{22} ~ 1×10^{23} e^-/m^2s の範囲とした。Ce および O イオン副格子のはじき出しエネルギーを、それぞれ 50 および 30 eV 程度と仮定すると、本研究の電子エネルギー範囲では Ce イオン副格子にはじき出し損傷は生じず、酸素イオン副格子にのみはじき出し損傷が生じるものと予想される。また、電子照射により形成された転位ループの構造を明らかにすることを目的として、JEOL JEM ARM 200F を用いて加速電圧 200 kV における高分解能観察を行った。

3. 結果及び考察

Ce イオン副格子には弾性的はじき出し損傷が生じないと考えられる 80~1250 keV の電子を室温にて照射すると、同様なコントラストを示す板状の照射欠陥集合体が形成された。図1はその一例であり、120 keV 電子を室温で照射した CeO_2 の明視野像である。照射欠陥集合体の形成・成長過程を「その場」観

察すると、照射欠陥は電子照射下に移動や繰り返し行き来する運動を示したり、欠陥同志が合体成長する現象が観察された。また、80，120，160，200 keV の電子照射下における転位ループ成長速度を測定すると、80 keV で 0.8×10^{-2} nm/s, 200 keV で 1.4×10^{-2} nm/s となり、転位ループの成長挙動は加速電圧に依存することがわかった。図2は、<110>方向から観察した転位ループを含む領域の HAADF-STEM 像であり、転位ループは edge-on 条件で写真中央に形成している。白く見えるコントラストは、Ce イオン原子列を示している。図2より、転位ループには余分な Ce イオン原子列は含まれていないことが分かり、このことは、低エネルギーの電子照射で形成される転位ループが{111}面に板状に集合した酸素イオンに起因する二次欠陥であるという考察を支持している。今後、転位ループ像の解析、ならびに Ce および O イオン副格子の双方にはじき出し損傷が誘起される照射実験をイオン照射により実施し、

比較を進めていく予定である。

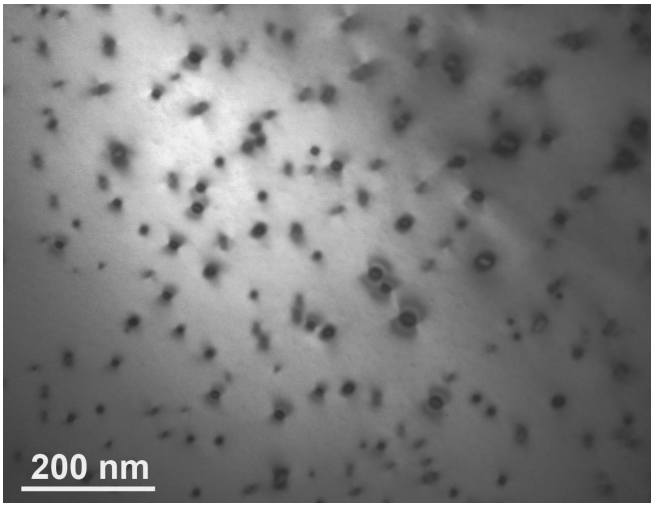


図 1　120 keV 電子を室温にて照射することにより CeO_2 中に形成された照射欠陥の明視野像。回折ベクトルは g=<333>

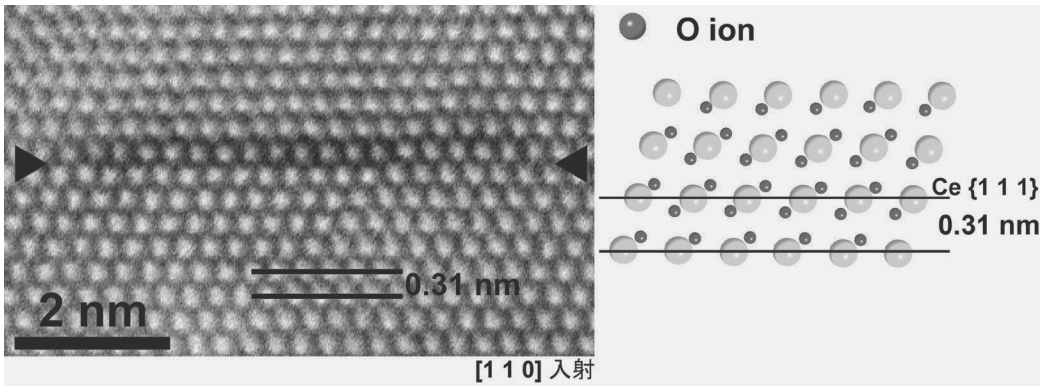


図 2 200 keV 電子を室温にて照射することにより CeO_2 中に形成された照射欠陥の HAADF-STEM 像。観察方法は、<110>方向。

23 FP－22

NDB 法によるタングステンと銅との接合界面特性に及ぼすイオン照射効果の研究

茨城大学工学部　車田　亮

1.　研究目的

タングステン材料は、耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導性を有するため、現在、研究開発が進められているプラズマ境界力学実験装置（QUEST）や国際熱核融合実験炉（ITER）などの核融合実験装置のプラズマ対向材料として期待されている。今後、実用化を目指すために、それら材料のプラズマとの相互作用の究明や冷却構造材料との接合技術の確立が必要である。一方、最近、無欠陥接合法（NDB；Non Defective Bonding）が開発され、タングステンと銅との接合強度や熱伝達特性の著しい改善がなされている。そこで、本研究は、今までの耐照射損傷性を有するプラズマ対向材料のイオン照射効果の研究実績を踏まえて、特に、NDB 法によるタングステンと銅との接合界面に注目して、その微細組織と機械的特性に及ぼすイオン照射の影響、および照射後アニーリングによる微細組織と機械的特性の回復現象を究明する。得られた結果と他の接合材などとの比較検討を行い、高性能プラズマ対向機器の開発および実用寿命の延長に役立つ知見を得ることを目的とする。

2.　実験方法

本実験では、応力緩和のため Mo を中間材に挿入した冶金接合材（W/Mo/Cu）と、タングステンと無酸素銅を直接接合した NDB（Non Defective Bonding）接合材（W/Cu）の２種類の試料を用意した。使用したタングステン材料は、市販の純度 99.95[%]の純タングステン（CM-W）、日本タングステン(株)製の純度 99.95[%]の微細結晶粒純タングステン（JT-01W）および純度 99.99[%]の粗大結晶粒純タングステン（JT-02W）の３種類であり、耐熱性や機械的性質に富み、化学的にも安定な高融点金属材料である。それらの接合材に対して、核融合炉内のプラズマ粒子や中性子照射および熱輻射などを模擬するために、573K でのイオン照射試験と 673K での照射後熱処理を行った。

イオン照射試験は、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置を用いて、接合界面を含んだ試験片中央の約φ4mm の範囲に、銅イオン（Cu^{2+}）を、タングステン部分に 1.0dpa，10dpa、銅部分に 1.8dpa，10dpa になるまで、573K での軽照射と重照射を実施した。それらの飛程はそれぞれ 350nm および 550nm である。また、照射後熱処理は、真空電気炉を用いて、温度 673K で、保持時間 100min の高温熱処理を行った

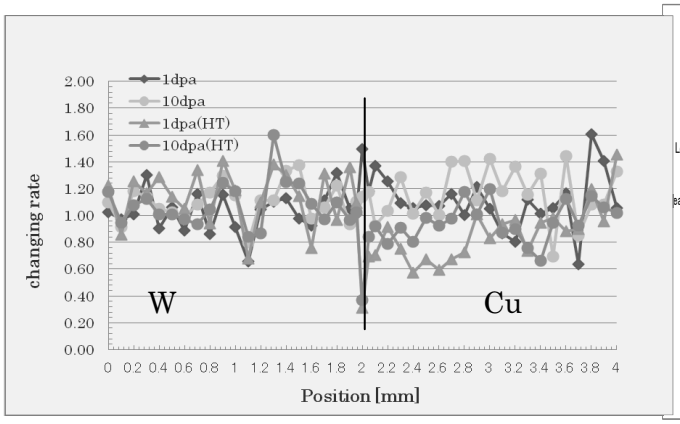
上記のタングステンと銅との接合材と照射後熱処理を施した接合材について、(株)島津製作所のダイナミック超微小硬度計(DUH-W201）による硬さ試験およびコンピュータ計測精密万能試験機(AG-5000 A）による３点曲げ試験を行い、接合界面特性のイオン照射効果および照射後アニーリング効果の究明を行った。

3.　実験結果及び考察

Fig.1 は、NDB 接合材の JT-01W/Cu の 573K イオン照射試験前後および熱処理前後におけるダイナミック硬さの未照射との増加率を示す。室温照射時と同じ傾向である照射量増大に伴う照射硬化の増大、材料による照射硬化の大小などの結果が得られた。ただし、573K での高温照射では、室温照射よりも照射硬化が小かった。また、照射後熱処理による機械的特性の回復が確認できた。

Fig.2 は、NDB 接合材の JT-01W の曲げ強度の変化を示す。イオンを低照射した接合材の曲げ強度が増加した。これは転位密度の増加に伴う照射硬化のためである。しかし、イオンを重照射した試

験片は低照射した試験片より曲げ強度が減少した。これは、高温重照射の場合は、照射による照射硬化に加えて、573K の高温環境に長時間さらされることにより、銅材料の粒成長が起こり、接合強度が低下したと考えられる。また、照射後熱処理の試験片の曲げ強度は、母材と比べて曲げ強度が低下した。上記の結果は、JT-02W/Cu 接合材についてもほぼ同等の傾向を示した。なかでも炉内の環境に近い 573K のイオン照射後熱処理の結果を比較すると、JT-01W/Cu は、JT-02W/Cu よりも高い接合強度を保持したので、より適した材料であった。



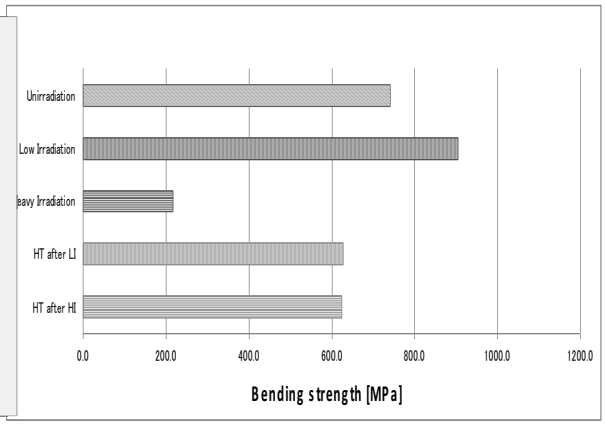


Fig. 1 Dynamic hardness change of JT-01W/Cu joint. Fig. 2 Bending strength of JT-01W/Cu joint.

4. まとめ

本研究は、タングステン材料を核融合実験装置のプラズマ対向機器へと応用するために、タングステンと銅との接合界面特性について究明した。得られた結果を要約して以下に示す。

(1)573K での高温照射においても、JT-01W の照射硬化は、JT-02W より小さかった。

(2)照射後熱処理（673[K],100[min]）により、銅およびタングステンは共に照射硬化が減少し、室温照射よりも高温照射でよりその傾向が見られた。したがって、照射後熱処理によるダイバータ機器の実用寿命の延長が期待できた。

(3)曲げ試験と接合界面観察の結果、イオンを低照射した試験片は JT-01W および JT-02W ともに曲げ強度が増加した。これは転位密度が増加し、照射硬化が起こったためと考えられた。

5. 研究組織

茨城大学工学部：車田　亮　　大学院生： 小吹隆之、由比藤峻佑

九州大学応用力学研究所：渡邉英雄　　大学院生：進崇一郎、荒瀬史朗

6. 研究成果報告

1) 小吹隆之、車田　亮、他、日本機械学会関東支部第 19 回茨城講演会講演論文集、茨城大学、(2011.8.26), pp.159-160.

2) 小吹隆之、車田　亮、他、銅及び銅合金技術研究会第 51 回講演大会概要集、京都テレサ、(2011.11.14-15), p.81.

3) 車田　亮、Mohd Yusairy、渡邉英雄、他、銅と銅合金、銅とタングステンとの接合材の硬さと組織に及ぼすイオン照射効果、第 50 巻 1 号, (2011), pp.110-114.

23 FP－23

無欠陥接合により作製されたタングステン／銅接合材料の熱負荷特性

茨城大学工学部　車田　亮

1. 研究目的

タングステン材料は、耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導率を有するため、次期核融合実験装置等のプラズマ対向材料として期待されている。今後、実用化を目指すためには、プラズマに対する熱負荷特性を究明する必要がある。また、最近開発されたタングステン材は、HIP後、鍛造や圧延等を行っておらず、従来の粉末焼結タングステン材と組織が大きく異なり、耐熱負荷特性も大きく異なることが予想される。さらに、無欠陥接合法(NDB:Non Defective Bonding)により、タングステンと銅の接合強度や熱伝達特性が著しく改善されている。そこで、本研究は、新しいタングステン材及び無欠陥接合法により作製したタングステンと銅の接合材について、実際の核融合実験装置において想定される熱負荷を与え、耐熱負荷特性を評価することを目的とする。なお、現在、九州大学応用力学研究所の球状トカマク QUEST においては、無欠陥接合法によるタングステンと銅の接合材が、リミターやダイバータ板として使用される計画となっており、その耐熱負荷特性を評価する上で、本研究の成果は有用であり、応用力学研究所の共同研究として行うことに意義がある。

2. 実験方法

実験に使用した試験体は、20x20x2.6mm の低放射化フェライト・マルテンサイト鋼（F82H, Fe-8Cr-2W）の表面にプラズマ溶射法（PS 法）により W を 1mm 被覆し、さらに内径 7mm の冷却管付き無酸素銅（OFHC）に冶金接合した。

実験では、ヒートシンク材（OFHC）を強制冷却した状態で、アーマ材（W）表面に電子ビーム加熱を行い、0.3～3.4MW/m^2 の熱流束を負荷した。冷却条件は、冷却水の入り口温度が 20℃、冷却水の流速が 18m/s、冷却水の圧力が 0.7MPa であった。また、電子ビーム加熱中の W の表面温度を放射温度計で計測するとともに、F82H および OFHC の材料温度を熱電対を用いて測定した。

熱解析では、有限要素法の汎用コードを用い、試験体の 1/4 モデルについて、各材料の温度依存性を考慮した熱伝導率、比熱、密度、熱膨張係数等の物性値を代入して解析した。Fig.1 に 1/4 試験体モデルを示す。この接合体モデルについて、熱・応力解析を行い、温度分布、ひずみ分布、応力分布等を求めた。

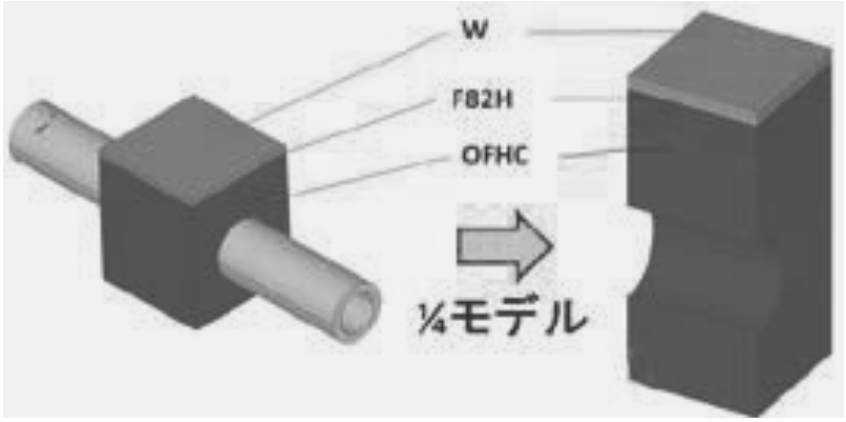


Fig.1　1/4 model of W/F82H/OHC joint.

3. 実験結果及び考察

Fig.2 に電子ビーム加熱による試験体モデルの熱負荷試験状況を示す。熱負荷試験では、3.4MW/m^2 までの熱応答試験および 3.2MW/m^2 における 200 回の熱疲労繰り返し試験を行った。その結果、き裂発生や剥離破壊を起こさず、健全性が保たれることが分かった。また、定常時の OFHC の材料温度

は、それぞれの熱流束に対して、実験結果と熱解析結果がほぼ一致し、ヒートシンク材から冷却水への熱伝達を精度よくモデル化することができた。一方、W および F82H の材料温度は、実験結果より解析結果の方が高い値を示した。この理由としては、各接合界面の熱抵抗の存在や表面輻射率の変化等が考えられた。

また、W と F82H の接合界面近傍の F82H 側に、最大引張熱応力の存在が明らかとなり、プラズマディスラプション等のさらなる温度上昇が起こった場合には、その引張熱応力が増大し、接合界面近傍の F82H 材料部分での損傷が予想された。

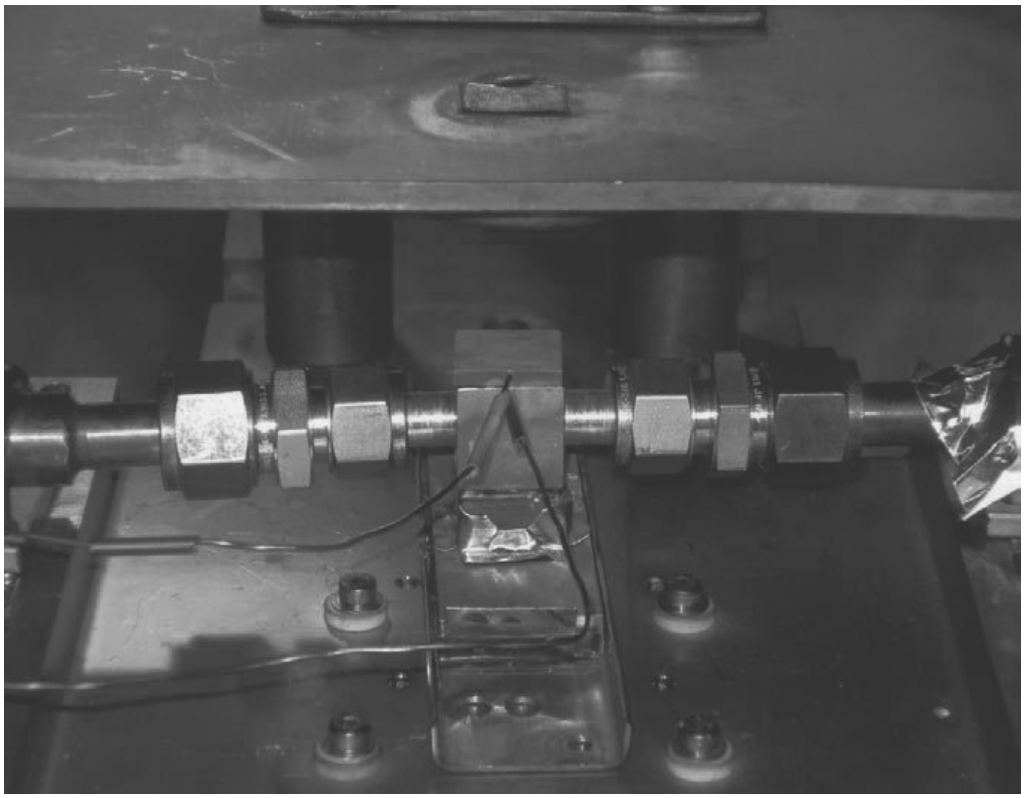


Fig.2 Electron beam heating test of W/F82H/OFHC joint.

4. まとめ

本研究は、高性能を有するプラズマ対向材料の開発を目指して、新しい無欠陥接合法により作製したタングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼と銅の接合材料について、熱負荷試験および熱・応力解析を行った。得られた結果を要約して以下に示す。

(1) 熱応答および繰り返しの熱負荷試験により、接合体の健全性が確認された。
(2) 熱・応力解析により、銅材料部分の熱応答、接合界面の熱抵抗や表面輻射率の変化および接合界面近傍の F82H 側の最大引張熱応力の存在等が明らかとなった。

5. 研究組織

茨城大学工学部：車田　亮　　大学院生：小吹隆之、由比藤峻佑
九州大学応用力学研究所：徳永和俊、荒木邦明、藤原　正、宮本好雄
日本タングステン（株）：松尾　明

6. 研究成果報告

1) 堀田智宏、徳永和俊、車田　亮、他、日本原子力学会 2011 秋の大会、北九州国際会議場, (2011.9.19-22),G05.

ゾーンプレートを使った QUEST プラズマ計測

電気通信大学　竹田辰興

【目的】磁気閉じ込めプラズマの実験的研究においては電磁波計測が有効で、中でも可視光を中心とする画像計測は重要である。本研究はゾーンプレートによるプラズマ画像計測法の開発を目的とする。

【研究概要】ゾーンプレート（ZP）は、ガラスレンズ等が屈折によって光を収束するのと異なり、回折と干渉によって光を収束させる光学素子である。ZP を用いると極めてソフトでコントラストの弱い写真が撮れるのが普通である。これは、ZP による解像度が低い訳ではなく、回折されずに像面に届く背景光のためである。点光源の像の解像度自体はゾーン数を多くすることによって大きくすることができる。X 線や短波長紫外線等の収束のためにはガラスレンズが使えないので ZP が広く有効利用されているが、可視光の場合にはガラスレンズによって鮮明な画像が簡単に得られるので今まで物理実験等の計測方法として利用されることがなかったようである。光学素子としての ZP の特徴は次のように整理できる。①ガラスレンズと違い光線が通る経路を真空にできる、②焦点距離が光の波長に逆比例するのでガラスレンズに比べて分散がきわめて大きな素子ができる、③ゾーン数を増やすと解像度が増加し、焦点深度、被写界深度が浅くなる。このうち、①の特徴は、既に記したように、可視光以外の計測分野で有効利用されている。②の特徴に関しては、分散の向きが通常のガラスと逆であることを利用した超高性能色消しレンズが可視光分野での利用例の一つである。本研究では特徴②および③に焦点を当て、ZP の QUEST プラズマ計測に利用する方法を研究する。具体的には、なるべく浅い被写界震度でプラズマの Hα 線による像を撮影することである。

今年度は、ZP の設計と基本的性能の分析、自然光下での（プラズマ以外の）被写体撮影による特徴②および③の検討、問題点および今後の課題の検討、を行った。これらについて記す。

ZP の設計と基本性能の解析：ZP にはいくつかの変種があるが、基本的な「フレネル型ゾーンプレート（FZP）」はプレート面上に同心円状の透明領域と不透明領域を交互に設けたものである（図 1、黒い部分が透明）。n 番目の同心円の半径 r_n は、同位相で透明領域を出た光が焦点面上で強め合うような条件によって求められるので、波長 λ の光に対して焦点距離 f をもつ ZP では $r_n = \sqrt{n\lambda f}$ となる。したがって、同じ ZP については、λf は一定値である。このような ZP の収束性能を調べるには、平行光線が ZP に入射するときにプレートから z の位置にある像面上の半径 R の点における光の強度 $U(R,z)$ を示す次式を計算すればよい。

$$U(R,z) = \sum_{m=1}^{M} U_m(R,z), \quad U_m(R,z) = \frac{1}{\lambda} \iint_{A_m} \frac{z}{\rho^2} \exp(jk\rho) r dr d\theta$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \rho = \left[z^2 + R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta \right]^{\frac{1}{2}}$$

ここでは光軸上無限遠にある点光源の（軸対称な ZP による）像を考えているので像面上の位置も R

だけの関数になっている。ゾーン数、焦点距離、設計波長を変えてこの計算を行い、点光源像の広がり、焦点深度、色収差の大きさを求めて、本研究の基礎資料とした。図２～図３は設計波長 550 nm、焦点距離 100 mm の ZP についての計算の例である。

実際の撮影での焦点深度、色収差の検討：デジタル一眼レフカメラ Olympus E-510 に ZP を装着して赤(R)・緑(G)・青(B)および黄(Y)のラベルで作ったテストパターン（図４）を撮影して被写界深度およびその光の波長依存性について調べた。なお、ZP は波長 550 nm 用に設計したもので像面までの距離は b=200 mm に固定してある。撮影は a=150~350 mm について行った。図５、６に結果の例を示す。カラーラベルが反射している波長分布が不明なので定量的比較はできないが図３と矛盾のない結果が得られた。なお、写真の右側の円弧と中央の白点は鏡筒内の反射防止処理が不足しているためである。

問題点と今後の課題：ZP の特徴を生かした可視光画像計測の可能性は理論計算およびモデル撮影で示されたが、磁気閉じ込めプラズマの画像計測に適用するにはいくつかの課題を解決する必要がある。大きな問題は背景光によるコントラストの低下である。対策はいくつか考えられるが一層の研究が必要であろう。次に重要なのは明るさの確保である。ゾーン数を増やせば解像度が上昇するとともに明るくもなるが、背景光も増加するという困難もある。この対策についても研究が必要である。

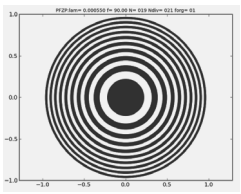


図１：ZP の例
ゾーン数：19

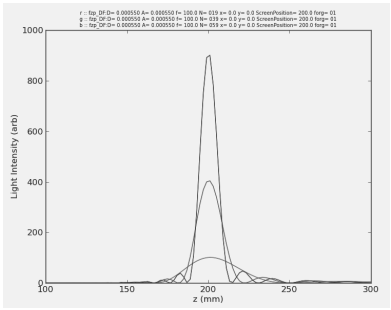


図２：被写界深度のゾーン数依存性
ゾーン数（上から 59,39,19）

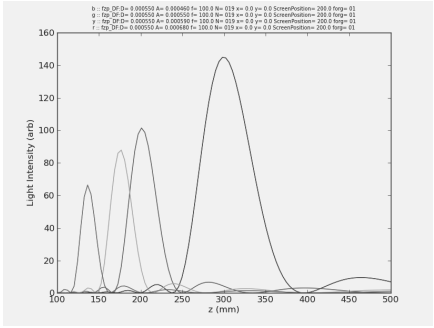


図３：被写界深度の波長依存性
f=100mm, b=200mm, RGBY

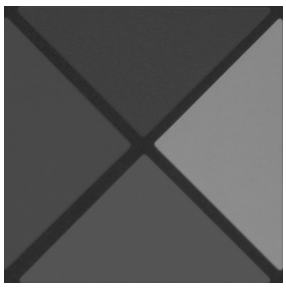


図４　テストパターン

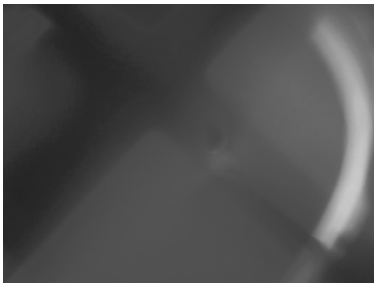


図５　a=200 mm

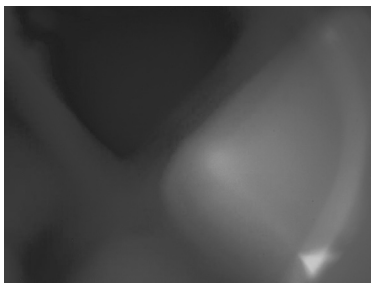


図６　a=300 mm

23 FP－25

トリチウムプラズマ照射した核融合炉材料中の水素拡散・捕獲挙動に関する研究

九州大学・総合理工学研究院　　田辺 哲朗

【目的】 次期核融合炉の第一壁候補材料である低放射化フェライト・マルテンサイト鋼（F82H）にタングステン（W）を被覆することが検討されている。本研究では、プラズマから入射したトリチウムがW被覆層およびF82H基板にどのように進入し、蓄積されるのかを明らかにすることを目的とし、W被覆層表面にDCグロー放電によりトリチウムを含んだ水素を注入し、被覆層および基板中のトリチウム深さ方向の濃度分布をトリチウムイメージングプレート法により調べた。

【実験】 大気圧プラズマ溶射（APS）法または減圧プラズマ溶射（VPS）法によって、W粒子をF82H基板（2.6 mm厚さ）上に1 mm厚さになるように積層させたものを試料（3.6 mm厚さ）として用いた。以後、APS-W/F82HおよびVPS-W/F82Hと呼ぶ。溶射に用いた平均W粒子径はVPS-Wの場合17 μmおよびAPS-Wでは50 μmであった。また、作製されたW被覆層の見かけの空隙率は前者が0.6 %であり、後者が6 %であった。

図1に示すように、トリチウムを含んだ水素（T/H=1.3 x 10^{-4}）のDCグロー放電プラズマに曝すことにより、試料のW被覆層表面にトリチウムを注入した。注入温度は453 Kまたは533 K、注入時間は2時間とした。放電は、水素ガス圧力2.6 mPa、DC電圧400 Vで行った。放電終了後、試料を233 Kまで速やかに冷却し、トリチウムのその後の移動を防いだ。つぎに図2に示すように、トリチウム入射表面に対して垂直断面を切り出し、この断面のトリチウムβ線強度分布をTIP法により測定することにより、W被覆層およびF82H基板中の入射方向へのトリチウム深さ分布を求めた。

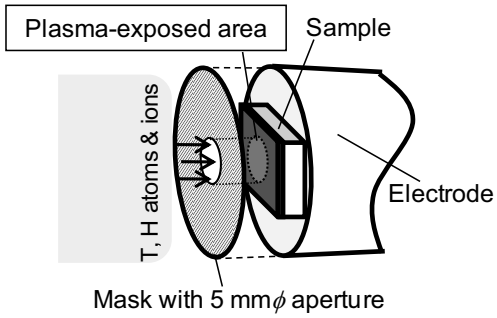


図1　DCグロー放電による試料への水素（トリチウム）注入方法の概略

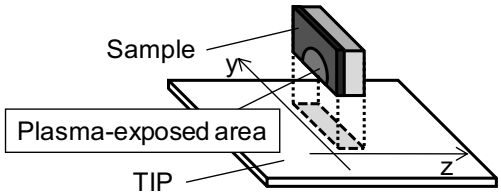


図2　TIP法における試料とTIPとの配置状況の概略

【結果・考察】 図3に、453 Kまたは573 Kでトリチウムを注入した(a)APS-W/F82Hおよび(b)VPS-W/F82H中のトリチウム深さ分布を示す。両試料とも、W被覆層表面から~0.25 mm深さまでに多量のトリチウムが保持されている様子が観察された。この領域より深いW被覆層中（0.25~1 mm深さ）では、トリチウムの濃度はほぼ均一であった。W被覆層とF82H基板表面との間に濃度のギャップが見られ、F82H基板中では深くなるにつれ、濃度が徐々に減衰していることがわかる。453 Kで注入した試料に比べると、573 K注入した試料では、W被覆層表面近傍のトリチウム濃度は半分以下であった。一方、W被覆層中の均一に分布していた成分については、APS-Wでは両温度でその濃度はほとんど変わらなかったが、VPS-Wでは473KではAPS-Wより濃度が高かったが573Kになると半分程度にまで低下したため、573KではAPS-WとVPS-W中のトリチウム濃度はほぼ同程度となった。基板中ではトリチウム濃度は界面でやや低下し濃度分布がほぼ平坦になった。

このようなW被覆層されたF82H基板へのトリチウムの進入は、以下のように説明できる。トリチウ

ムは、放電プラズマから高いエネルギーで、かつ多量に被覆層表面に入射する。これにより、被覆層の表面が改質、または表面近傍に多量の欠陥が生成され、それらがトリチウムを捕獲するため高濃度のトリチウムが表面近傍に保持（蓄積）される。被覆層中では W 粒子間の空隙を通ってガス状トリチウムが進入するため、各粒子の表面は同じ圧力の水素（トリチウム）に曝されることになり、粒子の位置（深さ）に関わらずトリチウム濃度はほぼ一定になる。両被覆層の空隙率が 10 倍程度異なるにも関わらず、ほぼ同じような濃度になっているのは、W 粒子の表面に水素が速やかに吸着（捕獲）され、一部の溶解した水素がバルク拡散により内部に進入するからであろう。注入温度が高いほうが、被覆層中の水素濃度が低下したのは、被覆層表面近傍や W 粒子表面や内部の捕獲水素の脱捕獲による再放出フラックスが大きくなるためと考えられる。被覆層と基板との界面も同じように水素（トリチウム）ガス圧に曝されることになり、トリチウムは基板内に進入する。ここで、基板表面での水素濃度は一定であり、水素は深さ方向へ拡散によって進入したと仮定し、473 K 注入した試料の基板内でのトリチウム深さ分布から水素拡散係数が求めてみたところ、その値は F82H 中の水素拡散係数の文献データに良く一致していた。このことから、基板内へのトリチウムの進入はバルク拡散によるものであると云える。573 K 注入した試料でトリチウム深さ分布がほぼ平坦であったことから、トリチウムは基板裏面に達しており、その透過がほぼ定常に達していたと考えられる。

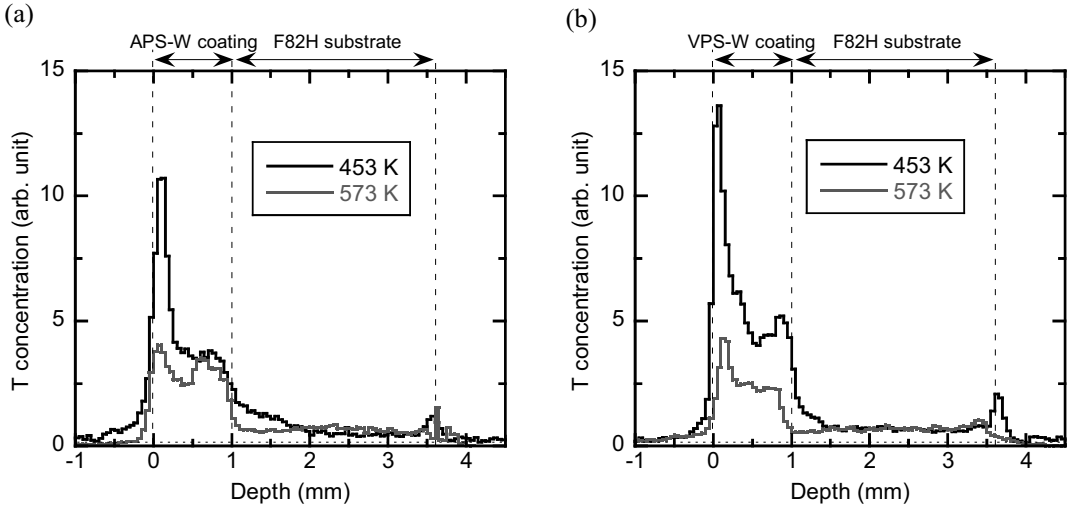


図 3　453 K（黒色）および 573 K（灰色）でトリチウムを注入した(a) APS-W/F82H および(b) VPS-W/F82H 中の水素深さ分布

【口頭発表・ポスター発表】

1. Behavior of tritium in plasma-sprayed tungsten coating on steel exposed to tritium plasma, T. Otsuka, T. Tanabe and K. Tokunaga, 13th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Rosenheim, Germany, 11 May 2011, 9-13 May 2011, P37B
2. I. プラズマ対向壁としてのタングステン中のトリチウム挙動(6) トリチウムプラズマに曝されたタングステン被覆フェライト鋼へのトリチウム進入機構の解明, 大塚　哲平, 田辺　哲朗, 徳永　和俊, 日本原子力学会　秋の年会,　北九州市

【論文】

1. Behaviour of tritium in plasma-sprayed tungsten coating on steel exposed to tritium plasma, T. Otsuka, T. Tanabe, K. Tokunaga, Phys. Scr. T145 (2011) 014035.

物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状再構築システム（CCS）の ST プラズマ位置形状制御への適用検討(II)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構 栗原研一、川俣陽一、末岡通治
九州東海大学 御手洗 修
九州大学 劉 暁龍、浮田天志、中村一男

1．目的

本研究は、九大応力研で平成20年度より既に実験を開始しているプラズマ境界力学実験装置（QUEST: Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak, R=0.68m, a=0.40m, Bt=0.25T, 図1参照）におけるプラズマ断面位置形状の高精度平衡制御系の構築を目指すものである。その手法として、原子力機構JT-60におけるプラズマ断面位置形状の高精度平衡制御に優れた実績を持つ「コーシー条件面（CCS）法」を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築手法を、QUESTのプラズマ実時間形状制御へ適用させるための検討を行うものである。特に、プラズマ変動期の再構築精度に大きな影響を及ぼす真空容器内渦電流の推定法について、物理的に無矛盾なモデルによる実時間計算方法の検討も行う。なお、昨年度は、QUEST実験開始当初に装着された磁束ループ信号だけを用いたデータ解析で良好な結果が得られたことから、さらに実時間位置形状フィードバック制御への適用検討や磁気プローブもセンサーとして追加した場合の渦電流同定とプラズマ位置形状精度向上について検討を開始する。

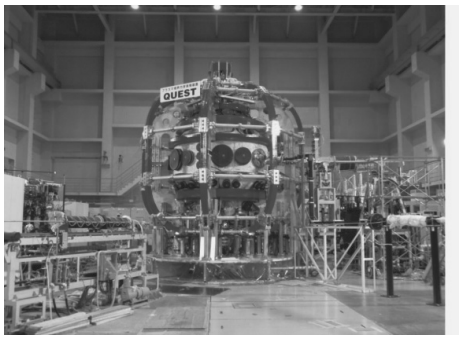


図 1：QUEST

2．研究の具体的方法

研究対象としては、原子力機構JT-60でのCCS法を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築システムをプラズマ境界力学実験装置（QUEST）への適用に於いて、昨年度に引き続き以下の検討を行う。図2に示すようなQUESTの幾何学体系を踏まえたコードの具体化と渦電流の影響を精度良く考慮する方法、さらにはプラズマ実時間制御を検討する。①磁気センサーとして、フラックスループ13本に加え、磁気プローブ8本を考慮したCCS法の適用について検討する。特に、これまでのリミター配位に加え、ダイバータ配位のプラズマへの適用を行う。②真空容器などプラズマ周辺の導体を流れる渦電流の影響を検討する。③処理の高速化、並列化などを検討し、n-indexが正となる縦長プラズマ断面位置形状の実時間制御への適用を検討する。④実時間プラズマ断面形状可視化システム構築の検討を行う。

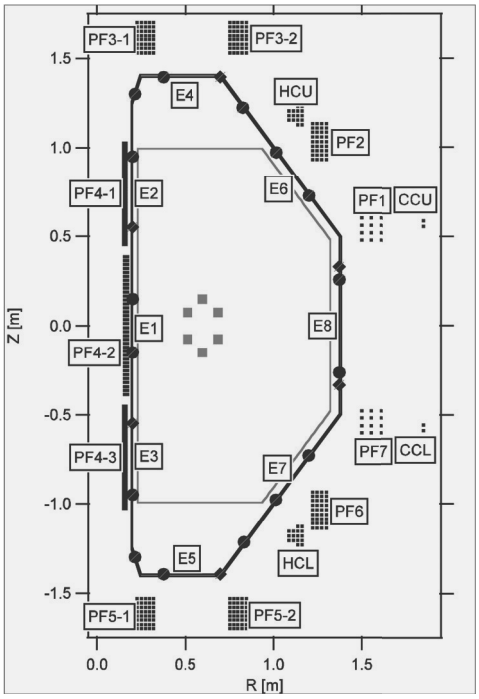


図 2：QUEST のポロイダル断面図

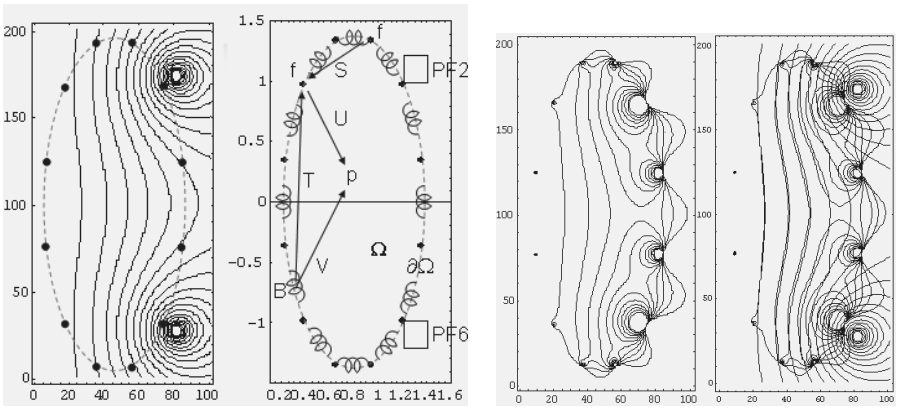
3．結果概要

3.1 QUESTにおけるCCS法に基づく真空磁場の再構成

CCS法の特徴として、真空磁場の場合（プラズマ電流が流れていない場合）で真空容器に渦電流が流れていても、真空容器よりも内側にある磁気計測面における境界条件（コーシー条件）のみによって真空磁場は決定される。QUEST球状トカマクにおいてPF2とPF6コイルのみに通電した場合の計算結果を図3に示す。

EAST超伝導トカマクのプラズマの着火時における真空磁場については、フラックスループおよび磁気プローブの磁気計測結果に基づいて真空容器に流れる渦電流を計算した後、真空容器内の真空磁場（もしくは初期プラズマ電流）を計算している。プラズマが着火する前の真空磁場について上記方法を適用した結果、良好な結果が得られた。

さらに、CCS法によれば、コーシー条件面上ではフラックスと接線方向磁場（フラックスの法線方向微分）の間に拘束条件が存在するため、真空磁場の場合、フラックスループの計測結果からのみでも、真空磁場を再構成することが可能である。EASTに本方法を適用した場合も、良好な結果が得られた。



(a)　(b)　(c)　(d)

図 3：CCS 法による QUEST の真空場の再構築例
（a：正解の真空磁束分布、b：コーシー面、c：再構築結果、d：正解との重ね描き）

3.2　2種類の磁気センサーを用いたCCS法に基づくQUEST断面形状再構成

磁気プローブ（図4に配置を示す）の増設により、これまでのフラックスループと伴に2種類の磁気センサーを用いることにより、真空容器渦電流の影響の考慮の精度が向上し、ダイバータプラズマ断面形状の高精度化が可能となった。

渦電流については、図5に示すように昨年度と同様に6種類の一様電流を仮定した。

これら磁気センサー及

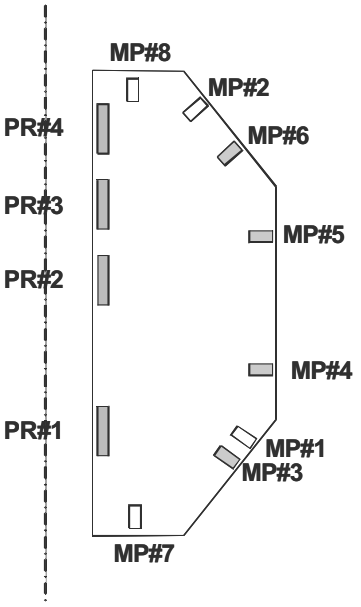


図4：8本の磁気プローブ（MP）配置

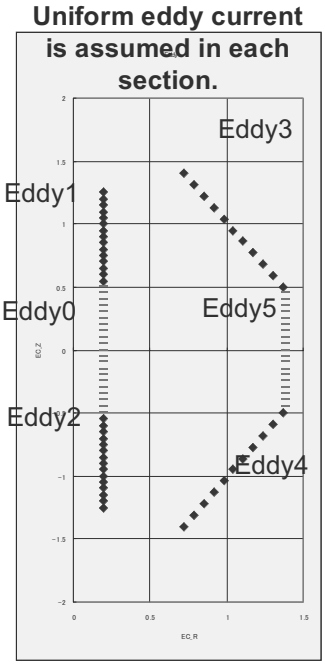


図5：用いた渦電流セクション

び渦電流を考慮してCCS法に基づくQUESTプラズマの高精度再構築を行った。まず図6に磁気プローブの有無による再構成磁気面の比較を示す。磁気プローブを使用した場合の方がX点が形成されかけた最外殻磁気面構造が再現していることが判る。

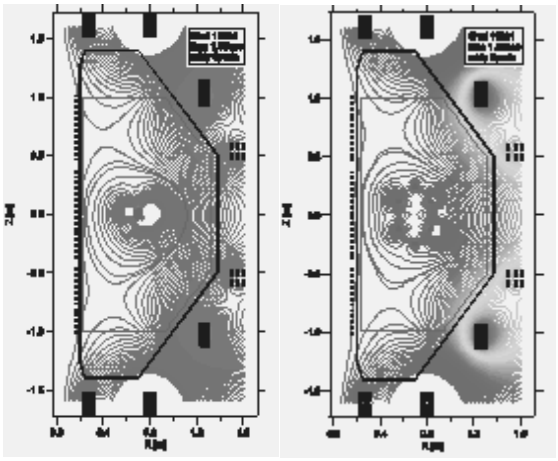


図6：磁気プローブの有無による再構成磁気面の比較

図7に12月に行ったダイバータ配位の再構成結果を示す。新たに導入したWindows E-FITにて再構成した結果との比較も示す。後者については、内部の電流分布を仮定していることから、その強い拘束条件による影響がどの程度かを利用に際しては常に精査する必要がある。

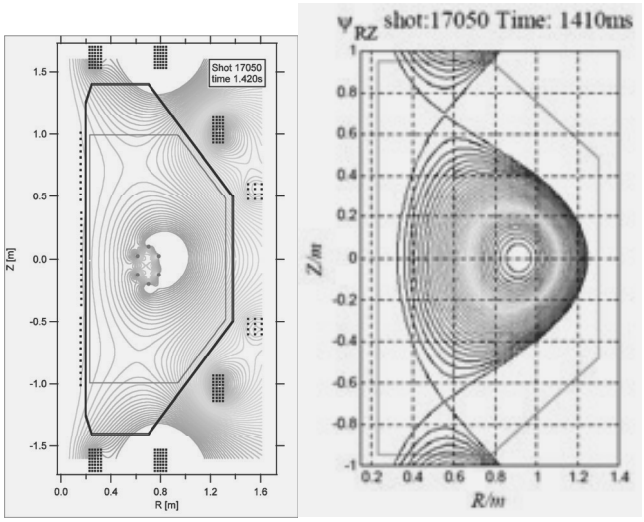


図7：CCS法とE-FITによるダイバータ配位の再構成磁気面の比較

また、図8にEC電流駆動時のプラズマを示す。高速電子の存在のため非等方な圧力分布になるが、CCS法は真空磁気面に関して影響を受けない。一方、ダイバータ配位を期待したが、インボード側で容器と接しリミター配位となっている。

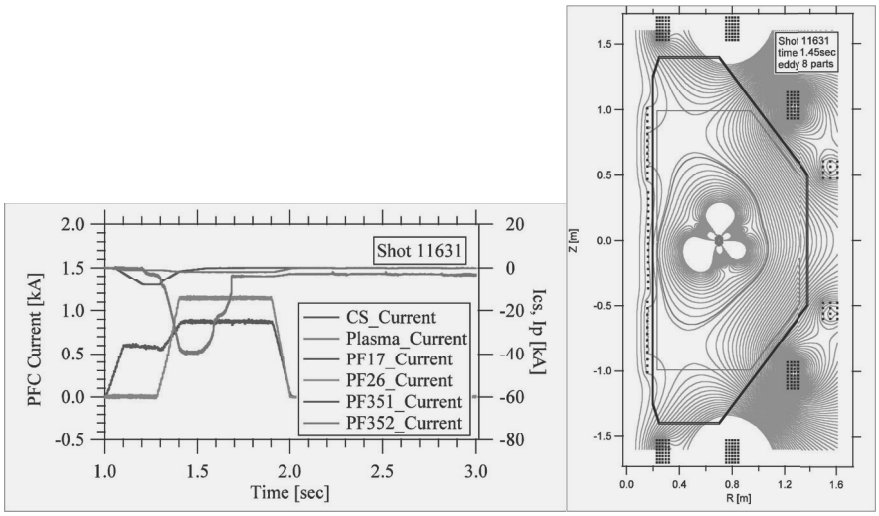


図8：ECRF電流駆動時のプラズマ再構築結果（左はPFコイル電流値変化）

図9に、CCS法により再構築された代表的なダーバータ配位のプラズマを参考に示す。

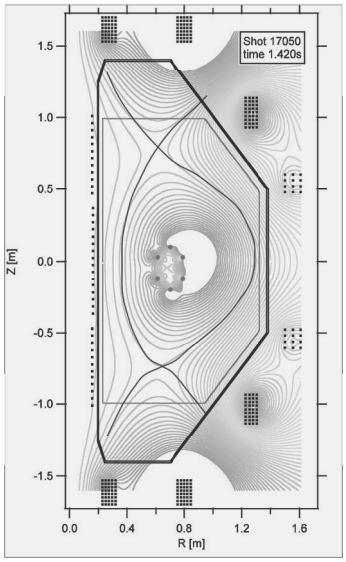


図9：CCS法により再構築されたダーバータ配位のプラズマ

3.3 CCSを用いたQUESTプラズマ断面形状実時間フィードバック制御に向けた制御システム構成検討

球状トカマクプラズマの断面形状は、位置の変化やポロイダルベータ値に敏感に反応する。そこでJT-60で稼働実績のあるCCS法に基づくプラズマ断面形状再構成により、球状トカマクプラズマ形状等を実時間制御することを目指し、本年度はまず制御システムの基本構成について検討した。参考に図10にJT-60で稼働していた実時間プラズマ形状可視化システムの構成を示す。

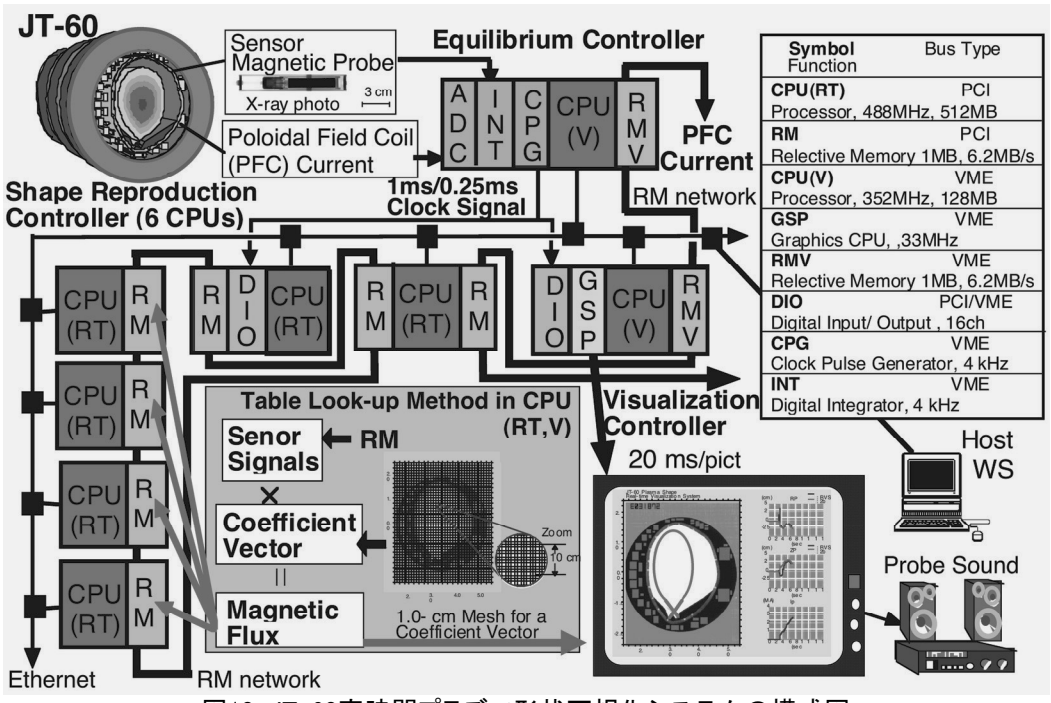


図10：JT-60実時間プラズマ形状可視化システムの構成図

実時間動作としては、プラズマ内の仮想の表面であるCCS（コーシー条件面）上の磁束、磁場と渦電流の三つのパラメータを未知数とし、磁気プローブ、フラックスループの観測方程式とコーシー条件面上の境界積分方程式を連立させて未知数を求めた後、プラズマ表面磁束値の等高線を探索すれば、プラズマ最外殻磁気面形状が再構築でき、目標とする形状との偏差をポロイダル磁場コイル電源電圧の指令値として制御することで所定のフィードバック制御システムが構築できる。

そこで、まずQUEST装置での現制御システムとCCS法を搭載した制御システムの並列同時稼働

を最初の達成ステップと設定し、その手法に関して、JT-60での経験及びJT-60SAの設計・開発作業より、メモリ共有方式による入力信号の共有(分岐)利用方法を提案した。

メモリ共有方式に用いる中心的なハードウェアは、「リフレクティブ・メモリ」と呼ばれる電子基板からなる機器である。現在のQUEST実時間制御システムを構成するNI(ナショナル・インスツルメンツ社)製のPXIバスシステムに、「リフレクティブ・メモリ」が対応可能か原子力機構で調査した結果、基本的にCompactPCIバスをベースとしたPXIバスシャーシに「リフレクティブ・メモリ」ボードが対応出来ることを確認した。

これを踏まえて、次年度以降、CCSを用いたQUESTプラズマ断面形状実時間フィードバック制御に向け、制御システム構成のより具体的な検討に着手する予定である。

4. まとめ —今後の新たな展開に向けて—

以上の検討結果から以下の成果が得られた。

○ 従来のフラックスセンサーに加え、新規の磁気プローブセンサーも加えたことで、渦電流を考慮したCCS法によるプラズマ最外殻磁気面の再構成精度が向上した。

○ CCS法に基づくQUESTの真空磁場の高精度再構成が可能である事を示した。

○ CCS法を実時間で実行する際の基本構成では、「リフレクティブ・メモリ」と呼ばれる共有メモリの適用可否が鍵となるが、現在のQUEST実時間制御システムを構成するNI(ナショナル・インスツルメンツ社)製のPXIバスシステムに、「リフレクティブ・メモリ」が対応可能であることを確認した。

今後は、さらに以上の成果を踏まえて発展させ、以下を行う:

○渦電流同定についてのさらなる精度向上を検討する。

○QUEST実時間制御システムに、CCSによるプラズマ断面形状実時間再構築システムの実現を検討する。

5. 関連文献

＜今年度(H23年度)分＞

[1] K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, Fusion Engineering and Design, Vol.86 (2011) 1080-1084.

[2] K. Nakamura, X.L. Liu, M. Tomoda, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Effect of Shell Cut and Diagnostic Port on Stabilizing Characteristics of Vertical Position Instability on QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-34.

[3] K. Nakamura, X.L. Liu, T. Yoshisue, O. Mitarai, K. Tokunaga, M. Hasegawa, et al.: Venturini Method and Space Vector Modulation Method in Matrix Converter, ICEE2011, Hongkong (2011) A367.

[4] 吉末竜也, 中村一男, 劉 暁龍, 薛 二兵, 長谷川 真, 徳永 和俊, 御手洗 修, 他: QUEST プラズマ制御のためのマトリクスコンバータの検討, 電気関係学会九州支部連合大会, 佐賀 (2011) 01-1A-01.

[5] X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study of Matrix Converter as a Current-Controlled Power Supply in QUEST Tokamak, Plasma Fusion Res., Vol.6 (2011) 2405137.

[6] Xue Erbing, Luo Jiarong, Liu Xiaolong, Kazuo Nakamura: Modeling of Vacuum Field in Start-up in EAST, ITC-21, Toki (2011) P1-54.

[7] K. Nakamura, X.L. Liu, E.B. Xue, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: QUEST Shape Reproduction Based on CCS Method with Two Kinds of Magnetic Sensors, Plasma Conference 2011, Kanazawa (2011) 22P132-P.

[8] X.L. Liu, K. Nakamura, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Robust Control Design for Plasma Vertical Instability of QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-39.

＜H22年度以前分＞

・中村一男, 姜 毅, 劉 暁龍, 御手洗修, 栗原研一,川俣陽一,末岡通治,長谷川真,他: CCS法に基づくQUESTプラズマ断面再構成に及ぼす渦電流の影響, 第8回核融合エネルギー連合講演会, Takayama (June 11, 2010) 11B-10p.

・ K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, 26th Symposium on Fusion Technology, Porto (Sept. 29, 2010) P3-158.
・ 中村一男, 姜 毅, 劉 暁龍, 御手洗修, 栗原研一, 川俣陽一, 末岡通治, 長谷川真,他: QUESTにおける各種電流駆動時のCCS法による断面形状再構成, 第27回プラズマ・核融合学会, Sapporo (Dec. 1, 2010) 01P54.
・ X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study of a Matrix Converter for Plasma Vertical Position Control on QUEST Tokamak, ITC-20, Toki (2010) P2-69.
・ 中村一男, 劉 暁龍, 吉末竜也, 御手洗修, 徳永和俊, 長谷川真, 他: マトリクスコンバータにおけるVenturini法と空間ベクトル法, 電気学会半導体電力変換研究会, Kobe (Jan. 21, 2011) SPC-11-024.
・K. Nakamura, et al., ″Characteristics of SVD in ST Plasma Shape Reconstruction Method Based on CCS″ Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Vol.8 (2009), pp. 1048-1051, Sep. 2009.
・K. Nakamura, et al., ″Eddy Current Effect on Plasma Shape Reconstruction Based on CCS Method in CPD and QUEST″ Asia Plasma Fusion Association 2009, Festival City AUGA, Aomori, Japan, Oct. 27th-30th, 2009.
・中村一男, 他,「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解の特徴」第25回プラズマ・核融合学会 年会 予稿集 (2008).
・中村一男, 他,「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解」第24回プラズマ・核融合学会 年会 予稿集 (2007).
・姜 毅, 他,「渦電流を考慮したCCS法によるQUEST球状プラズマ断面形状の実時間再構成」第13回プラズマ・核融合学会年会(九州・沖縄・山口支部大会) 予稿集 (2009).
・松藤伸治, 他,「真空容器渦電流分布を考慮したCCS法によるCPDプラズマ断面形状再構成」第12回プラズマ・核融合学会(九州・沖縄・山口支部大会) 年会 予稿集 (2008).
・F. Wang, K. Nakamura, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, K. N. Sato, H. Zushi, K. Hanada, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, et al.: *Engineering Sciences Reports, Kyushu University*, Vol. 29, No. 1 (2007) 7-12.
・K. Kurihara, et al., ″The basic methods for understanding of plasma equilibrium toward advanced control″ Fusion Eng. Des., 74 (2005), pp. 527-536.
・K. Kurihara, ″A new shape reproduction method based on the Cauchy-condition surface for real-time tokamak reactor control″ Fusion Eng. Des., 51-52 (2002), pp. 1049-1057.

（以上）

九州大学施設利用に係る報告書

「応力下における照射組織の発達過程に係る強度特性評価（その２）」

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
燃料材料試験部 材料試験課
井上 利彦

1. 緒言

日本原子力研究開発機構では、高速炉炉心用材料として耐スエリング性と高温強度に優れた改良 SUS316 鋼（PNC316 鋼）を開発し高速実験炉「常陽」等で実機燃料ピンとして実用するとともに、高速中性子による照射挙動を評価している。その結果、材料照射と燃料ピン照射において両者におけるスエリング挙動の明確な相違が認められている。材料照射は、材料試験片そのものを照射リグに装荷して照射しており、燃料ピン照射は実機燃料ピンでの照射を行っている。照射量と照射温度で評価した場合、両者の違いは明らかにされておらず、実機燃料ピンの環境効果が要因として推定される。具体的な要因として、温度勾配と温度変動及び内圧増加による周応力の変動等の照射環境の複合的な作用が考えられる。

本研究では、材料照射と燃料ピン照射におけるスエリング挙動の相違と要因を明らかにすることを目的とする。この複合的な環境効果の作用を評価する第 1 段階として、炉心用材料において応力場が組織変化に与える影響を明確にすることを目的とする。

また、機構では、耐スエリング特性に優れた高 Ni 鋼の研究開発を行っており、本研究で得られた知見を踏まえた開発を目指している。高 Ni 化や高温域でも安定な析出物の均一化等により耐スエリング特性が高められた高 Ni 鋼を用いて、応力を付加することにより更に照射損傷を加速させた照射試験を行い、耐スエリング特性に及ぼす高 Ni 化や析出物の影響評価を行う。

2. 実験方法

九州大学応用力学研究所設置のタンデム型イオン加速器ビームライン上に、荷重制御による小型引張試験機を設置されている動的効果観察ステーションを用いて、2.4-3.2 MeV Ni イオンの照射を行った。照射条件は室温から 600℃、負荷荷重は最大 100N とした。照射後に微細組織観察を行い応力が与える照射欠陥集合体の離合集散状態を応力無負荷の試料と比較した。供試材はオーステナイト鋼である JPCA2（焼鈍材）を用いた。

また、高 Ni 鋼（15Cr-43Ni、γ’/γ”弱析出型）を供試材として、タンデム型イオン加速器を用いた 2.4MeV Cu イオンの照射を行った。照射条件は 700、800℃、200dpa として、今回は応力無負荷での微細組織観察試料とした。

3. 結果

応力無負荷及び応力負荷試料の両者の微細組織を比較した結果を図-1 に示す。図-1 の上段には応力無負荷試料を示し、下段には 25N で応力を負荷したまま照射温度 400℃、照射量 5dpa まで照射した試料を示す。応力なしの状態では、損傷ピークの近傍にのみ格子間原子型の転位ループが形成されるが、照射中に 25N の応力を負荷すると転位ループ密度が少ない領域においても高密度の転位が形成され、応力負荷の影響が広範囲にまで及ぶことが示された。

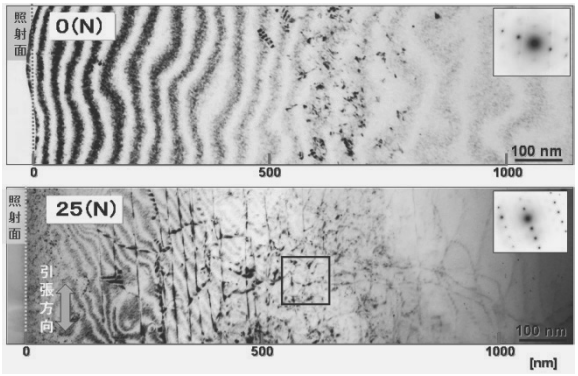


図 1　照射試料断面の微細組織観察結果（400℃，5dpa）

応力無負荷における高 Ni 鋼（15Cr-43Ni、γ'/γ"弱析出型）の 700℃、200dpa における微細組織観察の結果を図-2 に示す。高温及び高照射量の条件下においてγ'/γ"（Ni_3(Ti,Al)/Ni_3Nb）析出物は安定に存在していた。今後、応力負荷環境における照射試験を行い、損傷形態を比較することによって、耐スエリング特性に及ぼす高 Ni 化や析出物の影響評価を行う予定である。

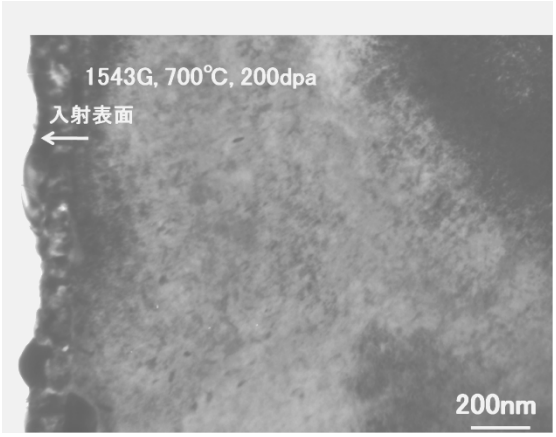


図 2　照射した高 Ni 鋼試料断面の微細組織観察結果（700℃，200dpa）

23 FP－28

低エネルギープラズマ照射によるタングステン中の水素拡散、吸蔵、透過に関する研究

筑波大学数理物質系　坂本瑞樹

目的

核融合炉実現に向けて、プラズマ対向壁とプラズマとの相互作用（PWI）は重要な研究課題である。プラズマ対向壁の表面状態は、照射損傷、再堆積、He バブル形成等の様々な PWI 現象に起因して変化する。この表面改質が壁の水素吸蔵・放出特性に与える影響の理解は、核融合炉のトリチウムインベントリーやプラズマの粒子制御に関連して重要である。本研究では、低損耗・高融点という特長から国際熱核融合実験炉 ITER においてプラズマ対向材料としての使用が計画されているタングステン材料に注目し、ダイバータを模擬した低エネルギー・高フラックスプラズマ照射と昇温脱離計測や材料解析、水素透過量計測等を行い、極限環境下におけるタングステン中の水素拡散、吸蔵、透過に関する基礎過程の理解を深めることを目的とする。

実験方法

今回の実験では特にタングステン中の水素拡散・透過に注目し、タングステン薄膜を透過する重水素フラックスの計測を行った。図 1 に今回実験に用いた PWI 模擬実験装置 APSEDAS(Advanced PWI Simulation Experimental Device and Analysis System)の概略図を示す。真空容器の周りには 2 組の磁場コイルが設置されており、真空容器中心で最大約 0.05T の垂直磁場を発生させることが可能である。真空容器上部のヘリカルアンテナに 13.56MHz の高周波(P_{RF}<5kW)を印加することによって直径約 50mm のプラズマが生成される。そのプラズマはステージに固定された試料に対して垂直に照射される。試料は図 2 に示すように内径 16mm のステンレス製ヘッドと銅ガスケットで締めこまれ、試料によってプラズマ入射側と透過側に分けられる。今回の実験に用いた試料は直径 20mm、厚さ 0.1mm、純度 99.99%のアライドマテリアル社製の多結晶タングステンである。プラズマ照射中は入射側の重水素ガス圧は約 2×10^{-2}Torr、透過側の圧力は約 3×10^{-7}Torr に維持される。プラズマ照射中の試料表面温度は試料の透過側に接触させた熱電対を用いて計測した。試料を透過した重水素フラックスは、図 1 に示すように試料より下流側に設置した四重極質量分析

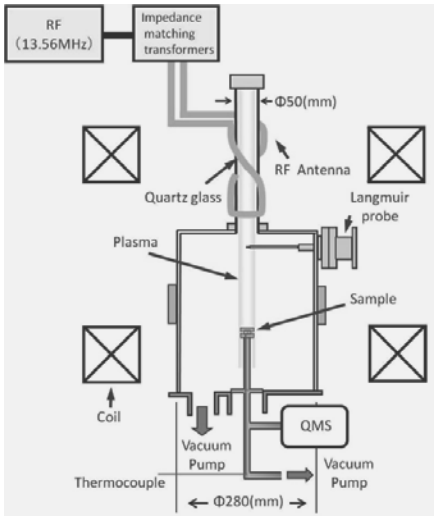


図 1　PWI 模擬実験装置 APSEDAS の概略図

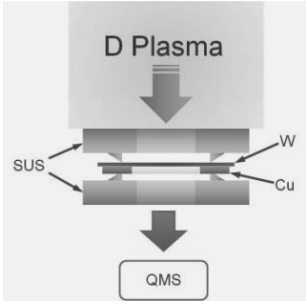


図 2　タングステン薄膜試料の固定部分

器(QMS)を用いて計測する。また、プラズマの温度、密度等のプラズマパラメータは、試料より 100mm 上方に設置されたラングミュアプローブを用いて計測した。

実験結果および考察

今回の実験では、タングステンの重水素透過特性の温度依存性を調べるために、RF パワーを調節することで試料温度を変えて重水素プラズマの照射を行った。RF パワー（P_{RF}）を 600W で一定にして行ったプラズマ照射における D_2 と HD の透過フラックスと試料温度の時間変化を図 3 に示す。この照射を行う前に同様の実験条件で 4 時間の照射を 2 回行っている。図 3 より、試料温度が一定となり全体として定常状態に達した時に、透過フラックスが一定となっていることがわかる。これはトラップサイトがすべて埋まり、材料深部へ拡散していく重水素のフラックスが一定となったためであると考えられる。この状態は試料にトラップサイトがまったく存在しない場合の透過現象と同等であると考えることができる。また、RF パワーが一定にも関わらず照射開始から約 2 時間 20 分経過したところで試料温度の上昇が見られた。これは、プラズマ照射中にプラズマ状態が変化したことによると考えられる。図 4 に試料温度をプラズマ照射中に段階的に変えた際の結果を示す。この照射は図 3 の照射の後に同一試料に対して行ったものである。図 4 に示すように、P_{RF}=600W から 100W ずつ上昇させた後、再度 600W に合わせた。RF パワーとともに試料温度と入射フラックスが増加し、透過フラックスも増加した。これは試料温度により拡散係数が増加したためだと考えられる。P_{RF}=600W、700W での照射において透過フラックスは定常状態で一定となっているが、これより RF パワーが高くなると定常状態での透過フラックスの減少が見られる。これはプラズマによって試料のプラズマ側表面の酸化膜等が除去され新しい表面状態となり、再結合係数上昇したこと、もしくは、ブリスタリング等の表面改質が生じ、それが拡散障壁となって材料内部への拡散を阻害した可能性が示唆される。また、図 3 の結果を TMAP7 を用いてシミュレーションを行った結果、今回使用したタングステンのトラップサイトは、E_t=1.4eV、n_t=0.001%であることが示唆された。

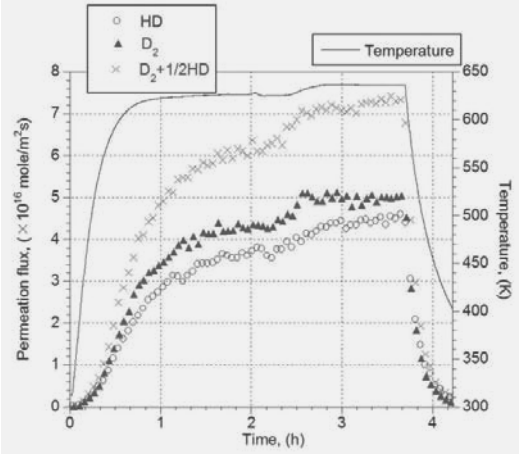


図 3　D_2 および HD の透過フラックスと試料温度の時間変化

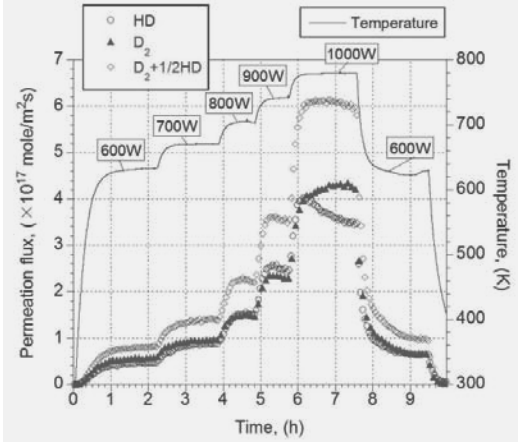


図 4　試料温度を段階的に変化させた際の D_2 および HD の透過フラックスと試料温度の時間変化

研究成果報告

本多耕一郎， A.Rusinov， 坂本瑞樹， 藤澤彰英， 芦川直子， 庄司多津男， 時谷政行， 宮本光貴， 吉田直亮， 田辺哲朗、「PWI 模擬実験装置 APSEDAS におけるタングステン試料の重水素透過実験」、プラズマ・核融合学会第 28 回年会/応用物理学会第 29 回プラズマプロセシング研究会/日本物理学会(領域 2)2011 年秋季大会、2011 年 11 月 22―25 日，石川県立音楽堂，24P083-P

研究組織

氏　　名	所　属	役割・担当分野
坂本　瑞樹	筑波大学・数理物質科学研究科	研究統括
芦川　直子	核融合科学研究所	ダスト解析
時谷　政行	核融合科学研究所	材料解析
大野　哲靖	名古屋大学・工学研究科	ダスト挙動
上野　昌史	名古屋大学・工学研究科	ダスト挙動
剣持　貴弘	同志社大学・生命医科学部	ACAT-DIFFUSE解析
宮本　光貴	島根大学・総理工	水素吸蔵解析
吉田　直亮	九州大学・応力研	材料解析
渡辺　英雄	九州大学・応力研	材料解析
徳永　和俊	九州大学・応力研	材料解析
ルシノフ　アレクサンドル	九州大学・総理工	プラズマ照射実験・解析
本多　耕一郎	九州大学・総理工	プラズマ照射実験・解析

23 FP－29

低エネルギーヘリウムイオン照射された絶縁体における光学特性

琉球大学教育学部　岩切宏友，添石太寿，当銘栄彦，吉田直樹
九州大学応用力学研究所　渡邊英雄，吉田直亮
京都大学エネルギー理工学研究所　森下和功

【研究の目的】

イオンビーム照射法は，任意の元素を非平衡状態で注入できることから，通常の溶解法では得られない新材料をナノスケールで創成することが可能である。ヘリウムは通常，極低温(4K 以下)・超高圧(11GPa)下でしか凝集しないが，He^+を固体物質に照射すると，ヘリウムバブル（ヘリウム原子が三次的に凝集したもの）が形成されることが知られている。このようなタイプのナノ微細構造は他種のイオンビーム照射では観察されないことから，物質の電子状態に独特な変化を及ぼす可能性がある。そこで本研究では，低エネルギーヘリウムイオン照射による透明絶縁体材料の光透過率変化を測定・検討し，格子欠陥が光学特性に与える影響についての新しい知見を得ることを目的とする。

【研究方法】

研究試料として透明固体材料である CaF_2 を用いた。照射実験は九州大学応用力学研究所の制御イオンビーム照射装置を用いた。照射イオン種は He^+及び D_2^+，照射エネルギーは 7 keV である。光透過スペクトル測定は，琉球大学教育学部の V-650 型紫外分光光度計を用いた。

【実験結果】

室温で He^+を照射した CaF_2 については，照射量が $1 \times 10^{20} He^+/m^2$ では，波長 420nm 付近をピークとした 1.5%程度の光透過率の低下が見られた。照射量が $1 \times 10^{21} He^+/m^2$ になると，波長 420 nm 付近のピーク自体も大きくなるが，波長全域において透過率の減少が観察された。$3 \times 10^{21} He^+/m^2$ に達すると，さらに透過率は減少するが，大きな違いは見られない。しかし，照射量が 1×10^{22} He^+/m^2 に達すると，波長 540nm 付近を中心とした吸光ピーク（その波長で光透過率の減少が最大となる）が出現した。次に照射中に試料を加熱して一定温度に保ち，それぞれの温度において 1×10^{21} He^+/m^2 の照射を行った。このときの代表的な光透過スペクトルを図 1 に示す。照射温度が 373K の場合，波長 540nm 付近における吸光ピークの著しい成長が確認でき，最大で約 9.7%の減少が見られた。照射温度の上昇に伴い吸光ピークは大きくなっていき，照射温度が 573K の場合，38.6%の吸光ピークが観察された。このとき，試料表面は濃赤紫色に着色していた。　しかし，照射温度が 629K では，波長 540nm 付近の吸光ピークが消失し，肉眼で明確な着色は確認されなくなった。照射温度が 773K では，波長 355nm 付近に新たな吸光ピークが出現し，薄黄色に着色した。CaF_2 に D^+を照射した場合，照射量・温度によっては若干の透過率の減少が観察されるが，He^+照射のような明瞭な吸光ピークは観察されなかった。したがって，He^+照射では D^+照射では見られないような特有の着色現象を引き起こしていることになる。

〔考察〕

本研究における照射条件では損傷領域は表面近傍に限定される。このため，本研究で得られた光透過率を他のイオン種や X 線照射などと比較するために，実効的な光吸収係数を概算する。光吸収係数を $\alpha(cm^{-1})$ とすると，α は下記の式で定義される。

$$\alpha = -\left(\frac{1}{d}\right)\ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right)$$

ここで，T_0は入射項，T_1 は透過項，d は試料の厚さである。7keV のヘリウムイオンを CaF_2 に照射したときの損傷領域は表面から 100 nm 程度と考えられるので，ヘリウムイオンを 1×10^{21}ions/m^2 照射した試料(573K)の波長 540 nm 付近における光吸収係数は α は 5305(cm^{-1})となり，未照射の場合では 0.013(cm^{-1})となる。また，D.W. Cooke 等が 14MeV 中性子を CaF_2 に照射した試料（照射量：1.1×10^{19} n/m^2）における光吸収係数は 0.5(cm^{-1})程度であることから[1]，ヘリウム照射を受けた領域においては中性子照射などでは形成し得ないような非常に強い光吸収帯の形成が行われていることになる。

[1] D. W Cooke et al., J. Nucl. Mater., 321 (2003) 158–164

（成果発表）

- 添石太寿：環境制御型原子間力顕微鏡によるイオン照射材の表面構造観察，平成 23 年度琉球大学教育学部自然環境教育コース　課題研究発表会（2012 年 2 月）
- 当銘栄彦：ヘリウムイオン照射が固体材料の光学的特性に与える影響，平成 23 年度琉球大学教育学部自然環境教育コース　課題研究発表会（2012 年 2 月）

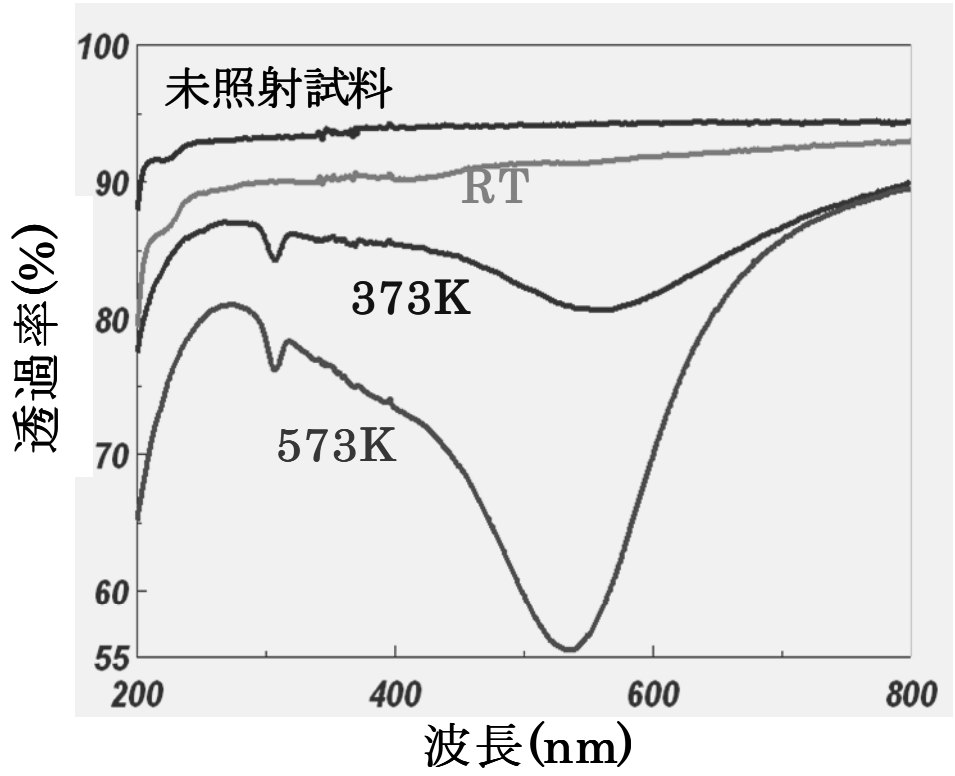


図 1　ヘリウムイオン照射した CaF_2 における光透過スペクトル

23 FP－30

核融合炉用先進バナジウム合金のイオン照射効果

核融合科学研究所　長坂琢也

1. 目的

低放射化バナジウム合金の高温強度と耐照射脆化特性をさらに改善するため、高 Cr 添加、微量 Y 添加、熱時効・加工硬化、分散強化等により、先進的なバナジウム合金の試作開発を行っている。これらの合金を核融合炉ブランケット材料として使用する場合に、その使用温度上限を定めるのは高温（700～800℃）でのクリープ強度とヘリウム脆化である。このうち、クリープ強度については、上記の手法による格段の向上が明らかになりつつある。一方、使用温度下限を定めるのは比較的低温（400～500℃）での中性子照射脆化であり、上記の新合金についても従来のバナジウム合金と比較するために照射データを取得するのが急務である。

本研究では、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置を用いて、先進バナジウム合金に様々な条件でイオン照射実験を行い、低温での照射脆化の主因となる照射硬化とそのメカニズムを微小押込み試験と電子顕微鏡観察による照射損傷組織観察から明らかにする。

2. 実験方法

大学共通材料である V-4Cr-4Ti 合金(NIFS-HEAT)及び、これを基本組成として微量 Y 添加等により試作した合金試料、さらに不純物(C, N, O)量を意図的に変化させたモデル合金試料を作成した。具体的な試料組成は、V-4Cr-4Ti-0.019O (NIFS-HEAT-2)、V-4Cr-4Ti-0.051O、V-4Cr-4Ti-0.09Y-0.011O、V-4Cr-4Ti-0.06Y-0.27O である。今年度は、大学共通試料である NIFS-HEAT-2 バナジウム合金 (V-4Cr-4Ti-0.019O)を用い、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置を用いて 1 または 10 dpa の Cu イオン照射を行った。照射温度は 200℃である。照射後の試料について、核融合研の微小押込み試験機で表面の照射硬化を評価した。

Y 添加合金については、まず非照射において Y 添加の効果を明らかにするため、室温から 800℃で引張試験を行った。不純物と転位の相互作用によっておこるセレーションに及ぼす Y 添加の効果を検討した。

3. 結果と考察

図 1 はイオン照射後の表面の微小押込硬さを示す。横軸は押込み深さである。イオン照射試料では、表面の約 1 μm の領域のみが照射損傷を受けているため、押込み深さが大きい場合には非損傷領域の影響が大きく、照射による硬さの変化は小さかった。一方、押込み深さ 0.6～0.8 μm 以下から 0.2 μm までは明確な照射硬化が確認された。10 dpa の試料では硬さのバラつきが大きく、照射硬化の正確な評価にはさらにデータを取得する必要はあるが、1 dpa と 10 dpa での照射硬化の違いは大きくないことが示唆された。これまでの中性子及びイオン照射の結果によると、バナジウム合金の照射硬化が飽和するのは 50 dpa 程度である。従来のバナジウム合金よりも不純物濃度の小さい NIFS-HEAT-2 において、照射硬化の飽和の挙動に違いがあるのかどうか、今後さらに照射条件を変えて実験を行い明らかにしていく予定である。

バナジウム合金の引張試験では、格子間不純物である C, N, O が転位を固着し応力が上昇し、それがある一定の応力になると外れて応力が低下する、セレーション（のこぎり刃状の応力振動）が観察され、これは動的歪時効(Dynamic Strain Aging)と呼ばれる。図２は DSA によるセレーションが観察された試験条件を示す。DSA は不純物の拡散の速度(v_i)が転位の運動速度(v_d)よりも大きいときに起こると考えられる。v_iは温度とともに上昇し、v_dは歪速度とともに上昇する。図では、DSA の起こる（$v_i > v_d$）領域が示されており、低温側で DSA が開始する温度は(a)、(b)とも同様であるが、高温側では Y 添加によって DSA が抑えられることが明らかとなった。高温側で DSA が消失するのは、基本的には不純物が固着した転位が熱的に分解することによると考えられる。本合金では不純物と親和性の大きい Ti あるいは Y が添加されており、不純物と析出し拡散できる不純物量が減って DSA を消失させるか、逆に Ti あるいは Y が不純物と一緒に転位に集積して固着を強化し DSA を促進するという可能性も考えられる。仮に前者の効果で Y 添加合金の DSA が抑えられたとすると、照射硬化を促進することが知られている不純物が減っていることになり、照射硬化が抑えられることが期待できる。これを確かめるため、今後 Y 添加合金についてもイオン照射試験を行う予定である。

4. 成果報告

T. Miyazawa, T. Nagasaka, Y. Hishinuma, T. Muroga, H. Watanabe, Effects of oxygen impurity and Y addition on the irradiation hardening of low activation vanadium alloys, 27th Symposium on Fusion Technology, Sep. 24-28, Liege, Belgium にて発表予定。

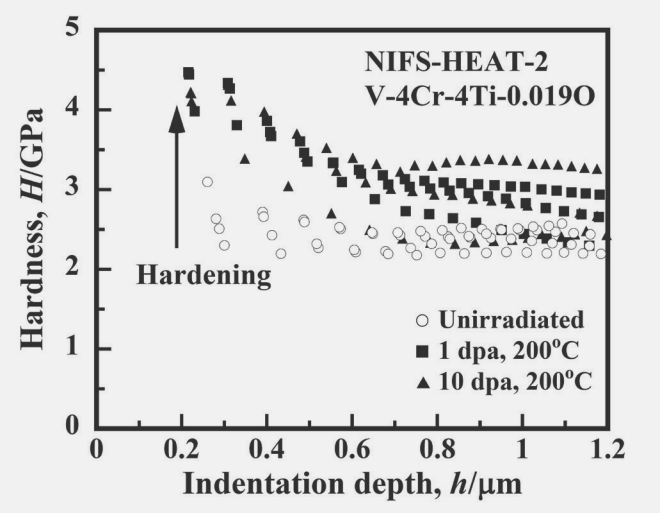
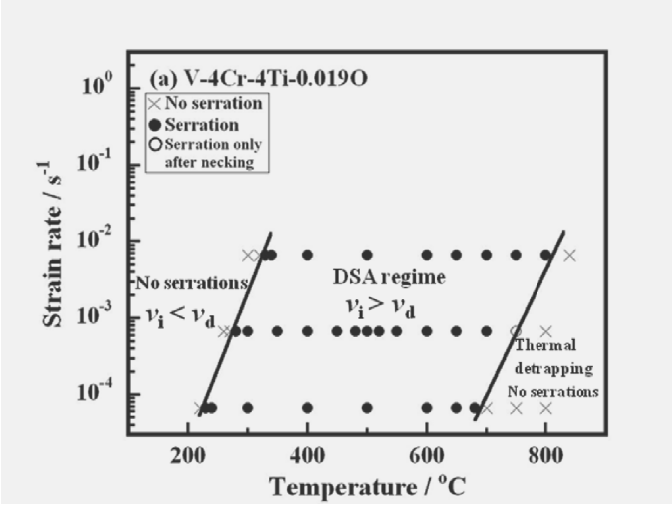


図１　Cu イオン照射試料の表面微小押込硬さ



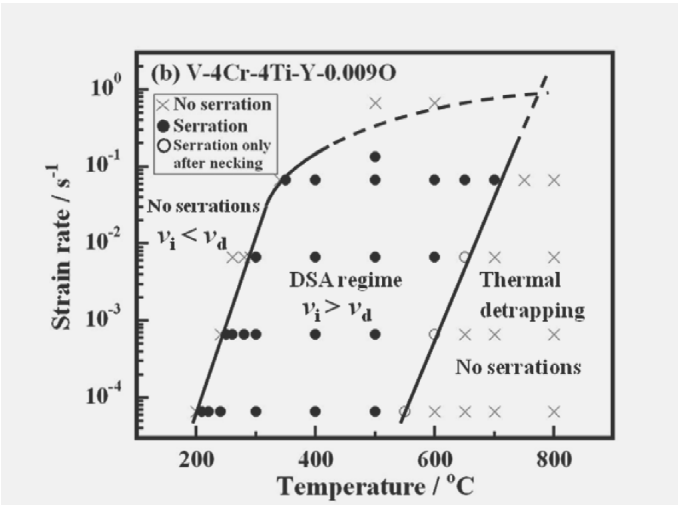


図２　引張試験において動的歪時効によるセレーションが観察された試験条件
(a)は NIFS-HEAT-2 合金。(b)は Y 添加合金。

23 FP－31

磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス現象の理論・シミュレーション研究

日本原子力研究開発機構　先進プラズマ研究開発ユニット　プラズマ理論シミュレーショングループ
研究主幹　石井康友

核融合プラズマの巨視的挙動を解明し、炉心プラズマの予測、制御手法を確立するためには、炉心プラズマ中の多スケール・多プロセス現象に焦点を当てた研究の推進が必要である。今年度は、昨年度に引き続き、外部磁場揺動による磁気島の発展に関する研究を進めた。

ヘリカルプラズマにおいては、磁気島の大きさは、抵抗性交換型モードや磁気島が駆動するポロイダル流の影響を受けることが知られている。また、アンバイポーラー条件により電場がユニークに決定されるため、これが磁気島の発展に及ぼす効果を調べることも重要と考えられる。

本研究では、ステラレータ展開に基づく簡約化４場モデルを用い、ヘリカルプラズマにおける外部共鳴磁場摂動の効果を数値的に解析した。用いたモデルは以下で与えられる[1]。

$$\frac{d}{dt}\nabla_\perp^2\phi = \nabla_{//} j_{//} + [\Omega, p] + \mu\nabla_\perp^4\phi, \tag{1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\nabla_{//}\phi + \eta_{//}(j_{//} - j_{//0}), \tag{2}$$

$$\frac{dp}{dt} = \hat{\beta}([\Omega, \phi] - \nabla_{//} v_{//} + \eta_\perp \nabla_\perp^2 p), \tag{3}$$

$$\frac{dv_{//}}{dt} = -\nabla_{//} p + \mu_{//}\nabla_\perp^2 v_{//}, \tag{4}$$

ここで、$d/dt = \partial/\partial t + [\phi,]$, は対流微分、$\nabla_{//} = \partial/\partial z - [A,]$, $[f,g] = \mathbf{z}\cdot\nabla f \times \nabla g$はポアソン括弧である。

Ωはヘリカルプラズマにおける規格化された平均磁場曲率の項を表し、交換型モードの駆動項となる。

$$\frac{\partial \Omega}{\partial r} = \frac{N}{l}\varepsilon(4r\iota + r^2\iota') \tag{5}$$

l, Nはそれぞれヘリカルワインディングのポールとピッチ数を示す。

共鳴磁場摂動は境界条件を通じて入れる。すなわち、$\tilde{A}_{m,n}(r=1,t) = \psi_a$, ここで$m, n$は共鳴磁場摂動のポロイダル、トロイダルモード数を表す。(1)を径方向に一度積分することによりポロイダル流の発展方程式が得られる。

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} = \frac{1}{r}\int r\left[\phi, \nabla_\perp^2\phi\right]_{0,0} dr + \frac{1}{r}\int r\left[A, j_{//}\right]_{0,0} dr + \mu\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r v_\theta)\right] + \nu^{nc}(V_0 - v_\theta) \tag{6}$$

ここで、$v_\theta = \partial\tilde{\phi}_{0,0}/\partial r$はポロイダル流速であり、$\nu^{nc}$は規格化されたイオンの新古典粘性、$V_0 = -2\delta(dp_0/dr)$は規格化されたイオンの新古典流速を表す。シミュレーションに用いた典型的なパラメータを示す。

$$\beta = 0.01, \delta = 10^{-2}, \varepsilon = 0.2, \mu = 10^{-5}, \eta_{//} = 10^{-5}, \hat{\beta}\eta_\perp = 10^{-5}, \mu_{//} = 10^{-5}, (m,n) = (2,1), \psi_a = 5\times10^{-4}, (l,N) = (2,10)$$

最初に、m/n=2 の共鳴モードに対する線形解析を行った。上記のパラメータにおいて抵抗性交換型モードが不安定であり、n=3 モードが最大成長率を与えることがわかった。次に非線形シミュレーションを行い、新古典粘性の磁気島の飽和幅に対する依存性を調べた。抵抗性交換型モードがプラズマのコアーで励起され、成長する。非線形領域では不安定モードは圧力を平坦化させ飽和する。新古典粘性が小さい場合は静電ポテンシャルにおいて同心円をなす構造が形成されることを見いだした。新古典粘性が大きな領域ではそのような構造形成は観測されなかった。新古典粘性が小さい場合は、磁気島の O 点付近においてポロイダル流の減衰がみられ、これが大きな磁気島の回転をロックさせていることが解析により明らかとなった。一方、粘性が大きい場合、磁気島の飽和幅は小さく、その場合、ポロイダル流の減衰も小さい。また、磁気島の飽和幅に対してヒステリシスをもつ領域が存在することも判明した。このシミュレーションにより、新古典輸送に伴うポロイダル流が共鳴磁場陽動による磁気島の減衰機構として働くことを明らかにした。

[1] S. Nishimura et al., Plasma Fusion Res. **6** 2403119(2012).

研究組織
研究代表者　石井康友（原子力機構）
所内世話人　矢木雅敏（H24 年 1 月より原子力機構に移籍）
研究協力者　徳田伸二(RIST)、小関隆久（原子力機構)、栗田源一（原子力機構)、中島徳嘉（核融合研)、内藤裕志（山口大学)、藤堂泰（核融合研)、西村征也（核融合研)、古川勝（東京大学)、相羽信行（原子力機構)、廣田真（原子力機構)、白石淳也（原子力機構)、宮戸直亮（原子力機構）

研究成果
[1] M. Yagi, S. Sugita, S.-I. Itoh and K. Itoh, ‘Simulation study on non-local transport by plasma blob in SOL’, U.S. Transport Task Force Workshop, San Diego, USA, Apr. 5-9, 2011.
[2] M. Yagi, “LIA activity in Kyushu University”, Seminar in University of Provence, France, May 27, 2011.
[3] M. Yagi, S.Inagaki, S.-I. Itoh and K. Itoh, “Simulation study on non-local transport in toroidal plasmas’, 1st Asia-Pacific Transport Working Group International Conference, NIFS, June 14-17, 2011
[4] M. Yagi, S. Inagaki, S.-I. Itoh and K. Itoh, “Non-local transport simulation based on RMHD model”, US-Japan WS on “Hierarchical Self-Organization of Turbulence and Flows in Plasmas, Oceans and Atmosphere”, Kyoto University, Oct 24-26,2001.
[5] M. Yagi, K. Shimizu, T. Takizuka, M. Honda, N. Hayashi, K. Hoshino and A. Fukuyama, “Simulation study of L/H transition with self-consistent integrated modeling of core and SOL/Divertor transport”, 13th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, South Lake Tahoe, USA, Sep.19-21, 2011.
[6] M. Yagi, “Perospects for Fusion Simulation Research using BA IFERC-CSC (invited)”, APFA2011, Guillin, China, Nov.3, 2011.
[7] 矢木雅敏、”JAEA における CSC に向けた理論シミュレーション研究”、シンポジューム“TER BA CSC に向けたシミュレーション科学の展望”、PLASMA2011、石川、11/22-25, 2011
[8] M. Yagi and Y. Kagei, “Simulation Study on Runaway Electron Orbit Loss during Disruption”, Physical Society of Japan, Annual Meeting, Kwansei Gakuin Univeristy, March 25, 2011.

照射による金属ミラー材の光学特性変化挙動と プラズマ対向材料のその場診断手法への応用

島根大学総合理工学部　宮本光貴

1. はじめに

核融合研究において，プラズマ診断の多くに用いられる金属第一ミラーは，プラズマから漏洩する高エネルギー粒子に曝され，また不純物堆積等の影響を受ける．その為，光反射率が劣化し，監視システムとしての機能が低下することが懸念されている．本研究では，損傷形成に与える寄与が大きいヘリウムに着目し，金属製第一ミラー材の光学特性劣化機構を分光エリプソメトリー法により電子分光学的立場から調べることを目指した．さらに，これらの光学特性変化と材料の原子レベルでの損傷組織発達程度との相関を調べ，プラズマ対向材料の劣化程度の簡便な診断法として提案することを目的とした．

2. 実験方法

㈱ニラコ社製の SUS316L を鏡面研磨したのち，室温で 1,3,5 keV のヘリウムイオン照射を行い，照射後の光反射率変化を分光光度計，および分光エリプソメトリーにより測定した．また，照射による組織変化の反射率劣化に与える影響を調べるために SEM，AFM を用いた表面組織観察，および TEM を用いた内部組織観察を行った．

3. 結果および考察

図 1 は，室温で 1,3,5 keV-He^+を~10^{23} He/m^2 照射した SUS の光反射率波長依存性を示した．尚，図では光反射率を未照射時のもので規格化して示している．図からわかるように，照射エネルギーの増加と光反射率の劣化に単純な対応は観察されなかった．350~800nm 程度の広い波長範囲で 3keV-He^+照射した試料において最大の光反射率劣化が見られ，350nm 程度以下の短波長領域では，反射率劣化とエネルギーの関係は完全に逆転し 1keV-He^+照射した試料において光反射率の顕著な劣化が観察された．これまでの研究から，同様の低エネルギーHe^+照射した試料の光反射率劣化は，照射に起因する試料表面の凹凸のみでは説明できず，表面直下の損傷組織の寄与が大きい事が指摘されている[1]．実際に，光反射に寄与する表面近傍領域における照射損傷量と光反射率劣化程度には強い相関が認められた．図 2 には SUS 試料中の光侵入長とその評価に用いた消衰係数 k の波長依存性を示した．短波長側で光の侵入長が短くなる事が分かる．一方，図 3 には TRIM-code によって求めた 1,3,5 keV-He^+を照射し

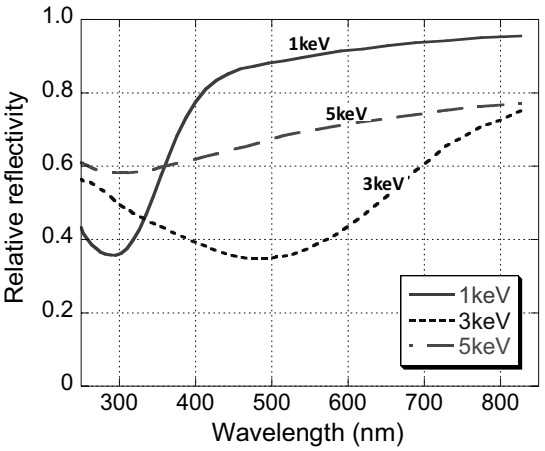


図 1　1,3,5 keV-He^+を~10^{23} He/m^2 照射した SUS の光反射率波長依存性

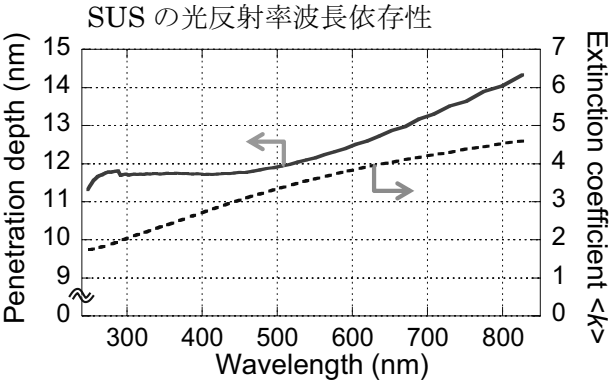


図 2　1,3,5 keV-He^+を~10^{23} He/m^2 照射した SUS の光反射率波長依

た SUS 試料中の損傷の深さ分布をそれぞれ示した．図 2,3 から，光反射に寄与する表面約 15nm 以下の領域においては 3keV 照射した試料で最も損傷量が大きくなることが分かる．また，極表面領域では 1keV 照射した試料の損傷量が最大となっており，短波長側で反射率が最大の減少を示した事と定性的には一致している．また試料の内部組織観察を行ったところ，TRIM-code により評価した深さ分布に近い損傷分布が観察されている．

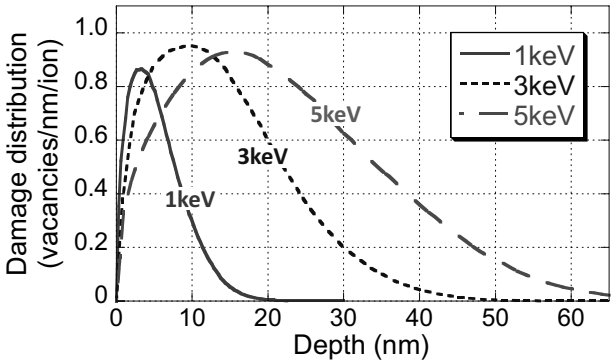


図 1　1,3,5 keV-He^+を~10^{23} He/m^2照射した SUS の光反射率波長依

以上の結果は，反射率測定に用いる光の波長を変化させその侵入深さを調整することで，損傷の深さ分布に関する情報を評価しうる事を示しており，プラズマ・壁相互作用計測監視法の開発にも寄与することが期待される．光反射率測定による材料診断手法の可能性を示唆している．現在，大型のプラズマ閉じ込め装置におけるプローブ試料の分析や，装置内での光反射率実時間測定の検討などを進めており，今後はプラズマ対向材料劣化程度の診断手法としての光学測定の適正の評価と測定手法の最適化を行っていく予定である．

[1]　小野興太郎，平成 20 年度九州大学応用力学研究所共同研究成果報告書

- **学術論文**

1. M. Miyamoto, D. Nishijima, M.J. Baldwin, R.P. Doerner, Y. Ueda, K. Yasunaga, N. Yoshida, K. Ono, “Microscopic damage of tungsten exposed to deuterium–helium mixture plasma in PISCES and its impacts on retention property”, Journal of Nuclear Materials, 415 (2011) S657-S660
2. K. Ono, M. Miyamoto, T. Nakano, Y. Hiraoka, “Temperature dependence of the reflectivity degradation in single and polycrystalline Mo mirrors under the irradiation with low-energy helium ions”, Journal of Nuclear Materials, 415 (2011) S1214-S1217
3. T. Nakano, M. Miyamoto, S. Hasuike, K. Ono, N. Yoshida, “Degradation of optical properties in Mo mirrors under irradiation with low energy helium and deuterium ions”, Journal of Nuclear Materials, 417 (2011) 834-837

- **学会発表等**

1. M. Miyamoto, K. Ono, M. Tokitani, A. Sagara, H. Iwakiri and N. Yoshida, “Degradation of Optical Properties in Metal Mirrors under Irradiation and Its Applicability Evaluation to In-situ Diagnostics of Microstructure Change in Plasma Facing Materials”, 15th International Conferences on Fusion Reactor Materials, 2011.10, Charleston, South Carolina, USA
2. 宮本光貴，雲出聡，高岡宏光，小野興太郎，時谷政行，「ヘリウムイオン照射したミラー材料における表面損傷の結晶方位依存性」, Plasma Conference 2011, 2011.11, 金沢市

- **研究組織**

研究代表者：　宮本光貴（島根大学総合理工学部教授）
所内世話人：　渡辺英雄（九州大学応用力学研究所准教授）
研究協力者：　雲出　聡，迫井佑己，高岡宏光（大学院生），小野興太郎（島根大学名誉教授）

23 FP－33

窒素を含む多粒子低温プラズマ生成による炭素ダスト成長と水素同位体吸蔵の制御

金沢大学理工研究域　　上杉喜彦

１．はじめに

低Ｚ材であるグラファイトは、長い間、核融合実験装置のダイバータ板および第１壁材として用いられているが、炭素材特有の化学スパッタリングによる損耗や核融合燃料であるトリチウムの炉壁炭素材および炭素ダストへの物理・化学的吸蔵が問題視され、ダイバータ板材料としては高融点金属材であるタングステンに取って代わられようとしている。しかしながら、タングステン材は、水素・ヘリウム照射によるブリスタリングやバブル形成、高い熱衝撃による溶融・ドロップレット・クラックの発生等、将来の核融合炉ダイバータ板材料として使用するには問題点も多いのが現状である。核融合炉ダイバータ材料開発研究の大半がタングステン材使用に向けて行われる中で、本研究はグラファイト材の欠点とされるトリチウム吸蔵を制御・抑制するための基礎物理・化学過程の解明とその手法の開発を行うことを目的としている。

これまでに，低エネルギー水素原子照射による炭素材損耗とそのとき生成されたダスト粒子の数密度と粒子径を評価した。さらに，アルゴン / 水素混合プラズマに窒素ガスを導入し，炭素材に対してアルゴン / 水素 / 窒素混合プラズマ照射実験を行った結果，ダスト微粒子形成は抑制されることがわかった。しかし，これまでの照射実験は，シースガスとして使用しているアルゴンガスは水素に対し 30 倍程度導入し，高気圧領域での照射という問題がある。そこで今回は，より現実に近い条件下でも窒素混入によるダスト成長の抑制効果がみられるか調べるために，高真空装置 Heliotron-DR を用いて照射実験行った。Heliotron-DR 装置を用いることで，低圧力下における定常純水素プラズマを生成することが可能である。ただし，炭素不純物の供給源として今回の実験はメタンを用いている。そして，高周波誘導熱プラズマ装置と Heliotron-DR 装置を用いたダスト微粒子形成の実験結果を比較検討する。プロセッシングプラズマの分野では窒素の導入によってアモルファス水素化炭素（a-C:H）膜の形成が大きく抑制されることが知られており，それを共堆積層の除去に応用した研究が近年行われている。そこで本研究では，窒素の導入が炭素ダスト形成へ及ぼす影響について検討を行った。

２．Heliotron-DR を用いた炭素膜成長制御実験

図２に Heliotron-DR 装置概要とプラズマ生成と照射実験に関係する主要機器の配置を示す。Heliotron-DR 装置は高周波誘導熱プラズマ装置と比べ低いガス圧（~1 Pa 以下）で，定常水素プラズマ生成が可能である。プラズマ照射の実験条件は，電力 定常 2.3 kW + パルス 1 kW (100 μ sec-1msec)，ヘリカル磁場 200 G，トロイダル磁場 40 G，ガス流量は水素ガスを 20 sccm，メタンガスを 1 sccm, 窒素ガスを 0~1 sccm とした。このときガス圧力は～ 0.4 Pa(3 mTorr) である。照射時間は 10 時間としている。以上の実験条件のもと，水素 / メタン混合プラズマ照射と水素 / メタン / 窒素混合プラズマ照射実験を行う。メタンガスはダスト形成の起因となる炭素系粒子を有するプラズマを形成するために導入した。照射ターゲットには照射後の試料表面が観測しやすいようにシリコンを用いた。ターゲット表面温度の制御は照射台にヒーターを取り付けることで行い，基板表面温度は照射台に設置した熱電対により測定した。また Heliotron-DR を用いて照射されるプラズマの電子温度および密度は装置に設置した静電プローブにより測定した。電子温度および密度はそれぞれ 5-10 eV，~10^{16}m^{-3} である。以上の条件のもとで，生成したプラズマは分光観測および QMS（四重極型質量分析計）により評価を行った。また，走査型電子顕微鏡（SEM）によりプラズマ照射後のターゲット表面に形成したダストを観測した。炭素膜については分光エリプソメータと触針式表面形状測定器

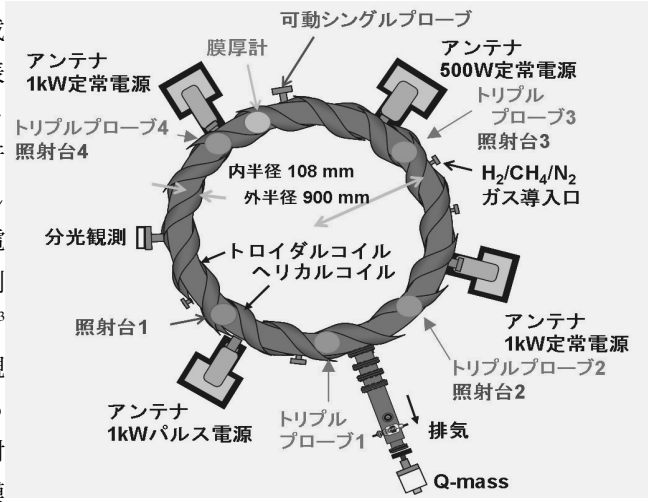


図１　Heliotron-DR 装置概要図

（Dektak）を用いて，膜厚の評価を行った。

３．実験結果

3.1　水素 / メタン混合プラズマと水素 / メタン / 窒素混合プラズマの分光観測

図２に水素 / メタン，水素 / メタン / 窒素プラズマの分光観測，図３に水素 / メタン，水素 / メタン / 窒素プラズマの Mass スペクトルをそれぞれ示す。窒素を添加することで分光観測より CN，NH 分子スペクトルの発光強度が増加していた。また，QMS 測定より CN，HCN，NHx 分子スペクトル強度が増加していた。ここで，C–H–N 粒子系においては炭素が関与する結合の中で C ≡ N 結合の結合エネルギーが最も高い（C–H：435 kJ/mol，C ≡ C：838 kJ/mol，C ≡ N：887 kJ/mol）。三重結合をもつ CN ラジカル（–C ≡ N）の形成は炭素原子同士の凝集を抑制すると考えられ，安定な分子として揮発性の HCN や C2N2 を形成する。つまり，窒素添加による炭素ダスト形成の抑制がもたらされた要因として，損耗生成物が HCN や C2N2 を形成し，ガスとなって装置外へ排気されたことが考えられる。CN の生成過程には主として次の二つの過程が考えられる：(1) 炭化水素分子と窒素原子との気相反応，(2) 窒素原子による堆積した炭素膜の化学スパッタリング（揮発性の CN や HCN，C2N2 を生成）。真空容器内は炭素膜が堆積するターゲット表面に比べはるかに大きい。そのため HCN 分子は，上記で述べた (1) の過程で多量に生成されていると考えられる。この結果は，CN 結合形成による炭素の凝集を抑制するだけでなく，水素を揮発性の HCN として装置外へ排出可能なことを示しており，炭素材の大きな欠点である水素同位体吸蔵が抑制される可能性がある。

3.2　炭素膜厚およびダスト粒子径の表面温度依存性

図３(a) にシリコン表面に堆積した炭素膜厚の表面温度依存性，図３(b) にシリコン表面に堆積した炭素ダスト粒子径の表面温度依存性を示す。低気圧領域でも窒素を混入することにより炭素膜は薄くなり，ダスト粒子径も小さくなる結果が得られた。ただし，320 K では窒素添加により膜厚が厚くなりダスト粒子径も大きくなった。ターゲットの基板温度が高いと，炭素間の結合が進むことにより，揮発性の分子（HCN, NH_3 等）を作る反応が促進される結果，膜生成に到らないと考えられる。逆にターゲットの基板温度が低いと，炭素間の結合に窒素が加わりつつ炭素膜やダストが成長していくので見かけ上，炭素の膜厚が厚くなっていると考えられる。つまり，窒素添加の効果は，～ 400 K 以上で炭素膜成長の抑制はみられるが，ターゲットの基板表面の温度に強く依存することが確認できた。

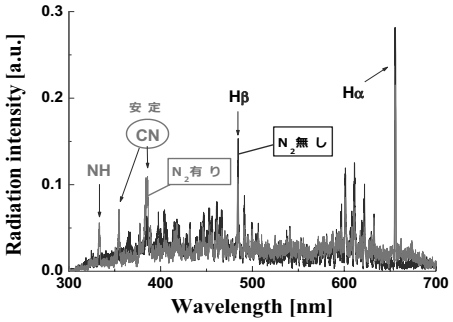


図２　水素 / メタンおよび水素 / メタン / 窒素プラズマの可視分光観測例

４．まとめ

本研究ではダスト形成基礎過程を理解するとともに，炭素ダスト生成抑制手法を開発することを目的とした。そこで，高周波誘導プラズマ装置を用いて炭素材にアルゴン / 水素混合プラズマ照射による炭素材損耗およびダスト形成，窒素を用いた炭素ダスト生成の抑制手法について検討した。また Heliotron-DR 装置を用いて ~1 Pa 程度の低気圧領域での窒素添加による炭素膜およびダスト成長の抑制効果について検討した。炭素膜およびダスト形成には照射時の表面温度が重要なパラメータとなってダストの数密度や粒子径，形状が変化することが明らかとなった。窒素添加の効果は，照射中のシリコン基板温度が～ 350 K 以上で炭素膜成長の強い抑制はみられた．炭素，水素，窒素からなる系では各原子間の結合エネルギーにおいて，C ≡ N の抑制が炭素膜成長と炭素ダスト形成抑制の主たる原因ではないかと考えられる。

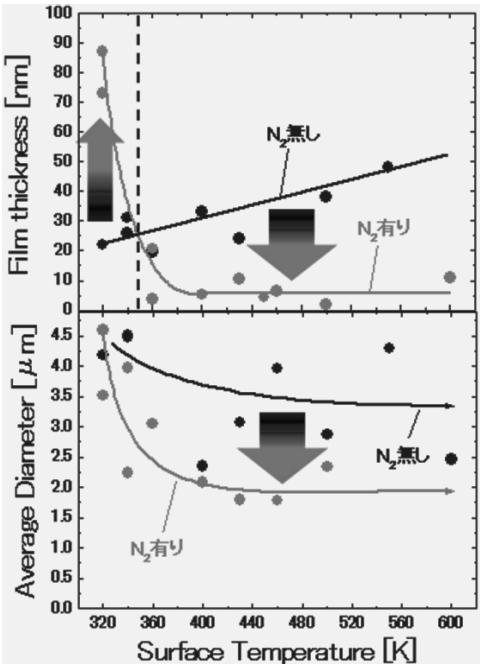


図３　窒素添加による炭素膜と炭素微粒子成長抑制効果

５．研究成果発表

(1)「H-C-N 反応性分子を有する低温プラズマ中における炭素凝集と水素吸蔵の制御 [1]」，高井裕一郎，佐々木　彩，上杉喜彦，田中康規，石島達夫，24P046-P, Plasma Conference2011, Kanazawa, 2011.

(2)「H-C-N 反応性分子を有する低温プラズマ中における炭素凝集と水素吸蔵の制御 [2]」，佐々木　彩，高井裕一郎，上杉喜彦，田中康規，石島達夫，24P045-P, Plasma Conference2011, Kanazawa, 2011.

23 FP－34

核融合炉材料中に捕捉された水素同位体の加熱再放出挙動

Thermal re-emission behavior of hydrogen isotopes retained in fusion reactor materials

名城大学理工学部　土屋 文

Bun Tsuchiya

Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

目的　シリコン炭化物(SiC)および Li 酸化物(Li_2ZrO_3, Li_2TiO_3, Li_4SiO_4)はそれぞれブランケット内の絶縁材料およびトリチウム増殖材料として使用され、また、アーマ材料として損耗が少なく高温特性に優れているタングステン(W)は第一壁材料およびダイバータ材料に使用されることが期待されている。燃料となる水素同位体プラズマと第一壁およびダイバータとの相互作用、リチウムと中性子との核反応により生成されたトリチウムのブランケット内の動的挙動を理解することは、第一壁、ダイバータおよびブランケット設計において極めて重要である。本年度の共同研究では、トリチウム増殖候補材料の 1 つである Li_2ZrO_3 に着目し、熱脱離(TDS)法および反跳粒子検出(ERD)法を用いて、大気雰囲気に曝された Li_2ZrO_3 の水蒸気吸収特性、Li_2ZrO_3 中に捕捉された水素の加熱再放出特性について調べた。

実験方法　寸法φ8.0x1.0 mm^3、単斜晶(蛍石型構造)の Li_2ZrO_3 試料を使用した。この試料を真空内で 473～673 K まで加熱して試料中の残留水素を取り除いた後、約 296～297 K の室温および約 50%の相対湿度の大気中に放置した。このとき、精密電子天秤を用いて、Li_2ZrO_3 試料の重量を大気に曝した時間(空気暴露時間)に対して測定した。さらに、1.7 MV タンデム加速器からの 2.8 MeV He^{2+}イオンをプローブビームとした ERD 法により、試料中に吸収された水素(H)の濃度を測定した。捕捉 H 濃度および重量が一定になった後、これらの試料を真空内で室温から約 673～773 K まで加熱して、ERD 法および TDS 法により捕捉 H 濃度測定および放出ガス種の判別をそれぞれ行った。

実験結果および考察　ERD 法により得られた Li_2ZrO_3 試料中の H の濃度分布を図 1(a)に示す。図 1 中の 298 K のスペクトルは試料作製後の試料中の H 濃度分布を示す。水(H_2O)が試料作製時に混入し、格子間 H 原子、水酸基(-OH)あるいは H_2O 等の形状で吸収されていると考えられる。333～423 K における ERD スペクトルは、試料を各温度で約 10 分間の等時加熱を行った後に測定された。深さに対する H 濃度は温度上昇とともにほぼ同程度で減少することがわかった。次に、各温度の ERD スペクトルの全カウント数を 298 K の ERD スペクトルの全カウント数で規格化し、加熱温度に対してプロットした(図 1(b))。試料中の捕捉 H 濃度は、約 323 K の低温から減少し始め、約 423 K で全 H 濃度の 10 %以下に達することが判明した。この結果は、Li_2ZrO_3 中に捕獲された H は、各トラップサイトから脱離あるいは脱捕獲するためのエネルギーが極めて低く、また拡散係数が非常に高いことを示している。

次に、真空内で残留水素を取り除いた Li_2ZrO_3 試料を室温において大気中に曝した。空気暴露時間に対する試料の重量増加の割合(wt%)を図 2 に示す。試料の重量増加の割合は、急激に増加した後、約 500 hrs で約 3 wt%まで達す

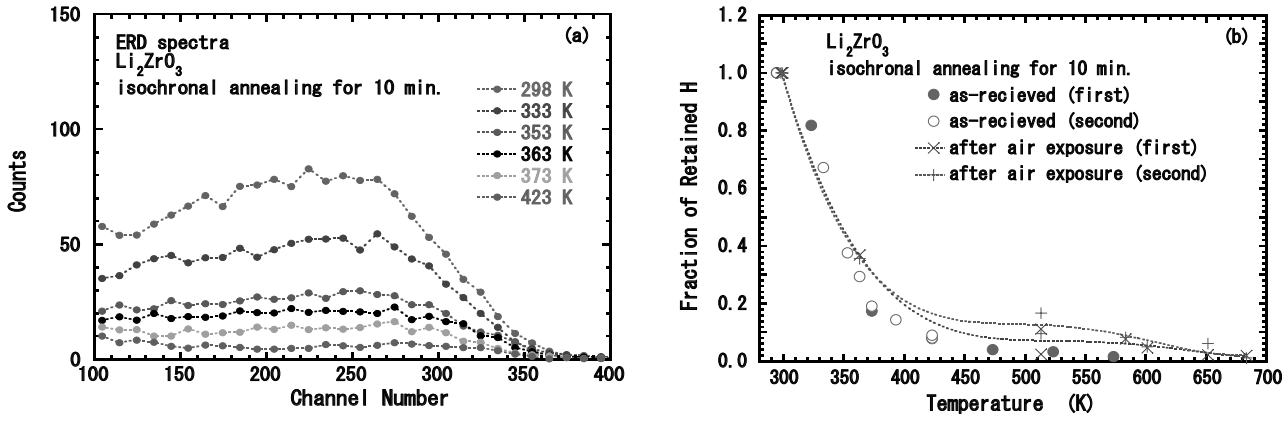


図 1　(a)室温から 423 K まで加熱された Li_2ZrO_3 の ERD スペクトル、(b) Li_2ZrO_3 中の捕捉 H 濃度の温度依存性。

ることがわかった。次に、144、528 および 4488 hrs の各空気暴露時間後に得られた ERD スペクトルおよび空気暴露時間に対する ERD スペクトルの全カウント数をそれぞれ図 3(a)および(b)に示す。深さに対する H 濃度は、約 500 hrs まではほぼ同程度で増加しており、試料の重量増加の結果と空気暴露時間に対してほぼ似た傾向を示すことから、試料の重量増加は大気中の水蒸気吸収によると考えられる。しかしながら、3000 hrs 以上の高空気暴露時間後では、H 濃度の減少および H 濃度分の変化が観測された。重量は試料全体を示すが、ERD スペクトルは試料表面から深さ約 400 nm 付近までの H 濃度分布を示すため、長時間の空気暴露により試料表面のリチウム(Li)と H_2O との反応により OH 基が形成され、バルクと試料表面の捕捉 H 濃度の分布に変化が生じたと考えられる。

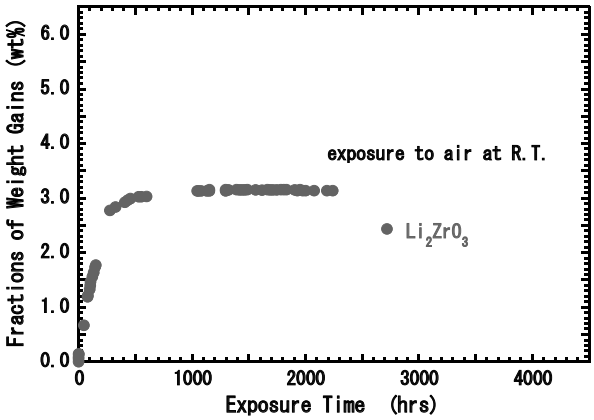


図 2　室温で大気中に曝された Li_2ZrO_3 の重量変化

次に、TDS 法を用いて、重量変化が一定になった Li_2ZrO_3 試料を室温から 773 K まで 16 K/min の温度上昇速度で

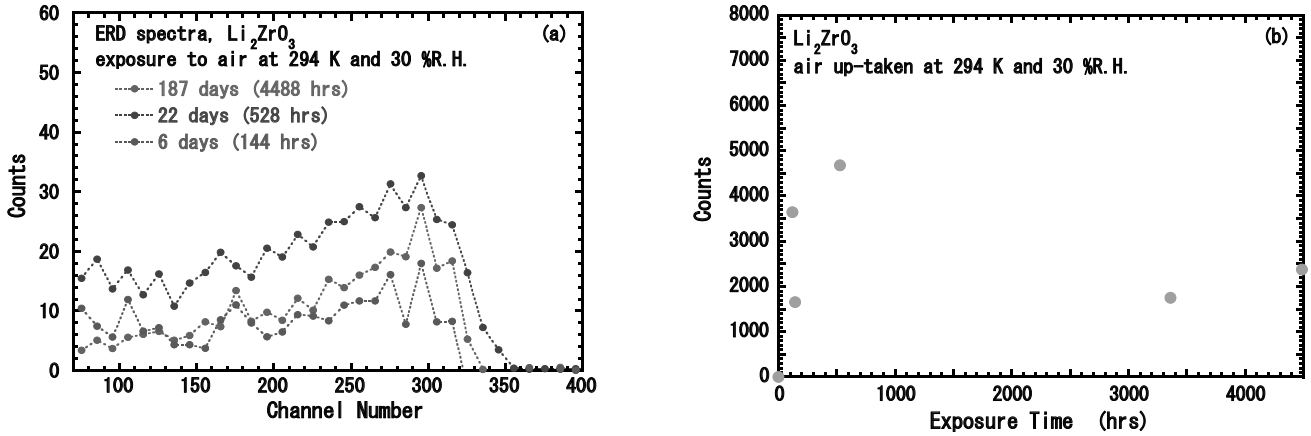


図 3　(a)室温で大気に曝された Li_2ZrO_3 の ERD スペクトル、(b) Li_2ZrO_3 中の捕捉水素濃度の空気暴露時間依存性。

加熱し、試料から放出されるガス種の判別を行った。得られた TDS スペクトルを図 4 に示す。Li_2ZrO_3 中に吸収された H は、約 323 K から H、H_2、CH_4、H_2O 等のさまざまな形状で徐々に放出し、約 427 および 603 K の加熱温度で放出ピークを観測した。さらに、10 min 間の等時加熱後に ERD 法によって測定された Li_2ZrO_3 中の捕捉 H 濃度の変化を図 1(b)中に示す。捕捉 H 濃度は約 323～423 K および約 473～573 K の温度範囲で減少することがわかった。2 段階の H 放出は、2 種類のトラップサイトが存在することを示し、第 1 段階は Li あるいは Li 水酸化物(LiOH)の周りに吸着した H_2O の脱離、第 2 段階は H 原子の格子間からの脱離が律速で生じると考えられる。また、図 4 から 500 K 以上になると N_2、CO、CO_2 の放出も観測された。これらのガス種も H_2O と同時に大気中から試料中に吸収されており、重量増加の割合を高めている要因であると考えられる。

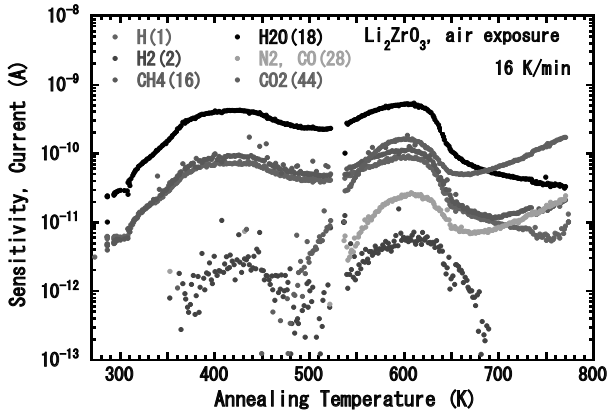


図 4　加熱された Li_2ZrO_3 からの放出ガス種の温度依存性。

まとめ　真空内で約 473～673 K まで加熱して残留水素を取り除いた Li_2ZrO_3 試料を室温で空気中に放置した。重量法および ERD 法を用いて、Li_2ZrO_3 の重量が約 500 hrs の空気暴露時間で約 3 wt%まで増加し、さらに H 濃度が増加することを判明した。また、TDS 法および ERD 法により、吸収された H は約 323 K の低温から H、H_2 および H_2O の形状で放出し始め、捕捉 H 濃度は約 423 K で 10 %以下まで減少することがわかった。

23 FP－35

タングステン混合堆積層における炭素･ヘリウムと照射欠陥分布と水素同位体滞留挙動の相関関係

静岡大学 理学部　大矢恭久

[目的]

プラズマ対向機器であるダイバータはプラズマに直接曝され、水素同位体や炭素、ヘリウムといった高エネルギー粒子負荷を受け、様々な相互作用を起こし水素同位体が滞留することが考えられる。これらの事項は、トリチウムインベントリーの観点から核融合炉制御に影響すると予想され、プラズマ対向材料であるタングステンに関して、高エネルギー粒子の照射により形成する照射欠陥と水素同位体滞留挙動の基礎的な知見を集積することが重要となる。本研究の目的は、炭素イオンとともに水素同位体やヘリウムイオンを種々の条件で同時に照射し、照射した高エネルギーの水素同位体やヘリウムの滞留量および放出挙動について研究することで金属-炭素混合堆積層形成過程におけるトリチウム滞留挙動を理解することにある。トリチウム滞留挙動を理解するために、試料表面の構造変化は重要な知見となるため、静岡大学所有の炭素(C^+)-重水素(D_2^+)-ヘリウム(He^+)3 種同時照射装置でイオン照射した際のタングステン表面の構造変化について、九州大学所有の透過型電子顕微鏡(TEM)および集束イオンビーム(FIB)を用いて評価する。また、得られた測定結果を静岡大学における昇温脱離(TDS)法の結果と相互に解析することで、水素同位体の動的挙動について解明する事を目的としている。

[実験方法]

C^+-D_2^+-He^+ 3 種同時照射装置を用いてアライドマテリアル社製タングステンに対し、各種イオン照射を行った。各種イオン照射のパラメーターとして、イオンエネルギーを 10 keV C^+、3.0 keV D_2^+および 3.0 keV He^+ として打ち込み深さが均一になるようにし、室温にてそれぞれ単独および D_2^+-He^+, C^+-D_2^+同時でイオン照射を行い、TDS 実験により重水素脱離挙動を、TEM を用いて表面状態を解明した。また、He^+照射および C^+照射した試料において深さ方向に対する照射損傷状態を観察するために FIB を用いて試料加工をし、TEM を用いて断面観察を行った。また、C^+照射を行ったタングステンに関して、打ち込まれた炭素のタングステン中での化学状態を解明するため光電子分光(XPS)法を行った。

[結果・考察]

図 1 に D_2^+照射フルエンスを変化させた際の D_2 TDS スペクトルと水素同位体滞留量変化を示す。これらの D_2 TDS スペクトルは、400 K 付近の Peak 1、500 K 付近の Peak 2、600 K 付近の Peak 3 の 3 つの脱離からなることが考えられ、Peak 1 が表面吸着および転位ループ、Peak 2 が原子空孔、Peak 3 がタングステン内部の格子間に捕捉された重水素の脱離であると帰属した。それぞれの滞留量は、Peak 1 はフルエンス 1.0×10^{22} $D^+ m^{-2}$ 以降で飽和することが、Peak 2、3 はフルエンス増加に伴い増加していくことが分かっている。これらのタングステンからの重水素脱離挙動と照射欠陥の関係性を明らかにするため、D_2^+照射フルエンスを変化させた際のタングステン表面観察を行った結果、フルエンス増加に伴いタングステン中の原子空孔が増加して

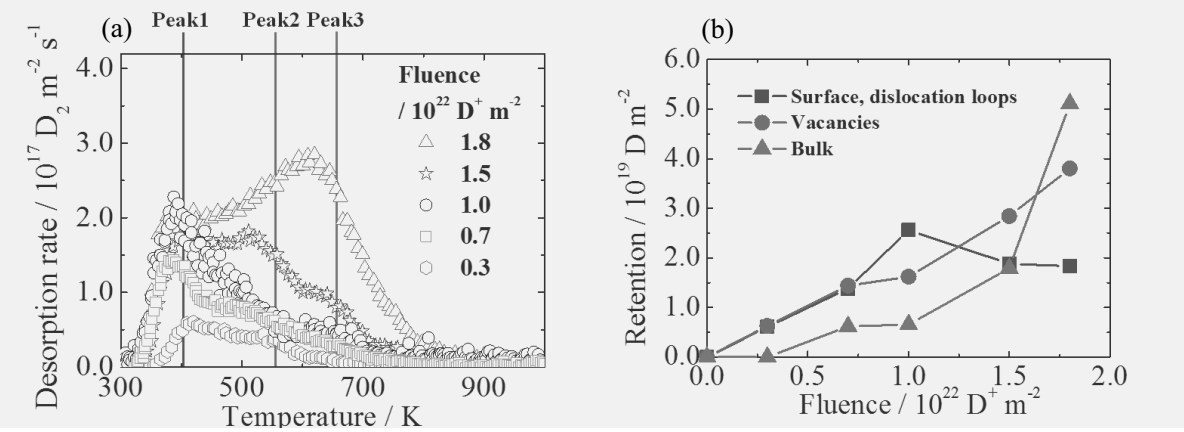


図 1 フルエンスを変化させた際の(a)D_2 TDS スペクトルと(b)各重水素滞留量

いることがわかり、重水素捕捉量と照射欠陥量に相関関係があることが明らかとなった。

また、タングステンに D_2^+-He^+, C^+-D_2^+同時照射した際の D_2 TDS スペクトルを図 2 に示す。この結果より、Peak 3 からの重水素の脱離が見られず、重水素と同時に He および C が照射されることにより、He や C がタングステン中において滞留および照射欠陥を形成し、タングステン中の重水素拡散過程に影響を及ぼすことが考えられる。He^+照射および C^+照射がタングステンにおよぼす影響を明らかにするため、図 3 に He^+照射もしくは C^+照射をした際の、タングステン深さ方向に対する照射損傷分布を示す。He^+照射したタングステンにおいて、表面近傍に He バブルの形成が観察され、その領域はおよそ 40 nm に及ぶことが明らかとなった。この結果は TRIM コードによるタングステン深さ方向に対する He 滞留挙動よりも深い位置に He が存在することから、照射した He はタングステン中に照射欠陥を形成しつつ滞留し、拡散および集合することにより He バブルを形成していくことが考えられた。C^+照射したタングステンにおいて、試料表面に転位ループが形成し、その領域はおよそ 20 nm であることが明らかとなり、TRIM コードによる計算結果と一致した。また、深さ方向に対して滞留した炭素の化学状態は、表面付近において W-C 結合が主であり、バルク方向にいくにつれ C-C 結合割合が増加することが明らかとなった。これらの知見から、タングステンに水素同位体と共に He や C を照射することにより、その照射によって形成した照射欠陥に水素同位体を捕捉することが考えられるとともに、深さ方向に対して形成した欠陥や滞留した He や C がタングステン中の水素同位体拡散過程に影響をおよぼすことが考えられた。来年度は He^+-D_2^+、C^+-D_2^+を照射したタングステンに対してエネルギーをパラメーターとした実験を行うことで、He^+照射もしくは C^+照射がおよぼす水素同位体滞留過程への影響を、照射欠陥分布の観点から解明を行う予定である。

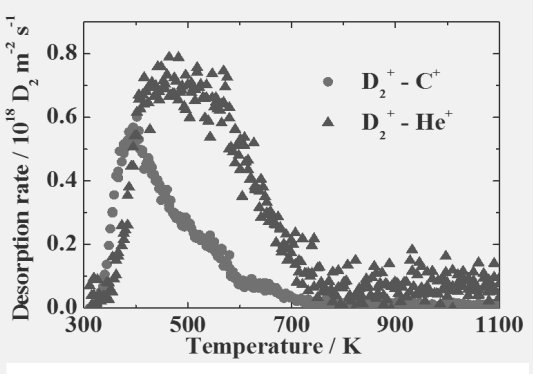


図 2　D_2^+-He^+, C^+-D_2^+同時照射した際の D_2 TDS スペクトル

[今年度の成果]

学術論文 Yasuhisa Oya, Makoto Kobayashi, Rie Kurata, Wangjing Wang, Naoko Ashikawa, Akio Sagara, Naoaki Yoshida, Yuji Hatano and Kenji Okuno, “Dynamics of hydrogen isotope trapping and detrapping for tungsten under simultaneous triple ion (C^+, D_2^+ and He^+) implantation”, Journal of Nuclear Materials, 415 (2011) S701-S704.

国際会議発表

Masato Suzuki, Makoto Kobayashi, Junya Osuo, Akiko Hamada, Katsushi Matsuoka, Naoko Ashikawa, Akio Sagara, Naoaki Yoshida, Mitsutaka Miyamoto, Kotaro Ono, Yasuhisa Oya and Kenji Okuno, “Recycling and retention behaviors of hydrogen isotopes implanted into tungsten-carbon mixed layer”, Fusion Engineering and Design (ISFNT-10).

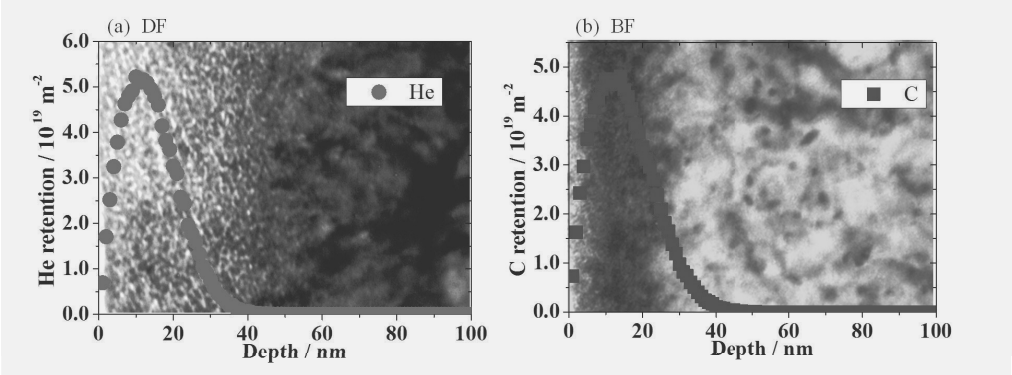


図 3 タングステン試料に対し(a)He^+照射もしくは(b)C^+照射した際の深さ方向に対する TEM 像と TRIM code により計算された He・C 滞留分布

23 FP－36

研究課題名：酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院
エネルギー理工学部門
橋爪　健一

・目的

核融合システムにおいて生成するトリチウムを含むガスの濃度測定は、トリチウムの回収、漏洩評価の上で非常に重要である。トリチウム含有ガスについて、プロトン導電性酸化物を水素ポンプとして使用し、ガス中のトリチウムを濃縮することによってトリチウム濃度の測定精度を向上させる方法が考案され、その効果が期待されている。この方法は、ガスを高温のまま処理できるので、メモリー効果などは小さいと考えられるが、使用されるプロトン導電体酸化物は粉末焼結により作製されるため欠陥を多く含み、溶解したトリチウムが粒界、気孔、析出物などへトラップされる可能性がある。よって、プロトン導電体を水素ポンプとして使用する場合、欠陥が透過するトリチウム量を減少させたり、あるいは逆に、一度トラップされていたトリチウムが徐々に放出されることにより透過トリチウム量を増加させるなど、結果として、トリチウム濃度測定にも影響を与える恐れがある。このように、水素同位体のトラップは非常に重要であるにもかかわらず、これまでほとんど研究が進められていない。本研究では、上記水素トラップの影響解明を目指して、重水素あるいは重水を用い水素同位体の溶解・放出挙動に関する実験・解析を行う。

具体的には、プロトン導電体セラミックスとして、セレート系（例えば、$BaCeO_3$）、ジルコネート系（$CaZrO_3$）、インデート系（$BaInO_{2.5}$）などの材料の水素同位体挙動を調べる。これらの材料中の水素溶解、拡散、脱離挙動は、トラップとなりうる添加元素、結晶粒径、析出物（第２相）などの影響を受ける可能性がある。本研究では、これらの試料に高温でのガス吸収法にて重水を均一に溶解させた試料を準備し、応用力学研究所の昇温脱離ガス分析装置（TDS）を用いて、真空雰囲気で昇温し、水素同位体放出挙動を観測する。それぞれの試料の水素放出挙動に、添加元素、結晶粒径、析出相の存在がどのような変化を与えるのかを明らかにする。

・実験方法

本年度は、10%Y 添加 $BaCeO_3$（原料粉末を（株）TYK より購入）について、焼成条件を変え（焼成温度、時間　A:1873K, 5h、B:1873K, 20h、C:1923K , 20h）粒径を調節した試料を三種類準備した。各試料を $0.4x2x8mm^3$ に加工後、重水蒸気曝露（773K, 3h, 22Torr）を行い、その試料からの重水、重水素の TDS スペクトル（昇温速度 1K/sec）を測定した。

・実験結果

焼結条件を変えて粒経を調整したY添加$BaCeO_3$のSEM像を図１に示す。各試料の平均粒径は、1.3、3.3、5.0μｍであった。また、重水蒸気曝露したのちの重水と重水素の TDS スペクトルを図２に示す。いずれも主要な放出ガスは重水であったが、重水素としての放出もみられた。それぞれの放出ピーク温度、形状は試料ごとに異なっており、焼成条件 B（粒径：3.3μm）の試料の重水放出温度は低く、単一のピークであり、また、この試料では重水素の放出量も少なかった。焼成条件 A と C の試料では、重水放出温度は高く、また、ピークも分離しており、加えて、重水素の放出量も多い結果となり、B 条件に比べ試料中のトラップの影響が大きいことを示唆する結果となった。

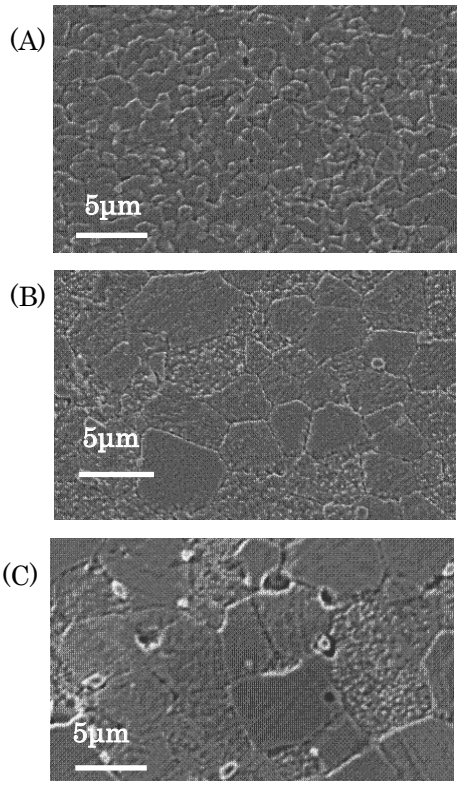


図１　$BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{2.95}$ 試料の SEM 像
（焼成条件）
A.1873K, 5h、B.1873K, 20h、C.1923K , 20h .
平均粒径はそれぞれ、1.3、 3.3、 5.0 μ m.

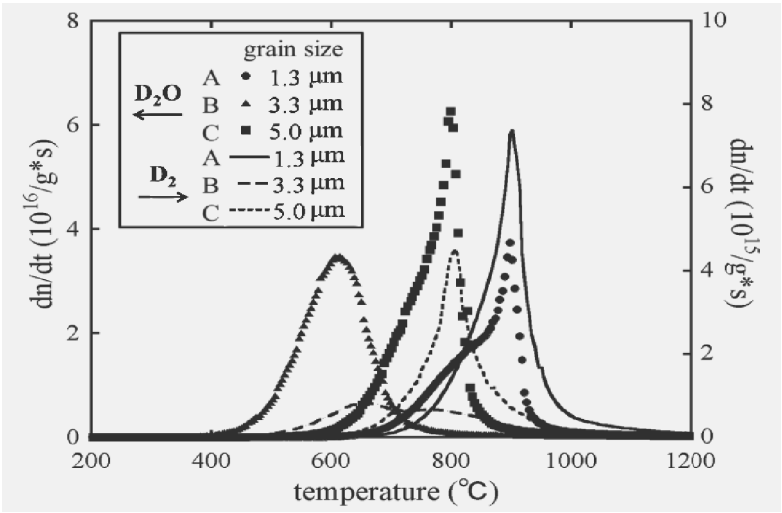


図２　773 K で重水曝露した試料の TDS 結果

・考察

本年度行った TDS 実験の結果は、酸化物プロトン道電体からの水素放出挙動に、粒径に対する一様な傾向は見られなかったが、試料調製条件によって大きく異なる可能性があることを示した。これは、同一原料でも、水素のトラップ密度、トラップエネルギーが大きく異なりえることを意味している。さらには、焼成条件 B のように、陽にはトラップの影響のない試料作製も可能であることが示された。今後、このような、最適試料調製条件の探索を含め、よりトラップの影響のない酸化物プロトン道電体探索に、TDS 等の実験・研究施設の共同利用、共同研究を進めたい。

・H23 年度の研究組織

研究代表者：橋爪健一（九州大学大学院総合理工学研究院・准教授）
研究協力者：大塚哲平（九州大学大学院総合理工学・助教）
緒方孝輔（九州大学大学院総合理工学府・修士 2 年生）
小坂和義（九州大学工学部・4 年生）
所内世話人：渡辺英雄　准教授

平成 23 年度発表論文：

１．K. Ogata et.al，“Thermal desorption spectra of D_2O and D_2 from $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{2.95}$ exposed to D_2O vapor at elevated temperatures”, Proceeding of13rd Cross Strait Symposium (11/22～23)

平成 23 年度学会発表：

１．橋爪健一　他、「外部電界を印加された酸化物プロトン導電体中の水素拡散」、日本原子力学会 (9/20～22)

２．K. Hashizume et al.，“Study on kinetics of hydrogen dissolution and hydrogen solubility in oxides using imaging plate technique”, ICFRM-15 (10/15～22)

３．K. Ogata et al.，“Thermal desorption spectra of D_2O and D_2 from $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{2.95}$ exposed to D_2O vapor at elevated temperatures”, 13rd Cross Strait Symposium (11/22～23)

４．橋爪健一　他、「直流電界下の酸化物プロトン道電体中の水素分布」、固体イオニクス学会 (12/7～9)

５．橋爪健一　他、「酸化物単結晶へのトリチウムの吸着及び溶解」、日本原子力学会 2012 年春の年会 (3/19~21)

23 FP－S1

研究集会「第１０回核燃焼プラズマ統合コード研究会」

京都大学　　福山淳

九州大学応用力学研究所研究集会「核燃焼プラズマ統合コード研究会」（実施責任者　福山淳（京都大学））は2011年12月15日～16日の期間、九州大学応用力学研究所において開催された。

はじめに

ITER ならびに核融合炉における核燃焼プラズマの振る舞いを予測し、その制御手法を確立する上で統合シミュレーションコードの開発は核融合シミュレーション研究における最重要課題である。米国では、従来からの輸送コードを中心にした NTCC (National Transport Code Collaboration) 活動に加えて、SciDAC (Scientific Discovery through Advanced Computing)における大規模シミュレーションの成果を取り入れる形で、統合シミュレーションコードの開発を目指す FSP (Fusion Simulation Project) が 2005 年から活動を開始している。一方、欧州においても JET における Transport Task Force (TR-TF) による統合輸送コードの開発に加えて、EFDA の活動として Integrated Tokamak Modeling Task Force (ITM-TF) が 2003 年末に発足し、2004 年初めから活動を開始している。国内においては ITER-BA(Broader Approach)活動も始まり、国際核融合エネルギー研究センター附属計算機シミュレーションセンター(IFERC CSC)が 2012 年 1 月より稼働を開始予定である。このような時期に第 10 回核燃焼プラズマ統合コード研究会を九州大学応用力学研究所において開催し，国内の研究動向、研究の進め方ならびにこれからの ITER-BA に関する研究協力について議論できたことは意義深い。12 月末をもって、世話人であった矢木教授が九州大学を退職し、六ヶ所で展開している IFERC-BA プロジェクトへ JAEA のプラズマ理論シミュレーショングループリーダとして赴任するという区切りの年でもあり、10 年間この活動を継続できたことは、感慨深いものがある。この場を借りて、矢木教授に感謝の意を表したい。ご苦労様でした。

会議内容

この研究会は毎年、応用力学研究所研究集会として開催されており、今回で第 10 回目となる。核燃焼プラズマ統合コード構想の活動報告、成果報告の場として位置づけられている。今回、25 件の発表があり、2 日間の講演スケジュールとなった。プログラムは大別して 8 つのセッションから構成される。セッション I は MHD 関連で 3 件の講演があった。磁気島の非線形ダイナミクスに関する講演が 2 件、回転プラズマの抵抗性壁モードに関する講演であった。セッション II はジャイロ運動論モデルに関連で２件の講演があった。トカマクにおける運動量輸送に関する最近の研究のレビュー(招待講演)と長波長領域へのモデルの拡張に関するものであった。セッション III はヘリカル系の輸送シミュレーション関連で５件あった。TASK3D を用いた LHD の輸送解析に関連した講演が 4 件と径電場のダイナミクに関するものであった。セッション IV は、拡張モデリング関連で、流れをもつ MHD 平衡、２次元輸送モデル、運動論的輸送モデルの講演があった。セッションⅤはトカマク輸送シミュレーション関連で６件の講演があった。ペレットによる ELM の統合シミュレーション、ビーム駆動電流における遮蔽因子の衝突依存性、TASK を用いた輸送シミュレーション関連 2 件、波動解析、GNET コードへの非線形衝突項の実装の講演があった。セッション VI はデモ設計に関する講演で、ダイバータの設計、新概念の講

演があった。セッション VII は L-H 遷移に関する講演で、周辺乱流コードと SOL２次元輸送コードの結合(招待講演)と輸送コードとダイバータコードの統合化の講演があった。セッション VIII はプラズマ周辺・壁関係で３件（うち１件はキャンセル）であった。不純物輸送と多種イオンにおけるボーム条件に関する講演であった。外国人研究者が２名参加したのでプログラムは英語で作成した。ビューグラフは英語、講演も原則英語で行った(一部の学生は日本語発表)。また、次年度の活動計画に関しても議論を行った。

全体を通し、周辺、加熱・電流駆動、統合コード、マルチスケール、乱流、ＭＨＤといったプログラム構成からも推察されるが、比較的バランスのとれたプログラムであったと言える。ヘリカル系統合化シミュレーション結果の報告もあった。今後、この方面の研究も増えていくことが期待される。来年度、研究会は京都大学がホストとなり、US-Japan JIFT workshop との共催で開催したい旨提案があり了承された。なお、プログラムの詳細に関しては下記のホームページを参照頂きたい。

http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/sosei/personal_pages/yagi/10THBPSI_Prog.html

最後にこのワークショップを開催するにあたり、九州大学応用力学研究所共同利用研究の支援を受けたので、この場を借りて感謝の意を表したい。

統合コード活動状況

活動環境

大学、核融合研、原研等による連携

（京大、九大、山口大、東大、東工大、慶応大、筑波大、核融合研、原研、電中研等）

活動形態

科学研究費補助金基盤研究(B)「統合コードによるＩＴＥＲプラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」（研究代表者　矢木雅敏、研究期間平成１９年度-２２年度）

科学研究費補助金基盤研究(S)「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発」（研究代表者　福山淳、研究期間平成２０年度-２４年度）

日韓ワークショップ “Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas” (NIFS 28-29, July 2011, organized by Y. Todo and C. M. Ryu)

US-Japan JIFT workshop on “Integrated Modeling and Simulation of Toroidal Plasmas” (GA, San Diego, 12-14, March 2012, organized by A. Fukuyama and V. Chan)

九州大学応用力学研究所共同研究

核融合研共同研究、原子力研究機構共同研究

中期的サポートが必要

理論・データ解析・コード開発：若手研究者

参考資料

10th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Annual Meeting (15-16) combined with Modeling and Simulation Sub-Cluster Meeting

Dec. 15-17, #W601, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

Dec 15 (Thursday)

(MHD) Chair M. Yagi

9:00-9:10 M.Yagi/A. Fukuyama, Opening Remarks

9:10-9:40 A. Ishizawa, Island dynamics with finite ion temperature effect

9:40-10:10 S. Nishimura, Nonlinear dynamics of magnetic islands in a helical plasma

10:10-10:40 J. Shiraishi, Development of resistive wall mode analysis code for flowing plasmas

10:40-11:00 Coffee Break

(GK)

11:00-11:40 T.S. Hahm, Recent Progress in Tokamak Momentum Transport and Intrinsic Rotation: Beyond Diffusion and Convection (Invited Talk)

11:40-12:10 N. Miyato, On extension of the gyrokinetic model to include long wavelength components

Lunch 12:10-13:20

(Transport, Helical System) Chair A. Fukuyama

13:20-13:50 M. Yokoyama, Development of Integrated Transport Code, TASK3D and its applications to LHD experiment

13:50-14:20 K. Watanabe, Transport Analysis on High Beta LHD Plasmas

14:20-14:50 R. Seki, Transport Study of ICH Plasmas in LHD using TASK3D/WM

14:50-15:20 A. Wakasa, Simulation of heat transport in LHD plasmas using TASK3D Code

15:20-15:50 S. Toda, Dynamics of radial electric field in helical plasmas

15:50-16:10 Coffee Break

(Extended Modeling) Chair T. S. Hahm

16:10-16:40 A. Ito, Equilibria of toroidal plasmas with flow in reduced MHD models

16:40-17:10 H. Seto, Modeling of two-dimensional transport in tokamak plasmas

current

17:10-17:40 H. Nuga, Kinetic Transport Simulation in Tokamak Plasmas

19:30-21:30 Conference Dinner (Jitokuya Chikushiguchi-Ten) reserved as the name of 'Togokodo-kenkyuukai'

Dec 16(Friday)

(Transport Tokamak) Chair K. Watanabe

9:00-9:30 N. Hayashi, Integrated simulation study of pellet triggered ELM

9:30-10:00 M. Honda, Collisionality dependence of shielding factor of beam driven current

(Demo Design)

10:00-10:30 K. Hoshino, SONIC simulation for DEMO divertor design

10:30-11:00 T. Takizuka, New Concept for DEMO reactor

11:00-11:20 Coffee Break

(Transport, Tokamak) Chair M. Yokoyama

11:20-11:50 A. Fukuyama, Present status of integrated modeling code TASK

11:50-12:20 T. Ikari, Tokamak transport simulation using TASK/TR

Lunch 12:20-13:30

13:30-14:00 Y. Maruyama, 2D kinetic full wave analysis in tokamak plasmas using FEM

14:00-14:30 Y. Masaoka, Validation of energetic particle confinement including the effects of nonlinear collision

(L-H Transition) Chair T. Takizuka

14:30-15:10 Y. Nishimura, Tokamak H-mode modeling by turbulence and transport simulation(Invited Talk)

15:10-15:40 M. Yagi, L/H transition simulation with integrated modelling of core and SOL/divertor transport

15:40-16:00 Coffee Break

(Edge, Plasma wall) Chair Y. Nishimura

16:00-16:30 G. Kawamura, Impurity transport simulation of LHD divertor and edge region

16:30-17:00 S. Azuma, Analysis of the Bohm criterion for two-ion-species plasmas using PARASOL

17:00-17:30 S. Sugita, Ballistic Propagation of Turbulence Front in Edge Plasma

17:30-17:50 Summary and Discussion

Adjourn

参加者リスト（25 名）

氏名	所属
矢木雅敏	九州大学
滝塚知典	大阪大学
横山　雅之	核融合研
登田慎一郎	核融合研
本多充	原子力機構
石澤明宏	核融合研
西村征也	核融合研
白石淳也	原子力機構
宮戸直亮	原子力機構
關　良輔	核融合研
伊藤淳	核融合研
奴賀秀男	筑波大学
T.S. Hahm	ソウル大学(韓国)
西村泰太郎	成功大学(台湾)
渡邊　清政	核融合所
星野一生	原子力機構

河村学思	核融合研
林　伸彦	原子力機構
若狭有光	京都大学
瀬戸春樹	京都大学
丸山優一郎	京都大学
碇　知朗	京都大学
東　修平	京都大学
福山　淳	京都大学
政岡義唯	京都大学

平成２３年度

新エネルギー力学分野

共 同 研 究 成 果 報 告

23 ME－1

機械的伸縮刺激に対する間葉系幹細胞の分化に関する研究

名古屋大学　　森田　康之

１．まえがき

人体において腱は，筋肉と骨を繋ぎ，筋肉の動力を骨に伝えている [1)-3)]．ここで，腱を損傷した場合，現在では縫合や移植による治療が行われている．しかし，これら既存の治療法では再発，後遺症などの問題がある．このような背景を踏まえて，新たな腱の治療法が必要とされている．

一方，臓器や組織に存在する未分化の細胞であり，多種類の細胞に分化可能な成体幹細胞を用いた再生医療が近年注目を集めている．中でも，ヒト骨髄由来間葉系幹細胞（hMSCs）は高い分化能を有しており，その分化に関して力学的刺激が有効であることが分かっている．特に，一軸伸展刺激を与えることで腱細胞に分化することが報告されている [4)]．このことから，幹細胞を用いて腱組織を構築することによる腱の再生医療が期待されている．

ここで，腱組織の機能や機械的強度は細胞から分泌された細胞外マトリクス（ECM）の組織化によって決定づけられている．したがって，幹細胞を用いて腱組織を構築するためには ECM の組織化が必要となる．現在では，腱細胞や幹細胞を播種したコラーゲンゲルや PLGA などの生分解性足場を用いた腱組織の構築に関する研究が進められている．しかし，これらの手法では，移植後に十分な強度が得られない，あるいは本来の腱組織と同等の組織が構築できないのが現状である．したがって，腱の再生医療のためには細胞から発現した ECM をより高い精度で組織化する必要がある．

そこで本研究では間葉系幹細胞に力学的伸縮を付加することで ECM として発現する I 型コラーゲン（Col I）およびテネイシン-C（TNC）の示す挙動を調べることを目的とした．その方法として，発現した ECM の発現量の定量化および構造観察を行い，伸縮条件による違いを考察した．

２．実験方法

２．１．伸縮実験

実験にはヒト骨髄由来間葉系幹細胞（hMSCs）を用いた．フィブロネクチンをコーティングしたシリコンチャンバーに幹細胞を接着培養し，シリコンチャンバーを伸縮装置で一軸方向に引張ることで幹細胞に繰り返し伸縮刺激を与えた．ここで，シリコンチャンバーは培養面の面積が 20×20 mm^2 のものを使用し，細胞を継代する際には細胞濃度が 1.0×10^5～1.3×10^5 cells/ml となるように調整した．継代後，温度 37℃，CO_2 濃度 5%に設定したインキュベータ内で 2 日間培養した後，伸縮実験を開始した．Table 1 に伸縮条件を示す．

２．２．マイクロプレートリーダによる吸光度測定

吸光度測定によって伸縮後に発現した ECM の発現量を定量化し，各伸縮条件による発現量の違いを比較した．測定の際は ELISA 法によって Col I および TNC に対して抗体を標識した．抗体標識後，マイクロプレートリーダを用いて 450nm での吸光度を測定した．測定の際に ECM は発現後に培養上澄み中に溶解したものと細胞周辺に沈着したものをそれぞれ測定対象とした．

２．３．蛍光抗体染色法による構造観察

伸縮後の細胞に対して，発現した Col I および TNC の構造観察を行った．観察の際は蛍光抗体を標識することによって Col I，TNC，細胞骨格および細胞核を蛍光染色した．染色後，共焦点レーザ顕微鏡を用いて細胞および ECM の構造観察を行った．

３．実験結果

３．１．吸光度測定による ECM の発現量の定量化

Fig.1 に各伸縮条件における吸光度測定の結果を示す．(a)に Col I の測定結果を，(b)に TNC の測定結果を示す．伸縮時間に関して，24 時間伸縮よりも 48 時間伸縮において ECM の発現量が増加していることが確認できた．また，伸展率に関して，10%伸縮よりも 8%伸縮において ECM の発現量が多くなっていることが確認できた．さらに，8%伸縮では 10%伸縮に比べて ECM の発現量の増加率が大きくなっていた．

３．２．共焦点レーザ顕微鏡による構造観察

Fig.2 に各伸縮条件における蛍光染色の結果を示す．Fig.2 において青色の部分が細胞核，緑色の部分が細胞骨格，赤色の部分が Col I，紫色の部分が TNC を示している．各条件ともに Col I の明確な発現が確認できたが，TNC はほとんど確認することができなかった．

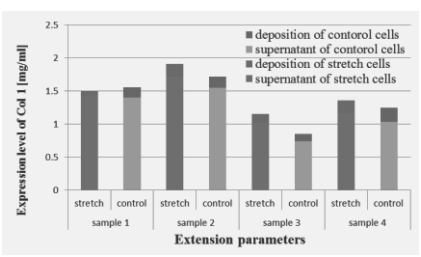
Table 1 Extension parameters.

	sample1	sample2	sample3	sample4
frequency	1Hz			
extension ratio	8%		10%	
duration	24h	48h	24h	48h

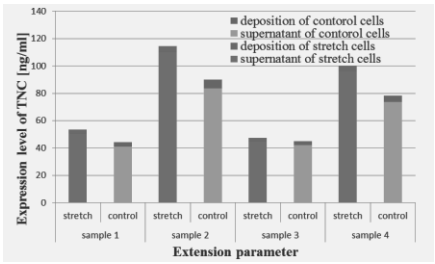
４．考察

４．１．伸展率による ECM の増加率の違い

幹細胞に対して一軸伸縮刺激を付加した場合，幹細胞は伸縮方向に対して 60°～80°の方向に整列することが報告されている [4),5)]．したがって同じ伸展率で伸縮刺激を与え続けたとしても，細胞の方向が変化するにつれて細胞の感知す



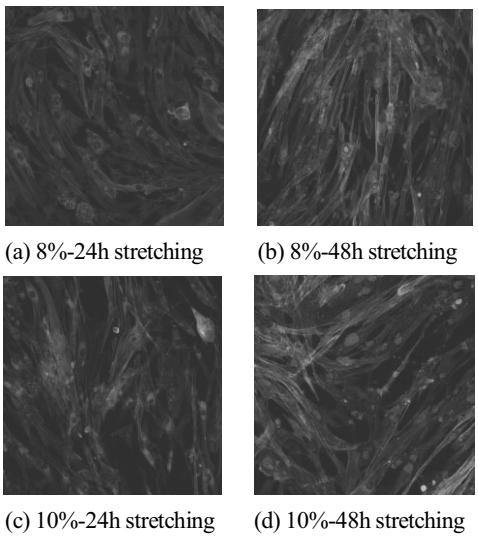
(a) Col I



(b) TNC

Fig.1　Expression level of ECM.

る刺激は小さくなっていくと考えられる．ここで，Fig.3 に各伸縮条件における細胞の整列角の分布を示す．(a)は伸展率 8%の分布を，(b)は伸展率 10%の分布を示している．本実験において伸展率 10%では 24 時間経過の時点で細胞は 60°～80°の方向に整列しており，その後 48 時間経過まではほとんど整列角に変化が見られなかった．一方，伸展率 8%では 24 時間経過時では整列角はあまり変化しておらず，48 時間経過までに緩やかに整列が進行していた．このことから，伸展率 8%では 24 時間経過後も細胞が比較的強い刺激を受け続けるが，伸展率 10%では 8%よりも早く細胞の受ける刺激が小さくなっていくと考えられる．その結果，上述のような伸展率による ECM の増加率に違いが表れたと考えられる．



(a) 8%-24h stretching　(b) 8%-48h stretching

(c) 10%-24h stretching　(d) 10%-48h stretching

Fig.2　Fluorescence images of the cells and ECM under the conditions of Table 1.

４．２．伸展率による構造比較

伸展率に関して，8%48 時間伸縮と 10%48 時間伸縮の染色結果を用いて Col I の構造を比較した．比較する際に，Col I の蛍光画像を二値化した．Fig.4 からわかるように，伸展率 8%では Col I の発現量は多いが，そのほとんどが粒状に発現しており，組織化している部分は確認できなかった．一方，伸展率 10%では 8%に比べて発現量は少ないが，全体的に発現した Col I が膜状に繋がっており，組織化していることが確認できた．ここで，Col I の発現量における沈着の占める割合を各伸縮条件に対して計算した結果を Table 2 に示す．これより沈着の占める割合は 10%48 時間伸縮において最大となった．一方，8%48 時間伸縮では全体の発現量は最大であったが，沈着として存在する割合は 10%48 時間伸縮の半分以下となった．これらの結果から，伸縮によって発現した Col I は，組織化が進行するほど沈着として存在する割合が増加するということが分かった．このことから，Col I の発現量と組織化の間には異なるひずみ依存性が存在していることが考えられる．

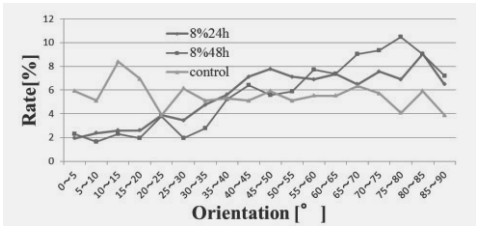
５．まとめ

ヒト骨髄由来間葉系幹細胞に対して伸縮刺激を与え，伸縮条件の違いが細胞外マトリクスの発現量及びその構造に与える影響について検討した．その結果，次のような結論が得られた．

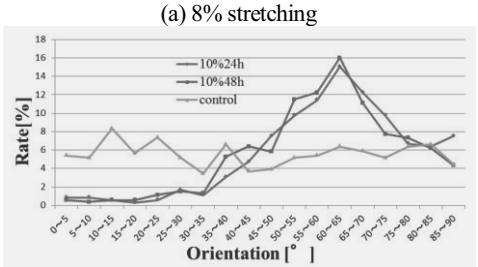
1)　Col I の発現量と組織構築の間には異なるひずみ依存性が存在していると考えられる．
(2)　本研究で検討した伸縮条件において，8%48 時間伸縮において ECM の発現量は最大となった．
(3)　発現した ECM は沈着と比べて上澄中における含有量が非常に多く，特に TNC ではその傾向が顕著であった．

参考文献

1) Tissue-engineering approach to the repair and regeneration of tendons and ligamnets, Goh JC, et al. Tissue Engineering, Volume 9(4, Supplement 1), 31-44, (2003).
2) Ectopic Induction of Tendon and Ligament in Rats by Growth and Differentiation Factors 5, 6, and 7, Members of the TGF-beta Gene Family, Neil M. Wolfman, et al. Journal Clinical Investigation, 100(2), 321-33(1997) .
3) Mechanobiology of tendon, James H.-C. Wang, J Biomech, 39(9), 1563-1582 (2006).
4) Effect of uniaxial stretching on rat bone mesenchymal stem cell Orientation and expressions of collagen type I and and tenascin-C, Zhang Lei, et al. Cell Biol Int, 32(3), 344-352 (2008).
5) Effect of Focal Adhesion Kinase on the Regulation of Realignment and Tenogenic Differentiation of Human Mesenchymal Stem Cells by Mechanical Stretch, B. Xu, et al. Connective Tissue Research, 52, 373-379, (2011).

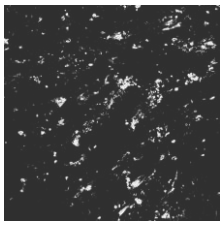


(a) 8% stretching

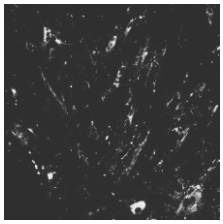


(b) 10% stretching

Fig.3　Orientation of the cells under the conditions of Table 1.



(a) 8%-48h stretching



(b) 10%-48h stretching

Fig.4　Difference of the structure of Col I.

課題番号 23ME-2　風レンズ風車のブレードの振動原因の究明と大型ブレードの実働ひずみ計測

鹿児島高専 機械工学科 小田原 悟

[1] 緒 言　現在，化石燃料の枯渇および脱石油脱原子力が世界的に注目されている．そこで，自然に害がなく非枯渇性の半永久的なエネルギー資源であることから風力エネルギーが注目されている．しかし，日本の風は風速が小さいうえに風向も頻繁に変化するため従来の風力発電に適していない．この問題を解決するために 2001 年に低速域でも発電可能であり，風向の変化を追従できるフリーヨー機構をもつ小型風車として「風レンズ風車」が開発された．風レンズ風車は従来の小型風車に比べ，2～5 倍の発電効率をもつ風車である．ただ，解決しなければならない問題は台風などが多く発生する環境下での風車の強度である．

そこで，本研究では風レンズ風車のブレードに作用する実働ひずみを計測し[(1)]，振動の原因の特定と風速や風向の急な変化及び集風体の有無が翼のひずみにどのような影響を及ぼすかを調査する．

[2] **実験条件および実験方法**　図 1 のように風レンズ風車のハブに無線テレメータ型ひずみ計を設置した．図 2 に示すようにブレードの根元にひずみゲージを貼り付けた．風レンズ風車を九州大学春日キャンパスの大型風洞の中央に設置した．図 3 に風速計と風車全体の配置図を示す．風向の急な変化による実働ひずみの計測において，手動で風車の向きを強制的に変化させることで風向の急な変化を模擬した．図 4 のように，風車と風向のなす角をθとし，実験ではθ =45，90[°]変動幅を再現した．また，風レンズ風車本体の各部の振動の加速度を測定するために，集風構造体に圧電型加速度検出器を取り付け，信号をメモリーハイコーダに出力することで加速度の計測を行った．

[3] **実験結果及び考察**

3.1　ひずみ計測実験　風速と風向を一定にし，集風体の有無によってひずみの変動幅がどのように変わるかを調べた．集風体が無いほうが集風体有りに比べ 2 倍ほど大きくなった．図 5 は横軸が時間[sec.]で縦左軸がひずみ[με], 縦右軸が角度の変化$d\theta/dt$[°/sec.]である．風速を一定にして風向を変動させたところ，図のように風向の変化速度$d\theta/dt$が大きいときにひずみ変動幅が増大した．また，$d\theta/dt$の増加に伴いひずみの変動幅が増加した．この原因は，風向が変化する際にブレードに生じるジャイロモーメントが考えられる．ジャイロモーメントとは回転体を回転軸とは異なる軸の周りに回したときに，第 3 の軸に生じるモーメントのことである．ジャイロモーメント Mは$M = m\ell^2\omega\Omega$で表され，m はブレードの質量, ℓはブレードの長さ, ωはブレードの回転角速度, Ωは風レンズ風車本体のヨー回転の角速度$\Omega = d\theta/dt$である．ジャイロモーメントによって生じる曲げ応力σ_bはσ_b=M/Z で計算される．ここで，Z は断面係数でありブレードとハブをつなぐ部分は図 2 より長方形断面なので$Z = bh^2/6$, b: 幅[m], h: 厚さ[m]と表される．また, ひずみ振幅$\Delta\varepsilon_t$は$\Delta\varepsilon_t = 2{\sigma_b}^2/E$, E: 材料の縦弾性係数[GPa]で表される．以上の式を用いてジャイロモーメント M 及び曲げ応力 σ_b，σ_bより推定されたひずみ振幅$\Delta\varepsilon_l$，実験で得られたひずみ振幅$\Delta\varepsilon_t$と式を用いて算出した値を表 1 に示す．

風向の変化$d\theta$が 45[°]の場合，実験で測定したひずみ振幅$\Delta\varepsilon_t$は理論値$\Delta\varepsilon_l$の 1.31 倍となった．また，$d\theta$が 90[°]の場合の計算上のひずみ振幅$\Delta\varepsilon_t$は理論値$\Delta\varepsilon_l$の 0.820 倍になった．この誤差は，ブレードを一様断面棒でモデル化して計算を簡略化したことが原因と考えられる．しかし，風向の変化速度 $d\theta/dt$ が異なっても誤差がほぼ同程度なので，風向が変化する際に生じるひずみの変動の原因の 1 つがジャイロモーメントの作用によるものであることは否定できない．したがって，風向の急激な変化によるひずみ振幅$\Delta\varepsilon$の増大の原因の 1 つとして風向が急変する際に生じるジャイロモーメントが関係していると考える．

3.2　集風構造体の加速度の変動　次に，集風構造体の加速度の変動挙動について実験を行った．図 6 は横軸が時間

[sec.]で縦左軸が加速度変動 a[m/s^2], 縦右軸が風洞内風速 u[m/s]の変化である．図より流速が u=3.0~10m/s の範囲で変化するとき，風速が u=5.0m/s および 8.0m/s 付近で加速度変動が急増することがわかった．この 2 つの風速域では共振が生じており，ブレードの固有振動数及び集風体の固有振動数とブレードに生じる振動が一致して生じたものと考える．

[4] 結 言　風速の増加に伴ってブレードに生じる半径方向のひずみは大きくなった．風向が変動する場合，風向の変化率$d\theta/dt$が大きくなったときにひずみが増加した．これは，ジャイロモーメントが原因の 1 つである．集風体無しの方が集風体有りに比べて，ひずみが大きくなった．また，風速が 5m/s と 8m/s のときに振動の加速度振幅が急増した．これは，ブレードの固有振動数及び集風体の固有振動数が風車の振動数と一致したことによる共振現象と考える．この風向変動によるブレードの振動と集風体の共振の相乗効果により風車自体の振動の増長が起こることがブレード破損の原因となりうる．

参考文献

(1)　小田原 悟:風レンズ風車ブレードの実働ひずみ計測, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 772, pp. 3336-3342, (2010).

謝辞　本研究は九州大学応用力学研究所 大屋裕二研究室の烏谷 隆 准教授の指導の下で行った．また実験の際には九州大学応用力学研究所 技術職員 渡辺公彦氏および大屋研究室所属の大学院学生に実験準備のお手伝いを賜った. 深く感謝申し上げる．

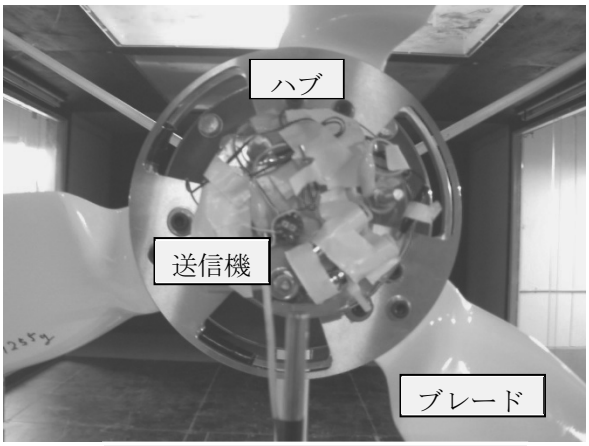


図 1　ハブに取り付けた送信機

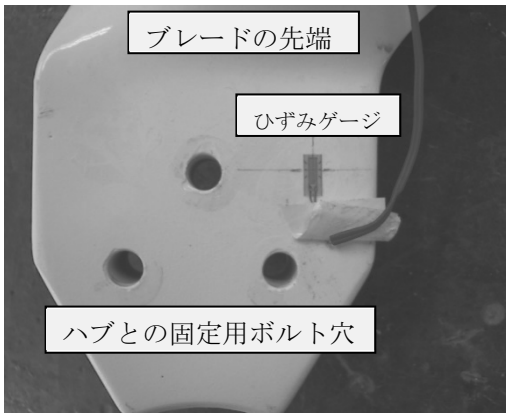


図 2　ひずみゲージの取り付け

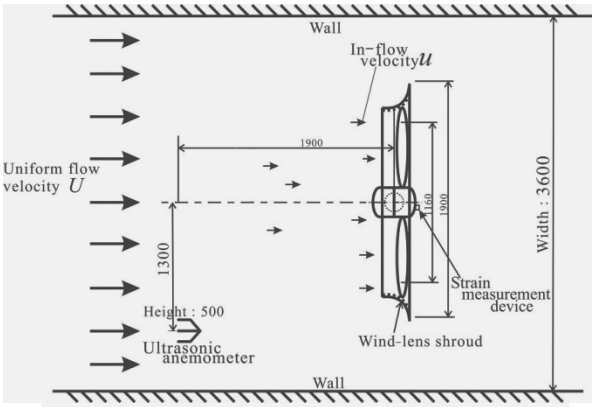


図 3　大型風洞内の風レンズ風車の位置

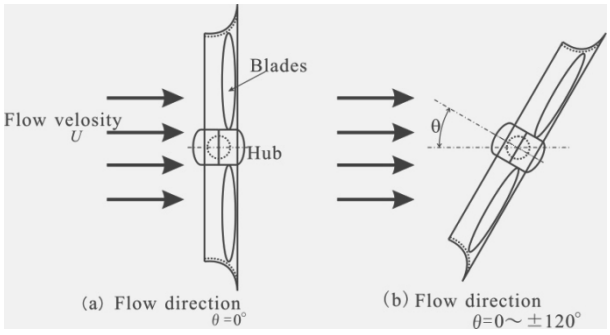


図 4　風向と風車本体とのなす角θ

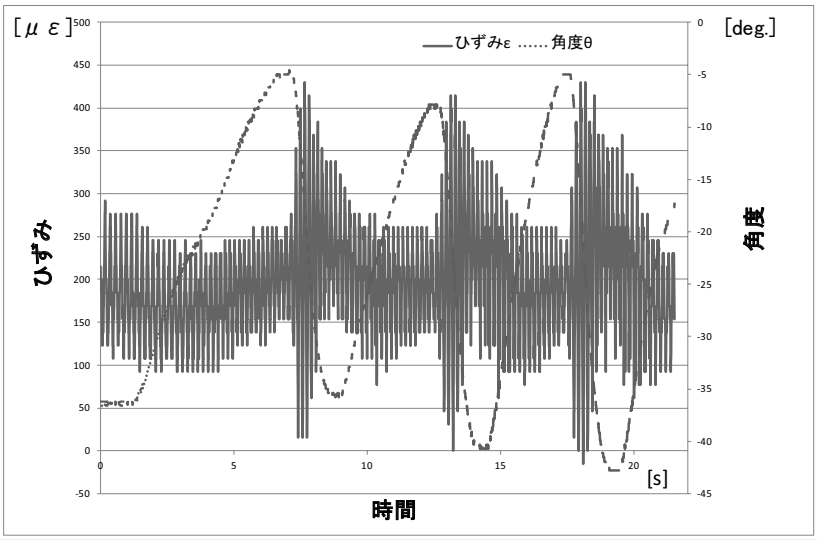


図 5　集風体有りで風速 5[m/s]のとき，変動角度 45[°]の場合のひずみ振動

表 1 ジャイロモーメント M とひずみ幅の算出値および計測値

$d\theta$ [°]	$d\theta/dt$ [rad/s]	M [Nm]	σ_b [MPa]	$\Delta\varepsilon_l$ [με]	$\Delta\varepsilon_t$ [με]
45	0.785	8.93	0.738	335	440
90	1.57	17.9	1.48	671	550

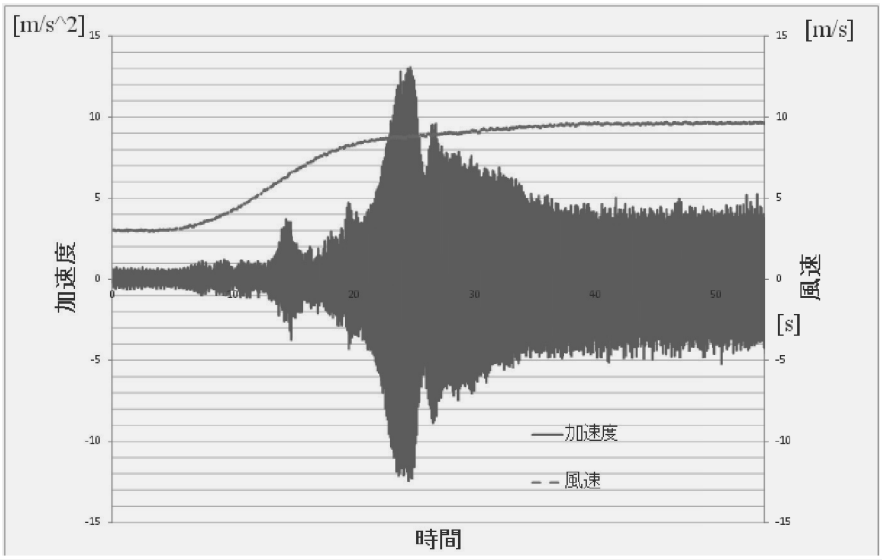


図 6　風速を 3[m/s]から 10[m/s]と変化したときの加速度波形

平成 23 年度の本研究に関連する研究実績

1) 小田原 悟：風レンズ風車翼材の機械的強度特性，日本機械学会論文集 A 編，Vo. 78, No. 786, pp. 244-248, (2012), 査読付.

2) 小田原悟：風レンズ風車の翼振動の原因究明，日本機械学会年次大会講演論文集 CD-ROM, S051013, 2011-9-12, 東京工業大学.

2 次元流れレンズによるフラッタ水力発電装置の出力性能向上

福岡工業大学　工学部　知能機械工学科　阿比留久徳

1. 目的

日本に多い中小河川や灌漑用水路などの比較的低流速（超低落差）の流れで翼にフラッタを生じさせ，その動きによって効率的に発電する新しい小規模水力発電技術について，これまでに基礎実験を行い発電効率 32-37%で発電できることを検証している [1)]．

一方，風力発電では「風レンズ」と呼ばれるディフューザを用いて風速を増し，発電量を増加させる「風レンズ風車」が開発されている．

本研究ではフラッタ水力発電装置の実用化に向けて，2 次元ディフューザ（流れレンズ）による出力性能向上の可能性につき実験的に検討を行う．

2. 実験装置及び実験方法

本実験は九州大学の深海機器力学実験水槽（長さ 65m、幅 5m、深さ 7m）にて行うことを前提に装置の設計を行った。使用するフラッタ発電装置は基礎実験に用いたと同様である。実験装置全体を図 1 に、流れレンズの形状・諸元を図 2 に、また曳航台車への取付け状況を図 3 にそれぞれ示す。

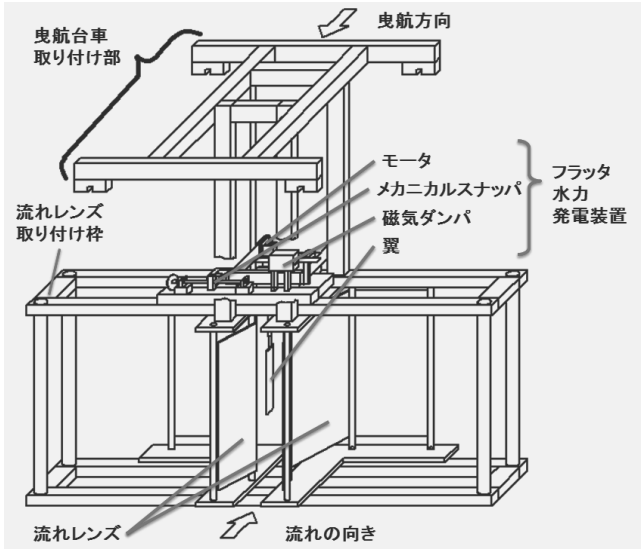


図 1. 実験装置の全体図

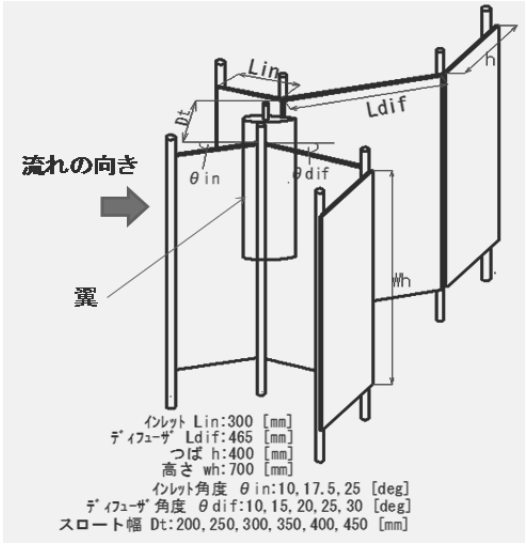


図 2. 流れレンズの形状及び諸元

図 3. 曳航台取付け状況

3. 実験結果

インレット角 10[deg]、スロート幅 250[mm]におけるディフューザ角 θ dif と発電量の関係を図 4 に、またディフューザ角 20[deg]、スロート幅 250[mm]でのインレット角 θ in と発電量の関係を図 5 に示す。

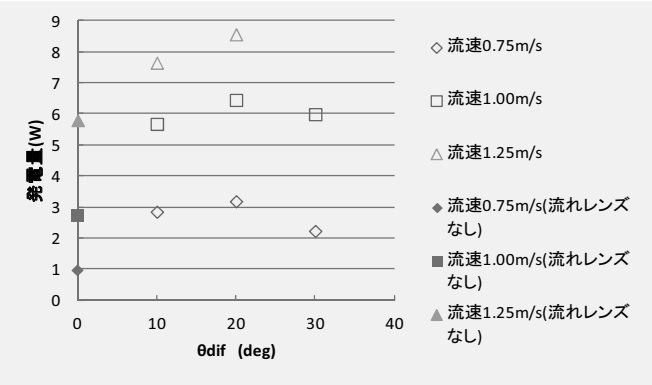


図 4. ディフューザ角と発電量

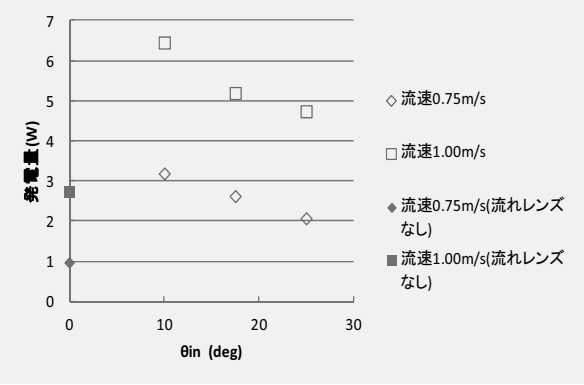


図 5. インレット角と発電量

これらの図より、各流速ともディフューザ角 20[deg]、インレット角 10[deg]が発電量が多くなることが知れる。

次にディフューザ角 20[deg]、インレット角 10[deg]でのスロート幅 Dt の影響を図 6 に示す。また、流れレンズなしとの発電量の比率を図 7 に示す。

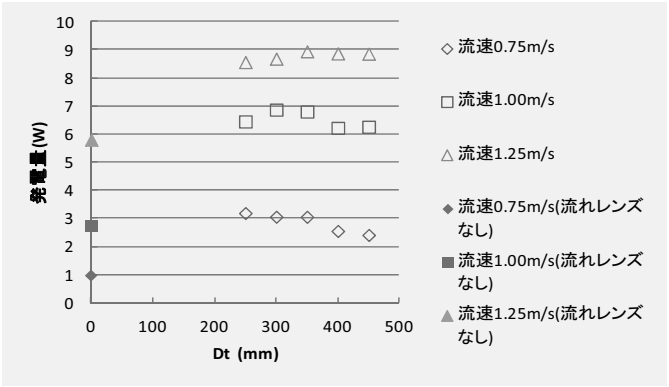


図 6. スロート幅と発電量

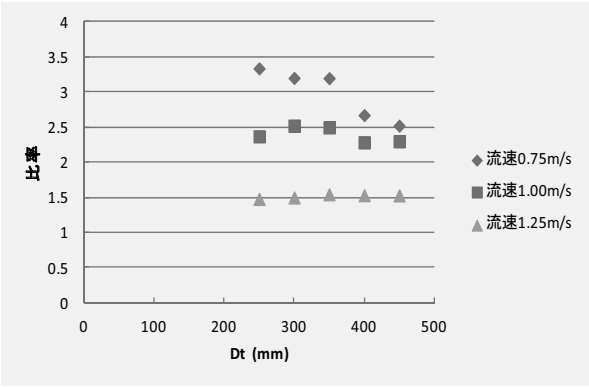


図 7. 流れレンズ有無の比率

図 6 より流速が低くなるにつれスロート幅の最適値は狭くなる傾向にある。図 7 より流れレンズによる発電量の増加は、流速が遅い 0.75[m/s]のときで約 3 倍、流速が速い 1.25[m/s]のときでも約 1.5 倍であることがわかる。

4. 結言

今回の実験で、流れレンズによりフラッタ水力発電装置の発電量を大幅に増加させることができ、流速の遅い流れへの有効な対応策になることが明らかになった。

5. 参考文献

(1) 阿比留久徳，et.al,”フラッタ水力発電システムの研究”，日本機械学会論文集(B 編)75 巻 758 号,2009

23 ME－4

「３次元環境下における細胞の力学エネルギー測定法の確立」

北海道大学先端生命科学研究院　水谷　武臣

・目的

細胞の機能を調べる研究は、これまで、培養シャーレ上などの２次元環境に存在する細胞をターゲットとしたものが主流である。しかしながら、生体内の細胞は３次元環境下に存在するため、近年、３次元環境下での細胞の機能を調べる研究が注目されている。

これまでに、細胞が出す力学エネルギーに注目し、研究を進めてきた。細胞は力を発生させることで、様々な機能を持った細胞に分化したり、組織・器官を維持するために増殖したり、外部から生体内への侵入者の元に運動したり、する。これらの活動は、もちろん、３次元環境下でなされている。本研究では、３次元環境で細胞が出す力や力学エネルギーの空間分布を測定する手法の開発を目指した。更には、この空間分布の時間変化と、細胞の運動・分化・増殖の動態とを対応させることで、生体内における細胞の機能発現のメカニズムを力学の観点から明らかにすることを試みた。

・実験方法

細胞をコラーゲンゲル中に培養し、力を発生することによって分化・増殖・運動する様子を蛍光顕微鏡で観察する。実験の主な流れは以下の通りである。

① GFP によって蛍光標識した細胞用意する。
② GFP とは別の波長の蛍光ビーズを用意し、コラーゲンゾルと混合する。
③ 細胞と上記コラーゲンゾルを混合し、ゲル化させる。
④ 細胞の動態とそれに伴うビーズの変位を蛍光顕微鏡で観察する。
⑤ ビーズの 3D 変位から歪および力を有限要素法によって数値計算する。

細胞の動態変化と 3D 下での力学量の変化とを対応させることで、3D 下における細胞の機能発現と力学との関係を明らかにすることを試みた。

・実験結果

GFP によって標識した細胞を蛍光顕微鏡で撮影することで、細胞の輪郭を取得した。さらに、細胞の輪郭の情報を元に、細胞を３次元構造体に対するメッシュとして表現することに成功した(図)。加えて、細胞周辺に位置する蛍光ビーズの変位情報を元に、コラーゲンの３次元変位情報をプロットすることに成功した(図)。細胞の動きにともない、変位の方向が変化することが観察された。

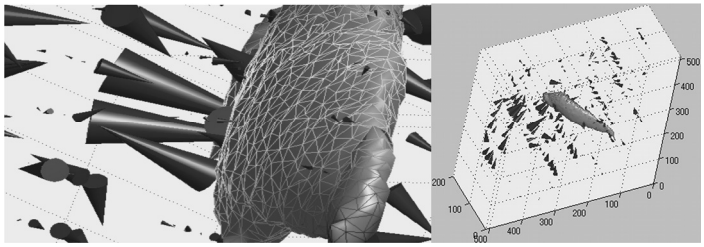


図　３次元環境下での細胞が出す力の可視化に向けて

蛍光標識コラーゲンゲル中に細胞を培養し、３次元ライブイメージング画像を解析することで、細胞が

(図説の続き)出す力によってどちらの方向にコラーゲン繊維が変形するのかを表現することに成功した。細胞表面をメッシュで、コラーゲン繊維の変位ベクトルをコーンで、それぞれ表現している。

・考察

現時点では、コラーゲンゲルに包埋した蛍光ビーズの変位の空間分布を得ることに成功している。細胞が出す力を得るための次のステップとしては、①歪の空間分布を解析するための計算アルゴリズムの構築、②コラーゲンゲルの弾性率の測定、が必要である。更に力の解析法が確立した後には、解析した力が妥当であるのか、評価する必要がある。ゲル全体に圧力をかけた際の変形を評価するなどの方法を検討している。

－現れてきた問題点と今後の展望－

細胞の過時観察を行っていると、一部の蛍光ビーズが細胞表面に付着し、コラーゲンゲル内の他のビーズと比べて明らかに速いスピードで移動することが発生していた。これは、ビーズを用いて変位を検出する方法に少し問題を含んでいることを示唆している。また、蛍光ビーズを単純にコラーゲンゲルに包埋しただけの手法であるため、コラーゲン繊維自体の変形をダイレクトに反映しているのか疑問が残る。これらを解決するために、現在、コラーゲン繊維そのものの変形を評価する方法に着手する予定である。

・研究成果報告

－学会発表－

①T. Mizutani:

"Imaging for Cellular Mechanics: Dynamic Behavior of Cytoskeletal Networks and Cellular Contractile Force"

The Fifth Shanghai International Conference on Biophysics and Molecular Biology, Shanghai (China), November 2011.

②水谷　武臣:

「細胞の時空間ダイナミクス計測：ライブセルイメージングから細胞骨格の力学バランスと細胞が発生する力をみる」

九州大学応用力学研究所全国共同利用研究会「細胞のメカノバイオロジー」、九州大学、９月２１日　２０１１年.

③吉村 遼、水谷 武臣、芳賀 永、川端 和重:

「3 次元環境下の細胞が発生する力の測定：画像相関法による 3 次元変位解析ソフトウェアの開発」

日本生物物理学会北海道支部例会、北海道大学、３月８日 ２０１１年.

・研究組織

水谷　武臣	北大・先端生命　助教	代表者	
Ikebe Mitsuo	University of Massachusetts	教授	研究協力者
吉村　遼	北大・先端生命　修士１年		研究協力者
東藤　貢	九州大学応用力学研究所　准教授		所内世話人

23 ME－5

CO2削減省エネ海上輸送のための新船型開発に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

世界の物流の99%を担う船舶は、昨今の地球温暖化問題に伴う CO_2 低減に対しても大きな責任を負っており、国土交通省の政策下、各所で特に実海域における抵抗低減法の研究開発が行われているところである。実海域とは波浪影響下を意味し、従来船型開発で主眼とされてきた静水中での推進性能ではなく、波浪環境下での推進性能の観点に立った抵抗低減を考えることになり、学術的には波浪中抵抗増加の低減ということになる。

一昨年採択された共同利用研究課題「船首形状変更による波浪中抵抗増加低減法に関する研究」において、Blunt な船型については船首部に強いフレアーを付けることにより、実海域で重要な波長域で波浪中抵抗増加を10%以上も低減できることが分かっている。これを受けて昨年から継続する本研究では、その成果の一般性を確認することを目的として、他船型についてフレアーの異なる船型模型を用いた曳航試験を実施する。実験では、非定常波の計測も行い、波形からも抵抗増加の解析を行って、力の計測により得られた結果を検証することにしている。

2. 研究方法

船首形状を変更した複数の供試模型を用いた曳航試験によって，次の手順により研究を遂行する．

(1) 2.5m 供試模型を用い，深海機器力学実験水槽において，船体運動計測試験を行い，非線形運動および波浪中抵抗増加を計測する．

(2) 運動計測試験と同時に波形計測試験を行い，現在得られ難い波浪中航行時の非定常波形を計測する．

(3) 取得データを解析し，船体運動および波形の非線形性の特性についてまとめるとともに，非定常波の波形解析からも抵抗増加を算出する．

(4) 力の計測により得られた抵抗増加と波形から得られた抵抗増加の二つの視点から，船首形状の相違による抵抗増加の低減量を比較，検討する．

(5) 一連の研究を総括し，昨年までの結果と比較・考察する．

3. 研究組織

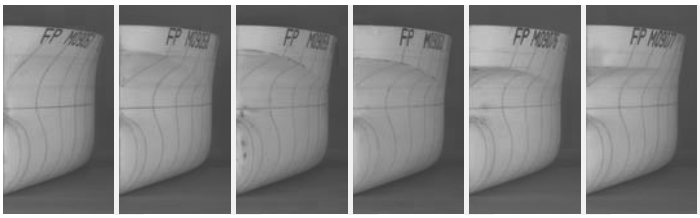
本研究は下記のような組織で行った．

氏　名	所　属	職　名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究院エネルギー・環境部門	教授	代表者
谷口 弘樹	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士２年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士２年	実験補助
柏木 正	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	教授	実験解析
若林 友輝	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	修士２年	実験補助
一色 智彦	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	修士１年	実験補助
胡　長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 供試模型

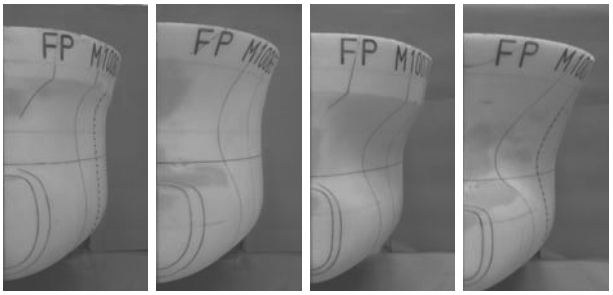
一昨年度の実験で利用した供試模型はタンカー船型である．船体番号 M09057 をオリジナル船型とし，船首部形状を変更した計 6 種類の供試模型を準備した．Fig.1 に使用した各船首形状の写真と船体番号，およびチャインラインとフレアー形状の特徴を示す．



船体番号	チャインライン	フレアー角度
M09057		
M09058	高	浅い
M09059	高	深い
M09060	中	浅い
M09076	低	浅い
M09077	低	水平

Fig.1: 船首形状の異なる供試模型とそれらの特徴 (一昨年度)

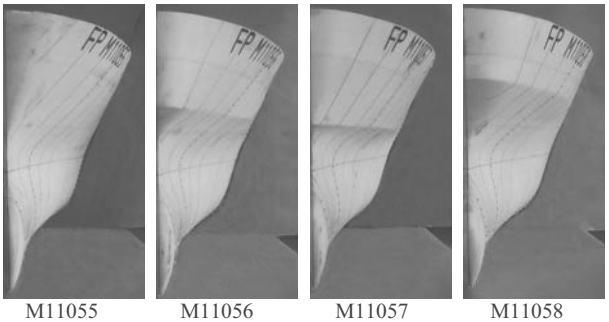
昨年度の実験で利用した供試模型はバルクキャリアー船型である．オリジナル船型である太めの船型 1(船体番号 M10065) と細めの船型 2(船体番号 M10071)，それぞれの船首部のフレアーを強めにした船型 M10064，M10070 の計 4 種類を準備した．Fig.2 に使用した各船首形状の写真と船体番号，および船首形状の特徴を示す．



船体番号	フレアー形状
M10064	強
M10065	
M10070	強
M10071	

Fig.2: 船首形状の異なる供試模型とそれらの特徴 (昨年度)

以上の供試模型に対し，本年度の実験で利用した供試模型はコンテナ船型である．船体番号 M11055 をオリジナル船型とし，船首部のチャインライン位置を変更した計 4 種類の供試模型を準備し，水槽試験を行う．なお，チャインライン位置が低いほどフレアーの強い形状となっている．Fig.3 に使用した各船首形状の写真と船体番号，および船首部チャインライン位置を示す．なお，各供試模型に対して重心位置や環動半径等の実験条件を一致させるため，バラストウェイトの調整を行っている．



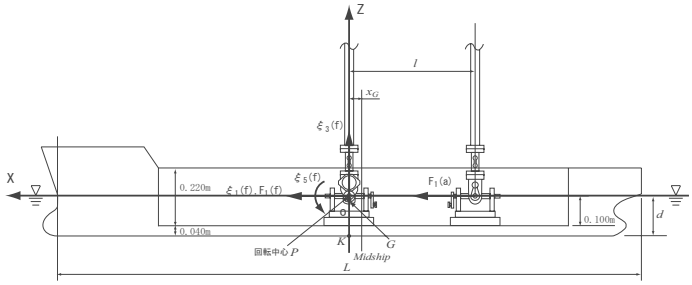
船体番号	チャインライン
M11055	
M11056	中
M11057	低
M11058	高

Fig.3: 船首形状の異なる供試模型とそれらの特徴 (本年度)

4.2 試験内容

運動計測

運動計測装置を用いて surge, heave, pitch の運動の計測を行い，前後のロッドに取り付けたひずみゲージにより船体に及ぼす抵抗を求める．位相基準は船体重心位置に入射波頂が来た時を $t=0$ としている。運動計測試験は，静水中を航行する定常試験と造波機により起こされた入射波中を航行するときの非定常試験について行っている．実験条件はフルード数 $F_n=0.2383$，非定常試験における入射波は正面向かい波で $\lambda/L=0.3$〜3.0 について行った．運動計測試験で用いる模型船体の模式図および主要目を Fig.4 に示す．



主要寸法

L	2.5000 m	l	0.4815 m
B	0.4118 m	$\overline{KG}$	0.1412 m
d	0.1397 m	κ_{yy}	0.6270 m
∇	0.0964 m^3	κ_{yy}/L	0.2508
W	96.400 kgf	I_G	3.8636 kgf·ms^2
x_G	0.0185 m	I_P	3.8402 kgf·ms^2
C_b	0.6702	$\overline{GP}$	0.0015 m

Fig.4: 運動計測試験時の模型セットアップ図および主要目

波形解析

Fig.5 に波形解析の模式図，また Fig.6 に容量式波高計を示す．水槽壁面に計 12 個の波高計を船の進行方向に縦並びに設置し，Fig.5 中の trigger の位置に船首が差しかかった瞬間を計測開始時刻としている．波形計測は定常試験および非定常試験について行った．計 12 個の波高計は同時に calibration が可能であり，非定常試験における波高計間隔は入射波の λ/L に対応させて、等間隔位相でデータ取得できるように調整している．

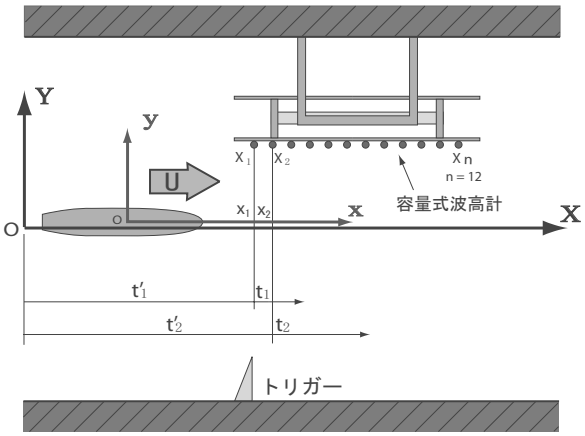


Fig.5: 波形計測装置セットアップ図

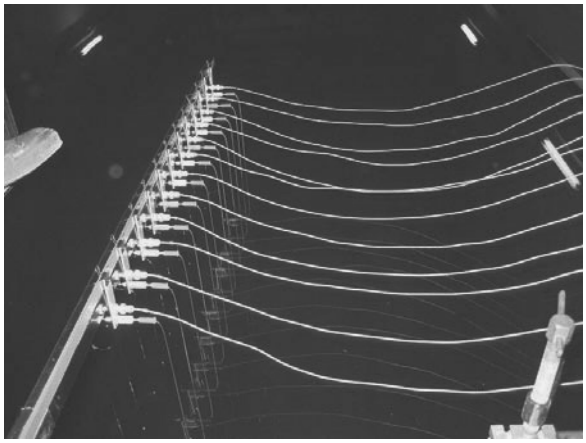


Fig.6: 容量式波高計

4.3 結果・考察

定常問題

水槽試験による定常航走時の各船型における x 方向流体力 (定常抵抗) とオリジナル船である M11055 からの増減率を Table1 に示す．定常抵抗の低減を考慮して設計されているオリジナル船が最も低い抵抗値を示した．他の船型に関して，M11056 は比較的抵抗の増加率が大きく，最もフレアーの強い M11057 はほぼ性能低下しないという結果を得た．

Table 1　各船首形状における定常抵抗

形状	定常抵抗	増減率
$M11055$	0.4597 kgf	-
$M11056$	0.4663 kgf	+1.43%
$M11057$	0.4602 kgf	+0.12%
$M11058$	0.4631 kgf	+0.75%

非定常問題

Fig.7 に一昨年の実験で計測された抵抗増加のグラフを示している．横軸に λ/L，縦軸に抵抗増加量を波振幅，主要船体寸法で無次元化した値を取っている．ここで言う抵抗増加とは、入射波ありの非定常実験で計測された surge 方向の力と入射波なしの定常実験で計測された surge 方向の力との差を意味している．また Fig.7 の右のグラフは海洋で主要な波長域である $0.3 \leqq \lambda/L \leqq 1.0$ の範囲において Fig.7 左のグラフを拡大したものである．全船型で $\lambda/L = 1.3$ 付近において抵抗増加がピークとなっている．また，船首部に強いフレアーを付けることで $0.3 \leqq \lambda/L \leqq 1.0$ の短波長域において全体体に抵抗増加を低減する働きがあることが一昨年の実験の結果から分かる．

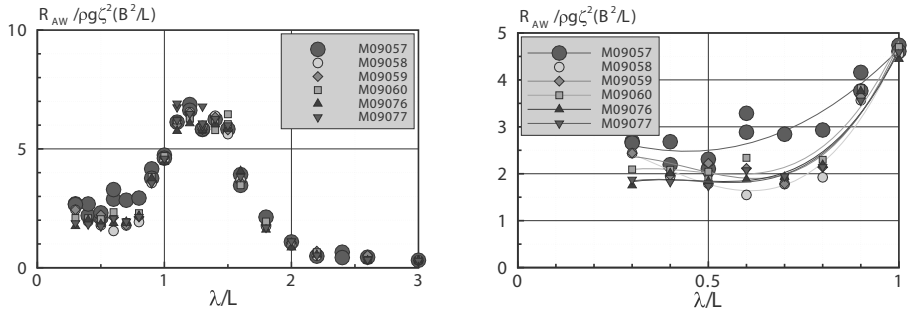


Fig.7: Added wave resistance for different bow shapes at $F_n = 0.190, \chi = 180$ degs.

次に，昨年の実験より得られた抵抗増加のグラフを Fig.8 に示す．左図が太い船型，右図が細い船型のグラフである．双方の船型で，船首部に強いフレアーを付けたことによって $1.0 \leqq \lambda/L \leqq 2.0$ の中波長領域において抵抗増加低減が確認できる．

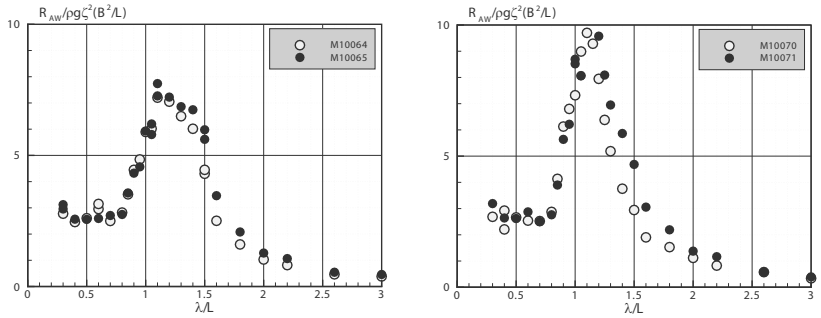


Fig.8: Added wave resistance for Ship1 at $F_n = 0.175$, $\chi = 180$ degs. and Ship2 at $F_n = 0.160$, $\chi = 180$ degs.

Fig.9 に本実験での検力計から計測された抵抗増加のグラフを示す．Fig.9 の左のグラフ内 $0.3 \leqq \lambda/L \leqq 1.0$ の範囲を拡大したものが右のグラフとなっている．全船型で $\lambda/L = 1.1$ 付近において抵

抗増加がピークとなっていることが分かる．短波長域をみてみると，オリジナル船である M11055 の抵抗増加の値が他の船型に比べ大きく，チャインラインを付けることによる抵抗増加の低減効果が確認できる．特に $\lambda/L < 0.8$ の範囲で M11056，M11058 の両船型が安定して抵抗増加が小さいことがグラフから読み取ることができる．

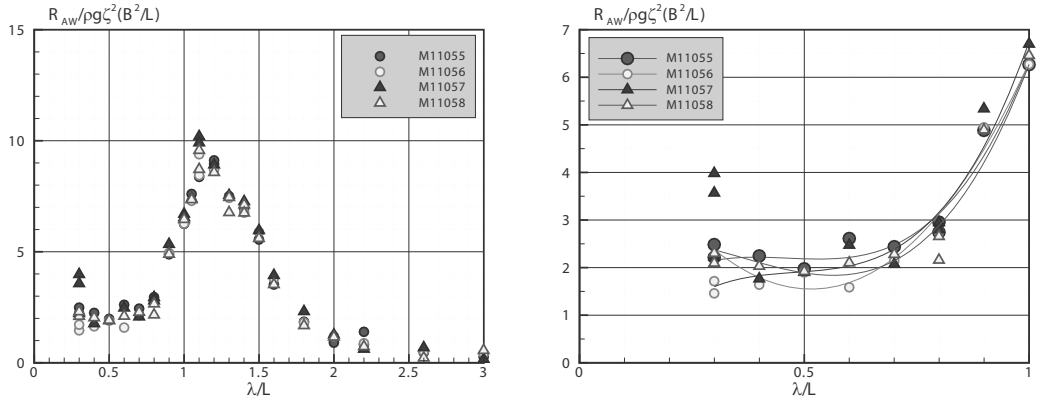


Fig.9: Added wave resistance for different bow shapes at $F_n = 0.2383$, $\chi = 180$ degs.

船体運動

Fig.10 に各船型の波浪に対する船体運動とその位相のグラフを示している．左から surge，heave，pitch となっており，全グラフとも横軸には入射波の波長の無次元量である λ/L，縦軸には運動振幅を入射波振幅で無次元化したもの，波浪に対する船体運動の位相を示している．

heave，pitch 運動においては λ/L が 1.5 付近に運動の同調点が存在するのに対して surge の運動には同調点は存在しない。これらの運動の結果には，各船型において実験値のバラツキ以上のものは見られない。先の船首形状の違いによる抵抗増加低減は、運動の違いに因り低減したものではなく、船首領域からの入射波の反射等の低減効果に依存したものであることが推察される。

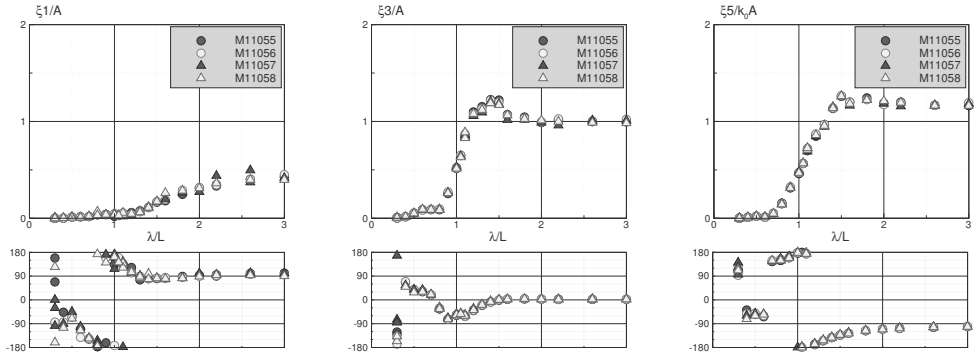


Fig.10: Ship motions for different bow shapes at $F_n = 0.2383$, $\chi = 180$ degs.

波形解析

力の計測により示された船首形状の相違による抵抗増加低減の事実を波形の観点から検証することができる。抵抗増加は船体が非定常波を造波することにより発生するものであるから、抵抗増加が低い船型であれば造波した非定常波の振幅も小さくなるなずである。

参考までに、Fig.11 にオリジナル船型に対して計測・解析して得られた非定常波形を示している。この波を波形解析理論を用いて解析することにより、素成波の振幅や位相を表わす Kochin 関数、およびそれに重みを掛けて積分することにより抵抗増加が算出できる。Fig.12 に Kochin 関数の例を示している。

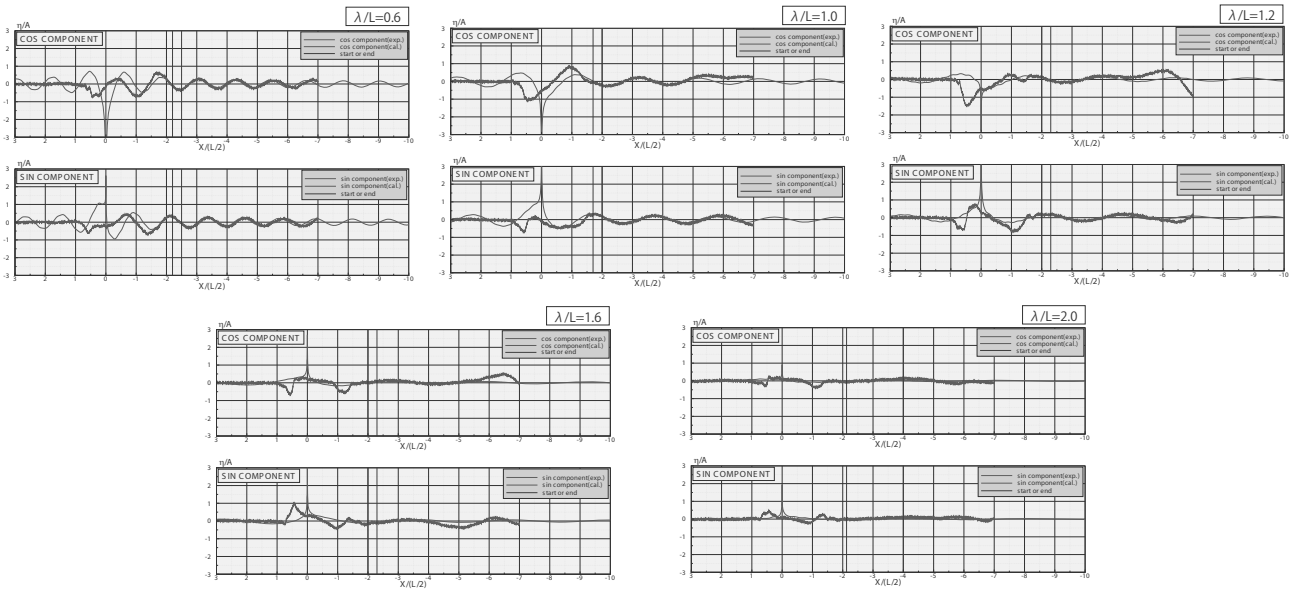


Fig.11: Unsteady waves for M11055 at $F_n = 0.2383$, $\chi = 180$ degs., y=306mm from C.L.

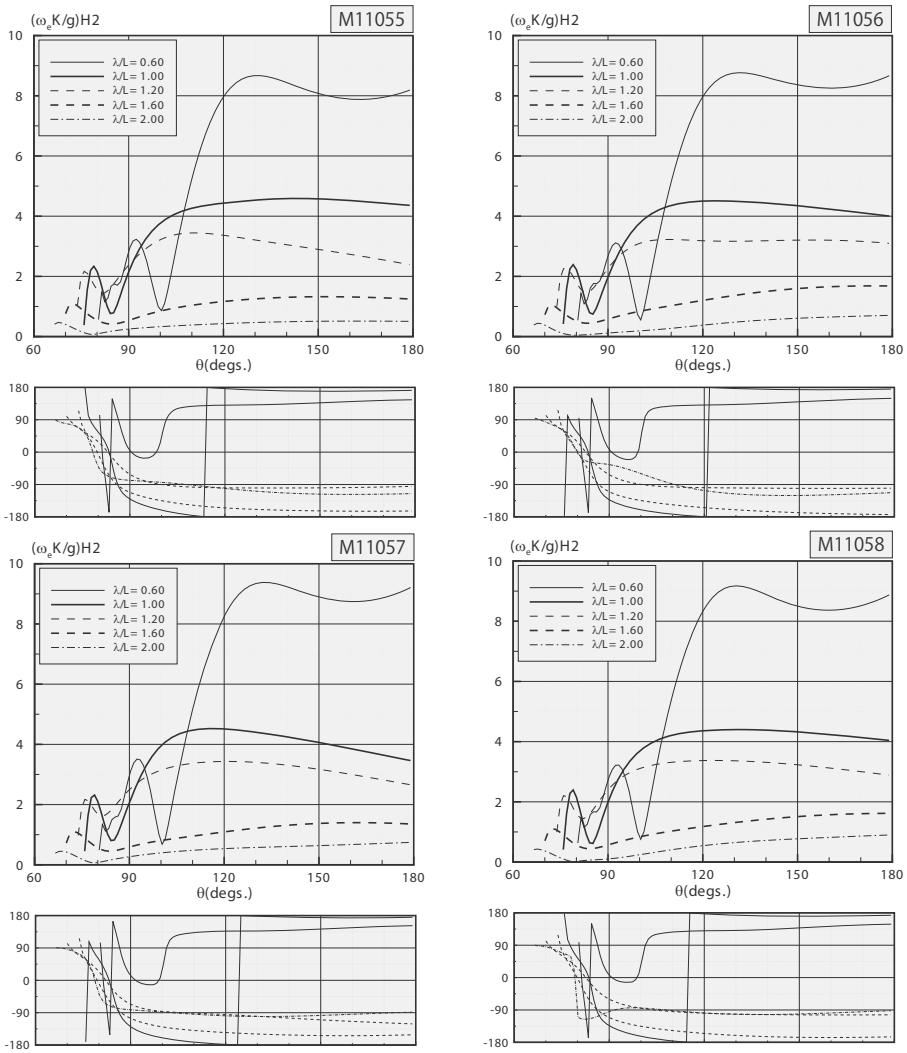


Fig.12: Kochin functions for different bow shapes at $F_n = 0.2383$, $\chi = 180$ degs., y=306mm from C.L.

Fig13 に実験による検力計の結果および Kochin 関数から算出された抵抗増加を示す．力の計測により得られた抵抗増加と波形から算出した抵抗増加とは，$\lambda/L < 1.0$ の短波長領域と $\lambda/L > 2.0$ の長波長領域では良好な一致を示している。抵抗増加が最大値を取る近傍で、波形解析による抵抗増加の方が低めになっているのは、船首からの砕波抵抗等に起因する非線形な影響であると思われる。

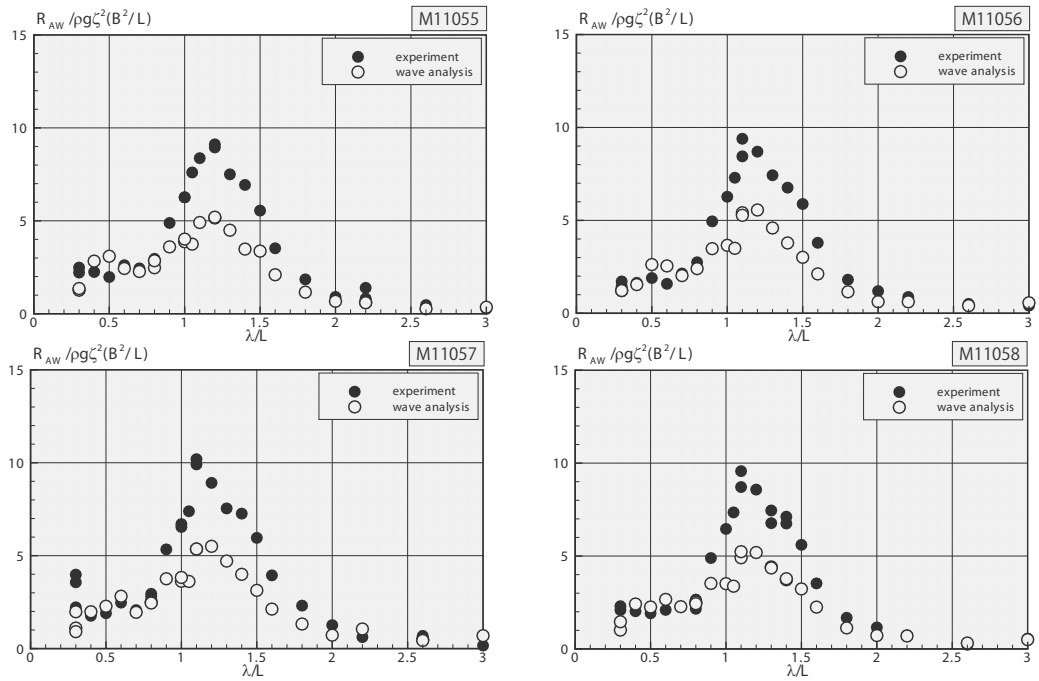


Fig.13: Comparisons of added wave resistance at $F_n = 0.2383$, $\chi = 180$ degs., y=306mm from C.L.

5. まとめ

定常抵抗，波浪中船体運動，抵抗増加を船首形状を変更した 4 種類の供試模型で計測比較し，船首部に強いフレアーを付けることによる影響をまた同時に波浪中を動揺しながら前進する船体が造波する非定常波形を計測することで波形解析の観点からも確認を行った．本研究より得られた結論を示すと次のようになる．

(1) 船首部に強いフレアーを付けることによって，静水中における抵抗は増加するが，その増加量は微量である．また，$\lambda/L < 0.8$ の短波長域において抵抗増加が低減されることが確認された．本実験で特に優秀な性能を示した船首形状は抵抗増加の観点からは M11056 と M11058 である．一方，静水中の抵抗の観点からは M1058 が優れており，結論としては M11058 船型が最も優れた船型として推奨される．

(2) 昨年までの結果と併せてみても，船首部にフレアーを付けることにより抵抗増加が低減されることが確認できるが，効果が表れる波長域は船型によって異なる．

(3) 非定常波形の計測を行い，波形解析理論を適用することにより船首形状の相違による抵抗増加の低減効果の確認を行った．その結果，非定常波形解析により算出された抵抗増加は力の計測によって得られた結果と同様の傾向を示した．

風レンズ技術を用いた潮流発電用水車の性能評価

九州大学大学院総合理工学研究院　経塚雄策

Key Words: *tidal current power generation, turbine, diffuser, Wind-lens technology, Blade Element Momentum Method*

1. INTRODUCTION

Tidal power is receiving a great deal of attention at present due to environmental and energy problems. Tidal flows are highly predictable and dependable compared with other renewable energies.

Wind-lens technology[1)] was applied to our tidal current turbine since one year before based on the same work principle of the wind turbine and the tidal turbine. Experimental results[2)] validated that torque and power coefficients can be improved about twice by attaching the brimmed diffuser to the turbine. In order to research effects of diffusers of different brims, the 3-stage diffuser was made of which the brim can be changed for 3 kinds of length.

Experiments were carried out in the circulation water channel (CWC) for the turbine with 3-stage diffuser. The drag force acting on the diffuser was also measured to investigate the cost of attaching the diffuser of different brims. Torque and power coefficients and the drag force were calculated by the CFD method (SCRYU/Tetra for windows V.8, Software Cradle Co., Ltd.), which were then compared to experimental results.

2. EXPERIMENTS IN CWC

2.1 Description of experiments

The shapes of the rotor and the diffuser and the experimental condition are same as those described in 2). The only difference is the length of the brim of the diffuser which changes 15mm each for three. The 3-stage diffuser is shown in Fig.1. The ring strip of 15mm-width is connected by rivets. So diameters of the outlet are 380mm, 410mm and 440mm respectively. The incoming flow is steady and uniform, of which the velocity is 1.0m/s.

2.2 Analysis of experimental results

Experiments were carried out for the turbine with diffuser of small brim, of middle brim and of large brim respectively. Experimental results are shown in Fig.2. The horizontal axis is the tip speed ratio λ. Cq is the torque coefficient and Cp is the power coefficient.

In Fig.2, it is quite apparent that the longer the brim is, the bigger Cq and Cp are, which means the performance of the turbine is better. But the brim cannot be too long, because the drag force acting on the diffuser is increasing as the length of the brim increases. Table.1 shows the drag force exerted on the diffuser. Rates of increase are 62.7% and 41.8% respectively.

Fig.1 3-stage diffuser.

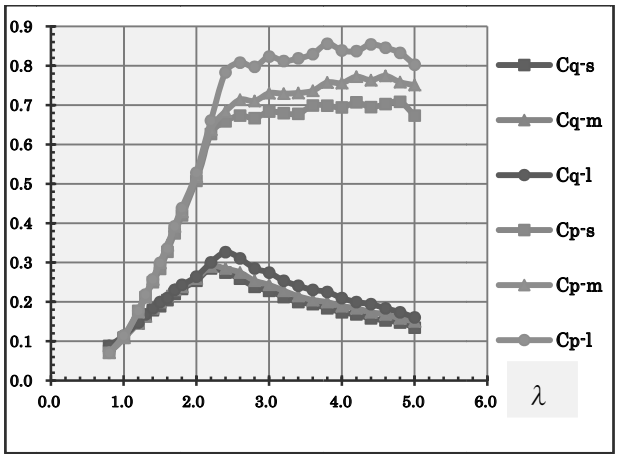


Fig.2 Experimental results of Cq and Cp

Table.1 Experimental results of drag forces

Diffuser type	Brim-S	Brim-M	Brim-L
Drag force(N)	26.19	42.61	60.43

3. NUMERICAL CALCULATIONS

3.1 Calculations with the CFD method

The CFD method was used to calculate the torque of the turbine. The whole calculation area is divided into two discontinuous parts, of which one is free flow area and the other is rotate area. Fig.3 shows the rotate area. The rotor and the diffuser belong to the rotate area.

We failed in getting the reasonable results from the CFD method because the space between the diffuser and the rotor is so narrow that the boundary layer cannot be inserted suitably and the mesh size cannot be refined correctly to match the precision of calculation. The distance from the tip of the rotor

to the inner surface of the diffuser is only 4.3mm. Fig.4 shows one kind of meshes around the diffuser and the rotor.

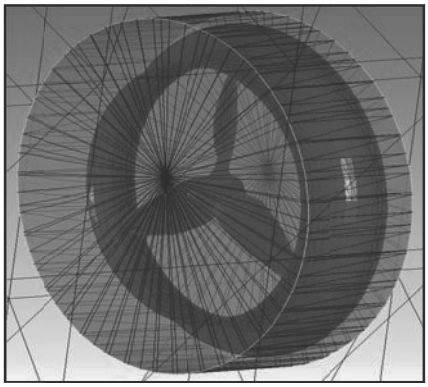


Fig.3 Rotate area

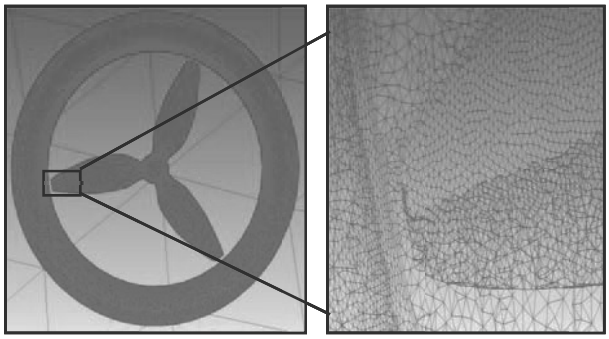


Fig.4 Meshes around the diffuser and the rotor

3.2 Flow velocity distribution inside the diffuser

Cq and Cp of the bare turbine were predicted quite well by use of the BEM method.[2] So if the flow velocity distribution inside the diffuser is derived on the condition that there is no rotor inside the diffuser, the BEM method can also be used to predict the hydrodynamic characteristics of the turbine with diffuser.

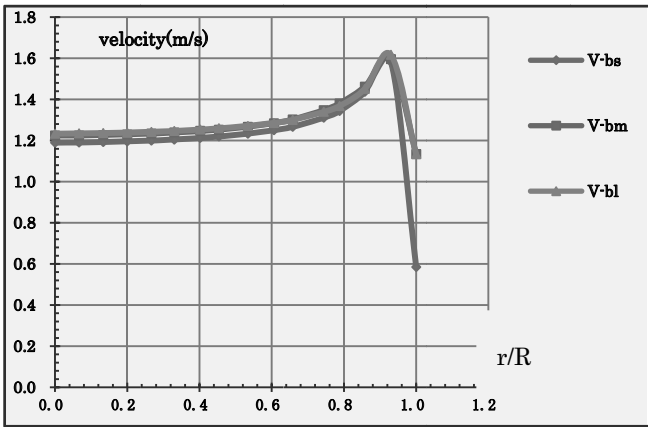


Fig.5 Flow velocity distribution inside the diffuser

Fig.5 shows the calculation results by the CFD method. The horizontal axis is the ratio of radius r/R. The trends of the velocity change in the radial direction are more or less same but in the tip the velocities are very different. In fact, results are quite different for different mesh size. As for choosing the results shown in Fig.5, calculation results of drag force by CFD is as references shown in Table.2, which fit experimental results well and the relative error is small.

Table.2 Calculation results of drag force

Diffuser type	Brim-S	Brim-M	Brim-L
Drag force (N)	24.83	43.77	60.90
Relative error	5.2%	2.7%	0.8%

3.3 Calculations with the BEM method

Flow velocity distribution is applied to the calculation with the BEM method based on the Fortran program. The calculation results are shown in Fig.6, which are bigger than the experimental results shown in Fig.2. The BEM results also shows the conclusion that is the longer the brim is, the bigger Cq and Cp are. When the brim reaches a degree of length, increases of Cq and Cp are not obvious.

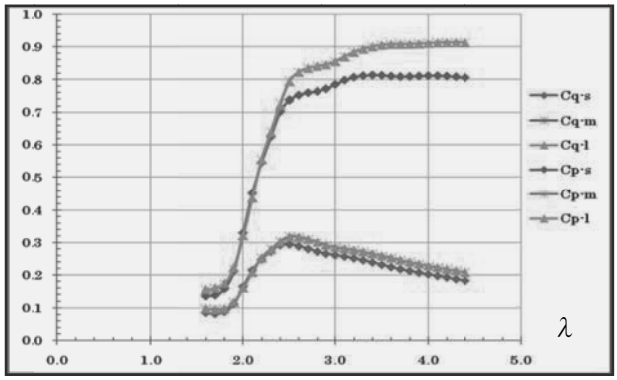


Fig.6 Calculation results of Cq and Cp

4. CONCLUSIONS

Experiments were carried out for the turbine with diffuser of 3-stage brim in the CWC to measure the torque for different tip speed ratios. We tried to predict Cq and Cp of the turbine using the CFD method but failed because the space between the diffuser and the rotor is so narrow that appropriate mesh cannot be formed correctly. According to flow velocity distribution derived by CFD, Cq and Cp are calculated by the BEM method. Both experimental results and calculation results show that the longer the brim is, the bigger Cq and Cp are. The BEM results are bigger than experimental results, but the trend of change is same. As for our experiences, experimental results are relatively small than our expectation. In order to get reliable results, experiments will be carried out in the towing tank in the near future. Then we could validate the calculation results based on experimental results.

REFERENCES

1) Y. Ohya and T. Karasudani: A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens Technology, Energies, Vol3, 2010, pp.634-649.
2) H. Sun, M. Ueno, T. Isogame and Y. Kyozuka: Development of a new horizontal axis turbine for the tidal current power generation by wind-lens technology, Conference Proceedings of Jasnaoe, Vol11, 2010, pp. 33-36.

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	孫　慧慧、白石侑大
所内世話人	胡　長洪

23 ME－7

高効率大量輸送のための特殊航空機に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授　岩下　英嗣

1. 研究目的

現在、世界の物流の 99%は低速大量輸送機器の船舶であり，高速少量輸送機器の航空機は旅客や高付加価値物の輸送に限られて利用されている．昨今，航空機を用いた高速かつ大量輸送を高効率で実現するための次世代の特殊航空機の研究開発が各国で進められている．それは地面効果を利用した地面効果翼機と称される特殊航空機であり，韓国では実用機を開発建造して将来，国際線として黄海上を飛ぶ計画であり，国際法の整備も含めた開発計画が進行中である．地球温暖化問題を抱えた将来において有望な輸送機器であると期待されている．本研究では，これまで当方で進めてきた前翼式の新形式地面効果翼機に関して，大型RC 模型の自航を模擬した風洞試験を行い，その空力性能や飛行安定性について検討することを目的としている．今回は，主翼に着目し翼端板の効果がどの程度空力に影響を及ぼすのかを確認する．供試模型を自作の模型から NC で切削した模型とすることで，より精度の高いデータを取得する．また，可視化実験を行うことにより翼の後流面の様子を観察する．

2. 研究方法

以下に示す手順により，研究を遂行する．

(1) 地面効果翼機の実験で問題となる境界層の影響を低減するため，供試模型の下に新たに板を設け，境界層を再発達させる．数値計算と実測により，境界層厚さを確認する．

(2) 機体に搭載するダクテッドファンの性能を把握する．

(3) 風洞内に主翼模型を設置し，迎角・飛行高度を変化させ，翼端板無しの場合の空力特性を調べる．風速はすべて 20m/s で行う．

(4) 主翼に翼端板を取り付け，迎角・飛行高度を変化させ空力特性を調べる．続いて，2cm，4cm，6cm の長さに伸ばした翼端板を取り付け，同様にして空力特性を調べる．

(5) 昨年度主翼に関して空力特性を調べ，今回の主翼と比較する．

(6) 主翼後流面の可視化実験を行う．

(7) 一連の研究を総括する．

3. 研究組織

本研究は次のような組織で行った．

氏　名	所　属	職　名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究院エネルギー環境部門	教授	代表者
谷口 弘樹	広島大学大学院工学研究院輸送環境システム専攻	修士課程 2 年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学大学院工学研究院輸送環境システム専攻	修士課程 2 年	実験補助
伊藤 悠真	広島大学工学部第四類輸送環境システム専攻	学部 4 年	実験補助
小川 恭平	広島大学工学部第四類輸送環境システム専攻	学部 4 年	実験補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 境界層対策

WIG の風洞試験は地面近傍の飛行を模擬して行うため，境界層影響ができる限り入らないように低減方策を検討することが非常に重要である．そこで模型の下に Fig. 1 の様な新たに板を設け底上げすることで，風洞吹き出し口から発達する境界層を板の前縁から新たに再発達させて，模型付近での境界層影響の低減を図る工夫を行っている．

床の高さ，長さ，また先端の形状等についてはあらかじめ 2 次元 CFD 計算を行い決定している．そこで，以降の実験に先立ち，この境界層厚み低減対策が妥当であるか否かを確認する計測を行った．この床上における風速分布を，床板の後縁 (point-1)，床板の中心 (point-2)，模型設置位置 (point-3)，床板の前縁 (point-4) の 4 点で計測し，CFD 計算と比較した．その結果，各場所において計測結果と CFD の結果は良く一致することが確認できた．図中の白丸が今年の実験結果であり，昨年度よりも境界層厚さが小さくなっている．模型主翼後縁付近の point-2 での境界層暑さは約 20mm となっており，模型寸法に比べて十分に小さく，実験時における境界層の影響は小さいものと推察される．

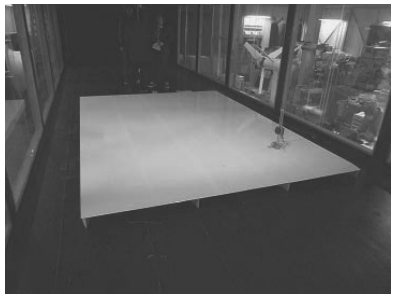


Fig.1: Boundary layer pannel

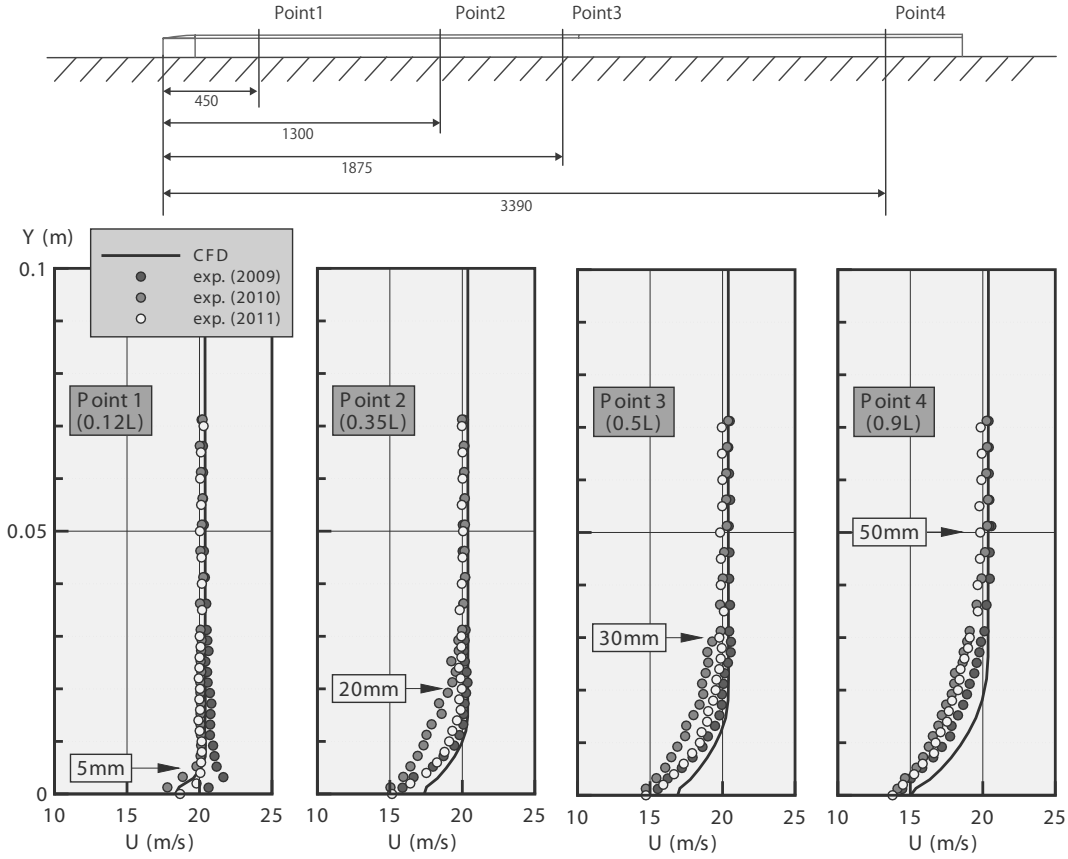


Fig.2: Velocity distribution in vertical direction at several points (U=20m/s, L=3.75m))

4.2 供試模型

昨年度主翼は下半角が −14° となっており，飛行不安定になる可能性があった．そのため，下半角を −8° にし，さらに翼端板断面が翼型になるように設計変更した．主翼単独の供試模型を Fig. 3 に示す．検力計下のスウォードに埋め込む形で模型をセットする形となっており，後方部にセットされたねじ部

で迎角を調整する．翼端板は脱着可能となっており，翼端板無し状態・翼端板がある状態に形状変更できる．また，翼端板に 2cm，4cm，6cm のスペーサーを入れることで，翼端板長さも変えることができるようになっている．NC 切削で製作されているので，模型の製作精度による誤差は無いと考えられる．

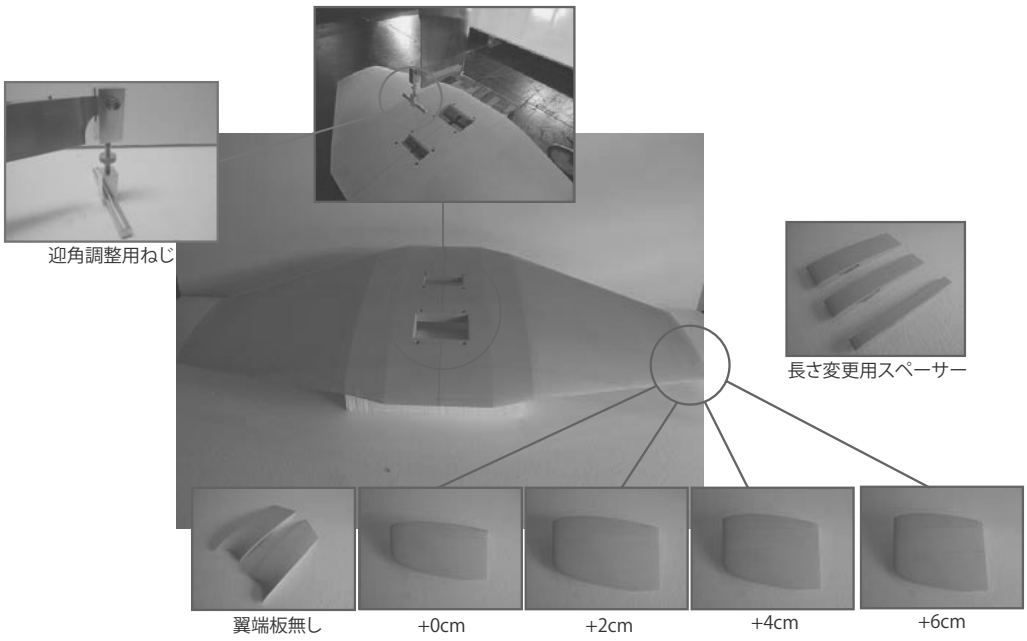


Fig.3: NC wing model

4.3 実験内容

主翼単独試験の実験内容を示す．新しい主翼形状での迎角・飛行高度変化，翼端板変化による空力特性を調べるため，以下の実験を行った．本実験の実験装置の概略図を Fig. 4 に示す．検力計は 3 分力計を用い，x 方向 ($F1$)， z 方向 ($F3$)，y 軸周りのモーメント ($F5$) を計測し，x 方向は主翼進行方向を正，z 方向は鉛直上向きを正，y 軸周りのモーメントは右回りを正とした．飛行高度 H/C は翼後縁の高さ H をコード長 C で除したものとし，0.025 刻みで 0.300 ～ 0.500 まで，0.600 と 0.700 の 11 通りの高度変化で行い，迎角に関しては，1° 刻みで 0.0° ～ 5.0° と −2.5°，3.5°，の 8 通りのデータを取得している．また，翼端板下面から地面までの高さ He を基準にして，2cm～ 10cm の 5 通りを計測している．風速はすべて 20m/s で行っている．

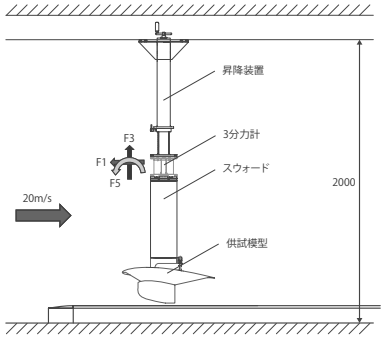


Fig.4: Exprimental setup of main wing model

(1) 翼端板無し

　(a) H/C 変化，迎角変化

(2) 翼端板有り（長さ変化なし）

　(b) H/C 変化，迎角変化，He 変化

(3) 翼端板有り（**2cm**，**4cm**，**6cm** 延長）

　(b) H/C 変化，迎角変化，He 変化

(4) 主翼可視化実験

4.4 実験結果

4.4.1 翼端板有無による迎角変化

巡航飛行高度 H/C=0.375 における迎角変化を翼端板有りと無しの状態で比較する．Fig. 5 に実験結果を示す．横軸に迎角変化，縦軸に揚力係数 C_L・抗力係数 C_D・圧力中心係数 C_P・揚抗比 C_L/C_D を取る．翼端板無しの場合，翼端板有りの場合，ポテンシャル理論による数値計算結果と比較している．まず，圧力中心係数 C_P であるが，模型全体に作用する空力モーメントがゼロとなる位置で，この時主翼前縁から後縁までの長さを 1 としたときの前縁からの距離を示している．グラフから，迎角が小さくなるにつれ圧力中心は後方に移動していくことがわかる．また，翼端板無しでの圧力中心は約 10mm 翼端板有りに比べ後方に位置している．これは，翼端板をつけることで圧力分布が変化しているためだと考えられる．次に，揚力係数・抗力係数であるが，揚力・抗力を動圧と代表面積で割った無次元値である．揚抗比は揚力係数と抗力係数の比をとったものであるが，機体の性能を示す指針であり，大きければ大きいほど，主翼性能が良いということになる．グラフより，翼端板有無で抗力係数に関してはほぼ同じであるが，揚力係数に差があることがわかる．また，主翼迎角が大きくなるほど揚力係数の差が大きくなっており，5° のときで約 9%もの揚力増加が翼端板を付加することにより得られる．また揚抗比が最も高い迎角 3° のときで，約 20%もの揚抗比増加が確認できる．計算結果とも概ね一致しているが，迎角が大きくなるほど揚力係数に差が出てくる傾向が見られた．現在，計算時にはいかなる迎角でも主流に沿って平行に後流面をつけて解析しているが，迎角が大きくなると後流面は大きく変化すると考えられる．したがって，後流面のモデリングが実験値と計算結果の差として表れているのではないかと考えられる．

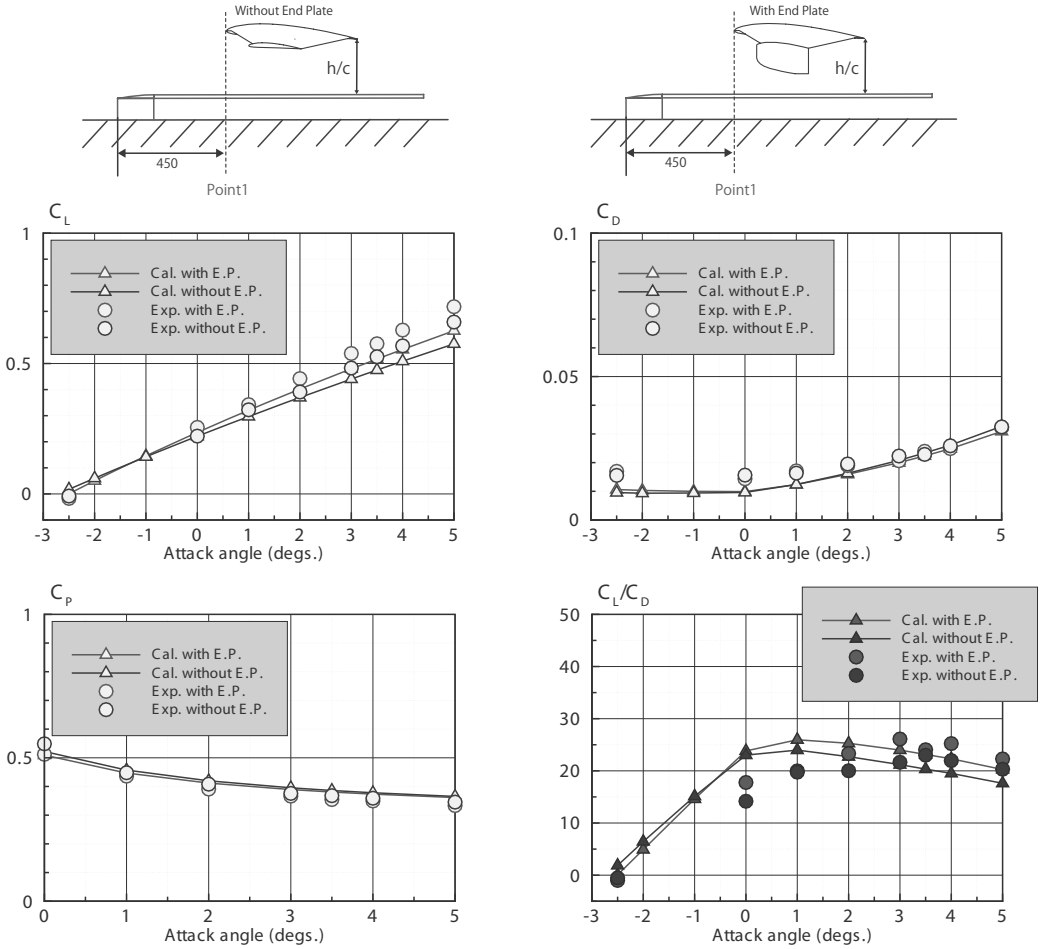


Fig.5: Aerodynamics properties of the main wing model with and without End Plate (H/C=0.375, Re=$7.7 \cdot 10^5$, End Plate height=140mm (+0mm))

4.4.2 翼端板有無による飛行高度変化

Fig. 5 より，最大揚抗比をとる迎角は 3.0° であった．次に，迎角 3.0° での横軸に飛行高度・縦軸に各空力係数をとったグラフを作成する．Fig. 6 にグラフを示す．圧力中心位置は飛行高度により変化しており，H/C=0.300 ～ 0.700 でコード長 700mm に対し，約 30mm 後方に移動している．揚抗比に関して見ると，H/C=0.300 ～ 0.500 にかけて地面効果の影響がはっきり表れている．翼端板有りでは H/C=0.500 から 0.300 の低高度飛行に移ると，約 50%もの揚抗比増加がみられるが，翼端板無しでは半分の 25%しか揚抗比増加が見られない．翼端板が付いてる方が揚抗比の増加率が大きく，地面効果の影響を顕著に受けるといえる．

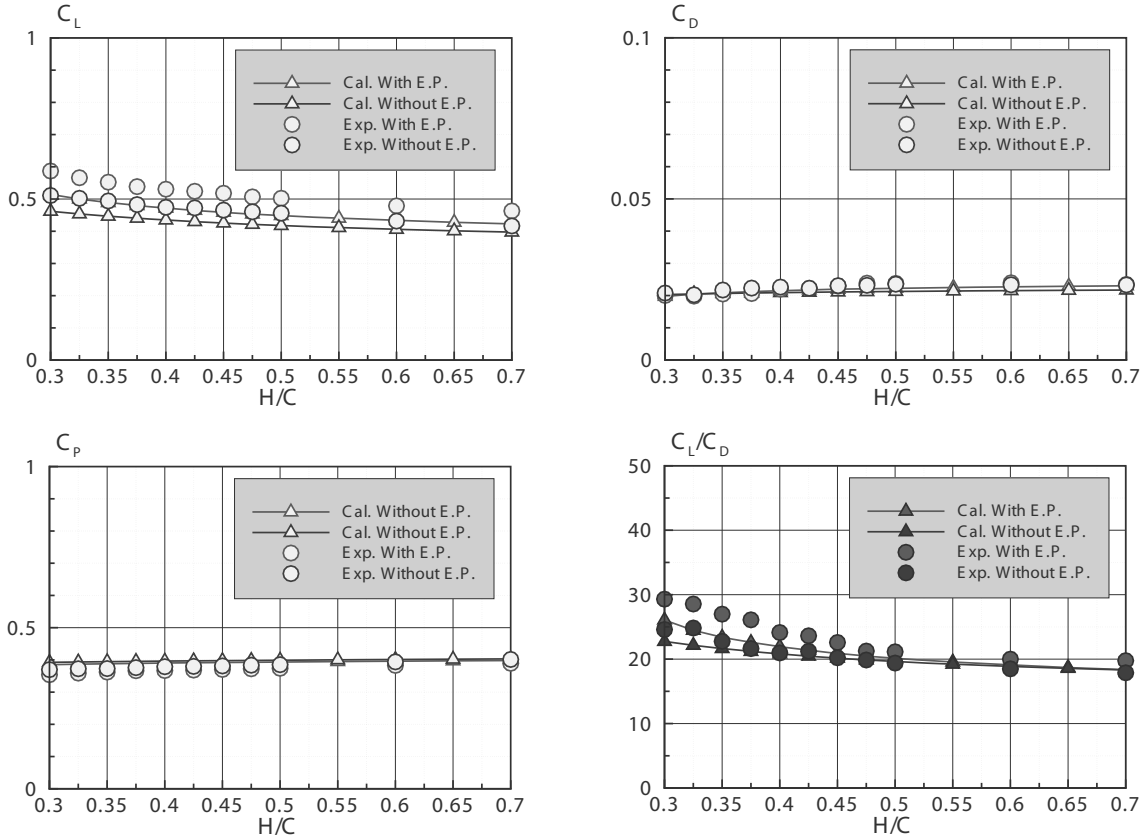


Fig.6: Aerodynamics properties of the main wing model with and without End Plate (H/C=0.375, Re=$7.7 \cdot 10^5$, End Plate height=140mm (+0mm))

4.4.3 翼端板の長さ変更による空力変化

(a) H/C 変化

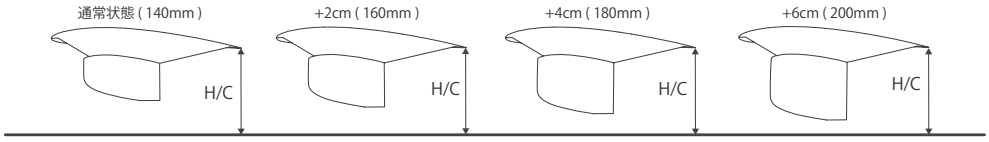


Fig.7: Exparimentl setup of the End Plate based on H/C

翼端板の長さを変更した状態で H/C 基準で計測する．Fig. 8 に実験結果を示す．H/C 基準で飛行高度を設定したため，各翼端板長さで計測することのできない飛行高度があり，2cm 増のときは H/C=0.35 から，4cm 増のときは H/C=0.375 から，6cm 増のときは H/C=0.400 から計測している．まず，翼端板の長さ変更により圧力中心は移動しないことがわかる．また，いずれの長さも H/C=0.300 ～ 0700 の高度変化により約 30mm 後方に移動する．揚力係数に関しては翼端板を長くすると約 2%ずつ増加し，抗力係数に関しては約 2%ずつ値が小さくなっている．したがって，揚抗比に関しては，翼端板長さが長く

なるほど大きくなっており，H/C=0.400 では通常状態から 6cm の翼端板の長さ増加で約 20%の揚抗比増加がみられる．高高度飛行時の H/C=0.700 のときにはほぼ同程度の揚抗比であったものが，低高度時には揚抗比に大きな差が生まれることから，翼端板が長いほうが地面効果を受けやすく，揚抗比の増加が大きいと言うことができる．次に翼端板の下面から地面までの高さを基準とした飛行高度変化で実験を行う．

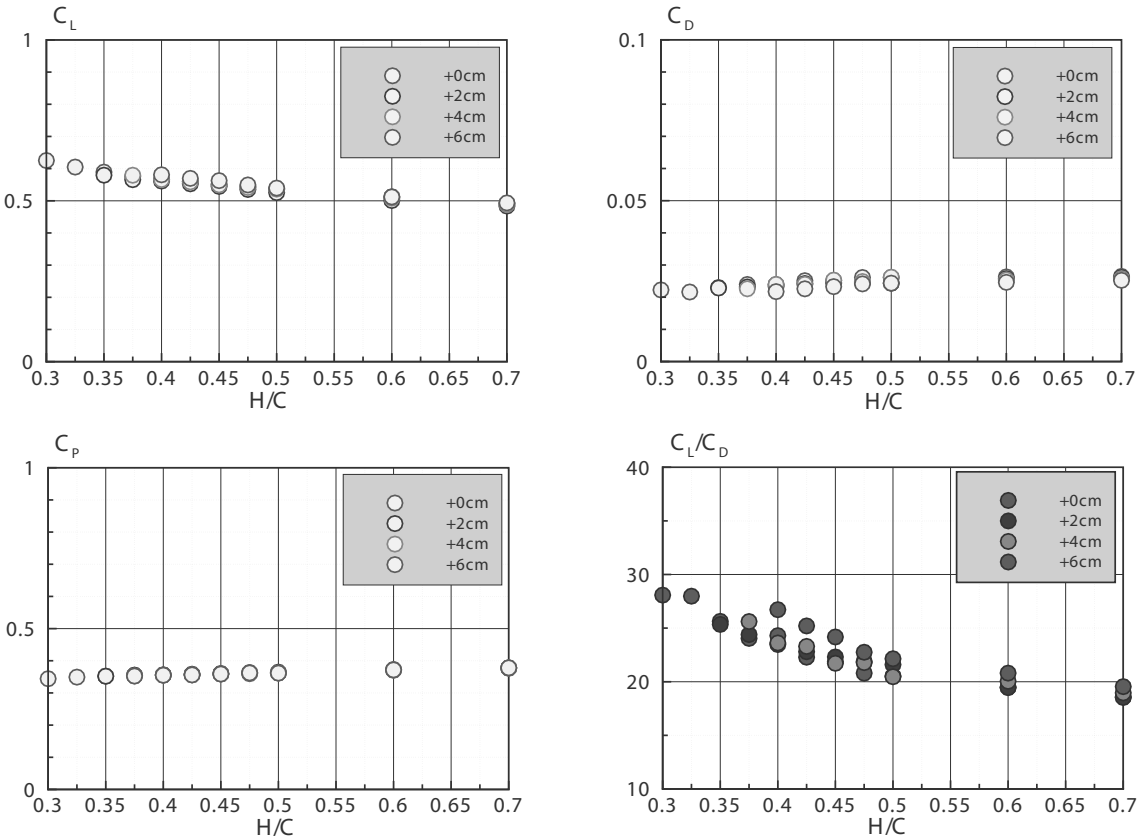


Fig.8: Aerodynamics properties of the main wing model with end plate (attack angle：3.5degs. End plate height：140mm，160mm，180mm，200mm，Re=$7.7 \cdot 10^5$)

(b) He 変化

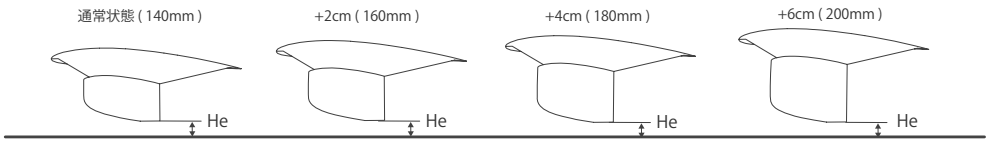


Fig.9: Exparimentl setup of the End Plate based on He

翼端板下面から地面までの間隔を He として飛行高度変化させる．Fig. 10 に実験結果を示す．横軸は翼端板下面と地面の間隔であり，2cm，4cm，6cm，8cm，10cm で実験を行っている．飛行高度の基準を変更しただけなので，H/C 変化同様，圧力中心の移動量は変わっていない．しかし，揚力係数に関しては翼端板が短い方が約 2% ずつ高くなっており，揚抗比に関しては翼端板 6cm 増で，通常の翼端板から約 25%揚抗比が低下する．これは H/C 基準で計測した時と反対の現象が起こっており，この場合では翼端板が短い方が性能が良いということになる．

このことに関して Fig. 11 に主翼を H/C 基準で高度変化させたものと He 基準で高度変化させたときの主翼の簡易的な正面図を示す．H/C 一定で翼端板の長さを変化させたとき，翼端板が長くなるほど翼端板下面と地面との距離が狭くなる．この時，翼と地面の間の空間は一定で，長さ変化でより閉じられた空間を作るほど揚抗比は上がる．一方，He 一定で翼端板の長さを変化させたとき，翼端板を長くす

るほど翼下面と地面の間の空間は広くなっていく．この時，翼下面と地面との空間は狭いほど揚抗比が上がっていく．したがってより大きな地面効果を受けるためには，H/C と He を小さくすること，即ち，翼下面と地面との空間が狭いということに加え閉じられた空間にするのが良いということがこの実験から言える．これは，翼下面に働くせき止め圧（ラム圧）が大きくなることに起因している．

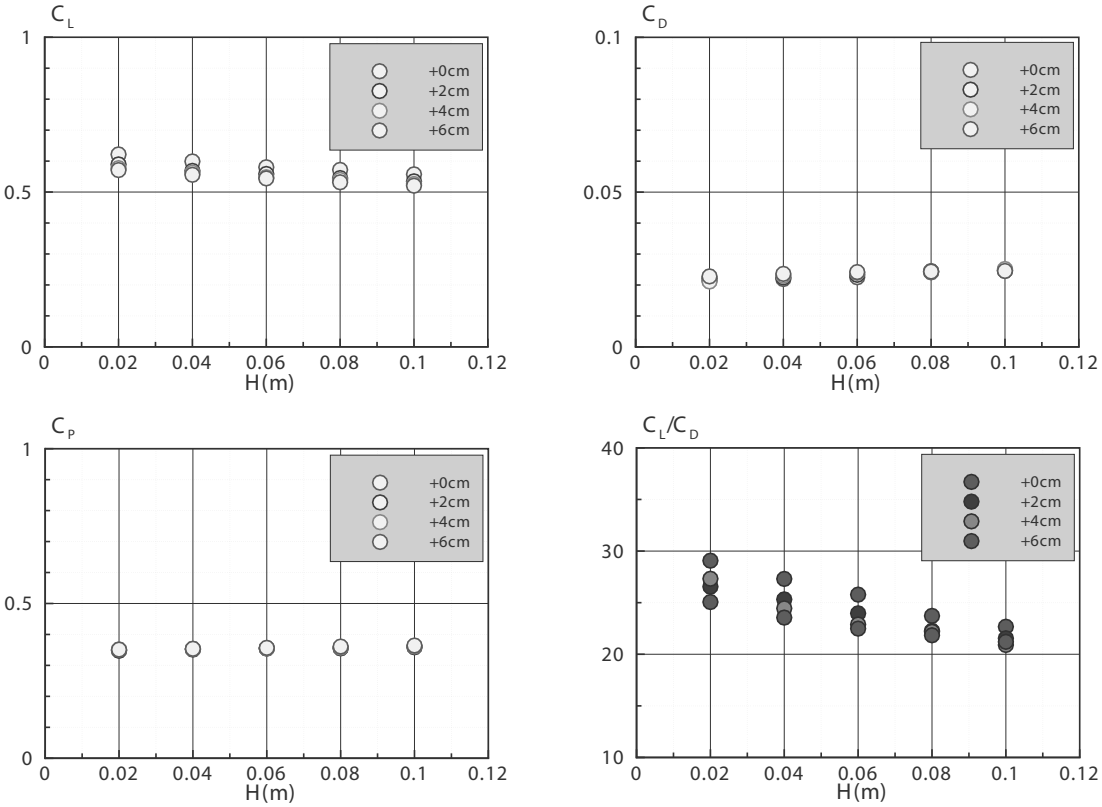


Fig.10: Aerodynamics properties of the main wing model with endplate (End plate height：140mm, 160mm, 180mm, 200mm, Re=$7.7 \cdot 10^5$)

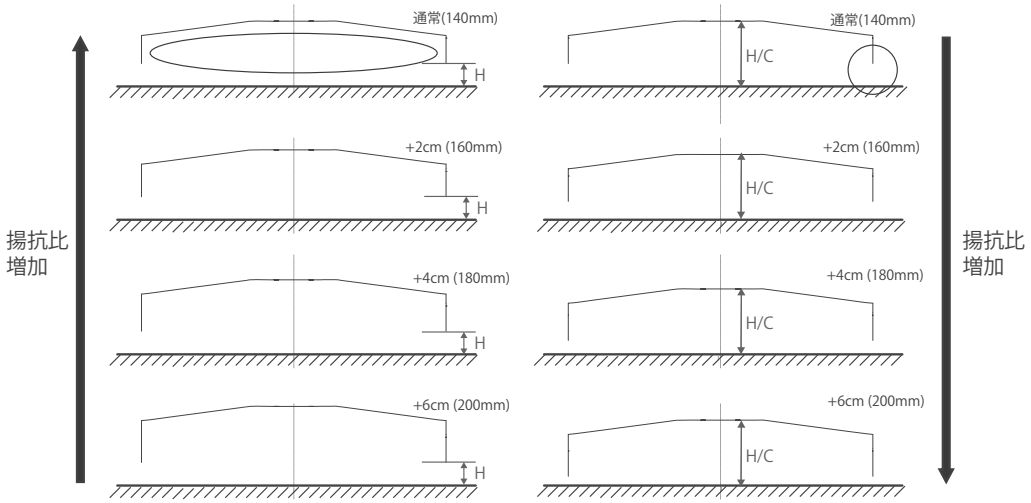


Fig.11: Front view of the main wing while changing length of End Plate

4.4.4 境界層影響の確認

境界層影響でどの程度性能に差が出てくるのかを確認するため，主翼前縁位置を Point1 と Point2 で行う．前節の風速分布実験より，Point1 では 5mm，Point2 では 20mm の境界層厚みがあることが分かっ

ている．これまでの実験は全て Point1 で行っており，境界層厚みが少ない位置で計測している．

Fig. 13 に実験結果を示す．青丸が Point1，赤丸が Point2，緑ラインがポテンシャル理論による数値計算の結果である．グラフから Point1 では Point2 よりも約 1cm 前に圧力中心が来ていることが分かる．また，Point1 では Point2 よりも約 4%揚力が大きく，抗力が小さくなっているため，揚抗比は巡航飛行高度 H/C=0.375 で約 25%ほど大きくなっている．したがって，境界層厚み 15mm は模型に比べて非常に小さい値であるがその影響で実験結果が大きく変わることになる．境界層をいかに少なくするかがより良い実験を行うために重要となることが分かる．今回の実験は境界層厚みも少なく，比較的精緻な実験結果を得ることができたと言えよう．

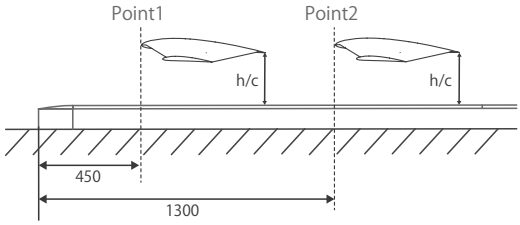


Fig.12: Effect of the longitudinal position of the wing model

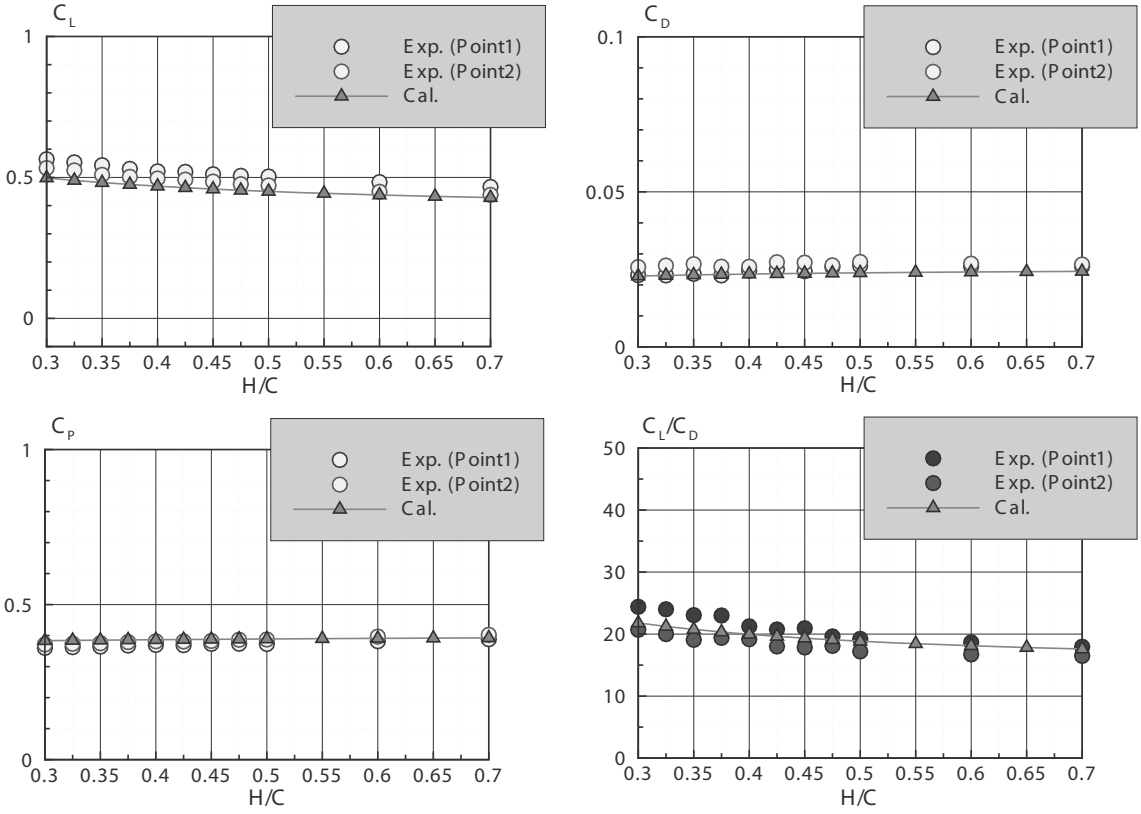


Fig.13: Aerodynamics properties of the main wing model without end plate (attack angle：3.5degs., Re=$7.7 \cdot 10^5$) Comparison of Point1 to Point2

4.4.5 主翼可視化実験

翼端板を取り付けた状態と外した状態で翼端部の流れに関する可視化実験を行う．風速は 1m/s で行っており，翼端板回りの流れが観察しやすいようにした．実験パターンとしては迎角 3.5° と 5.0° で翼端板有りの状態と無い状態の 4 パターンで計測している．

Fig. 14 に後方から見た流れを示す．右が翼端板有り，左が翼端板無しの場合である．両者翼端渦が鮮明に表れているのが分かる．しかし，後流の広がり方に違いがあり，翼端板なしの場合ではほぼまっすぐに流れてきているが，翼端板有りの場合，後流が外側に広がりながら流れていることが分かる．この違いに関して，流れを上方から見た図を Fig. 15 に示す．右が翼端板有り，左が翼端板無しの場合であ

る．やはり，翼端板がある場合，翼端板部付近では後方まっすぐに後流が流れてきているが，後ろに行くにつれて広がりながら流れていくのが分かる．この様な後流の違いが，主翼性能に大きく関係している．今後，自由後流モデルの解析により得られた後流面を計算時に適用することで，さらに計算精度が上がる可能性がある．

Fig.14: Comparison of the Tip vortex of the wing (L：without End Plate，R：with End Plate)

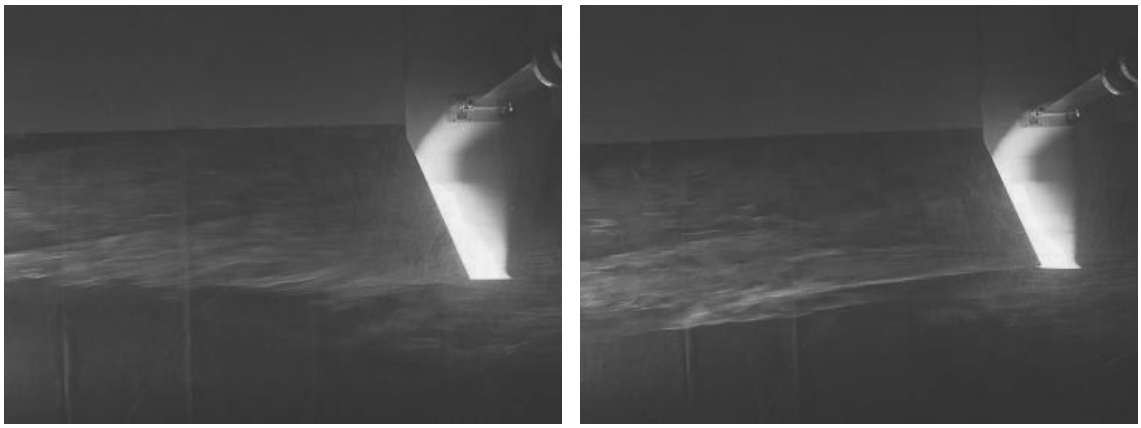


Fig.15: Comparison of the stream line behind the wing (L：without End Plate，R：with EndPlate)

4.5 追加実験

4.5.1 推進器単独性能試験

自航試験用 RC 模型に搭載するダクテッドファンの単独性能試験も行っている．使用するダクテッドファンは内径 90mm，外形 114mm，最高回転数が 40000rpm である．推進器単独性能試験の実験装置セットアップ図を Fig. 16 に示す．実験は風速制御方式で行う．推進器のファンの回転数を一定に保ち，風洞風速 V を V=1 ～ 25m/s の間で 2.5m/s ごとに変化させ，各風速における電圧，電流，x 方向にかかる力，F_x(=-T) を計測する．レイノルズ数影響も確認するため，ファンの回転数は 15000rpm，20000rpm，25000rpm の 3 通りで行った．ファンの回転数，電圧，電流については，E-meter という計測器を用いて計測している．この装置は，あらかじめ使用するモーターの特性をキャリブレーションしておき，モーターに流れる電圧，電流の関係から回転数を算定して表示する計器である．電圧と電流からシステムに投入したパワー (消費電力) が算出され，一方，推力と風速から推進

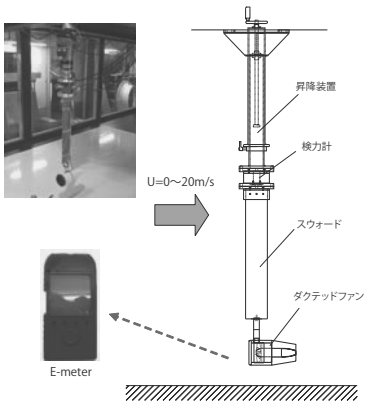


Fig.16: Experimental setup

器が推力として行った仕事率が算出できるから，両者の比を取ることで効率が算出できる．従って，ここで得られる効率は，通常のプロペラ単独性能試験で得られる，推力の仕事率とトルクの仕事率の比で定義される空力的な効率ではなく，実際に推進器に入力したパワーに対して推進器がどれだけ推力として仕事をしたかを示す効率となる．すなわち，この効率にはモーターや配線ケーブルにおける損失が考慮されていることになる．

計測データから以下に示す定義式を用いて前進率 J，スラスト係数 Kt，効率 η を求めた．

$$J = \frac{V}{nD}, \quad K_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad \eta = \frac{TV}{P}$$

ここで V は風速，n はファンの回転数，D はダクテッドファンの外径，T は得られた推力，ρ は空気の密度，P は消費電力を示す．Fig.17 左図に前進率 J とスラスト係数 Kt，効率 η の関係，および右図に得られたスラスト係数を基に求めた機体の任意機速に対するファンの回転数 n と推力 T の関係を示す．左図において各回転数により大きな値の差はなく，レイノルズ数影響は少ないと考えられる．以下の式の様に，推力は機体重量に揚抗比の逆数をかけたもので表される．

$$T = W \cdot \frac{C_D}{C_L}$$

この式にから，今回想定している全機模型の重量は 7.6kgf であり，想定巡航速度 70km/h での揚抗比を 12 とすると，巡航時に必要な推力は 0.63kgf となる．必要推力は 1 機当たり 0.3kgf，即ち，グラフから約 15000rpm で充分ということになる．しかしこの計算は巡航時の話であるから，離水時にはさらに大きな推力が必要となるであろう．

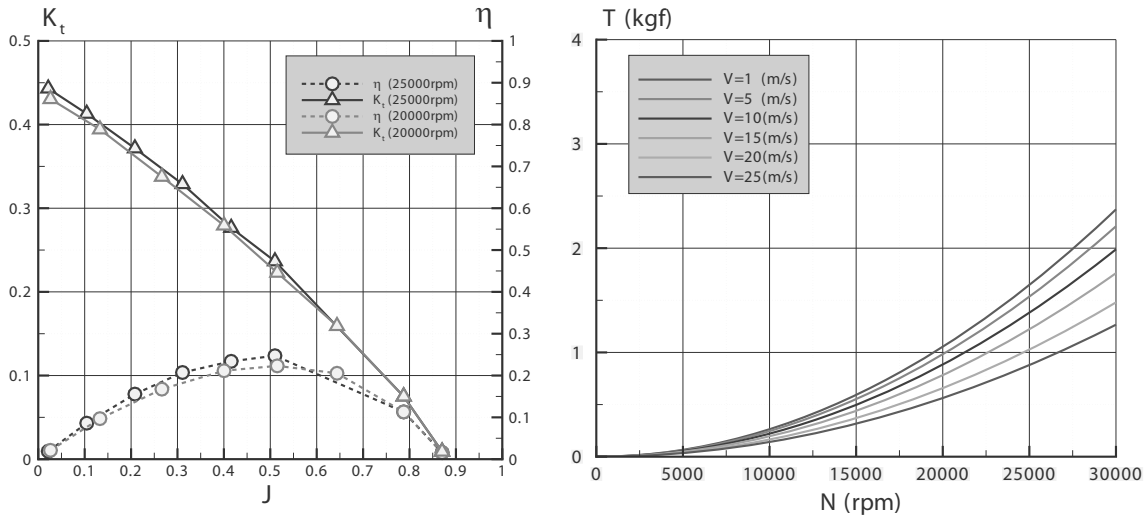


Fig.17: Propulsor properties of the Dacted fan (Outer Diameter：0.114m)

5 まとめ

本研究では新しく設計した主翼 NC 模型を用いて，主翼の地面効果内での空力特性を調べた．飛行高度・迎角変化による空力特性を把握するだけでなく，翼端板有り・無し，翼端板の長さを変更した実験も行った．本研究の成果を以下に示す．

(1) 翼端板無しの状態から翼端板を付加すると，最大揚抗比をとる迎角 3° において，約 20%もの揚抗比増加が得られる．また，H/C 変化においては翼端板有りの揚抗比増加量は翼端板無しの増加量の約 2 倍もあり，翼端板を付加するとより大きな地面効果を獲得できる．

(2) 翼端板の高さ変更において，翼下面と地面の空間を閉じられたより狭い空間にするほど大きな揚抗比が得られる．単に翼端板を長くすることが性能向上につながるというわけではない．

(3) 境界層厚みにより，主翼の性能は悪くなる方向にシフトする．境界層厚みをいかに減らすかが実験を行う上で重要になる．

(4) 可視化実験において，翼端板の有無で後流の流れが大きく異なることが観察できた．

(5) 想定している全機模型での巡航飛行時のダクテッドファンの回転数は 15000rpm である．最高回転数 40000rpm であることから，充分余力があるといえる．

23 ME－8

エネルギー効率向上のための船舶の風圧抵抗低減に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

近年，CO2 の削減は世界的な課題であり，輸送機器関連分野でも取り組みが展開されている．船舶分野の取り組みの一つに，船体の風抵抗の軽減がある．船は無風の場合でも航行速度 V の 2 乗に比例する抵抗を大気から受ける．空気の密度は海水の 1/800 程度ではあるが，強風の中での操船に対する風の影響や操舵のためのエネルギーも大きくなるので，風抵抗は無視できない．こうした背景を受け，本研究では船首形状，及び居住区・ホールドファンの有無による風抵抗の変化を，供試模型を用いた風洞試験による計測を通じて実験的に調べることを目的としている．

2. 研究方法

船体の供試模型を用いて風洞通風型実験棟において風洞試験を行い，船体に対する風抵抗を計測する．L=1.0m の供試模型をターンテーブルにセットし，10 度刻みで模型を回転させ，それぞれの角度で風抵抗を計測した．風速は 12.0m/s としている．船体の船首形状と居住区形状を変更，居住区・ホールドファン有無による風抵抗の調査，及びそれらの組み合わせについて実験を行った．

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った．

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科エネルギー・環境部門	教授	代表者
田辺 晃弥	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
池田 浩基	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士 1 年	実験補助
澤田 俊紀	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士 1 年	実験補助
伊藤 悠真	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4 年	実験補助
小川 恭平	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4 年	実験補助

4. 研究結果

4.1 供試模型

本実験で使用した供試模型は分割模型となっており，船首部形状, 及び居住区を容易に取り替えることができる．船首形状としては，通常, 斜め 45 度切り落とし，通常+カウリング (囲い) 追加，通常+フルカバー追加の 4 種類を準備した．Table 1 に船体番号と実験状態，船首形状を示す．Fig. 1 に本実験で使用した船首形状，及び居住区形状の異なる模型を，Fig. 2 に居住区の有無の状態を，Fig. 3 にそれらを組み合わせた状態の模型を示している．

Table 1　船体番号, 実験状態及び船首形状

-	デッキ上構造物				船首形状			
船体番号	居住区	デッキ段差	幅変更	ホールドファン	通常	斜め 45 度	カウリング	フルカバー
001	-	-	-	-	○	-	-	-
002	○	○	-	○	○	-	-	-
003	○	-	-	○	○	-	-	-
004	○	-	-	○	-	○	-	-
005	○	-	-	-	-	○	-	-
006	○	-	○	-	-	○	-	-
007	○	-	○	-	-	-	○	-
008	○	-	○	-	-	-	-	○
009	-	-	-	-	-	○	-	-
010	-	-	-	○	-	○	-	-
011	○	-	○	○	-	-	○	-
012	○	-	○	○	-	-	-	○
013	-	-	-	-	○	-	-	-

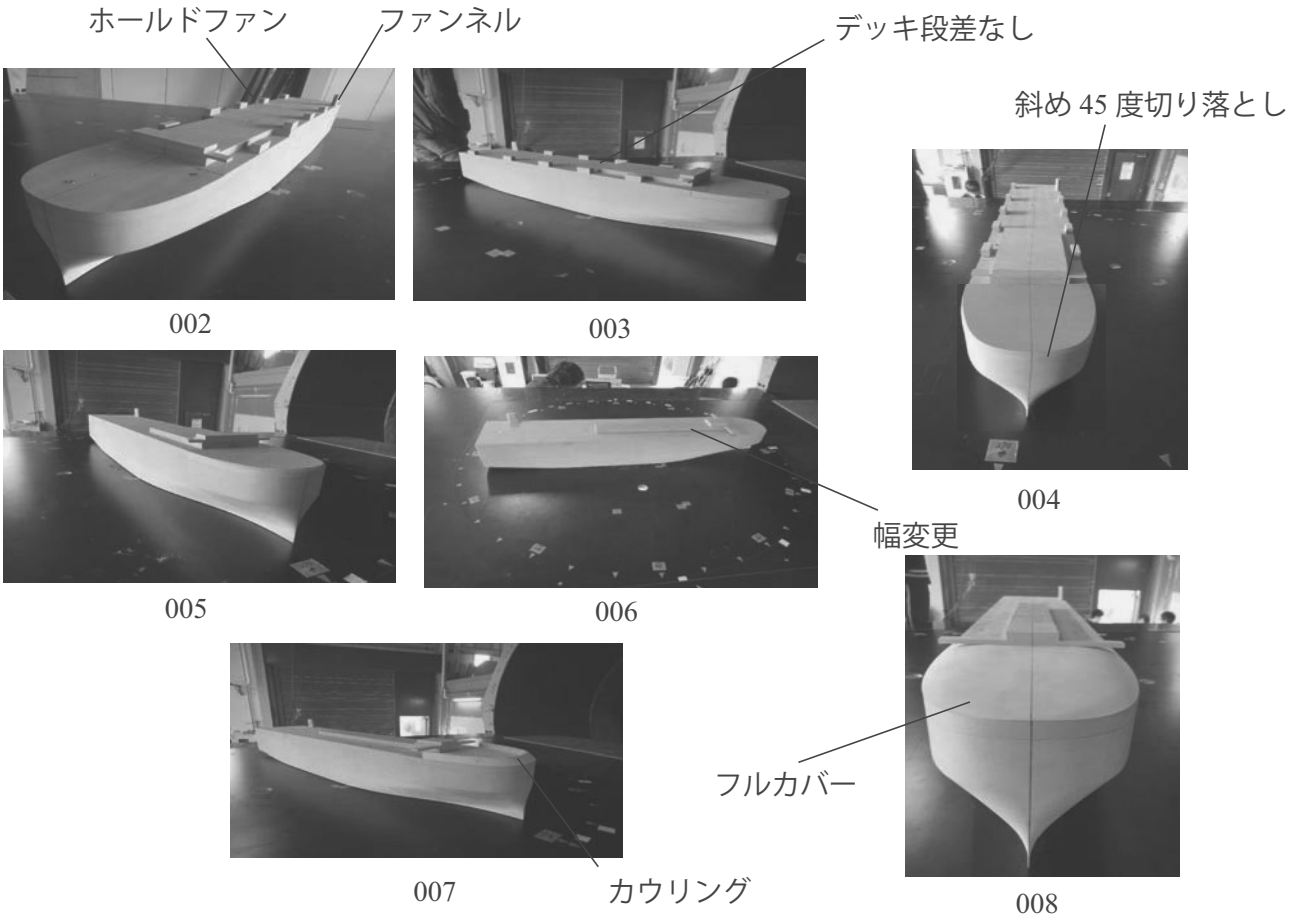
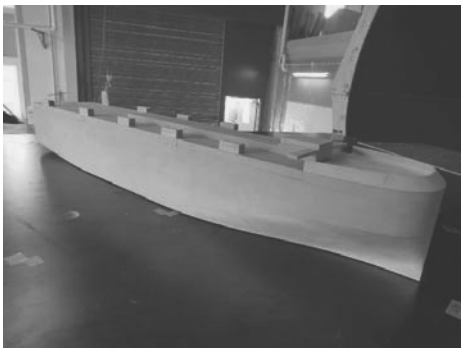


Fig. 1　船首形状，及び居住区形状の異なる供試模型

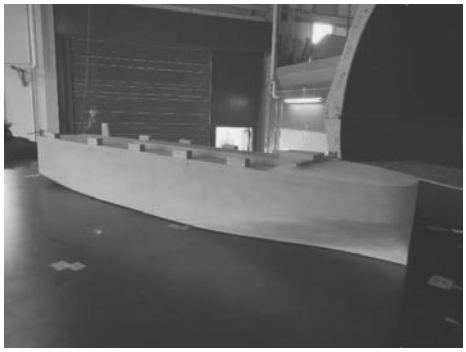
009

005

Fig. 2　居住区無し (左) と有り (右) の供試模型



011



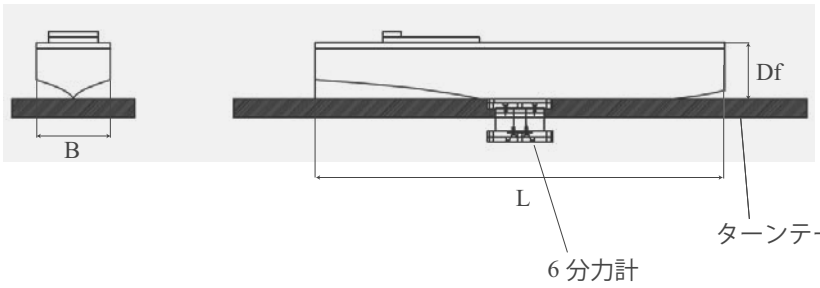
012

Fig. 3　船首形状と船上構造物の組み合わせの様子

4.2 試験内容

風洞試験

6 分力計を用いて，F_x，F_y，F_z 及び M_x，M_y，M_z を計測する．6 分力計は模型の船体中央部下直に設置している．今回の実験では F_x において，船尾方向を正の方向とする．模型船体の模式図と主要目を Fig. 4 に示す．模型をターンテーブルに設置しており，角度を 10 度刻みで反時計回りに 0 度から 360 度まで変えて実験を行う．船首が風洞の方向に向いている時を 0 度としている．また，風速は風洞設備の関係上 12.0m/s で行うことにした．Fig. 5 は通風型風洞と模型の設置状態を示している．風洞の直径は 1.7m であり，上部に設置してある風速計で風速を測っている．また，Fig. 6 に座標系を示す．ψ は風向角，V は風速を示している．



主要目 (1/200)

L	1.0000m
Df	0.1365m
B	0.1200m

Fig. 4　模型図および模型主要目

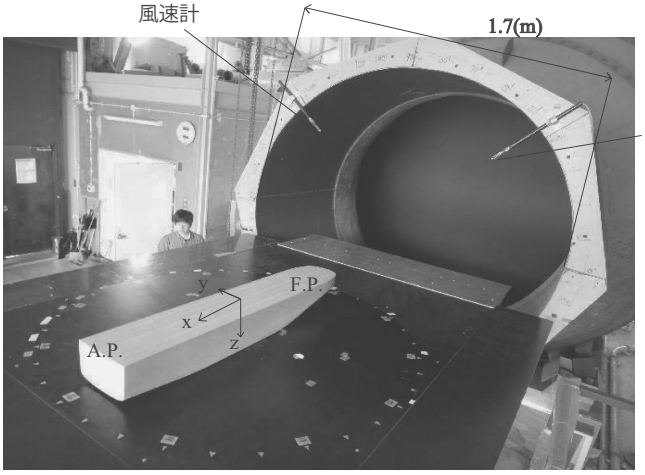


Fig. 5　通風型風洞

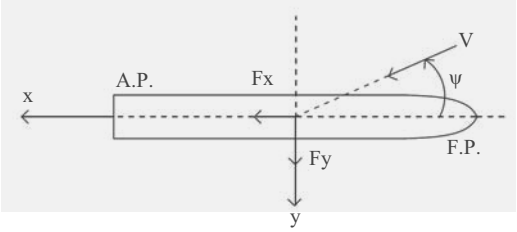


Fig. 6　座標系

4.3 結果・考察

(1) 船首形状，居住区形状の変更

風速 V，風向角 ψ での F_x を無次元化した前後風圧力係数 C_x を，次式のように定義する．

$$C_x(\psi) = \frac{F_x(\psi)}{qS} \tag{1}$$

$$q = \frac{\rho}{2}V^2 \tag{2}$$

ただし，S は船体の正面投影面積，ρ は空気の密度であり，$S = 0.0164(m^2)$，$\rho = 1.184(kg/m^3)$ で計算を行っている．
船首形状，及び居住区形状を変更した際の，0 度での C_x の増減率を Table 2 に示す．船体番号 002 の C_x を基準としている．Fig. 7 は角度による C_x の分布を示している．
90 度と 270 度の C_x の絶対値に大きな相違が見られるのは，ファンネルの影響が大きいためであると考えられる．0 度における C_x の絶対値が小さい．これは船首下部の形状が流線型となっており，抵抗を低減しているためである．また模型を横から見ると，船尾端をばっさりと切ったような形状である．180 度における C_x の絶対値が大きいことから，この形状は追い風を受けると大きな推力が期待できる．
居住区の幅を半分にした 006 の C_x は，居住区の幅が通常の 005 と比べて 5.4% 低減されることが確認された．また，カウリングを追加した 007 とフルカバーを追加した 008 では，C_x を大きく低減できることが分かった．

(2) 居住区・ホールドファンの有無による風抵抗の調査

居住区・ホールドファンの有無による，0 度での C_x の増減率を Table 3 に示す．船体番号 009 は居住区とホールドファンがない状態であり，009 の C_x を基準とする．また，Fig. 8 は角度による C_x の分布を示している．居住区を追加した 005 は，009 と比較すると風抵抗が 24.8% 増加し, ホールドファンを追加した 010 と比較すると 5.9% 低減していることが確認された．

(3) 組み合わせ

船首形状，及び船上構造物変更の組み合わせによる，0 度での C_x の増減率を Table 4 に示す．船体番号 002 を基準としている．また，Fig. 9 は角度による C_x の分布を示している．カウリングを追加した 011 では 4.3% の低減，フルカバーを追加した 012 では 8.8% の低減が確認できた．

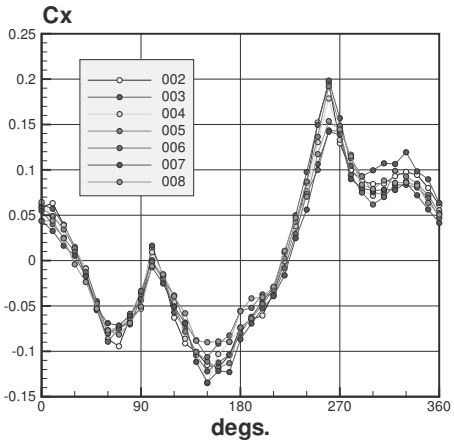


Fig. 7　船首形状，及び居住区形状変更時の C_x の風向角に対する分布

Table 2　船首形状，及び居住区形状の変更時の前後風圧力係数の増減率

船体番号	C_x の増減率
002	-
003	+4.9%
004	+9.4%
005	-1.7%
006	-7.1%
007	-25.5%
008	-26.1%

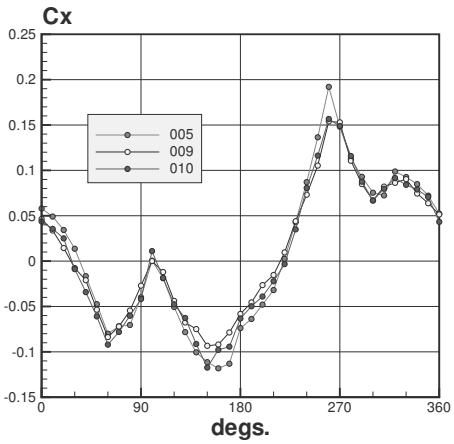


Fig. 8　居住区・ホールドファンの有無による C_x の風向角に対する分布

Table 3　居住区・ホールドファンの有無による前後風圧力係数の増減率

船体番号	C_x の増減率
009	-
005	+24.8%
010	-5.9%

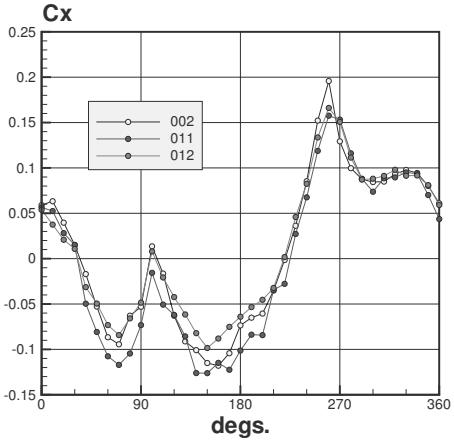


Fig. 9　船首形状，及び船上構造物の組み合わせた状態の C_x の風向角に対する分布

Table 4　船首形状，及び船上構造物の組み合わせによる前後風圧力係数の増減率

船体番号	C_x の増減率
002	-
011	-4.3%
012	-8.8%

5. まとめ

風抵抗増減率を船首形状，居住区，ホールドファンを変更した計 11 種類の供試模型で計測比較し，船首形状と船上構造物の変更による影響について考察を行った．本研究より得られた結論を次のように示す．

(1) 90 度と 270 度において，C_x の絶対値にファンネルの影響と思われる大きい相違が見られることが分かった．

(2) 0 度において C_x の絶対値が小さい．これは船首下部が流線型の形状であるため，抵抗を低減していると考えられる．

(3) 180 度において C_x の絶対値が大きいことから，追い風を受けると大きな推力が期待できる．

(4) 風抵抗に対する居住区の影響は大きく，居住区を追加することにより C_x が約 25% 増加することが確認された．

(5) ホールドファンを格納している状態の船型 006，007，008 を比較すると，カウリングを追加した 007 とフルカバーを追加した 008 において，C_x を大きく低減できることが分かった．

(6) ホールドファンを追加した状態では，フルカバーを追加した 012 の方がカウリングを追加した 011 よりも，C_x を低減できることが分かった．

GaN 系窒化物半導体の結晶成長シミュレーション

三重大学大学院工学研究科　河村貴宏

研究背景・目的

GaN 系窒化物半導体は LED や LD などの光デバイスや高周波用パワートランジスタなどのパワーデバイスとして期待されている. その結晶成長には結晶材料の種類や用途によって溶液成長(高圧溶液法, Na フラックス法など)や気相成長法(HVPE 法, MOVPE 法など)をなど様々な方法が用いられているが, その成長メカニズムには未だ不明な点が多く残されており, 更なる発展には原子スケールでの成長メカニズムを理解することが重要である.

本研究では分子動力学(MD)法を用いて GaN 系窒化物半導体の結晶成長シミュレーションを行い, その成長過程における各原子の挙動を調べることによって成長メカニズムを明らかにすることを目的とした. また結晶表面における N 原子の拡散挙動を解析し, GaN 結晶成長に及ぼす影響について検討した.

計算方法

図 1 に溶液成長に用いたシミュレーションモデルを示す. 全原子数は 1108 個(GaN 結晶:432, Ga 溶液: 576, N:最大 100)である. シミュレーションの流れは以下のとおりである. まず設定温度で平衡化後, 一定時間間隔(60ps)で N 原子を溶液中に 1 個ずつ追加し続ける. その N 原子が結晶表面に到達し成長面に取り込まれることで成長が進展するのでその成長過程と成長面の平坦性について調べた.

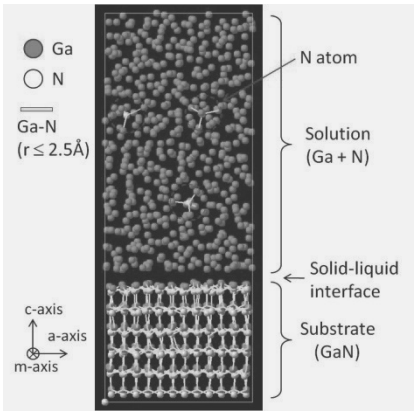


図 1. 溶液成長のシミュレーションセル

結晶表面(固液界面)における N 原子の拡散挙動解析にも図 1 と同様のモデルを用いた. 固液界面に N 原子を 1 個配置し, その移動の軌跡から拡散係数を求めた. その際, 基板表面から高さ 3Å の位置に N 原子にのみ働く鏡面反射境界条件を適用することによって N 原子が固液界面内を拡散するように拡散範囲を制限した(図 2). 拡散係数 D は次式により求めた.

$$D = \lim_{t\to\infty} \frac{1}{6t} \langle |\mathbf{r}(t_0 + t) - \mathbf{r}(t_0)|^2 \rangle$$

ここで, t は時間, $\mathbf{r}$ は原子座標である.

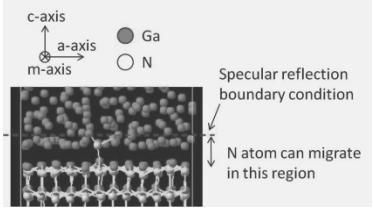


図 2. 固液界面拡散のシミュレーションモデル

その他の計算条件としては, ポテンシャル関数には Brenner ポテンシャル[1,2], 温度制御には速度スケーリング法, Nose-Hoover 法を用いて成長及び拡散シミュレーションは一定温度条件下で行った. 全計算時間は成長シミュレーションは 15ns(5000 万ステップ), 拡散シミュレーションは 3ns(1000 万ステップ)とした.

結果及び考察

成長シミュレーションではN原子がGa溶液中を拡散し，結晶表面に到達したN原子が結晶表面および周囲の Ga 原子と結合することで結晶成長が進展する様子が見られた．図3に2500Kで行ったGa面成長およびN面成長シミュレーションのスナップショットを示す．Ga面成長の場合は表面が平坦に成長したが，N 面成長では三次元的に成長が進行し，結果的にラフな表面になる様子が見られた. このシミュレーション結果は高圧溶液法による実験結果[3]と同様の傾向を示している. Ga面上ではN原子は結晶表面のGa原子と1本の結合手のみで結合しているがN面上では複数の結合手で結合しているため, Ga面上の方が表面拡散によって平坦に成長すると考えられる.

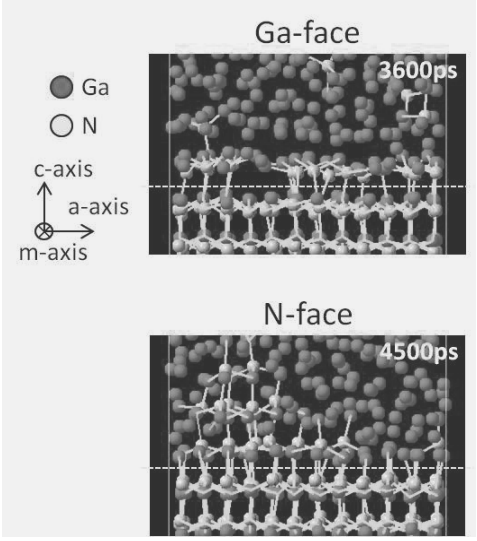


図3. Ga面上およびN面上成長シミュレーションのスナップショット.

次に固液界面(Ga面上とN面上)におけるN原子の拡散係数を計算した結果を図 4 に示す．比較のため，バルクGa溶液中のN原子の拡散係数の計算結果も示している．それらの値を比較すると，バルク溶液中>Ga面上>N面上の順に大きな値を示した．またこの温度依存性の結果からアレニウスの式で活性化エネルギーを求めたところ，Ga面上とN面上の値はそれぞれ 1.59 ± 0.18，2.27 ± 0.26 eV であった．このように，Ga 面成長では固液界面における N 原子の拡散が大きいため平坦な成長面が得られやすい，という成長シミュレーションの結果から得られた考察を裏付ける結果が得られた.

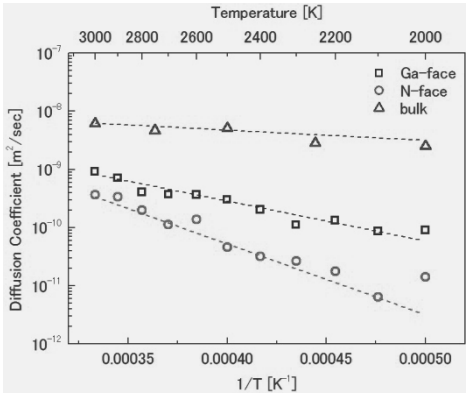


図 4. 固液界面内におけるN原子の拡散係数の温度依存性

参考文献

[1] D. Brenner, Phys. Rev. B 42 (1990) 9458.

[2] J. Nord, K. Albe, P. Erhart and K. Nordlund, J. Phys.: Condens. Matter. 15 (2003) 5649.

[3] M. Boćkowski, I. Grzegory, S. Krukowski, B. Łucznik, Z. Romanowski, M. Wróblewski, J. Borysiuk, J. Weyher, P. Hageman, S. Porowski , J. Cryst. Growth 246 (2002) 194.

研究成果報告

- GaN溶液成長におけるN原子の拡散挙動の数値解析，河村貴宏，寒川義裕，柿本浩一，小竹茂夫，鈴木泰之，第72回応用物理学会学術講演会, 2011.8.，山形大学，山形県.
- N原子の拡散を制御したGaN溶液成長シミュレーション，河村貴宏，寒川義裕，柿本浩一，小竹茂夫，鈴木泰之， 第41回結晶成長国内会議, 2011.11.，つくば国際会議場，茨城県.

電磁波遮蔽材料の創製とその評価法の確立

信州大学繊維学部
機能機械学課程　　倪 慶清
九州大学応用力学研究所
汪　文学

１．目的

カーボン繊維強化樹脂（CFRP）をはじめとする軽量・高強度複合材料は，飛躍的に産業用途へ展開されている．一例として，CFRP を主翼や胴体にまで利用拡大し，複合材料が構造重量の 50%を占めることになった中型旅客機 B787 が挙げられる．また，省エネとエコの観点から，次世代の自動車構造材料にも FRP 複合材料は一部利用されている．複合材料は従来の金属や高分子材料を単純に置換するものではなく，微視的な構成素材から構造までの種々の階層での「複合化」「機能化」「知能化」を集結できる新しい材料・構造であり，その材料用途の可能性は今後も広く深まっていくものと予想している．現在のフロンティアとして，スマートコンポジット，グリーンコンポジット，ナノコンポジットなどの分野での研究が展開されている．

一方，軽量・超高強度複合材料の航空，自動車分野への応用や IT 技術の発展による情報量の増大に伴う高速通信の普及につれて，電磁波がますます重要視されている．高速通信を実現するために，マイクロ波帯からミリ波帯への高い周波数の利用が望まれている．これらの応用にあたり，部品ごとに応じて，電磁波の遮蔽と透過がそれぞれ要求され，機器の誤作動や人体への影響が懸念されている．そこで，広範囲の周波数領域にわたる電磁波の遮蔽や抑制は必要不可欠であり，今後も益々重要視される．本研究では，高性能の電磁波遮蔽材料・構造を開発するとともに，電磁波遮蔽性能の評価方法を確立することを目的とする．

２．実験手法

◆試料作製　カーボン繊維強化樹脂複合材料 (CFRP)は，軽量・高強度部材として，多くの分野での応用が期待されている．一方，電磁波遮蔽効果の観点から，従来の金属材料と比べ，著しく小さい．そこで，カーボン繊維強化樹脂材料の構造設計を行い，カーボンブラックやカーボンナノチューブなどの充填材との複合化により，よりよい電気的特性，電磁波遮蔽特性を得られることが期待され，新規材料構造の開発を行った．作製した試料は，CFRP 積層板及びカーボンナノチューブ（CNT）を用いたナノコンポジットである．.

◆導電性の評価　直流導電率σ 試料の導電性の評価のために直流導電率を測定した．試料の導電率は電磁波遮蔽特性において重要なパラメータの1 つである．端子の接触抵抗を排除するために4 端子法を用いた．電極は導電ペースト(酢酸ブチル，Butyl Acetate)を塗布して作製した．電流計および電圧計はADVANTEST 社製のR8240 DIGITAL ELECTROMETER を用いた．直流電源は高砂製作所社製のEX-375L2 を用いた．試験片サイズは40×10×t mm とした．t は積層板の厚みである．

◆電磁波遮蔽の評価　試料の電磁波遮蔽特性を評価するために電磁は遮蔽効果(SE，Shielding Effectiveness)を測定した．SE は材料に入射する電磁波および伝送後の電磁波の比率で表される．本測定では，電磁波遮蔽効果の測定はホーンアンテナの前方に誘電レンズを設置した自由空間法を採用した. 装置にはベクトルネットワークアナライザおよび透過減衰量測定装

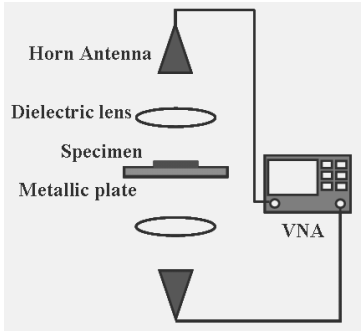


Fig.1 The schematic of an EMI shielding measurement system.

置を用いた．装置の概略図をFig.1 に示す．試験片は孔の開いた金属板上に孔を覆うように置いた．金属板の孔のサイズはφ150 mm のものを用いた．試験片サイズは220×220 mm とした．装置のダイナミックレンジは約60 dB である．ホーンアンテナから放射された電磁波は誘電レンズを通過することにより，高利得で等位相に近い平面波として試験片に入射する．装置に用いたホーンアンテナから放射される電磁波は直線偏波であり，電界の振動方向が一定である．これを用いてCFRPの繊維方向の電磁波遮蔽特性の依存性を検証した．電界の振動方向に対してCFRP の上層の繊維方向が等しいときの角度を0 °とした．電界の振動方向に対して繊維配向角を変化させ，それぞれの条件下でのCFRP電磁波遮蔽効果を測定した．また，小さいサンプルに対しては，同芯軸装置を用いて測定を行った．測定周波数は0.5-18 GHzである．

３．結果および考察

3.1. 直流導電率　一方向 CFRP の直流導電率測定結果を Fig.2 に示す．繊維方向により導電率の値は異なった．このことから一方向 CFRP は電気的に異方性である．繊維配向 0 ° の時に導電率は最も高くなり，90 ° の時と比較して 3 桁高かった．また，繊維方向が 0 ° から 90 ° に至る時，導電率は繊維方向が大きくなるに伴い減少した．繊維方向 90 ° から 30 ° 付近まで，導電率が急激に減少し，30 ° 以降の導電率の減少は緩やかになった．

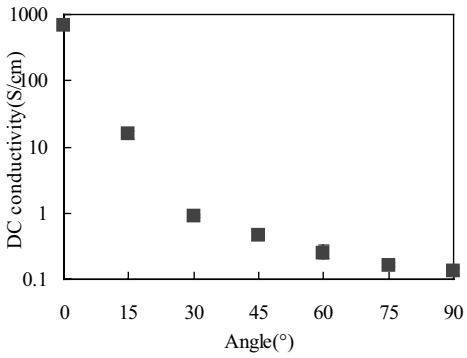


Fig.2 DC conductivity for unidirectional CFRP.

3.2. 電磁波遮蔽効果の方向依存性

一方向CFRPのSE方向依存性をFig.3に示す．図より，SEは90 ° を境に左右対称に変化することがわかった．0~90 ° におけるSEの方向依存性に注目すると，SEは電磁波の電界振動方向に対する方向依存性があった．SEの方向依存性は層数が変化しても同じ傾向を示した．SEは0 ° の時に最高値を示した． 0 ° の時とは，電磁波の電界の振動方向に対する一方向CFRPの繊維方向が等しい時である．反対に90 ° の時にSEは最低値を示した．90 ° の時とは，電磁波の電界の振動方向が炭素繊維の直径方向の時である．0 ° から90 ° へ至るSEは比例的に減少するのではなく曲線的に減少した．この減少傾向はFig.2の導電率測定結果と似た傾向であるとわかる．

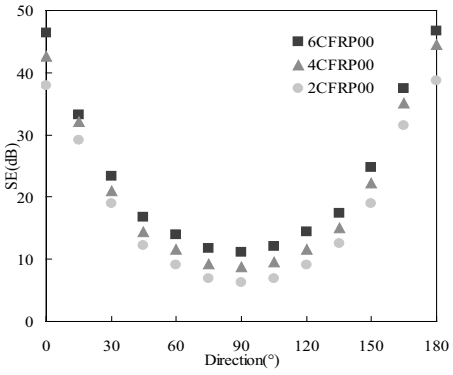


Fig. 3. Directional dependence of shielding effectiveness (SE) in unidirectional CFRP

４．まとめ

一方向CFRP 積層板の電磁波遮蔽特性を評価し，明確な電磁波方向依存性を明らかにした．その上，電磁波遮蔽メカニズムを検討し，評価プロセスを確立した．また，CFRPは電磁波遮蔽材料として有効であることが確認された．

５．研究組織

研究組織　１．信州大学繊維学部機能機械学科　倪 慶清（研究代表者）
２．九州大学応用力学研究所　汪　文学

23 ME－11

高効率化合物半導体太陽電池用基板の作製

宮崎大学 工学部 電気電子工学科
永岡章、吉野賢二

１．はじめに

Ⅰ-Ⅲ-VI_2 族化合物は、直接遷移型のバンド構造を持ち、禁制帯幅付近で大きな光吸収係数を持ち、オプトエレクトロニクスデバイスとして応用されている。また、特徴的な熱物性値も持っている。例として $AgGaSe_2$、$CuInS_2$ は低温側において線膨張係数が減少し、さらにバンドギャップも増加するという理論報告がある[1, 2]。さらに、フォトルミネッセンス(PL)測定の低温においてピークエネルギーが増加するという報告がある[3]。これらのことから低温における線膨張の異方性がピークエネルギーの増加に影響していると考え、本研究では、$CuGaSe_2$ の線膨張係数からピークエネルギー増加へアプローチを試みた。

２．実験方法

移動ヒーター法（THM）による単結晶作製のための種原料のとして $CuGaSe_2$ の多結晶インゴットを作製した。$CuGaSe_2$ の化学量論組成と一致するように Cu、Ga、Se の元素の規定量を石英アンプルに封入した。Cu と Ga のグレードは 6N で、Se は 5N である。元素を詰めたアンプルは、高真空下で封入した。そして、アンプルは垂直電気炉に入れ、ゆっくり 1100℃まで上げ、そして 24 時間保温したあとに自然冷却した。得られた多結晶インゴットは、直径 9 ｍｍで 40 ｍｍ程度の長さである。

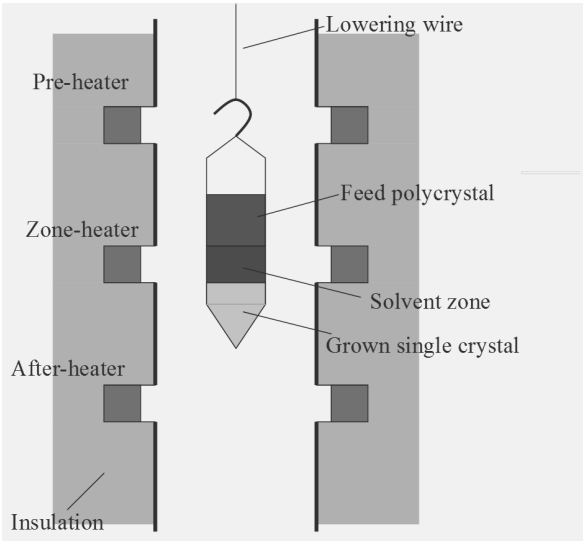


Fig. 1 THM原理図

$CuGaSe_2$ の多結晶インゴット(種インゴット)と溶媒の In を成長のためカーボンコートした石英アンプルに入れた。THM 成長の原理図を Fig. 1 に示す。アンプルは、高真空下で封入し、アンプルを THM 炉に入れた。成長温度は 900℃で、温度勾配は約 40 ℃/cm とした。4-5 mm/day のスピードでアンプルを吊るして、降ろしながら結晶成長を行った。

THM 法によって成長させた $CuGaSe_2$ 単結晶の線膨張係数は、10～300K において XRD 測定を行うことによって求めた。XRD の高角ピークから *a* 軸、*c* 軸の格子定数を算出し、そして格子定数より線膨張係数を算出した。

３．結果と考察

3.1 X線回折測定

Fig. 2 に 300K における $CuGaSe_2$ 単結晶の粉末 XRD スペクトルを示す。(112)ピーク、(204)ピーク、(312)ピークの主要ピークは ICDD データ(#00-031-0456)と一致した。スペクトルから異相は観察されなかった。$CuGaSe_2$ 単結晶図を Fig. 3 に示す。$CuGaSe_2$ 単結晶は、カットし鏡面研磨後、粒界は観察されなかった。

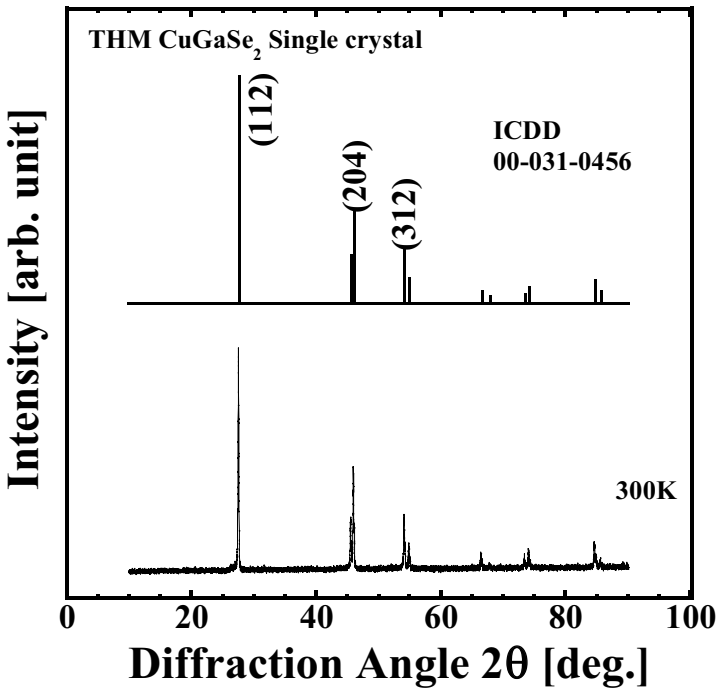


Fig. 2 The powder XRD spectrum of $CuGaSe_2$ at room temperature

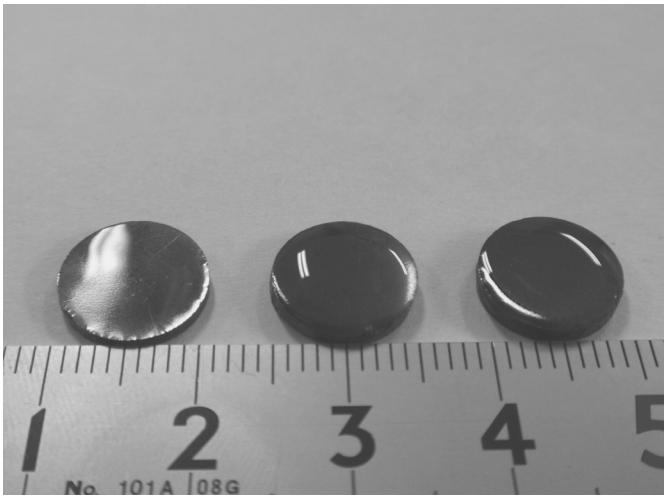


Fig. 3 $CuGaSe_2$ single crystal grown by THM

3.2　　格子定数、線膨張係数温度変化

XRD 温度変化より算出した格子定数の温度変化、各軸の線膨張係数の温度変化を Figs. 4, 5 にそれぞれ示す。格子定数の値より式(1)を用いて *a* 軸、*c* 軸それぞれの線膨張係数を求めた。

$$\alpha_{a,c} = \frac{1}{l_o}\frac{dl}{dT} \qquad (1)$$

300 K 時の各軸の格子定数を基準に各温度での膨張係数を算出している。
温度上昇とともに *a* 軸は増加、*c* 軸は減少した。*a* 軸の線膨張係数 α_a は、温度上昇とともに増加していったが、*c* 軸の線膨張係数 α_c は、100 K において最小値を取り、T < 100 K の範囲において負の線膨張係数を示し、異方性を持った。α_a、α_c ともに～10^{-6} K^{-1} を示し、報告されている値と一致している[4]。*c* 軸線膨張係数の特異な温度変化は、$AgGaSe_2$ や $AgInSe_2$ において報告されている。さらに、Ozaki らは、$AgGaSe_2$ と $AgInSe_2$ の光学吸収温度変化測定からバンドギャップ E_g の温度上昇に伴う増加を確認している[1, 5]。Bauknecht らは、MOCVD で作製した $CuGaSe_2$ のエピタキシャル膜の PL 測定を報告している。自由励起子発光ピークは、100 K 以下において温度上昇とともに増加している[3]。

遷移エネルギーの低温における温度上昇による増加は、負の線膨張に要因するものだと考えられる。負の膨張により格子間の距離が縮まり、電子の重なりが増える。結果としてバンドの幅が小さくなり、バンドギャップが大きくなるためピークエネルギーは増加すると考えられる。

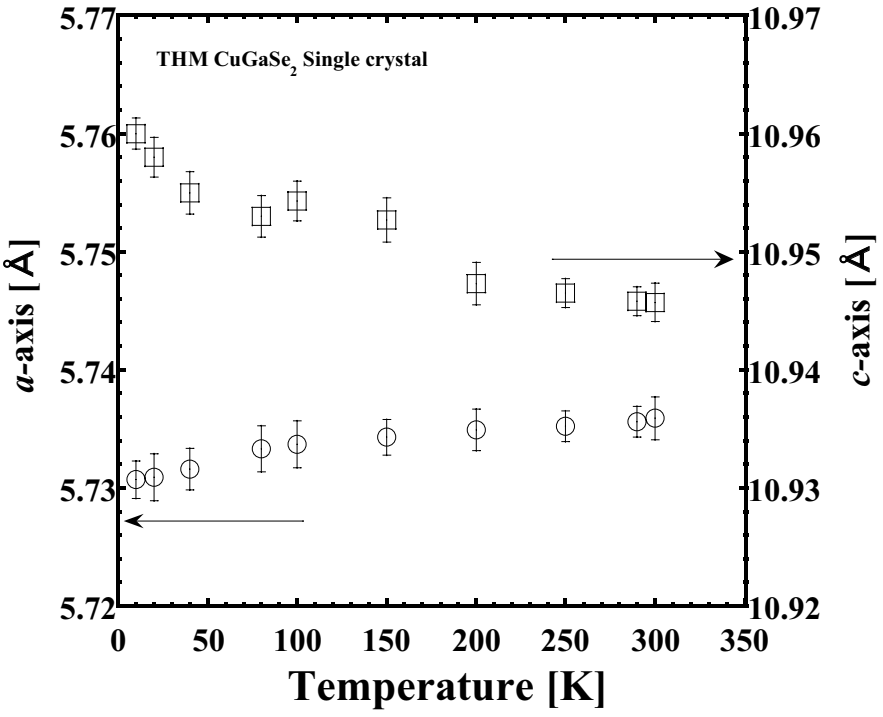


Fig. 4 Temperature dependence of lattice constants

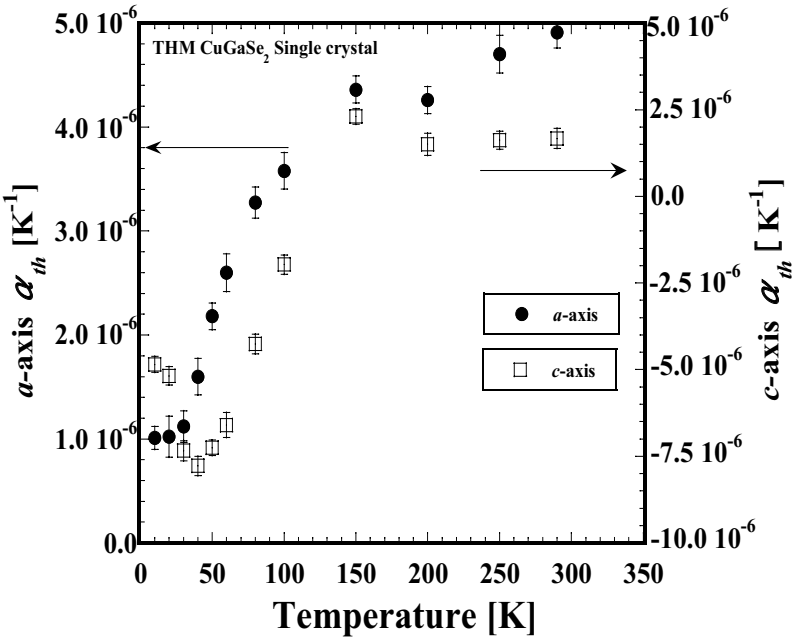


Fig. 5 Temperature dependence of linear thermal expansion

４．まとめ

THM によって $CuGaSe_2$ 単結晶の作製に成功した。XRD 測定から ICDD パターンと一致し、異相は確認されなかった。温度上昇とともに *a* 軸の格子定数は増加し、*c* 軸は減少した。格子定数より算出した *c* 軸の線膨張係数 α_c は、100 K 以下において負の値を示した。報告されている $CuGaSe_2$ の低温における遷移エネルギーの増加は、負の線膨張係数に起因していると考えられる。

引用文献

[1] S. Ozaki, M. Sasaki, and S. Adachi: Phys. Status Solidi (a) **203** (2006) 2648.
[2] A. Nagaoka, K. Yoshino, T. Taniyama, and H. Miyake, Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 05FB04.
[3]A. Bauknecht, S. Siebentritt, J. Albert, Y. Tomm, and M. C. Lux-steiner, Jpn. J. Appl. Phys., Suppl. **39** (2000) 322.
[4] A. Bauknecht, S. Siebentritt, J. Albert, Y. Tomm, and M. C. Lux-steiner, Jpn. J. Appl. Phys., Suppl. **39** (2000) 322.
[5] S. Ozaki, and S. Adachi, J. Appl. Phys. **100** (2006) 113526.

発電機能を有するナノコンポジットの開発

千葉大学工学研究科
機械系コース　　胡 寧

1. 目的

近年，ナノフィラーの優れた電気・熱特性を生かして，機能性ナノコンポジットの開発において目覚しい進歩があり，優れた特性が実験により明らかにされている．また，ナノコンポジットではなく，**圧電ポリマー単体**のエネルギーハーベスティング性能に関する数少ない研究が行われており，準静的の場合(1Hz)，従来の圧電セラミック素子より **100～200** 倍高い電気エネルギー出力密度（**11Wh/m^3**）が報告された．一方，このような研究は近年開始された段階にあり，圧電型発電ナノコンポジットに関する報告がほとんどない．将来の環境・省エネルギー・健康福祉社会の一層の推進を図るためには，ナノフィラーを用いて，センサ，発電およびアクチュエータなどの機能を有する多機能ナノコンポジットの開発が重要となる．本研究では，本研究グループのこれまでの研究成果を発展させ，**カーボンナノフィラー／ポリマーによる優れた発電機能を有するナノコンポジットの開発**が主要な目標である．

2. 研究内容

本研究で開発される材料は，CNT や VGCF などのカーボンナノフィラーと熱可塑性ポリマーPVDF を用いることにより，循環利用可能かつ環境負荷が小さい利点がある．本研究における具体的な内容と方法については，下記の 2 つ項目からなる

◆DFT 計算によるポリマー結晶構造の形成の解明

機械的エネルギーから電気エネルギーへの変換効率を高めるため，電気活性化ポリマーの選択が重要であり，ここで，リラクサ強誘電体ポリマーなどの電歪ポリマーを候補材料とする．DFT 計算によるポリマー結晶構造の形成に関する解釈により，ナノコンポジット発電性能の向上のためのメカニズムを明確にする．例えば，結晶核形成剤の機能としているナノフィラーの添加が圧電ポリマーPVDF 中の TT チェーン構造の集結による重要な**β型結晶**の形成および安定性に及ぼす影響を調べ，ナノフィラー種類の選択，分散性と添加量などを決める．

◆ナノコンポジットの発電性能の実験的評価および性能向上

MWNT と VGCF のようなナノフィラーの添加および添加量によるナノコンポジットのエネルギー変換効率を向上させる可能性などを含めて実験的に検討する．さらに，機械エネルギーから電気エネルギーに変換することにおけるエネルギーハーベスティング電気回路の改良およびエネルギー変換効率の向上を含めて研究を行う．

3. 結果および考察

◆DFT 計算の結果

図 1 に示すような PVDF 中のα型結晶と圧電性能を持つβ型結晶について，図 2 に示すような単層の CNT(SWNT)と周辺のポリマーチェーンを含む構造における DFT 計算を行い，CNT に対するチェーンの表面付着エネルギーおよびα型結晶からβ型結晶まで転換するエネルギー障壁高さを評価することにより，CNT によるポリマーチェーンの結晶核機能，特に Zigzag SWNT における低い相転換エネルギー障壁を確認し，CNT による圧電ポリマー PVDF の圧電性能向上のメカニズムを明らかにした．現在，DFT 計算により，グラフェインのようなほかのフィラーについての評価も進行中である．

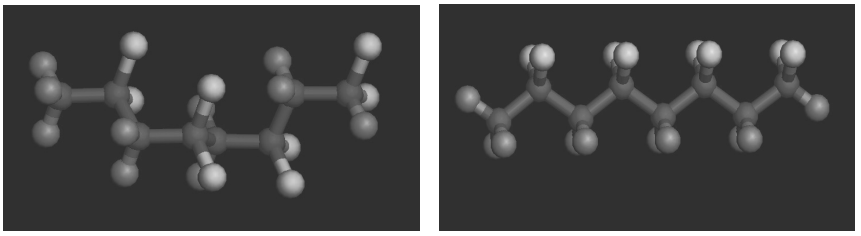
◆ナノコンポジットの作製•発電性能の実験的評価

本研究では，フィラーとして MWNT-7(ナノカーボンテクノロジーズ(株))および VGCF(昭和電工(株))，マトリックスとして PVDF-HFP(Arkema Inc.)を使用した．溶剤として DMF(和光純薬工業(株))を用い，重量比で PVDF＋フィラー : DMF＝1 : 3 とした．またフィラーの含有率に関して，0，0.05，0.2，0.3wt%の 4 種類を作製した．

1) 電子天秤を用い，必要量のフィラーと DMF，PVDF をカップに入れ，超音波分散機および自転・公転ミキサーで十分に撹拌を行う．

2) 自転・公転ミキサーにて脱泡を行う．
3) アルミニウム板上に溶液をキャストし，送風を行いながら，約 90℃にセットしたホットプレート上で乾燥させる．
4) 10mm/min にて加熱一軸延伸を行う．
5) 30×30mm^2 の面積に，導電性接着剤とアルミニウム箔で電極を形成する．
6) シリコンオイル中にて，常温で数段階に分けて 60MV/m まで印加し，分極処理を行う．

本研究では，PVDF およびカーボンナノフィラー/PVDF 複合材料を表面に貼り付けた図 3 に示す梁を加振させ，開放電圧出力および Standard AC 回路に接続したときの回収電力を測定した．この実験により，各サンプルの圧電および発電性能の評価を行った．



α型結晶　　β型結晶

図 1．PVDF ポリマーにおける典型的な結晶

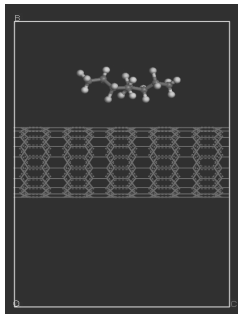


図2．α型結晶と CNT の DFT 解析

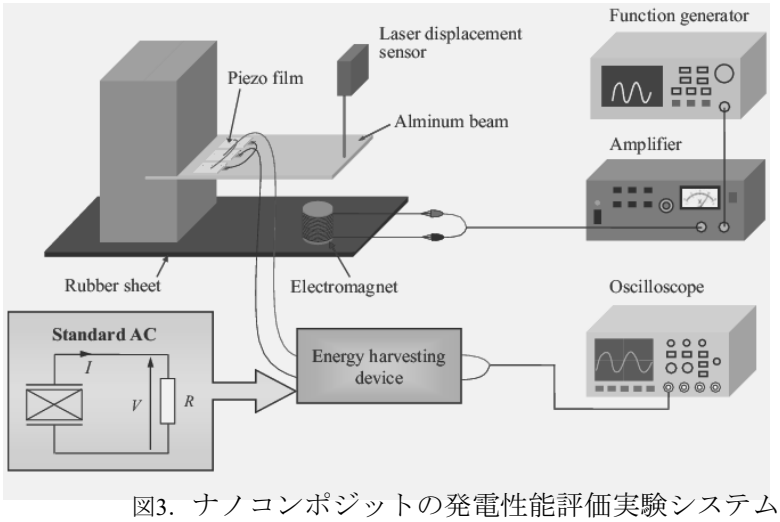


図3．ナノコンポジットの発電性能評価実験システム

➢ **MWNT/PVDF 複合材料**　図 4 に MWNT の含有率と開放電圧の実効値の関係を，図 5 に負荷抵抗と回収電力の関係を示す．開放電圧に関しては 0.05wt%の添加によって最大となり，PVDF と比較して約 24%の向上が確認できる．しかし 0.05wt%以降の含有率では次第に減少していることから，開放電圧の向上に関して，0～0.2wt%の間に最適含有率が存在すると考えられる．また，圧電 g 定数の向上によって開放電圧も向上したものと考えられる．すなわち，少量の MWNT の添加によって PVDF の圧電性能が向上したものと考えられる．次に回収電力に関して，開放電圧同様 0.05wt%で最大となり，以降の含有率で減少している様子が確認できる．特に 0.05wt%添加したものは，最大回収電力で PVDF と比較すると，約 54%向上していることがわかる．圧電方程式より，フィルムの誘電率 ε および弾性スティフネス c が一定とみなせるのであれば，圧電 g 定数の増加は圧電 d，e 定数の増加につながり，最終的に回収電力が増加することがわかる．したがって，MWNT の添加によって圧電諸定数が向上し，PVDF の発電性能が向上したものと考えられる．また，フィラーの結晶核生成作用によって PVDF 中の β 型結晶の割合が増加し，圧電諸定数の増加につながったのではないかと考えられる．

➢ **VGCF/PVDF 複合材料**　図 6 に VGCF の含有率と開放電圧の実効値の関係を，図

7 に負荷抵抗と回収電力の関係を示す．MWNT/PVDF 複合材料と同様，開放電圧，回収電力ともに 0.05wt%で最大値を示し，以降の含有率では徐々に減少した．0.05wt%添加したサンプルと PVDF を比較したとき，開放電圧に関して約 15%，最大回収電力に関して約 87%の向上がみられる．ここで回収電力について図 7 より，MWNT/PVDF 複合材料ではみられなかった，PVDF からの最適負荷抵抗値のシフトが観察された．最適負荷抵抗値の理論式より，VGCF を添加したことによってフィルムの静電容量が増加したためではないかと考えられる．また，MWNT/PVDF 複合材料と同様，圧電 g 定数の向上が開放電圧の向上につながったと考えられる．このように，圧電諸定数のみならず誘電率も増加したため，MWNT/PVDF 複合材料よりも VGCF/PVDF 複合材料のほうが回収電力の向上率が高くなったと考えられる．したがって発電性能の向上の面から考えると，VGCF のほうが優れたフィラーではないかと予想される．

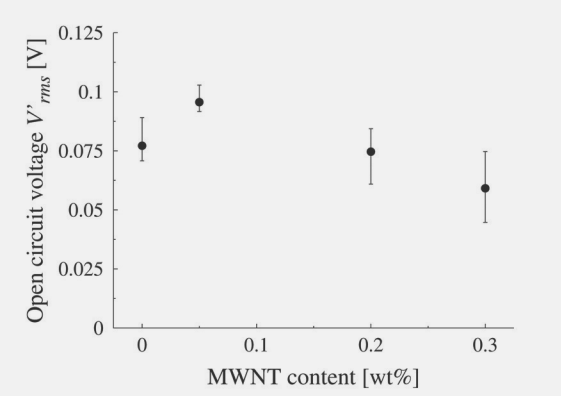


図4．MWNT/PVDF の開放電圧

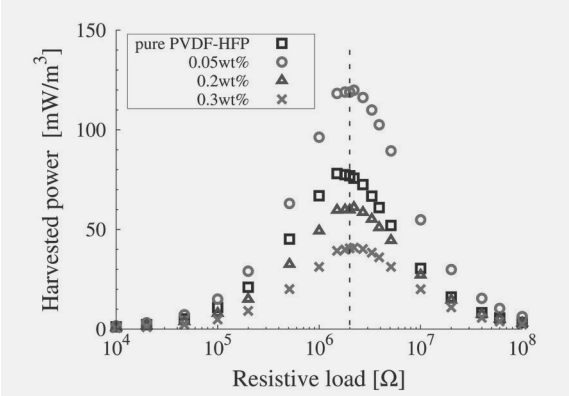


図5．MWNT/PVDF の発電性能

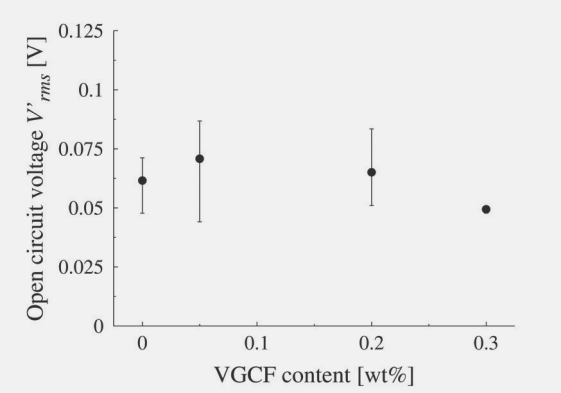


図6．VGCF/PVDF の開放電圧

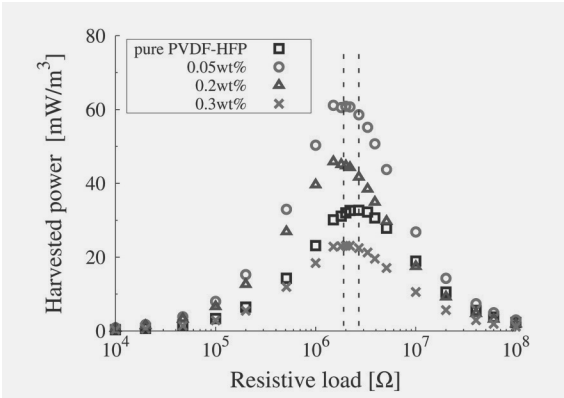


図7．VGCF/PVDF の発電性能

➢ ナノフィラーによる PVDF 複合材料の内部結晶および組織評価

図8および図9に，それぞれ延伸前，延伸後の，MWNTの各含有率のXRDスペクトルを示す．図8中に示すように，延伸前のサンプルでは2θ=18.5°，19.9°，26.5°付近にピークが現れており，それぞれα型結晶の(020)面，(110)面，(021)面に対応している．またβ型結晶に対応するピークが現れていないことから，延伸処理を施さないサンプル中では，β型結晶が優勢であることがわかる．しかし，延伸処理を施すことによって2θ =26.6°付近に大きなピークが現れており，これはβ型結晶の(110)面に対応している．また延伸後のXRDスペクトルから，α型結晶に対応するピークはわずかに確認できるものの，ほぼ消失していることがわかる．このことから延伸処理によって，最も安定な結晶構造であるα型結晶から不安定な結晶構造であるβ型結晶にほぼ転移したものと考えられる．MWNTの添加による効果については，図8に示すように，α型結晶の(021)面のピークが0.05wt%のMWNT添加量で一番顕著に現れ，この場合により多くのα型結晶が存在することと言える．FTIR解析の結果でも，同様な傾向が得られた．よって，延伸後にも，0.05wt%のMWNT添加量の場合，より多くのβ型

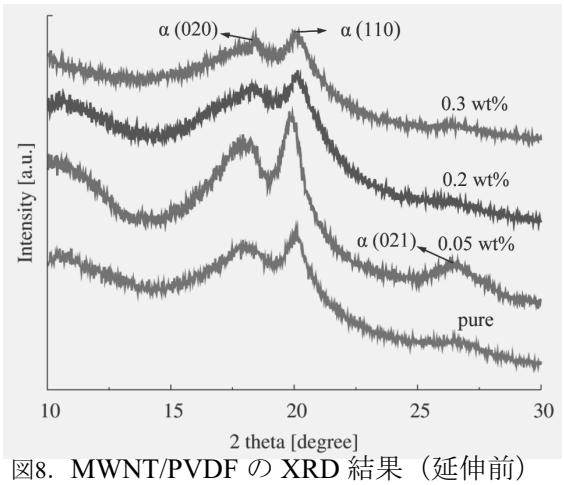


図8. MWNT/PVDF の XRD 結果（延伸前）

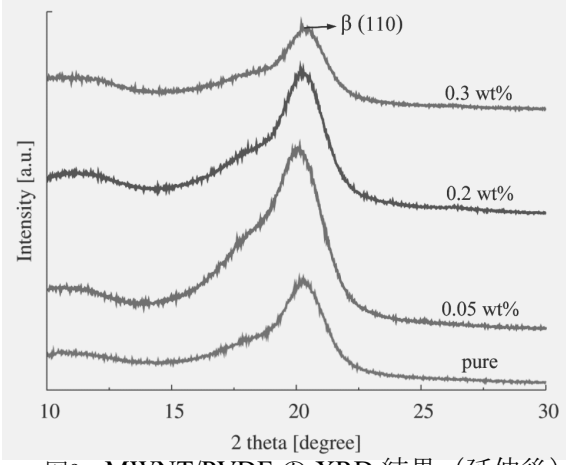


図9. MWNT/PVDF の XRD 結果（延伸後）

結晶を析出することと推測される（図 9）．VGCF/PVDF についても,同じ結果は得られた．

図 10 と 11 に, MWNT を 0.05wt%と 0.3wt.%添加した材料の破断面を示す．これらの図により, 0.3wt.%の場合における多数の凝集の存在に対して,0.05wt%の場合における MWNT の良い分散性を確認できた．つまり,高含有率になるほどフィラーの分散性が悪くなり，フィラーの結晶核形成作用が十分に活かせなかったと考えられる．

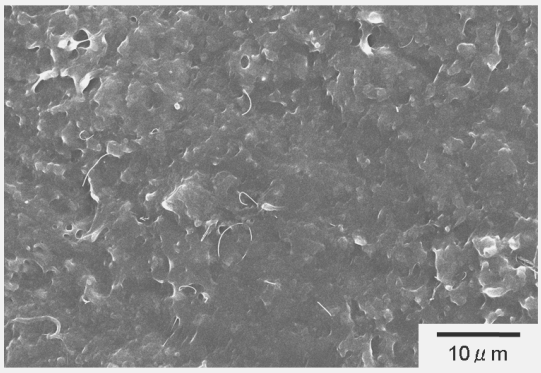


図10. MWNT/PVDF の破断面（0.05wt%）

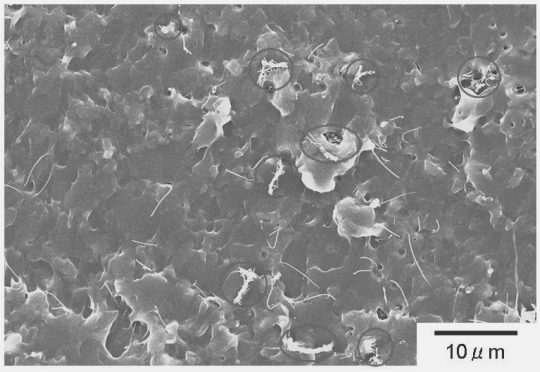


図11. MWNT/PVDF の破断面（0.3wt%）

4. 結論

本研究では，柔軟性に優れ高い圧電性能を有し，かつ環境にやさしい材料の開発を目的とし，マトリックスとして PVDF，フィラーとして MWNT および VGCF を添加した複合材料の圧電および発電性能について，DFT 解析および実験により研究を行った．本研究により, 下記のような結論は得られた．

- DFT 解析により, CNT によるポリマーチェーンの結晶核機能および相転換エネルギー障壁を低下させる機能を確認した．
- 0.05wt%の MWNT の添加により，開放電圧に関しては 24%, 回収電力に関しては 54%の向上が確認できた．0.05wt%の VGCF の添加により，開放電圧に関しては 15%, 回収電力に関しては 87%の向上が確認できた．
- MWNT および VGCF を少量添加することで，PVDF の圧電諸定数向上につながることが確認できた．VGCF を少量添加することで PVDF の誘電率の向上にもつながるため，発電性能の向上には VGCF フィラーの方が適していると推測できた．

5. 研究組織

研究代表者　胡 寧
研究組織　1. 千葉大学工学研究科機械系コース　胡 寧
2. 九州大学応用力学研究所　　汪 文学

クレイ強化ナイロンハイブリッドナノコンポジットの破壊機構

福岡工業大学　朱　世杰

1. 研究の目的

ナイロン 6 クレイハイブリッド（NCH）は，ナイロン 6 とモンモリロナイトと呼ばれるクレイ（粘土鉱物）とのナノ複合材料である．NCH は，モンモリロナイト層を剥離させてナイロン 6 マトリックスにナノメートルオーダーで分散させることにより，高強度，高剛性，高耐熱性，高ガスバリア性等の優れた特性を実現している．これらの特性を活かし，エンジンカバーや燃料チューブ等に実用化されている．しかし，クリープ特性や温度の影響に関する研究が少なく，設計方法や寿命評価方法が確立されていないのが現状である．そのため，クリープ破壊特性に及ぼす温度の影響についての調査や，クリープ変形の予測方法の確立が求められる．本研究では 23 ℃（室温）及び，ナイロン 6 のガラス転移領域の下限値付近である 35 ℃ や 50 ℃ におけるナイロン 6，NCH-2，NCH-5 のクリープ破壊機構について調査を行った．

2. 材料と実験方法

本試験にはクレイ添加量の違いによる影響を調べるため，クレイ無添加のナイロン 6，クレイ体積含有率 2 %及び 5 %のナイロン 6 クレイハイブリッド(NCH-2, NCH-5)を用いた．試験片は幅 10 mm，厚さ 4 mm，ゲージ長 80 mm のダンベル型形状のものを使用した．試験機には島津製作所（株）製のサーボパルサーを用いた．試験温度はナイロン 6 のガラス転移領域の下限値及び上限値付近である 35 ℃, 50 ℃ とした．クリープ試験にはシリコーンオイルを用い，油中環境下で行った．シリコーンオイルの温度調節にはリボンヒーターで加熱しデジタル卓上型温度調節器で制御した．クリープ破断試験の応力は比較的短時間でクリープ破壊が生じる応力とし，35 ℃ における NCH-5 の試験応力は 65～85 MPa，50 ℃ における試験応力は NCH-2 では 48～56 MPa，NCH-5 では 56～66 MPa とした．

3. 結果と考察

23 ℃ では NCH-2 が最も高いクリープ強度を示したが，35 ℃ ，50 ℃ においては，NCH-5，NCH-2，Nylon6 の順で高いクリープ強度を示した．また NCH-2 では 23 ℃ から 35 ℃ になるとクリープ強度が約 30 %減少しているのに対し，35 ℃ から 50 ℃ になると 5 %程度しか減少しなかった．NCH-5 では温度が 23 ℃ から 35 ℃ になると約 3 %減少したのに対し，35 ℃ から 50 ℃ になると約 14 %と大きく減少した．これらのことより，クレイの添加量を 2 %から 5%に増やすことで，機械的特性が急激に低下するガラス転移温度が上昇したと考えられる．

Fig. 1 に温度 35 ℃，応力 74 MPa にて NCH-5 のクリープ破断面の SEM 像を示す．Fig. 1 (a)中に(b)で示した領域の中央に(d)に示すような介在物が確認できる．また，破断面の中央に楕円状の模様が認められ，(c)よりこの領域が塑性破面であることがわかる．紙面の都合によりひずみと時間の関係（クリープ曲線）は省略するが，ひずみが 0.094 程度と少ないひずみ量で破断に至っている．また 35 ℃ の他の荷

重条件の試験でも，多くの場合破断面に同様の介在物や，欠陥が確認できた．これらの事より，ひずみ量が少ないことにより内部に蓄積されたエネルギーが，介在物を起点に楕円状に塑性変形を生じさせ，その後一気に破壊が進んだと考えられる. 温度 50 ºC, 応力 63 MPa にて NCH-5 のクリープ破断面の SEM 像より，破断面付近にネッキングが発生していることが確認でき，試験片側面には多数のクラックが確認できる．試験片表面のクラックが成長し，試験片内部にまで拡大していることがわかる．温度の上昇により破断に至るまでのひずみ量が増加し，それによって側面に生じた多数のクラックが成長・合体を繰り返すことで破壊に至ったと考えられる．

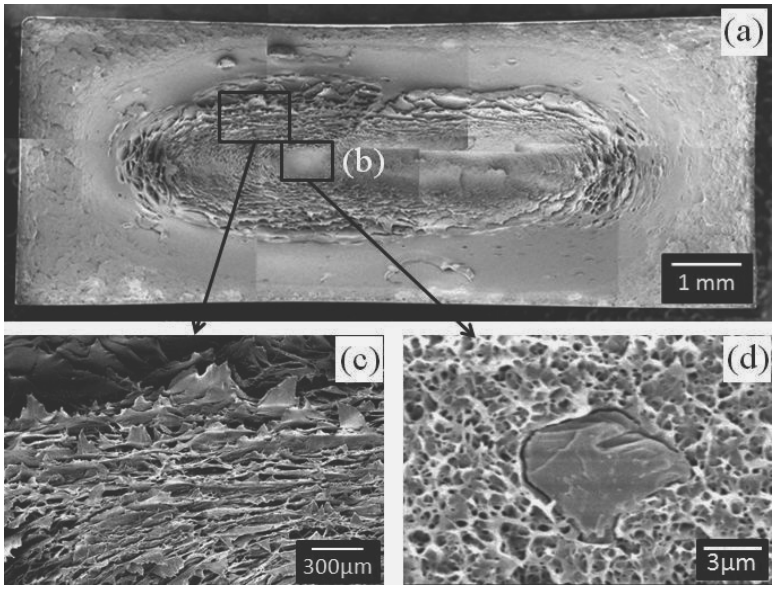


Fig. 1　Scanning electron micrograph of fracture surface in NCH-5 under 74 MPa at 35°C.

4.　まとめと今後の展開

クリープ破断試験では，全ての材料で温度の上昇に伴いクリープ破断強度が減少したが，クレイ添加量が 2%から 5%になることでガラス転移温度が上昇した．NCH-5 の 35 ºC における実験では，少ないひずみ量により材料内部に蓄積されたエネルギーが，介在物や欠陥を起点として破壊を進行させた．NCH-5 の 50 ºC における実験では，大きなひずみ量により側面に多数のクラックが発生し，クラックが成長・合体を繰り返すことで破断に至った．

今後、以上の結果より，ナノコンポジットの疲労・クリープの挙動を説明可能な損傷モデルを提案する。また，本モデルに基づく疲労・クリープ寿命推定の可能性を検討する。さらに，ナノコンポジットの疲労・クリープ特性向上のための材料設計指針についての提案を行う。

5.　成果報告

Masaki YAMAMOTO, Yoshihiro NAKAZATO, Shijie ZHU, Arimitsu USUKI and Makoto KATO, Creep Behavior of Nylon 6 Clay Hybrid Nanocomposites at Room and High Temperatures, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM'11), September 19-21, 2011, Kobe, Japan

6.　研究組織

研究代表者　福岡工業大学　教授　朱　世杰

所内世話人　九州大学応用力学研究所　准教授　汪　文学

23 ME－14

TLP を利用した浮体式洋上風車の最適設計に関する研究

大阪府立大学大学院・工学研究科　二瓶　泰範

- **目的**

洋上風力発電利用に関する研究開発は昨今取り上げられる陸上風力発電の様々な問題(風車ブレードが作り出す振動音による人体の影響や山間部に設置する際の森林伐採等々) の観点からも喫緊の課題であると考えられる．沖合は水深が深く，着底式工法には限界があり，浮体式工法により風力発電を実現する必要がある．洋上では安定した風が吹くことが既に報告されており，spar 型や barge 型といった浮体工法に注目した洋上風力発電に関する研究は様々存在する．しかし，これらの浮体工法は主に緩係留方式であり，波による運動が大きい．この運動に起因し，風のブレードに対する相対風速が変化し，電力出力の変動が生じ得る．これは電力の安定供給という観点から大いに懸念される検討事項であると考える．

そこで本申請研究では波浪中での運動応答が非常に良い TLP 型洋上風力発電に着目し，その最適な設計要目に関する検討を行う．また，風車タービン回転影響を組み込んだ浮体運動解析ツールを開発し，浮体運動を始め，係留索や風車タワーに作用する荷重等を明らかにする．更に，水槽を用いて風や波浪という複合環境下での水槽試験を行い，TLP 型洋上風力発電システムについて構造や運動応答に関して詳細な研究を行うことを目的とする．

- **研究の具体的方法**

[1] 最適な TLP の主要目の検討

TLP の主な運動をモデル化すると，テンドンの材質で主に決定されるピッチング，ヒービングの短周期運動と，初期テンションで主に決まるサージング，スウェイングの長周期運動とがある． TLP にとって重要なのは，(a)波力を出来る限り小さくすることと，(b)固有周期が外力である海洋波の周期とはずれること，(c) 長周期の固有周期が海洋波の二次差成分とはずれること，(d)初期テンションを可能な限り小さくすること，(e)スナッピングを生じないようにすることである．(a)に対しては水線面積を可能な限り小さくすることが一つの指標となる．(b)は鋼管を用いることで自動的に満足される．一番重要なのは(c)(d)(e)である．建造費やメンテナンスコストの面からは初期テンションが小さいことがメリットとなる．しかし，初期テンションが必要以上に小さくなると波浪の二次差成分と同調し大きなサージング等につながる．更に風や波浪外力により一時的に圧縮荷重が働き，次の瞬間，浮体の復原力により鋼管降伏応力に至ることもある．この現象をスナッピングという．すなわち(c)(d)(e)のためには，可能な限り精度よく TLP 及び風車に作用する波浪荷重，風荷重を予測し適切な初期テンションをかける必要がある．この設計手法を基に TLP 型洋上風力発電の最適な設計を行う．

[2] 風・波浪共存場における水槽試験

[1]により検討された浮体について実際に模型製作を行い水槽試験において運動計測，索張力，ナセル部の加速度等の計測を行う．近年，５MW クラスの大型風車タービンの材質は GFRP 等の先端材料が用いられるため一翼がおよそ２０～３０トン程になっている．1/100 スケールの模型に換算すれば２０～３０グラム程で製作しなくてはならず相似比を合わせた実験は非常に難しい．申請課題では相似比を合わせた翼を実際に製作し風・波浪共存場での水槽試験を行う．

- **結果**

[1] 最適な TLP の主要目

上述の方法によって決定した浮体(Model550)の主要目を Table1 に示す．また，TLP 浮体，および風車の外観図を Fig. 1 に示す．

Table 1 Principal particulars of Model550 sub structure

Model 550	Full scale		Model scale	
Displacement	tons	3500	g	3500
Draft	m	38	cm	38
Initial tension	tonf	2260	gf	2260
# of mooring line	-	6	-	6

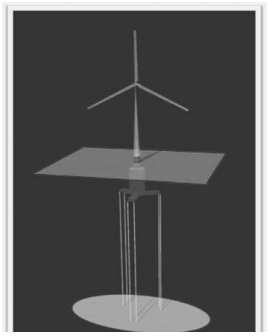


Fig. 1 Model 550 の概観図

[2]水槽試験結果

TLP において最も大切なものが，スラックしないということである．ここでは初期テンションが適切であったかどうかを示す．(Fig.2)

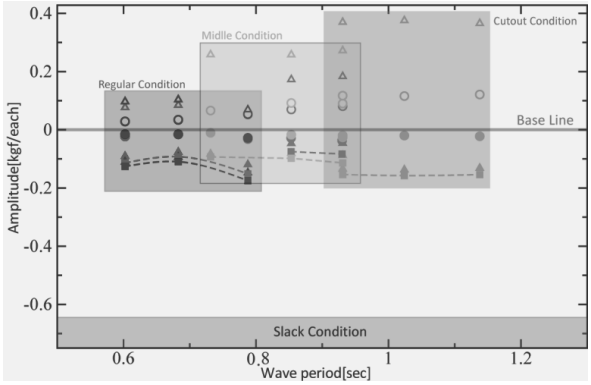


Fig.2 は全ての波浪条件，風速条件における変動張力の値を示している．横軸は波の周期を表している．同風速を点線で繋いでいる．図からも分かるように全ての条件において十分なテンションを保っていることが分かり，本研究において提案された設計手法が有効であることが示された．

但し，水槽試験では浮体のヨーイング，ローリング等の風車回転に伴う現象も確認できた．今後の研究課題としたい．

Fig. 2 Tension loads due to waves and wind (Model550)

- 成果報告

i. TLP 型洋上風力発電の最適形状と運動応答に関する研究，二瓶泰範，松浦みどり，藤岡弘幸，鈴木英之，日本船舶海洋工学会春季講演会,2011 年 6 月

ii. Aerodynamic Effect on TLP Type Wind Turbines and Predictions on the Electricity They Generate， Yasunori Nihei and Hiroyuki Fujioka, Journal of Marine Science and Application,June,2011

iii. An Approach for the Optimum Design of TLP Type Offshore Wind Turbine, Yasunori Nihei, Midori Matsuura, Hiroyuki Fujioka and Hideyuki Suzuki, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering,June,2011

iv. Gyro effect of rotating blades on the floating wind turbine platform in waves, Fujiwara Hideo, Takashi Tsubogo, Yasunori Nihei, The Twenty First (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference,June,2011

- 研究組織

役　割	氏　名	所属･身分	滞在延べ日数
研究代表者	二瓶　泰範	公立大学法人大阪府立大学・助教	４日
研究協力者	村井　基彦	国立大学法人横浜国立大学・准教授	０日
所内世話人	胡　長洪	国立大学法人九州大学・准教授	

振動水柱型波力発電装置の波浪中発電特性試験

佐賀大学海洋エネルギー研究センター　永田修一

1. 序論

温暖化ガス排出が削減されつつある現在、再生可能エネルギーは CO_2 排出量を削減する技術として注目されている。波力エネルギーは再生可能エネルギーの一つであり、そのエネルギーを電気エネルギーに変換する波力発電装置は現在様々な形式が提案されている。中でも、波エネルギーを空気エネルギーへ変換し、空気エネルギーを電気エネルギーへ変換する振動水柱型波力発電装置は大波浪下での安全性も高く、実用化に近い。本研究は振動水柱型波力発電装置の一種である「後ろ曲げダクトブイ」(Backward Bend Duct Buoy： 以後 BBDB)について研究したものである。BBDB の特徴として、浮体と水室内の水柱の共振時に空気圧力が非常に高くなること、装置自体が小型で浅い海でも使用可能である、波浪中で波の入射方向に微速前進することが挙げられる。

これまでに九州大学応用力学研究所深海機器力学実験水槽で実施した実験では、全長 0.85m の小型 BBDB 模型の 2 次元および3次元水槽実験で、2次元の場合は70%、3次元の場合はほぼ100%の一次変換効率が得られることが明らかになった。さらに、昨年度はこの小型模型の寸法を 3 倍に拡大した中型模型を製作し、タービンおよび発電機を搭載して、規則波中における発電実験を行った。

本年度は、タービンおよび発電機を搭載した BBDB 中型模型の規則波中発電実験を行い、発電効率（最終効率）の周波数特性と浮体運動をより詳細に調べることにより両者の関係を明らかにした。

2. 実験方法

水槽実験に使用した BBDB 模型を Fig.1 に示す。模型はアルミ製フレームと外殻、バラスト、タービンおよび発電機部、計測機器から構成される。Table 1 に模型緒元を示す。

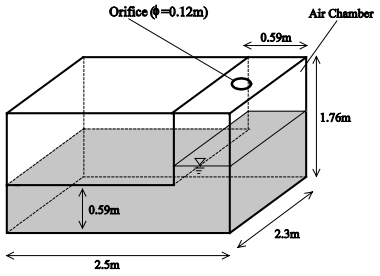


Fig.1 BBDB model

Table 1 Specification of Model

Length overall	2.50m
Breadth	2.30m
Buoyancy module draft	0.45m
Draft	1.05m
Displacement	2.56m^3
Longitudinal center of gravity	1.42m (from bow)
Center of Gravity(C.O.G)	0.74m (from bottom)
Radius of gyration (Roll) K_{xx}	1.00m
Radius of gyration (Pitch) K_{yy}	1.00m
Radius of gyration (Yaw) K_{zz}	1.03m

実験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽にて実施した。水槽は全長 65m、幅 5m、水深 7m である。Fig.2 に実験機器配置図を示す。水槽中央部に中型模型を係留した。BBDB 船首部の左右 2 ヶ所をワイヤー係留した。水槽端に設置された造波機で規則波を発生させ、規則波中における BBDB の発電量を計測した。入射波波高は BBDB 波上側と波下側に設置した波高計で計測した。同時に空気室内部の水位変動および圧力を計測した。運動はビデオトラッキングにより計測した。10Hz でマーカー画像を撮影し、MVTec 社製 HALCON を用いて変位を計測した。

運動の固有周期は Surge 方向が 2.68 秒、Heave 方向が 2.92 秒、Pitch 方向が 2.68 秒であった。これは入射波波長 λ と物体 L の比 λ/L に換算するとサージ（前後揺）方向 4.46、ヒーブ（上下揺）方向 5.33、ピッチ（縦揺）方向 4.46 に相当する。

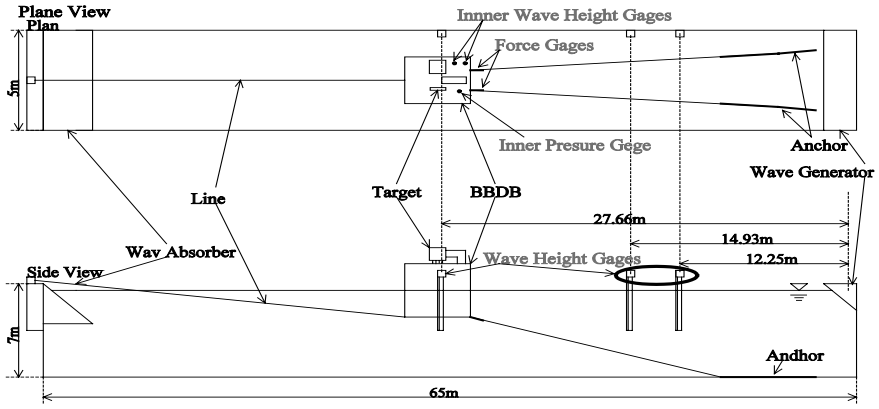


Fig.2 Arrangement of experimental equipments

3. 実験結果及び考察

Fig.3 に最終効率（入射波エネルギーと発電エネルギーの比）の周波数特性、Fig.4～Fig.6 にそれぞれサージ、ヒーブ、ピッチの無次元運動振幅を示す。最終効率はλ/L=3.52 において最大 31%を示した。その周期ではサージおよびヒーブ運動振幅が最大となり、ピッチ運動振幅が極大値をもつ。また、最終効率が最大となる波周期は、前節に示したそれぞれの運動の固有周期には相当しない。Fig.7 にサージを位相基準とした場合の内部波高の位相を示す。本来位相差は－π～πの範囲であるが、πで割って−1～1 の範囲で位相差を表している。同じく Fig.8 にピッチを位相基準とした場合の内部波高の位相を示す。λ/L=3.52 付近ではサージ運動とピッチ運動とダクト内部の水運動がほぼ逆位相となるため、高い内部圧力が生まれ、高い最終効率を生むことが明らかになった。

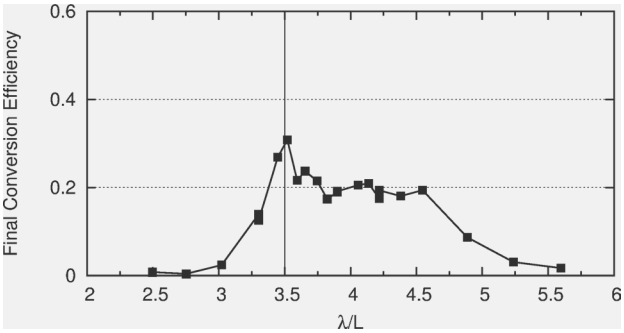


Fig.3 Final conversion efficiency

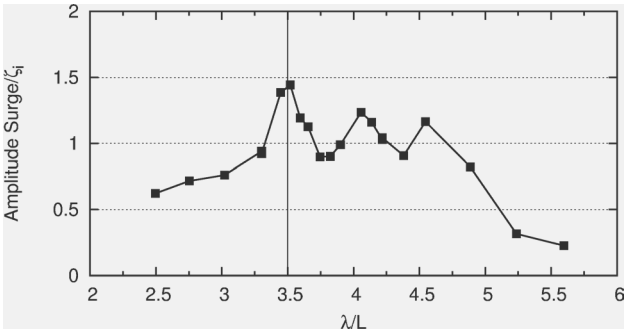


Fig.4 Amplitude of motion (Surge)

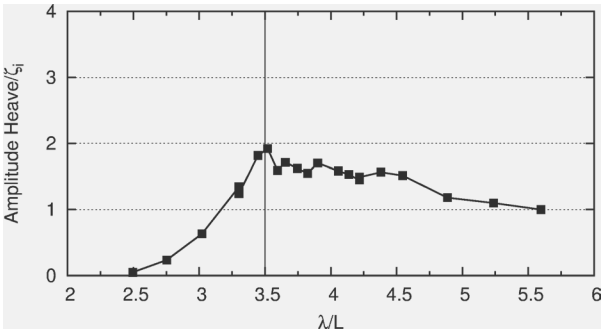


Fig.5 Amplitude of motion (Heave)

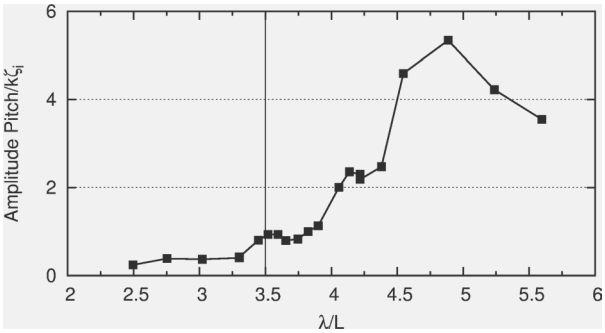


Fig.6 Amplitude of motion (Pitch)

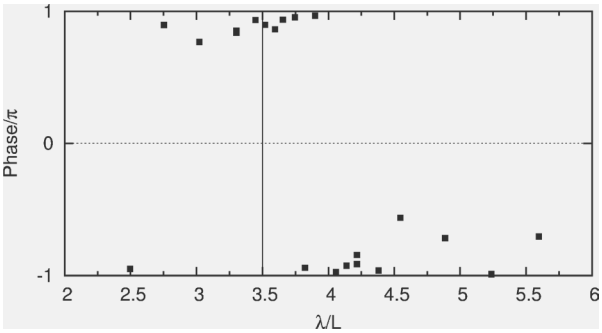


Fig.7 Phase of inner wave height (Surge Based)

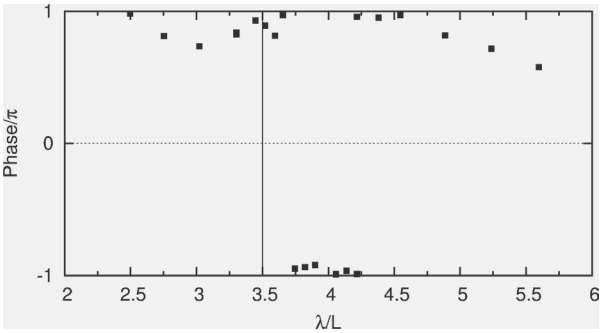


Fig.8 Phase of inner wave height (Pitch Based)

4. 結論

振動水柱型波力発電装置「後ろ曲げダクトブイ」の規則波中発電実験を行い、最終効率の周波数特性を求めた。最終効率が最大となる波周波数ではサージ運動とピッチ運動とダクト内部の水運動が逆位相となることを明らかにした。今後は実際の海洋波を模した不規則波中における発電効率の研究を実施予定である。

5. 成果報告

なし

次世代人工股関節と生体股関節の力学的相互作用に関する研究

九州大学大学院医学研究院　中島　康晴

1. INTRODUCTION

Total hip arthroplasty (THA) has been the standard treatment for patients with progressive osteoarthritis, yet continues to cause complications such as dislocation. The smaller size of the ball compared to the anatomical femoral head decreases the range of motion (ROM) of the implant, increasing the risk of impingement. The debris particles generated from the wear are a known cause of osteolysis, and along with stress shielding, these factors lead to implant loosening and fracture. The need for a better functional implant has renewed interests in metal-on-metal (MOM) implants, specifically resurfacing hip arthroplasty (RHA). The main advantage over THA is that the process involves less bone removal. Due to the implant maintaining the size of the femora head, studies have reported increase ROM and this decrease in rate of dislocation. While metal ion release is a known issue with MOM implants, the primary complication of RHA is spontaneous femoral neck fracture [3]. Large strains near the rim of the implant and notching of the femoral neck have been associated to the cause of fracture.

The purpose of this study was to observe common complications reported for THA and RHA implants by conducting FEA and analyzing stress, strain energy density (SED), and damage formation in the femur with hip arthroplasties.

2. FINITE ELEMENT ANALYSIS

CT images from the lumbar to the knee of a 54-year old male were used to create a three-dimensional bone model. CAD models of THA and RHA implants were imported and positioned as shown in Fig.1. Inhomogeneous mechanical properties of the bone were determined by Hounsfield Unit of the CT images. Ti alloy and alumina properties were assigned to the stem and the ball of the THA implant respectively. Co-Cr alloy properties were assigned to the RHA implant. The material properties of each of the components are summarized in Table 2. Both implants were considered to be bonded at the bone-implant interface.

To mimic climbing downstairs, a surface load was applied at 12° in the frontal plane and 35° degrees in the transverse plane. The load itself was set to 10kN to maximize the occurrence of fracture. Displacement and rotation was fixed in all directions at the distal end (Fig. 2).

Fracture mechanics of the femur were based on predictions made by Keyak et al. The load bearing strain was set to 3000μ, the physiological bone loading that leads to bone formation. The test strength was set to 80% of the yield strength determined from the CT images.

Table 1. Material properties for FEA

Property	Ti-6Al-4V	Alumina	Co-Cr-Mo
Elastic modulus (GPa)	113.8	370	230
Poisson ratio	0.34	0.22	0.3
Critical stress (GPa)	0.88	0.4	0.94
Yield Stress (GPa)	0.97	3.0	2.7
Density (g/cm^3)	4.43	3.96	8.28

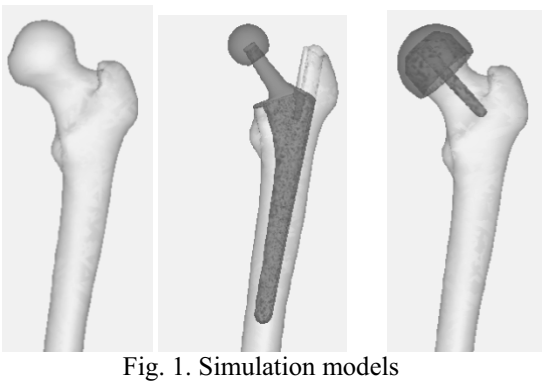


Fig. 1. Simulation models

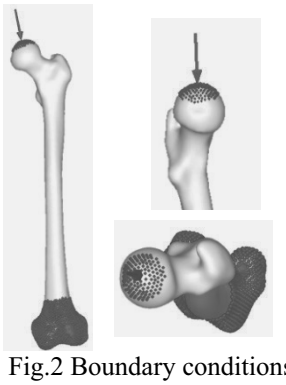


Fig.2 Boundary conditions

3. RESULTS

Fig. 3 shows the fracture sites of the FEA models. Tensile fracture is represented in white and compressive fracture in red. In the IB model, tensile fracture began appearing at 3.5BW at the trochanteric fossa. At 5.9BW, compressive fracture appeared at the inferior component of the femoral neck. The failure load was 8.6BW and the fracture site was transcervical intracapsular. In the RHA model, fracture began at 1.8BW with both tensile and compressive fracture appearing around the rim of the implant at the inferior neck area. This was followed by tensile

fracture at the trochanteric fossa at 4.0BW. At 6.2BW, internal fracture emerged around the middle section. The failure load was 9.6BW and the fracture site was trancervical intracapsular. The THA model did not fail, and only showed fracture appeared around the tip of the implant stem and at the corner edge at the top of the stem at 4.7BW and 8.6BW, respectively. At 11.1BW, tensile fracture appeared along the diaphysis.

The distribution of the maximum principal stress is shown in Fig. 4. For the bone and RHA models, stress is spread across the top of the femoral neck. Stress is also concentrated around the tip of the THA implant. High stress concentration along the lateral side of the femur is evident in all models. Fig. 5 shows minimum principal stress. All models have a high stress concentration along the medial side. Stress concentration also exists around the bone-implant interface in the THA model. The IB model also has stress distributed around the femoral head.

The distribution of SED is shown in Fig.6. SED is significantly lower in the THA model compared to the other two models. The IB model and the RHA model show very similar results, with high density values along the medial side of the femur. Both implant models, however, show densities concentrated at the tip of the implant stem.

4. DISCUSSION

Unlike RHA, the main complication associated with THA is aseptic loosening, primarily due to osteolysis caused by stress shielding. Compared to intact femurs, femurs with THA experience less stress due to the transfer of load to the implant. Decrease in stress is noticeable around the lower half of the implant stem. It is also evident around the medial cortex, where compressive fracture is present. The significant decrease in SED between the THA and the IB model is also an indication of stress shielding in effect. The figures also indicate bone thickening as there is an increase in stress and SED around the tip of the implant stem. These two areas have been known to cause periprosthetic remodeling [5-7]. The main differences between the IB and the RHA model are the initiation of the fracture and the mode of propagation. With the IB model, compressive fracture at the neck inferior propagated internally in an even and gradual manner. Internal fractures were also present in the RHA model due to the transfer of load towards the implant stem, but in addition, fractures at the inferior area of the neck propagated externally along the rim of the implant. The propagation of these fractures may be amplified with the presence of notching [8]. There is also a noticeable decrease in SED in the femoral neck which can be linked stress shielding, as well as increased area around the tip of the implant stem, suggesting bone thickening.

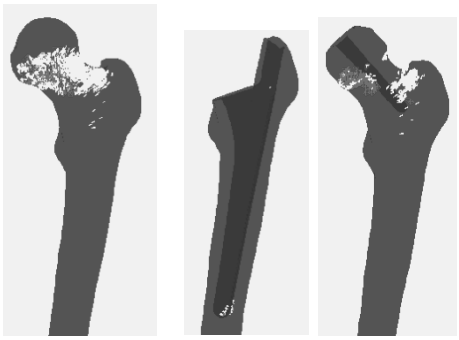


Fig.3 Fracture locations

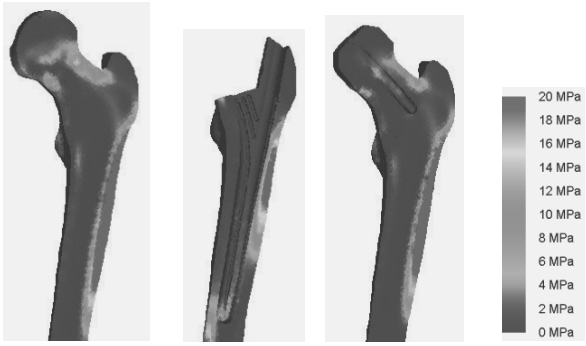


Fig. 4. Maximum principal stress distribution

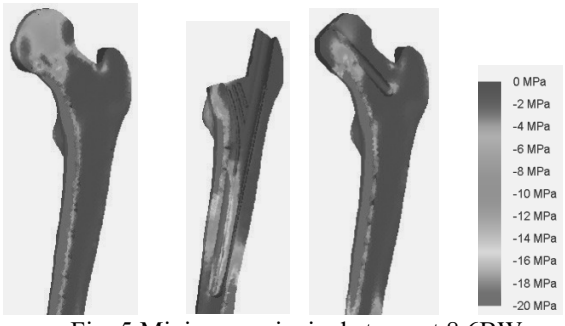


Fig. 5 Minimum principal stress at 8.6BW.

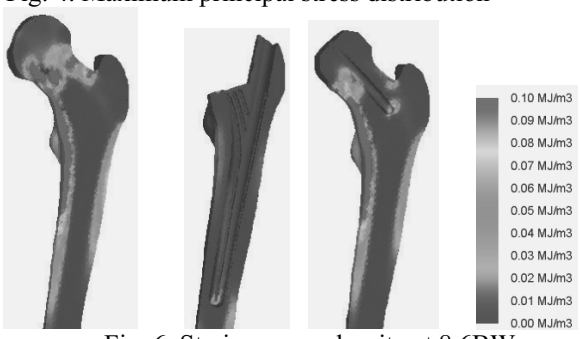


Fig. 6. Strain energy density at 8.6BW.

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
中島康晴	九州大学医学研究院	講師	研究代表者，臨床的考察
岩本幸英	九州大学医学研究院	教授	臨床的考察
北村英輔	総合理工学府	M2	数値解析
東藤　貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人，生体力学解析

多孔質バイオセラミックスと骨組織再生の生体力学的相互作用に関する研究

大阪大学附属病院未来医療センター　名井　陽

INTRODUCTION

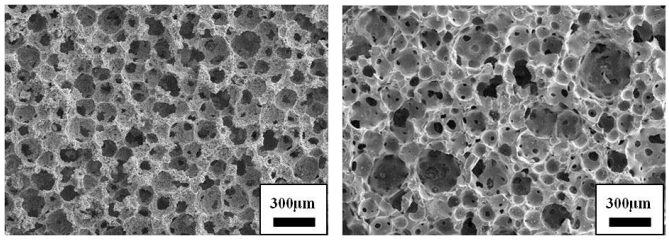
In current orthopedic treatments, artificial bone substitutes composed of bioactive ceramics are often used instead of autograft and allograft to obtain bone tissue ingrowth in damaged regions. In particular, porous bioceramics such as hydroxyapatite (HA) and β-TCP have been applied in the clinical situations in order to enhance bone ingrowth into the artificial substitutes. After implantation, their mechanical characteristics are affected and changed by both bone tissue regeneration into the porous structures and the absorption behavior for the case of bioresorbable ceramics. However, the detailed mechanism has not been clarified yet.

The primary objective of this study is to quantitatively evaluate the effects of bone tissue regeneration on the compressive mechanical behavior of different types of artificial bone substitutes on the basis of in vivo experiment and image based computer simulation.

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL METHODS

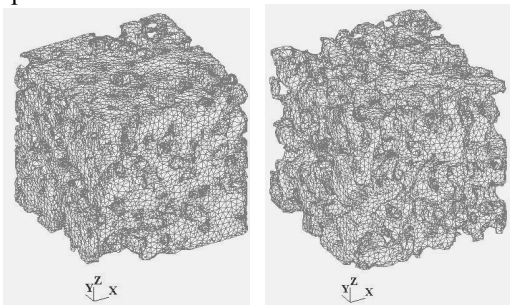
Two different types of porous aritificial bone substitutes, resorbable HA and nonresorbable HA,were implanted into femurs of rabbits to perform in vivo study of bone regeneration. The micro-porous structures of the bone substitutes are shown in Fig.1. It is noted that both the substitutes have interconnected pores so that bone tissue is easily able to grow into the porous structures. The longest period of implantation was 48 weeks. After certain periods of implantation, the bone substitutes were removed from the femurs and compression mechanical tests were conducted to evaluate the compressive deformation behavior. Structural analysis using μ-CT images and histological analysis were also performed to characterize the bone ingrowth behavior.

The μ-CT images scanned periodically were used to construct finite element models of the bone substitutes with bone tissue ingrowth. Three cubic models were constructed for each of the samples, and finite element analysis was performed under a simple compressive loading condition with 1 N loading. Averaged compressive modulus was obtained from each of the FEA models and compared with the experimental results.



(a) Resorbable (b) Nonresorbable

Fig.1 Porous microstructures



(a) Resorbable (b) Nonresorbable

Fig.2 FEA models

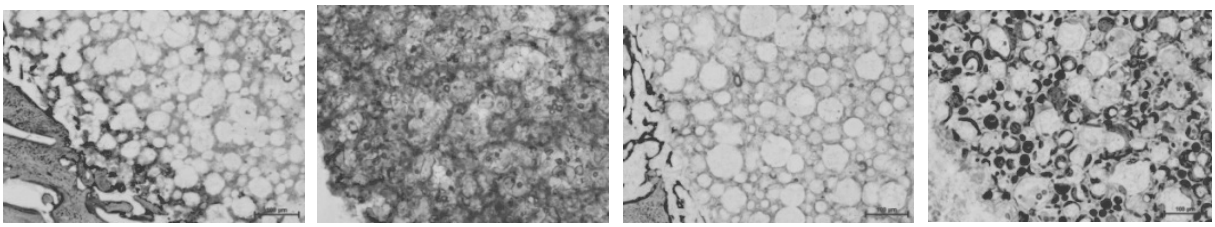
RESULTS AND DISCUSSION

The bone ingrowth behaviors are shown in Fig.3. It is clearly seen that at one week, partial ingrowth is observed in the resorbable HA, while there is no ingrowth seen in the nonresorbable HA. After 48 weeks implantation, bone tissue fully grew into the porous structures.

Strain energy density (SED) distributions are shown in Fig.4. In the resorbable HA, SED at one week is very similar with that at 48 weeks. On the other hand, in the nonresorbable HA, high localized SED concentrations are seen at one week, and such concentrations are evenly reduced at 48 weeks.

Variation of the compressive moduli are shown in Fig.5. The FEA results well coincide with the experimental. In the resorbable HA, the modulus increases in 5 weeks and then almost keep constant up to 48 weeks. It is thus expected that bone regeneration is saturated at 5 weeks. On the contrary, the modulus of the nonresorbable HA tends to increase up to 24 weeks, and then decrease up to 48 weeks. It is expected that in the nonresorbable HA, bone tissue is regenerated excessively until 24 weeks, and tends to be reduced due to bone remodeling.

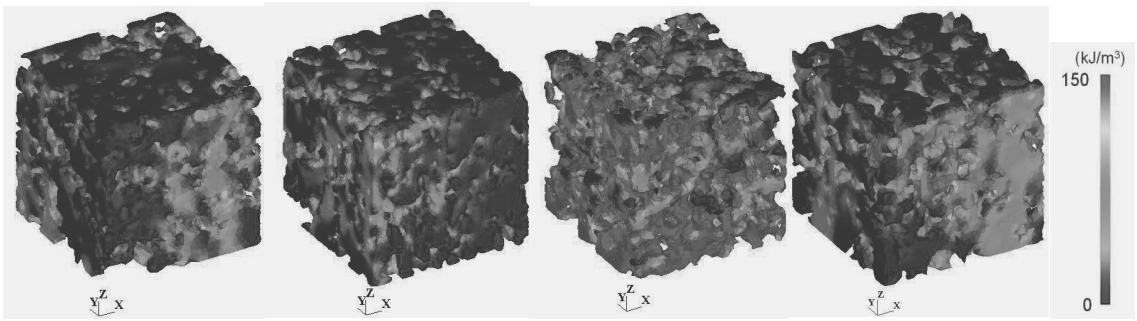
It is thus concluded that the nonresorbable HA is suitable for bone regeneration in older patients who have relatively weak bone structure such as osteoporosis. On the other hand, the resorbable HA may be used for bone regeneration in younger patients who have normal bone structure and remodeling ability.



one week　48 weeks　one week　48 weeks

(a) Resorbable HA　(b) Nonresorbable HA

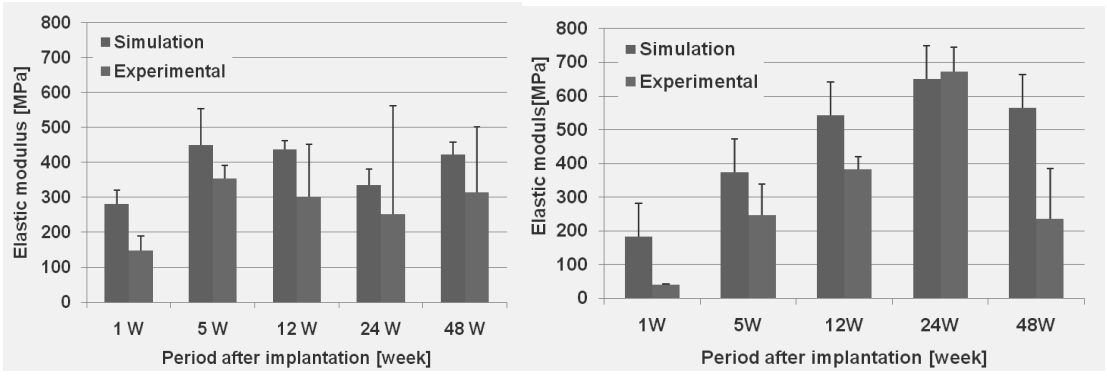
Fig.3 Bone ingrowth behavior



one week　48 weeks　one week　48 weeks

(a) Resorbable HA　(b) Nonresorbable HA

Fig.4 Distribution of strain energy density



(a) Resorbable HA　(b) Nonresorbable HA

Fig.5 Variation of compressive modulus

成果報告

1) Li-Mei Ren, Takaaki Arahira, Mitsugu Todo, Hideki Yoshikawa and Akira Myoui, Biomechanical evaluation of porous bioactive ceramics after implantation: micro CT-based three-dimensional finite element analysis, ***Journal of Materials Science: Materials in Medicine***, 2011 (DOI 10.1007/s10856-011-4469-2)

2) T. Arahira, M. Todo, A. Myoui and H. Yoshikawa, Effects of bone tissue regeneration on mechanical behavior of porous bioceramics, 4th International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues, Hawai'I, 2011.

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
名井　陽	大阪大学未来医療センター	准教授	研究代表者，臨床的考察
任　麗梅	応用力学研究所	研究員	数値解析
荒平　高章	総合理工学府	D2	数値解析
東藤　貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人，生体力学解析

生体吸収性高分子材料の高機能化に関する研究

山形大学大学院　理工学研究科　高山哲生

1. 緒言

超高齢化社会の進行に伴い，医療技術の低侵襲化は必要不可欠とされている．生体吸収性材料は生体内に埋入後，分解され代謝により流れていくため，例えば骨固定材用の材料として使用すれば，除去手術を必要としなくなり低侵襲化に適した骨固定材の開発が可能となる．例で挙げた骨固定剤用の生体吸収性材料としてはポリ(L-乳酸)(PLLA)が使用されているが，初期強度および弾性率が骨と比べて低いこと，分解速度が遅く骨折治癒後も残存してしまうといった問題点がある．本研究では骨固定材用としての生体吸収性材料の使用用途の拡大を目的として，骨の主成分であり生体活性セラミクスであるハイドロキシアパタイト(HAp)を分散させたHAp/PLLA複合材料に注目した．この材料はPLLAに比べて初期弾性率が高くて分解速度も速く，また骨伝導能といったPLLAにはない機能性も有している．しかし，HAp分散に伴い強度が低下してしまう．これはHApとPLLAの界面強度が低いためと考えられる．そこで本研究ではHApおよびPLLAの両方に反応するリジントリイソシアネート(LTI)を添加剤として使用し，界面強度を改善することでHAp/PLLA複合材料の初期強度を改善することを試みた．

2. 実験方法

原料はPLLAペレット(トヨタ自動車製)とHAp粒子(サンギ製)である．PLLAの重量平均分子量は1.97×10^5[g/mol]，ガラス転移温度および融点はそれぞれ65℃および176℃である．またHApの平均粒径は5μmである．混練比はHAp：PLLA＝10：90wt%で一定とし，これにLTIをドライブレンドにて1および2phr添加した．また，比較の為にPLLA単体にLTIを同量添加した試料も用意した．これらをバッチ式溶融混練機(井元製作所製)に充填し，50rpm，20minの条件で溶融混練を行った．得られた混合物をホットプレス機にて加熱圧縮成形し，$140\times140\times2$mm³の板材を得た．得られた板材を機械加工することで$70\times10\times2$mm³のBeam試験片を用意し，万能力学試験機(島津製作所製)を用いて3点曲げ試験を行った．スパン間距離Lは40mm，負荷速度は10mm/minで行い，得られた荷重変位曲線より，最大荷重P_{max}を求め，以下の式にて曲げ強度σ_fおよび曲げ弾性率Eを求めた．

$$\sigma_f = \frac{3P_{max}L}{2WB^2}, \quad E = \frac{L^3}{4WB^3}S \tag{1}$$

ここでWおよびBはそれぞれ試験片幅および厚さである．また，Sは荷重変位曲線の初期の傾きである．

破壊靭性を評価するためにBeam試験片の中央に幅方向に5mmのVノッチを施したSENB試験片も用意し，万能力学試験機を用いてモードI破壊試験も行った．スパン間距離Lは40mm，負荷速度は1mm/minで行い，得られた荷重変位曲線よりき裂発生までに吸収するエネルギーU_{in}を求め，下記の式にて臨界エネルギー解放率としてのJ積分値J_{in}を評価した．

$$J_{in} = \frac{\eta U_{in}}{B(W-a)} \tag{2}$$

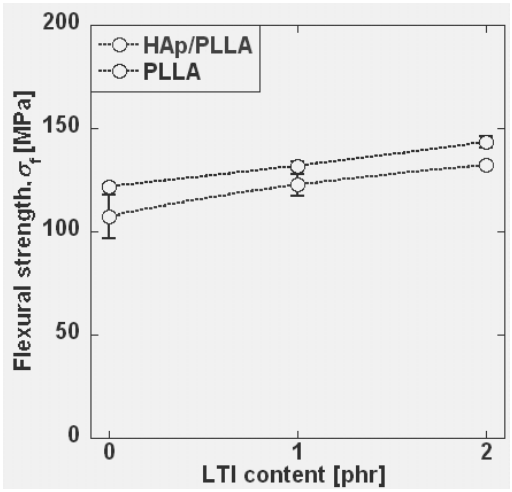
ここで，aは初期き裂長さであり，SENB試験片の場合，$\eta=2$である．本研究では試験片の剛性$dP/d\delta$が急激に減少する点をき裂進展開始点と仮定して，この点を臨界点とした．

3. 結果

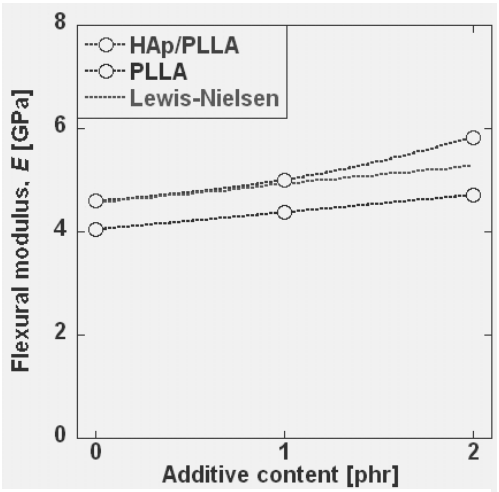
3点曲げ試験より評価したσ_fおよびEの結果をFig.1に示す．同図中には比較の為にPLLA単体にLTIを添加した試料の結果も合わせて示す．LTI添加量の増加に伴い，σ_fおよびEともに増加しており，LTI2phr添加でσ_fは約23%，Eは約27%増加する．また，PLLAと比較するとどの添加量においてもHApを分散させることでσ_fは低下し，Eは増加している．

このことからHAp分散による強度低下は改善することはできないが，LTIを添加することにより強度を改善することは可能であることが分かった．

粒子分散系複合材料の複合則としてLewisおよびNielsenらが提唱した式はHAp/PLLA複合材料の弾性率の結果とよく一致することが著者らの研究により明らかにされており，それは下記の式で表される．



(a) Flexural strength



(b) Flexural modulus

Fig.1 Flexural properties of HAp/PLLA composites.

$$\frac{E_c}{E_m}=\frac{1+ABV_f}{1-B\psi V_f},\quad A=\frac{7-5\upsilon_m}{8-10\upsilon_m},\quad B=\frac{E_f/E_m-1}{E_f/E_m-A} \tag{2}$$

ここで V_fおよび E_fは充填剤の体積含有率および弾性率であり，ν_mおよび E_mは母材のポアソン比よおび弾性率である．また，ψは最大充填率ϕ_mに依存し下記の式で表される．

$$\psi=1+\frac{1-\phi_m}{\phi_m{}^2}V_f \tag{3}$$

これより求めた Eの結果も Fig.1(b)に示している．上記の Lewis-Nielsen の式より求めた値は LTI の添加量が 1phr まではよく一致しているが，2phr になると大きく外れ，実験値の方が大きくなる．Lewis-Nielsen の式では界面相互作用が考慮に入っていないことを考えると 2phr で実験値が計算値より大きくなった理由としては LTI2phr 添加により HAp と PLLA の界面相互作用が大きくなり，また拘束を受ける界面有効厚さも大きくなったためと考えられる．

Fig.2 にモード I 破壊試験の結果より評価した J_{in}の結果を示す．同図中には PLLA 単体に LTI を添加した結果も合わせて示す．HAp/PLLA 複合材料に LTI を添加しさらにその添加量を増加させることで J_{in}は増加し，LTI2phr 添加で PLLA 単体の値よりも大きくなる．しかし，PLLA 単体に LTI を添加した結果と比較するとどの添加量においても HAp を分散させると J_{in}は低下している． 以上の結果より， HAp 分散による破壊靭性の低下は抑制できないが，LTI を添加することにより PLLA 単体程度までに改善することができることが分かった．

4. まとめ

本研究では HAp/PLLA 複合材料に LTI を添加し，LTI 添加が HAp/PLLA 複合材料の力学特性および破壊靭性に及ぼす影響について検討した．得られた結果は以下の通りである．

(1) LTI を添加することで曲げ特性は向上し，曲げ弾性率については LTI を 2phr 添加することで Lewis-Nielsen の式より求めた計算値より大きくなった．これより LTI を 2phr 添加することで HAp 粒子と PLLA の界面有効厚さが増加していることが示唆された．

(2) 破壊靭性として臨界エネルギーとしての J 積分値 J_{in}を評価した．LTI を添加することで J_{in}は改善されることが分かった．

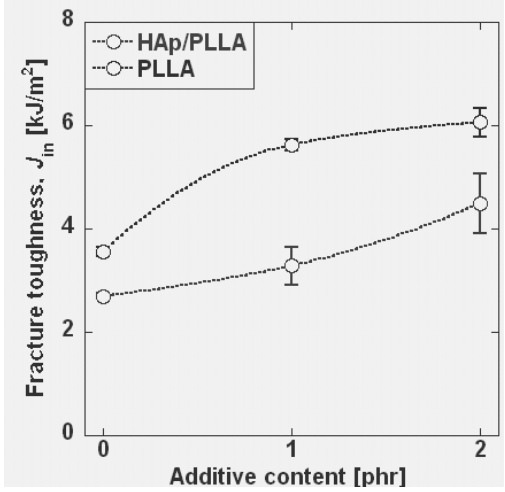


Fig.2 Mode I fracture properties of HAp/PLLA composites.

5. 研究機関

研究代表者：山形大学大学院　理工学研究科　助教　高山哲生
研究協力者：九州大学応用力学研究所　准教授　東藤貢

23 ME－19

下肢屈曲動作に基づく人工膝関節の安全性評価

愛媛大学大学院医学研究科　三浦裕正

緒　言

膝関節の屈曲状態を再現するための実験的研究として，膝関節シミュレータを用いた研究が行われている．しかし，軟組織の力学的役割が未だ完全には理解されていないため，その再現性については確立されていないのが現状である．また，シミュレータを用いて人工膝関節の安全性評価を試みる場合に，最も重要視される UHMWPE インサートの応力状態を計測することは，非常に困難である．一方，最近では，コンピュータ・シミュレーション技術の発展に伴い，複雑な 3 次元形状を成す構造体のモデル化が可能となり，人工膝関節の応力解析に応用されている．このような状況の下，コンピュータ上でバーチャルな膝関節シミュレータを構築することは，実験的シミュレータとの比較検討を可能にするという観点からも，人工関節置換膝の力学的研究において有用であると思われる．

そこで本研究では，バーチャル・膝関節シミュレータの基礎的モデルの構築を試みた．特に人工関節置換膝の解析において，境界条件と軟組織の力学モデルが屈曲や回旋等の基本動作と UHMWPE インサートの応力状態に及ぼす影響について調べることを目的とした．

解析方法

生体膝モデルは，CT 画像から作成した骨モデルと MRI 画像から作成した軟組織モデルを組み合わせることで作成した[6]．さらに，汎用 PS 型人工膝関節（Stryker NRG）の CAD データを用いて人工関節置換膝モデルへと発展させた．筋肉が屈曲と回旋動作に及ぼす影響を調べるために，大腿四頭筋のみのモデルと大腿四頭筋とハムストリングスの両者を考慮したモデルの 2 種類を作成した．大腿四頭筋のみのモデルを図 1 に示す．機械構造体の各部位と骨は剛体を仮定し，UHMWPE インサートは弾塑性体とした[7]．大腿四頭筋と四頭筋健は線形弾性体とし，側副靭帯は Maxwell 粘弾性体とした[8]．ハムストリングスは Hill の筋肉モデルを採用した．力学的境界条件として，図 1 に示すように股関節部に 300 N の荷重を鉛直下向きに作用させた．また，大腿四頭筋については，立位の状態では 0 N で最大 300 N となるような時間依存性を示す筋力を骨軸方向に作用させた．拘束条件として，足関節下方に位置するプレート裏面を完全に拘束した．

結果と考察

図２に解析終了時の膝関節部の状態を示す．大腿四頭筋のみのモデルでは，最終屈曲角度は 135°であり，15°の脛骨の外旋が生じた．一方，ハムストリングスを考慮したモデルでは，最終屈曲角度は 125°であり，9°程度の内旋が生じた．回旋の屈曲角度依存性を図３に示す．大腿四頭筋のみのモデルでは，60°から 110°まではわずかに内旋を示した後，130°まで急激に外旋が生じることがわかる．一方，ハムストリングスを付加したモデルでは，屈曲角度 10°から内旋が始まり，125°まで次第に増加していった．最終段階での UHMWPE インサート表面での相当応力分布を図 4 に示す．大腿四頭筋のみのモデルでは，post 面と外側 condylar 面のエッジおよびインサート前方部で高い応力集中が生じている．一方，ハムストリングスを付加したモデルでは，応力集中は低下し，Condylar 面では内外側ほぼ均等に応力が分布していることがわかる．Post 面での応力も低下している．今回のシミュレーション結果は，PS 型人工関節で置換した膝関節の回旋運動は，主に大腿四頭筋とハムストリングスの筋力のバランスで決定されることを示唆しており，本シミュレータモデルが，人工関節置換膝の動作状態のメカニズム解明の有用なツールとなることが期待される．

結　言

膝関節の動作解析実験で利用されている膝関節シミュレータをコンピュータ上で再現した，バーチャル膝シミュレータの構築を試みた．筋力としては，大腿四頭筋とハムストリングスを考慮した．PS 型人工関節で置換した膝関節の屈曲解析を行った結果，これらの筋力のバランスが回旋運動に強い影響を及ぼすことが示唆された．

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
三浦裕正	愛媛大学医学研究科	教授	研究代表者，臨床的考察
日垣秀彦	九州産業大学工学部	教授	動作解析
東藤　貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人，生体力学解析

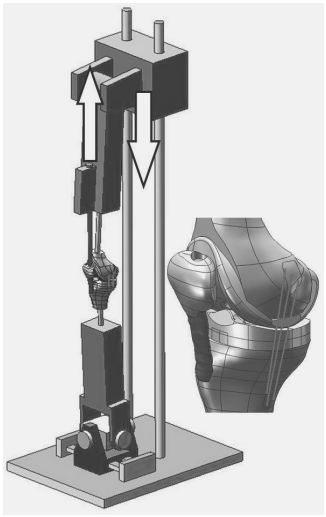
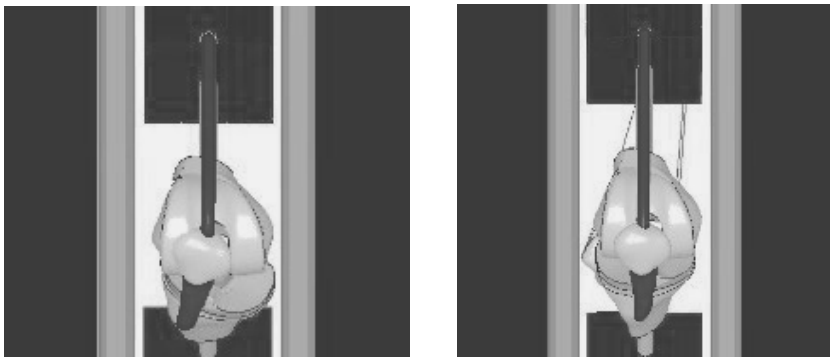


図１バーチャル・膝シミュレータモデル



(a) ハムストリングス無　　(b) ハムストリングス有

図２　最終屈曲位での回旋状態

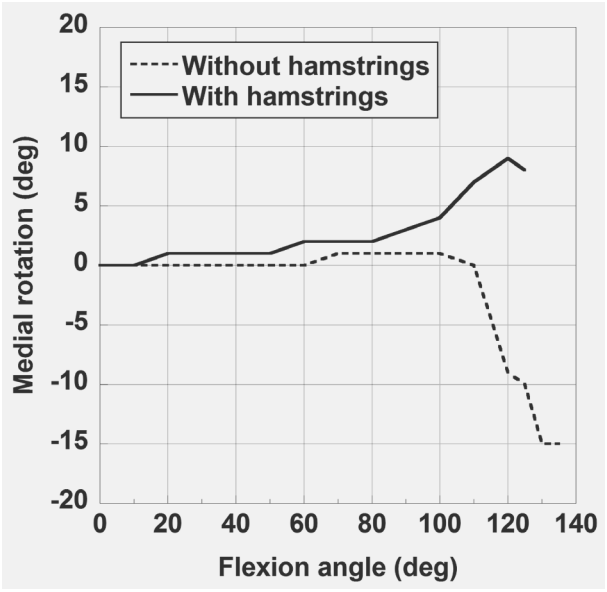
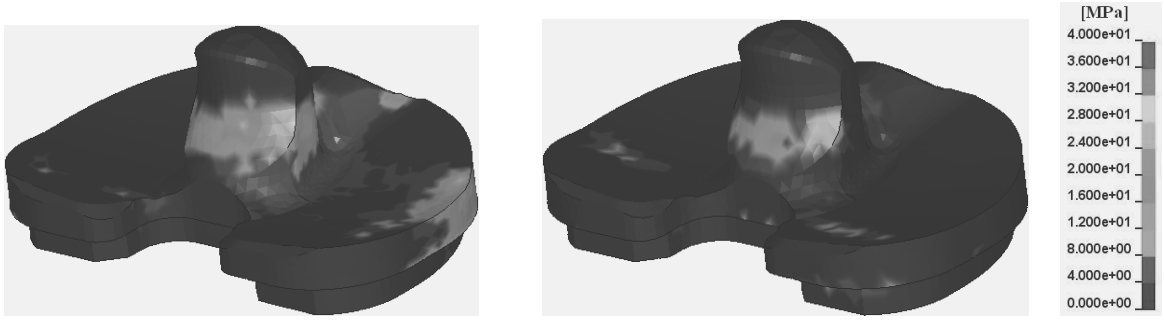


図３　回旋角度の屈曲角度依存性



(a) ハムストリングス無　　(b) ハムストリングス有

図４　UHMWPE インサートの相当応力分布状態

23 ME－20

船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻　橋本博公

研究目的

近年，化石燃料の枯渇問題や地球温暖化への関心の高まりを受けて，船舶分野においても省エネや環境負荷の低減が強く求められている．一航海あたりに長期間を要する海上輸送では，航行中に何らかの手段でエネルギーを回収することが期待されるが，船舶においては定速航行が航海の大部分を占めるため，自動車分野などで行われている減速時のエネルギー回生などはほとんど見込めない．また，風力や太陽光といった自然エネルギー吸収では，限られた甲板スペースのため発電容量が絶対的に不足する．そこで，航行時に巨大な船体を動揺させる波浪に着目し，本来であれば船体運動に与えられて造波エネルギーとなって消費されるエネルギーの一部を吸収するシステムを開発し，その効果・実現性について数値シミュレーション，模型実験などを通じて検証することを目的とする．

波浪エネルギー回収システムの概要

波浪によって引き起こされる船体運動としては、縦揺れが最も顕著であり、この運動を介した波浪エネルギー吸収システムを目指す。内部の水が自由に移動可能なU字型タンクを船舶に設置すると、タンク内の水は船体と波との相対運動に応じて長手方向に振動することとなる。この振動流中にウェルズタービンや衝動タービンを設置し、軸の回転運動から発電機を介して電気エネルギーを得るシステムを構築する。U字型タンクはバラストタンク内に設けるものと仮定し、タービンの回転軸はシールドの問題や発電ユニットのメンテナンス性を考慮して鉛直方向に設置する。

システム設計に関する基礎的検討

過去に前例のない新しい波浪エネルギー吸収であるため，具体的な設計には多くのモデルケースを事前に検討する必要がある．そこで九州大学応用力学研究所の末吉誠助教が開発してきた MPS 法（粒子法）と大阪大学が得意とする波浪中船体運動予測を組み合わせることで，波浪中船体動揺時の複雑な水管内流れを事前に把握することとした．

本研究では国内造船所の主力であり、バラスト状態での運航が見込まれるバルクキャリアーを対象とし、航行時の主要な出会い波周期に対して同調振動するU字型タンクの要目設計を行い、実際に塩化ビニール製のU字型タンク模型を製作した．

簡易強制動揺試験

製作したU字型タンクの片側上部に空気流の増速のために絞りを設け、その増速空気流中に2枚のウェルズタービンを直列に設置した。昨年度は水中にタービンを設置したが、今年度は実用化の観点から振動空気流を利用した発電を検討することとした。今回、U字型タンクの内径とタービン部の内径の比は250：75（単位：mm）とした。本来であれば内経比を更に大きくして空気流を増速したいところであるが、タンクに水を入れた場合の重量、ウェルズタービンの加工精度の制約からこれ以上の内径比では

模型の製作および実験の実施が困難であると判断した。U 字型タンクの片側に垂直方向に回転軸を設けたウェルズタービン部を連結した状態の写真を Fig.1 に示す。また、ウェルズタービン部を拡大した写真を併せて示す。

U 字型タンクに水を入れた状態にて、船舶の慣性モーメント計測に用いられるブランコに載せて固定し、人間がブランコの両側から概略の周期と振幅にて回転運動を与える簡易検証実験を実施した．振動周期はブランコに設置された周期カウンターを参考に概略調整した。タンク水の同調付近となる角周波数において 2 枚のタービンが回転することを確認したが、非常に低回転に留まり、同調周波数から外れるとタービンは回転しない結果となった．設置場所として想定している船舶のバラストタンクは非常に容量が大きいため、U 字型タンクの内径とタービン部の内径比を非常に大きくとることができると考えられるが、これを模型実験スケールで再現することは困難であり、本発電システムの検証実験としては昨年度に行ったようにタービンを水中に設置するスタイルが好ましいといえる．

まとめ

増速空気流中に設置したウェルズタービンを用いた波浪エネルギー吸収システムについて、塩化ビニール製の U 字型タンクを製作して，船体縦揺れ運動を模擬した簡易強制動揺試験を実施した。初期コスト、メンテナンス性に優れると考えられる振動空気流中でのウェルズタービンによる発電であるが、模型製作や実験実施の観点から内径比を大きくした場合の検証実験が困難であること、水と空気のエネルギー密度差や増速時の翼面積確保の観点から低効率に留まることが示唆された．今後は，ウェルズタービンあるいはより高効率な衝動タービンを水中に設置した発電システムについて、同様の強制動揺試験を実施するなどして、その稼働周波数帯や発電量について検証する予定である．

成果報告

特になし

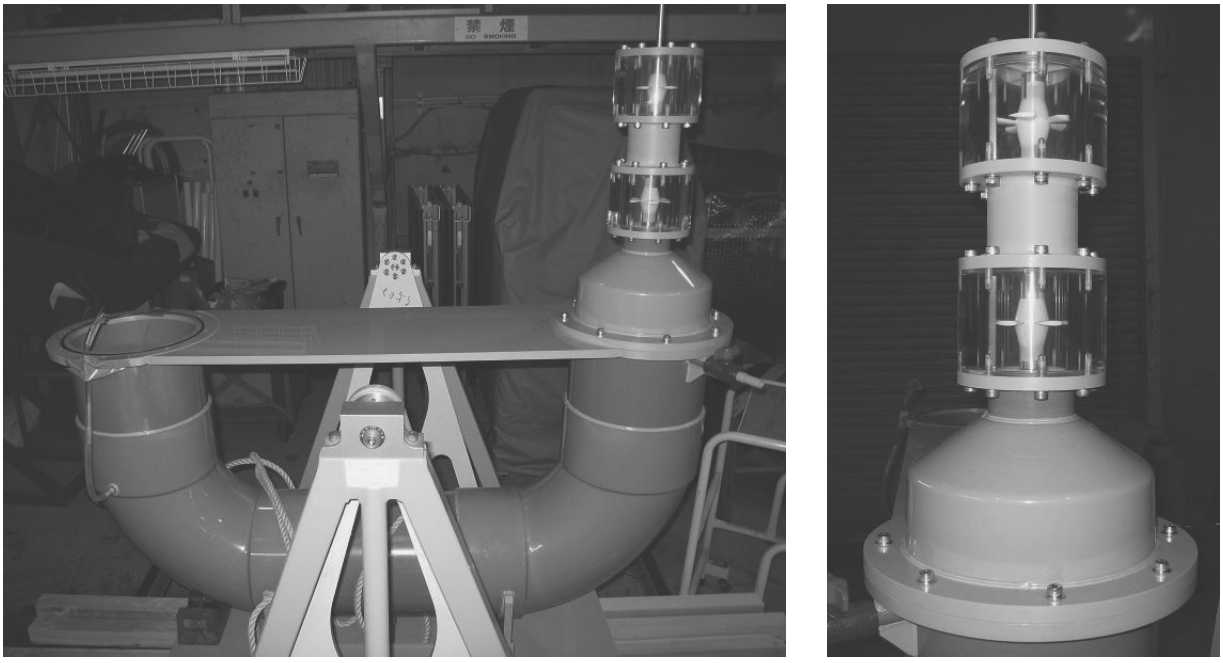


Fig.1 The experimental setup for forced motion tests (left) and the Well’s turbines (right)

風洞実験による回転するサッカーボール・ラグビーボールの空気力学特性実験

福岡工業大学　工学部　知能機械工学科　溝田武人

1.　研究の目的

揺れながら飛翔するサッカーボールについてニュースで頻繁に取り上げられることが多いが,既に本研究室でメカニズムは解明されている.しかし回転するサッカーボールについては世界中でも明確な空力特性が得られていない.

大型風洞を使って回転しているサッカーボールに加わる空気力の測定を行う方法を検討した.

(1)滑らかに回転するサッカーボールの制作

1)ウレタン発泡剤でボールを中実構造にする.

2)中空のボールの両端をピンで押さえて回転させる.

(2)ボール支持部の影響が少ないボール支持装置の開発

2.　実験装置

2・1　回転するサッカーボールの制作:ボールの両端をボールが変形しない程度にベアリング付きのピンで押さえ，ボールを回転させることで動バランスの安定化を図った.

2・2　サッカーボール支持装置:フレームの上部と下部にはサッカーボールに通したピアノ線を張る為,H型のフレームを設けている．フレームは回転できるように設計している。

3.　実験方法

3・1　実験方法(1):測定は大型風洞装置で風速0～20[m/s]の範囲を5[m/s]刻みで行った．サッカーボールの回転はコンプレッサーからエアーノズルを伸ばし，ノズルからのジェット流を当て回転させる.

3・2　実験方法(2):大型風洞装置で風速5～25[m/s]の範囲を2.5[m/s]刻みで行った.

4.　実験結果

4・1　実験結果(1):振動の信号が大きく読み取られており，精度の良い測定結果とはならなかった．抗力係数とレイノルズ数の関係にはFig.1のようにドラッグクライシスが発生していることが見てとれる.しかしこの実験データについては正確に求められたとは言い難いものなので，今後の参考とする.

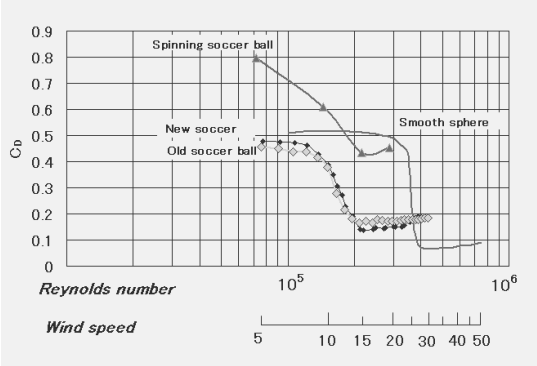


Fig.1 Drag force on soccer ball

4・2　風洞実験と発射実験の飛翔軌道の比較:風洞実験より得た空気力から飛翔軌道を求め，発射装置で発射した実際のボールの飛翔軌道と比較した.

5.　測定装置の検討

これまでの実験結果から実験装置のフレームによる影響が結果として大きく表れていることが分かった.またボールにピンを取り付けるとサッカーボール周りの空気の流れが変わるため,精度のよい実験結果として得られない.

そこで、ボールの周りに突起物を設けず，最小限のフレームに抑えるためにFig.2，Fig.3のような、ボール懸架装置と回転軸を挿入したボールを制作した。現在までの予備実験で懸架装置の3直交方向の直線性は非常に良いこと、他方向への干渉も少ないことを確かめている。中空ボールに回転シャフトを挿入して空気漏れが無く、静バランス、回転時動バランスも良いことも確かめている。

ロードセルは大型風洞装置の外（下方）に設置し，中空ボールの中心軸にベアリングを介してシャフトを通し，ピアノ線を通して取り付ける．ピアノ線は0.5[㎜]物を使用し，ボールに自由度を持たせる為，ばねを使って風洞装置の天井と床へ引っ張る．さらにボールにピアノ線を中心軸に通し，ロードセルに設置したフレームに張ることで力を測定する．

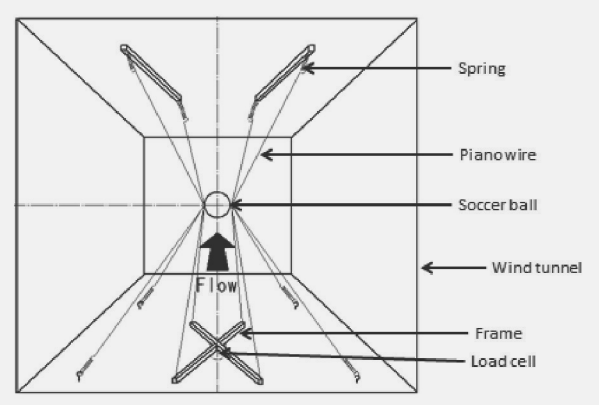


Fig.2 Set up image

Fig.3 Ball through the shaft

6.　結言

(1)サッカーボールをウレタン発泡剤で充填させ、シャフトの固定及びセットボルトを使用し重心を取ることを試みた．しかしボール内部のウレタンにはいくつか大きな空洞が発生しており、静バランスは取れても回転時の動バランスは正確に取ることが困難であった．

(2)回転時のマグナス力の測定をする為，フレームでボールを支持した．中空のボールをピンで支持することで回転による振動を抑え，マグナス力得ることができたが，ボール周りの流れに影響が出ているので改良を行う必要がある．

(3)発射装置で実際にサッカーボールを発射した時の軌道と,風洞実験の空気力から求めた軌道を比較した．

(4)中空ボールに回転軸を挿入し、空気漏れを工夫することにより、実験に耐えるボールの制作を完了した。
(5)新しくボール懸架装置を工夫し、周辺気流への影響を減らすこと、出力直線性、他方向への干渉も少ない、装置の完成を得た。

7.　今後の課題

(1) 検討した測定装置を九州大学応用力学研究所の大型風洞装置で測定する．
(2) ボールを回転させるためのジェット流の当て方検討

8. 研究業績

(1) 藤村龍平，黒木康平，内田雅彦，大畑雅也，安田晃，溝田武人 :弱回転サッカーボール軌道の魔球的変化に及ぼす空気密度の影響，シンポジウム:スポーツ･アンド･ヒューマン･ダイナミクス 2010，pp175-178，
(2) 藤村龍平，趙凌波，池田治人，溝田武人，大屋裕二，岡島厚 :風洞気流中で回転するサッカーボールの空気力の測定，シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011，pp27-30.

23 ME－22

風レンズ風車翼の空力設計法の開発

九州大学　大学院工学研究院機械工学部門　古川雅人

1.　緒言

風レンズ風車では，図１のとおり，ディフューザとつばを組み合わせた「風レンズ」（集風体）を翼車の外周部に装着することによって，翼車まわりに風を局所的に集中させる．コンパクト型の風レンズでも約２～３倍の風車出力の向上を実現することができることから，日本の風況に適した風車として注目されている．この風レンズ風車では，図２に示すとおり，風レンズのつば外周で流れが剥離し，その後方に剥離渦が形成される結果，つば後方の圧力が風車前方の大気圧よりも低下し，この圧力差で風車周囲の流れがディフューザ内に引き込まれることによって，集風効果が得られる．この集風効果，すなわち風レンズ内部へ流入する風量は風レンズ風車の空力設計において最も重要なパラメータであるが，集風効果が風レンズと翼車の両流れ場の干渉の結果決まることから，設計段階で集風効果を定量的に予測することは容易でない．また，風レンズ風車の場合，風レンズ内の内部流れと風レンズまわりの外部流れが混在すること，風レンズ後方で流れの剥離が発生すること，集風効果に伴う流入流線の曲率発生によって風レンズへの流入風速に大きな半径方向分布が現れることから，従来の風車よりも極めて複雑な流れ場が形成される．さらに，風レンズ風車では，翼作用（特にスパン方向の翼負荷分布）が風レンズの外部流れに大きな影響を与えるとともに，風レンズの外部流れ（特に風レンズ後方の剥離渦流れ構造）が風レンズの内部へ流入する風量に大きな影響を及ぼす．すなわち，風レンズの内部流れ場と外部流れ場とを連成して，風レンズ風車の空力設計を行うことが求められる．

以上のような特徴をもつ風レンズ風車に対して，従来の風車設計法を適用することには限界があり，高性能な風レンズ風車を開発するためには，従来の設計法にとらわれない斬新な発想に基づく空力設計法の新たな創出が不可欠である．そこで本研究では，風レンズ風車のための革新的三次元空力設計法を創出することにより，ベッツ限界を超越した高性能風車を実現することを目的とする．従来の風車設計法とは異なって，外部流れと内部流れとを連成させるという斬新な発想に基づき，まず子午面粘性流れ解析と翼の三次元逆問題設計から成る「風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法」を創出した上で，本設計法を適用した試作風車に対し，風洞による全体性能試験を実施して，本設計法の妥当性を検証した．

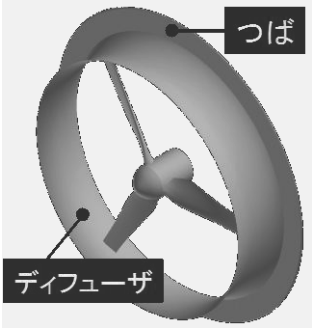


図１　風レンズ風車

2.　風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法

与えられた風レンズ形状に適した翼車を設計するための風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法を構築するにあたって，まず問題の定式化を行った．本翼車の設計スキームは，図３に示すとおり，子午面粘性流れ解析と翼の三次元逆問題設計から構成され，その両者について以下のとおり定式化を行った[(1)]．

子午面粘性流れ解析においては，子午面（r-z 面）内の軸対称かつ粘性流れを仮定するが，軸対称流れの仮定のもとで翼作用（翼負荷分布）を考慮するために，翼両面の圧力差に基づいた翼力（体積力）として翼作用をモデル化する．設計条件として与えられる風レンズの形状および翼負荷（角運動量）分布のもとに，翼力を体積力として付加した軸対称ナビエ・ストークス方程式を数値的に解いて，風レンズの内部流れと外部流れを連成して解析することにより，風レンズの集風量（風レンズ内部を通過する風量）および流入風速分布を求める．

翼の三次元逆問題設計では，風レンズで囲まれた内部流れ場において，上述の子午面粘性流れ解析で求まった風レンズの集風量と流入風速分布を流入境界条件とし，設計条件として与えられた翼負荷分布を翼面上の境界条件とする三次元の逆問題を構成することにより翼の形状を求める．この逆問題解法では，翼のキャンバー面を渦層で近似し，その束縛渦分布を翼負荷分布（周方向平均角運動量分布）から定め，渦層が誘起する流速ベクトルが翼面に沿って流れるという条件から翼の三次元形状を数値計算により求める．本逆問題解法においては，入口流れの非一様性および翼後縁から流出する随伴渦を考慮した翼の三次元設計が行えるという利点を有する．

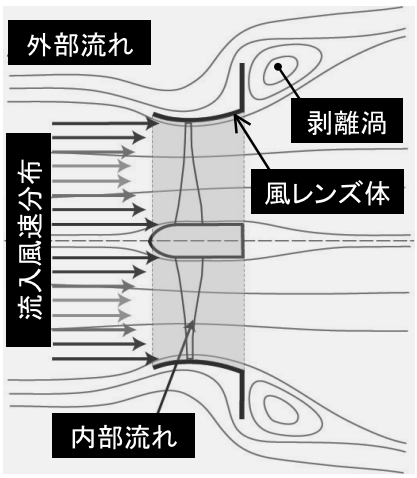


図２　風レンズ風車の流れ場

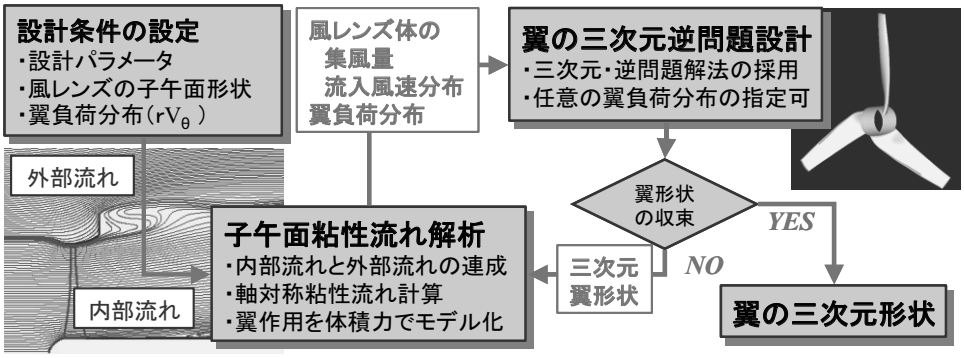


図３　風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法

3.　設計適用例

従来の設計法により設計および試作されるとともに，風洞実験によりその全体性能が既知である既存の風レンズ風車に対して，本三次元空力設計手法を適用した．この既存の風レンズ風車は, 翼枚数が 3 枚であり, 翼車の外径が 1000mm, 回転数が 670rpm である．動翼先端と風レンズ対とのすき間は 10mm である．近寄り風速を 10m/s として設計され，このときの設計周速比は 3.5 である．

また，本設計において採用した翼の空力負荷分布を図４に示す. 同図において, 翼軸は前翼から測ったコード方向距離, 縦軸は負荷を表している．翼のスパン方向空力負荷分布（図４(a)）は根元から約 70%スパン位置に最高値を持ち，翼の根元および先端部で負荷を低くとった．翼のコード方向空力負荷分布は，図４(b)に示すとおり，翼前縁で負荷なし（すなわち入射角ゼロ）とするとともに，10%コード位置に負荷ピークをもつ前方負荷型とした．

4.　実験方法

上述のような設計仕様のもとに本設計方法で設計した翼車を試作し，九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞を用いて試作機の空力性能を計測した．この風洞は 3.6m 幅×2m 高さ×15m 長さの測定部を有し，最大 30m/sec まで風速を任意に設定することが可能である．大気開放状態を模擬するため，風車設置位置に対して上流側 2m から下流側 4m までの風洞壁を取り外した状態で実験を行った．また，実験ではトルク計による軸トルク計測および熱線流速計と静圧管による流速・静圧測定をあわせて行った．

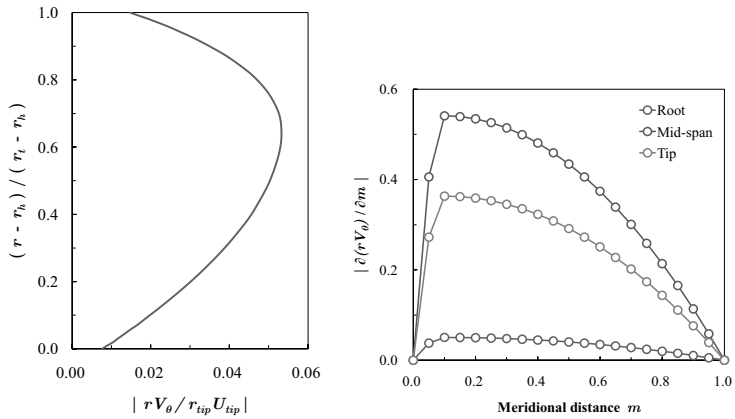
5.　性能試験結果

図５に試作した風レンズ風車の全体空力性能を示す．同図中の横軸は周速比を，縦軸は代表面積として翼車部の軸方向投影面積をとった出力係数 Cw を表している．図中の TURBOdesign 適用例と付されたシンボルが本設計法の適用結果である．また，同図には従来の設計法[(2)]を適用した結果もあわせて示している．

本研究により構築した風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法を適用することにより，従来設計と比較して，風レンズ風車の性能が著しく向上することがわかる．本設計方法は与えられた風レンズ形状に対する翼車の空力設計法であるが，本設計法を基にして翼車と風レンズの同時最適化を施すことによって，さらなる性能向上が期待される．

参考文献

(1)　Tabata, S., et al., Proc. of the 7th International Conference on Flow Dynamics (2010), pp.314-315.
(2)　井上雅弘，他，ターボ機械，vol.30,No.8 (2002),pp.46-51.



(a) スパン方向分布　　(b) コード方向分布

図４　翼負荷分布

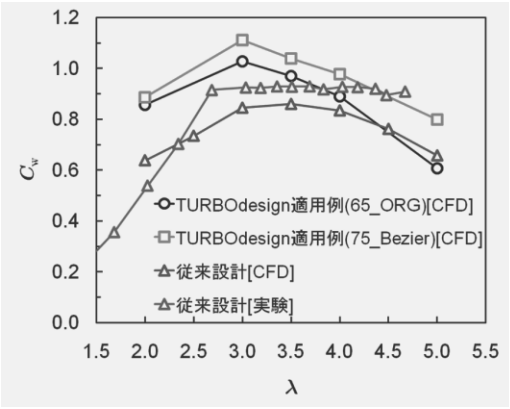


図５　本空力設計法の適用結果
（風レンズ風車の出力特性）

第４回九大グラフェン研究会
－グラフェンナノ構造の形成と物性－

２３ＭＥ－S1（継続）

報告書

開催日時：平成２４年1月２７日（金）１３：００～１７：３５
場所：九州大学大学院工学研究院　伊都キャンパス・ウエスト２号館９２１号室
代表者：田中 悟（九州大学大学院 工学研究科）
世話人：寒川義裕（九州大学 応用力学研究所 新エネルギー力学部門）

１．１３：００～１３：０５
はじめに　九大院工　田中　悟

２．１３：０５～１３：３５（３０分）
九大院工　田中　悟
「エピタキシャルグラフェンナノ構造の形成と物性」
究極の２次元電子系であるグラフェンは，基礎物性から電子デバイス応用まで非常に興味深い材料である．我々は傾斜 SiC 表面に特有に形成される周期的ナノファセット構造に着目し，それをテンプレートとしたエピタキシャルグラフェンナノ構造の形成を試みている．ナノメートル周期性やファセット等の表面ポテンシャルによるグラフェン（電子）物性の変調が予想され，新奇な物性を実験的に観察することを目的としている．本講演では特にグラフェンナノリボン，周期リップル，SiC 高面指数上のグラフェンの形成およびラマン分光特性，電子物性について最近の結果を報告する．

３．１３：３５～１４：１５（４５分＝発表３０分＋質問１０分）
NTT 基礎研　日比野　浩樹

「エピタキシャルグラフェン成長の基板面方位依存性」
SiC基板上に成長したグラフェンは、構造と物性が基板面方位に依存する。(0001)Si面にエピタキシャル成長した少数層グラフェンでは、電子構造が層数とともに大きく変化する一方、(000-1)C面に成長した多層グラフェンは、面内回転の乱れにより、多層であっても1層と同様の電子構造を取る。我々は、SiC基板面方位がグラフェン成長に及ぼす影響を解明し、所望の特性のグラフェンを得る目的から、(1-100)m面と(11-20)a面に成長したグラフェンの構造を調べたので報告する。

４．１４：１５～１５：００（４５分）
九大先導研　吾郷浩樹
「ヘテロエピタキシャル Cu 膜上に成長した単層グラフェンのドメイン構造と物性」
２次元電子系かつ高電子移動度特性を持つグラフェンは高周波電子デバイス用材料として注目されている。グラフェン膜の作製方法にはグラファイトの剥離法、SiC 熱分解法、CVD 成長法が挙げられる。本研究では CVD 成長法に着目し研究を進めている。これまでの研究により、CVD 成長を行う初期基板の品質がグラフェン単層膜の品質に影響を与えることが明らかとなっており、ここでは単一ドメインの高品質 Cu バッファ層を用いることでグラフェンの高品質化に成功している。本講演ではヘテロエピタキシャル Cu 膜上に成長した単層グラフェンのドメイン構造と物性の相関について報告する。

休憩　１５：００-１５：２０

５．１５：２０～１６：０５（４５分）
物質・材料研究機構 WPI-MANA　若林　克法
「グラフェンの電子物性におけるナノスケール・エッジ効果」
グラフェンのサイズがナノスケールになると、端の形状によって電子状態が大きな影響を受ける。ジグザグ端があると、エッジ状態がフェルミ準位近傍に現れ、端近傍で特異なスピン分極起きる可能性がある。そのため、系の磁気的性質が変化すると考えられる。また、エッジ状態によって、擬スピンの時間反転対称性が破れるため、グラフェンナノリボンでは完全伝導チャンネルによる特異な電子伝導機構が期待される。本講演では、グラフェンの電子伝導および磁性に現れる特異なナノスケール・エッジ効果について理論・計算の立場から議論する。

６．１６：０５～１６：５０（４５分）
東大物性研　中辻　寛

「微傾斜 SiC 上に成長したグラフェンのπ電子状態と異方性」
オンアクシス SiC(0001)基板上に熱分解法によりグラフェン膜を成長させる場合、層数制御が困難であることが知られている。一方、微傾斜 SiC 基板を用いることで層数制御が比較的容易になることも知られている。しかし、微傾斜基板上の分子ステップと平行方向および垂直方向でその構造異方性から電子移動度に変化が生じると推測される。本研究では ARPES を用いて微傾斜 SiC 基板上グラフェンのπ電子状態の方向依存性について解析を行ったので、ここではその研究成果を報告する。

７．１６：５０～１７：３５（４５分）
福井大学院工　橋本　明弘
「転写グラフェンにおけるエッジ及び欠陥構造のラマン散乱分光評価」
我々は、微傾斜 SiC 基板上のグラフェンの剥離および異種基板上への貼付け（転写プロセス）について研究を行っている。本研究では、SiO_2/Si 基板上への転写プロセスの最適化により、大面積のグラフェン/SiO_2/Si を作製することに成功した。本講演では、光学顕微鏡、ノマルスキー顕微鏡、顕微ラマン分光法により転写グラフェンの特性評価を行ったので、その詳細を報告する。

第３回　窒化物半導体結晶成長講演会

－窒化物半導体の応用・評価および結晶成長基礎－

２３ME-S２（新規）

2011 年 6 月 17 日～18 日
九州大学 筑紫キャンパス 総合研究棟 筑紫ホール

報告書

Timetable

6月17日（金）

		カテゴリー	講演者	所属	座長
13:00	13:10	Opening	三宅秀人	三重大学	
13:10	14:00	基調講演(PL1)	吉川明彦	千葉大学	寒川義裕（九大）
14:00	14:45	チュートリアル(TU1)	藤岡 洋	東京大学	
14:45	15:15	招待講演(IN1)	村上 尚ほか	東京農工大学	
15:15	15:40	休　憩			
15:40	16:10	招待講演(IN2)	西川 敦ほか	大阪大学	山口雅史（名大）
16:10	17:10	ショートプレゼン(P1)			
17:10	18:10	ポスター(P1)			
18:15	20:15	意見交換会			

6月18日（土）

		カテゴリー	講演者	所属	座長
09:00	09:45	チュートリアル(TU2)	福山博之	東北大学	岡田成仁（山口大）
09:45	10:15	招待講演(IN3)	赤坂哲也ほか	ＮＴＴ	
10:15	11:15	ショートプレゼン(P2)			
11:15	12:15	ポスター(P2)			
12:15	13:15	昼　食			
13:15	13:30	奨励講演(AW1)	藤川紗千恵ほか	理研	熊谷義直（農工大）
13:30	13:45	奨励講演(AW2)	小島一信ほか	京都大学	
13:45	14:30	チュートリアル(TU3)	播磨 弘	京都工芸繊維大学	
14:30	15:15	チュートリアル(TU4)	桑野範之	九州大学	
15:15	15:30	Closing	藤岡 洋	東京大学	

PL1 「窒化物半導体超薄膜量子井戸構造/短周期超格子の形成と SMART 太陽電池への展開
―InGaN 系窒化物半導体のエピタキシ制御から超薄膜ナノ構造光デバイス開発へ―」
吉川明彦
千葉大学大学院工学研究科、G-COE、VBL、JST-ALCA:SMART 太陽電池 PJ

TU1 「低温 PXD 成長技術を用いた高 In 組成 InGaN の素子応用」
藤岡洋[1,2]、田村和也[1]、太田実雄[1]、井上茂[1]、小林篤[1]
東京大学生産技術研究所[1]、JST-CREST[2]

IN1 「In 系窒化物半導体の MOVPE、HVPE 成長」
村上 尚[1]、富樫理恵[1]、稲葉克彦[2]、熊谷義直[1]、纐纈明伯[1]
[1]東京農工大学大学院工学研究院応用化学部門、[2]株式会社リガク X 線研究所

IN2 「OMVPE 法により作製した Eu 添加 GaN の発光特性及び赤色発光ダイオードへの応用」
西川 敦、寺井慶和、藤原康文
大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻

TU2 「サファイア窒化法の熱力学と窒化機構およびその展開」
福山博之
東北大学 多元物質科学研究所

IN3 「表面過飽和度制御による GaN ステップフリー面の形成」
赤坂哲也、小林康之、嘉数 誠
日本電信電話㈱ NTT 物性科学基礎研究所

AW1 「窒化物半導体を用いた深紫外 LED の開発」
藤川紗千恵[1,2]、平山秀樹[1,2]
[1]独立行政法人理化学研究所、[2]独立行政法人科学技術振興機構・CREST

AW2 「非極性面窒化物半導体の光学特性に関する理論的検討」
小島一信[1]、山口敦史[2]、船戸 充[1]、川上養一[1]、野田 進[1]
[1]京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻、[2]金沢工業大学 ものづくり研究所

TU3 「GaN 系窒化物半導体のラマン散乱分光法による評価」
-ラマン散乱の基礎からInNやAlGaNなどの最近の話題まで-
播磨 弘
京都工芸繊維大学

TU4 「結晶の皺(しわ み)を鑑る ― 電子顕微鏡による欠陥の解析 ―」
桑野範之
九州大学 産学連携センター

PL1

窒化物半導体超薄膜量子井戸構造/短周期超格子の形成と SMART 太陽電池への展開

―InGaN 系窒化物半導体のエピタキシ制御から超薄膜ナノ構造光デバイス開発へ―

吉川　明彦 [1,2,3,4]

[1]千葉大学大学院工学研究科、[2]G-COE、[3]VBL、[4]JST-ALCA:SMART 太陽電池 PJ

千葉市稲毛区弥生町 1-33

最初の疑問

ｃ面サファイア基板上へ成長する窒化ガリウムの極性はどのように決まるのであろうか？また、どのように制御できるであろうか？　窒化物半導体のエピタキシを始めた頃の疑問である。

当時、既に赤﨑先生らによるＭＯＣＶＤによる２段階成長技術は確立していた。しかし、無極性基板（サファイア）上への極性半導体（窒化物）成長の極性決定のメカニズムは不明で、それを議論したり、疑問に思う人さえほとんど見当たらない状況であったと言っても過言ではない。

このような基本的事項は、エピタキシ制御を志す者にとって、“基板から如何にその結晶情報を引き出し、それをエピ膜に伝えていくか”という点で、本来は極めて重要な問題であろう。次代を担う若手研究者は、どの程度の人がこの点を疑問に感じ、あるいは考えているであろうか？

また、経験豊かな研究者であっても、どのように自分自身の見解をお持ちであろうか？

結晶成長制御へのこだわり：ＭＯＣＶＤとＭＢＥの両手法併用と“その場観察”

ZnSe や ZnO などの II-VI 族化合物、および GaN,InGaN,InN などの窒化物半導体等、基本的にワイドギャップ半導体のエピタキシ制御の研究に長年携わってきた。この間、どのような半導体材料・結晶を扱う時も、ＭＯＣＶＤとＭＢＥを併用し、両手法での類似点・相違点に注意を払いながら、両手法ともに実時間・その場観察を駆使して成長フロントを観察・理解・制御することを心掛けてきたことが有効であった。特に、ＭＯＣＶＤにおいても、光プローブによって実時間・その場観察を駆使することにより、成長フロントを観察・理解・制御することが容易となった。

最初のＭＯＣＶＤ装置を自作してから 30 年程になるが、はじめは He-Ne や Ar イオンレーザ等の p 偏光レーザをブリュースタ角で入射させることで、原子一層レベルの変化を感度良く観察することから始め、次に手作りの反射率差分光ＲＤＳ、そして複数の分光エリプソＳＥ利用へと展開し、物理的に意味ある表面情報を得るように展開している。また、ＭＢＥの場合はＲＨＥＥＤやＣＡＩＣＩＳＳなどの手法と光プローブの併用で、物理的に意味の異なる表面情報・信号を同時に得られ、異極性面の効果や表面ストイキオメトリ解析など成長フロントの理解に有効である。

InN/InGaN/GaN 成長での表面ストイキオメトリ制御と InN/GaN 短周期超格子の作製

InN は他の窒化物と比べ平衡蒸気圧が高いことから、成長温度の低温化が必要である。一方、GaN 成長のためには成膜温度の可能な限りの高温化が必要である。また、InN と GaN は 11%の格子不整合がある。つまり、InN/GaN 系ナノ構造形成のためにはエピタキシ温度と格子定数の大きな不整合性が問題となる。さらに、エピタキシ温度の低温化に伴い In や Ga の液滴が表面に現れやすく、“化学平衡”のみでなく“反応速度”も考慮した表面ストイキオメトリ制御が必要である。

筆者らは、InN/GaN 系超薄膜量子井戸構造でコヒーレント成長が可能なことを実証した。また最近、InN/GaN 短周期超格子・擬似混晶へ展開したＳＭＡＲＴタンデム太陽電池を提案している。

本講演では、InN 基盤窒化物のエピタキシ制御からＳＭＡＲＴ構造作製までを一緒に考えたい。

TU1

低温 PXD 成長技術を用いた高 In 組成 InGaN の素子応用

藤岡洋[1,2]、田村和也[1]、太田実雄[1]、井上茂[1]、小林篤[1]
東京大学生産技術研究所[1]、JST-CREST[2]

１．はじめに

InGaN は短波長光素子の発光材料として広く用いられているが、そのバンドギャップは 0.65～0.34 eV と幅広いエネルギー領域をカバーしており、たった一つの材料系で紫外域から近赤外域までの発光素子を作製できる潜在的能力を持っている。また、この事実は InGaN が多接合太陽電池用材料としても極めて有望であることを示している。しかしながらこの混晶系は大きなミサビリティギャップを持ち、さらに分解温度も低いため、熱力学的平衡に近い条件下で結晶を成長するのは困難である。この様な困難を本質的に解決する手法として、高エネルギー原料粒子を用いた低温結晶成長を行うことが有効と考えらている。本発表では高エネルギー原料を間欠的に供給するパルス励起堆積（PXD）とよばれる手法群を用いて作製した高品質 InGaN 薄膜の素子応用について紹介する.

２．パルス励起堆積（PXD）による低温結晶成長技術の開発

パルス励起堆積（pulsed excitation deposition: PXD）法は，高エネルギービームをパルス的に原料ターゲットに照射することによって薄膜成長を行う手法の総称であり，励起源としてパルスレーザーを用いるパルスレーザー堆積（pulsed laser deposition:PLD）法, パルス電子線を用いるパルス電子線堆積（pulsed electron beam deposition:PED）法，パルスプラズマを用いるパルススパッタ堆積（pulsed sputtering deposition:PSD）法などが知られている. これらの手法の内，最も広く使われているのは PLD 法で，主に高温超伝導物質や ZnO といったオキサイドエレクトロニクス用の高品位酸化物薄膜をエピタキシャル成長させるための手法として発展してきた。最近ではこれらの手法は高品質窒化物薄膜の成長手法としても注目を集めている．PXD 法では反応容器内に基板と対向するように設置されたターゲットをパルス的に励起することによってターゲット表面の原料をアブレートする．このとき基板 - ターゲット間にはプラズマが瞬間的に生成し，原料は基板に高い運動エネルギーを持って入射する．パルスレーザーによってアブレーションされた原料粒子の運動エネルギーは熱エネルギーに比べはるかに大きいことが知られており成長温度が低くても基板表面上におけるマイグレーションが促進され，室温でも高品質窒化物薄膜のエピタキシャル成長が可能となる。これらの手法の内、装置スループットの高さという観点からは PSD 法が特に有利と考えられている。PSD 法は液晶テレビの製造などで大面積基板用の高スループット製造技術として実績のあるスパッタリング法の一種であり，従来から知られている半導体の結晶成長技術に比べ大幅なコストダウンが期待できる．低温結晶成長の具体例として，SiC 基板上に AlN 単結晶を室温で結晶成長した例について述べる．[文献 1] 通常窒化物半導体の結晶成長は高温で行うほど結晶品質が向上するため，1000℃程度の高温で行われるが，今回は PSD 法の優位性を示すため室温での結晶成長を試みた．図 1 には室温で成長した AlN 薄膜の表面 AFM 像

を示す．極めて低い温度で成長されたにもかかわらず，分子で構成された階段構造が明瞭に観察されることから，結晶成長が原子レベルで平坦な表面を維持しながら 2 次元的に進行していることが分かる．さらに，X線回折法を用いて結晶の品質を調べたところ 1000℃以上の高温で成長された結晶と全く遜色ないことが判明した. また、PSD 法を用いて GaN を成長し、その移動度を測定した結果、MOCVD 法や MBE 法で得られる膜とほぼ同等の値を持つことが分かった。[文献 2]　光学特性に関しても、PL の発光強度や線幅から判断する限り、他の手法と遜色の無い GaN 薄膜が成長できていると考えられる。

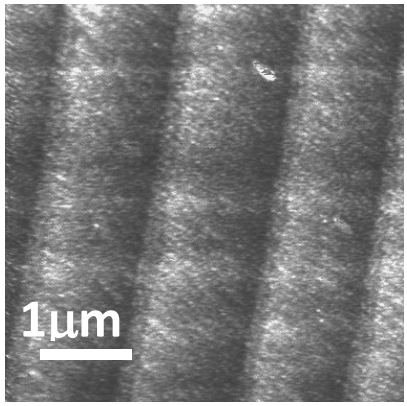


図 1　SiC 基板上に PSD 法で室温結晶成長したAlN 薄膜表面の AFM 像

3．PSD 法による InGaN の成長

PSD 成長の強みは、その高い装置スループットと低い成長温度にある。特に低温成長時には相分離反応が抑制されるため、高品質 InGaN の成長が容易となることが知られている。この特徴を活かして InGaN の低温成長を試みたところ、図 2(a)に示す様に、サファイア基板上で紫外～近赤外域にわたる室温での強い PL 発光が観測された。また、低温成長には基板と窒化物薄膜の界面反応を抑制するという効果もあり、従来の成長手法では利用ができなかった反応性の高い基板も使うことができる。この性質を利用して InGaN と格子ミスマッチの小さい ZnO を基板として用いたところ、より一層、結晶品質が向上することが分かった。[文献 3]

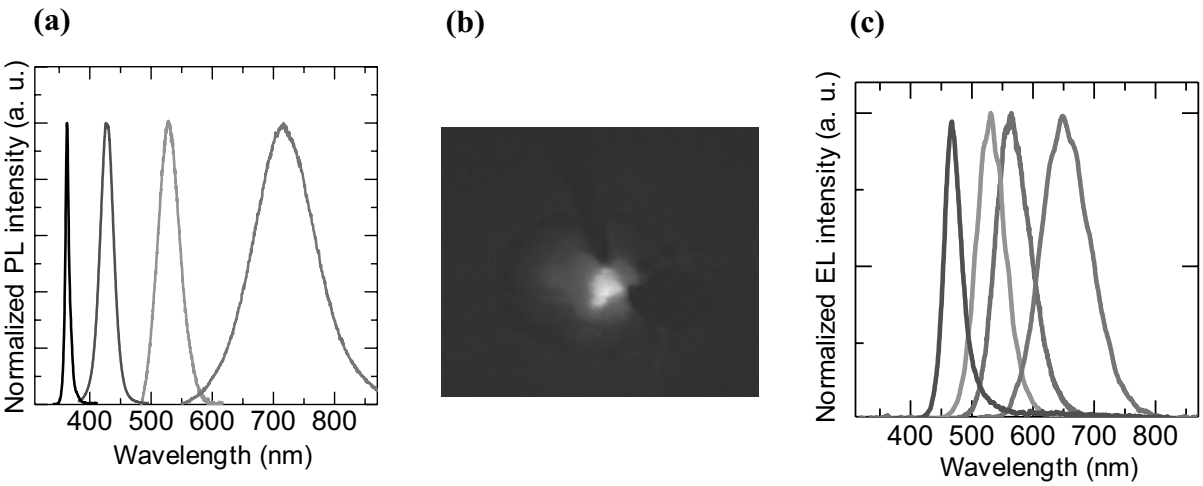


図 2　サファイア基板上に PSD 法で作製した InGaN の(a)室温 PL と(b) 試作した発光ダイオードからの発光の様子、(c) 試作した LED のスペクトル

４．PSD 法による InGaN 薄膜の素子応用

図２(b)に実際に PSD 法によってサファイア基板上に作製された InGaN 青色窒化物 LED の発光の様子を示す．この様な手法で作製した素子は従来の素子に比べて製造コストを大幅に低減できると考えられ，今後の実用化技術の開発が期待される．さらに、PSD 低温成長技術を用いれば、前節で示した様に、従来よりも In 濃度の高い高品質 InGaN 薄膜を成長することが可能である。この特徴を利用して、緑、赤といった長波長の LED を作製したところ図２(c)に示す様な EL スペクトルを確認できた。

この PSD 法を用いて既に太陽電池の試作例が報告されている．[文献 4]　InGaN のバンドギャップエネルギーは近赤外から紫外域までをカバーするので、タンデム型太陽電池を作製すれば、原理的には極めて高い変換効率が期待できる。また、InGaN は Si 基板上にも比較的容易に成長でき、バンドのエネルギーアライメントも優れているので結晶系 Si 太陽電池の窓電池として期待がもたれている。実際に、InGaN 層を用いて GaN とのダブルヘテロ太陽電池を作製したところ、正常な太陽電池動作が確認できた。In 組成を変えて太陽電池を作製したところ、In 組成の増加に伴い Voc は徐々に低下し、デバイスシミュレーションの結果と良く一致していた。これらの結果は InGaN がタンデム太陽電池用材料として高いポテンシャルを持っていることを示している。

５．低温成長技術を用いた窒化物素子の新しい展開

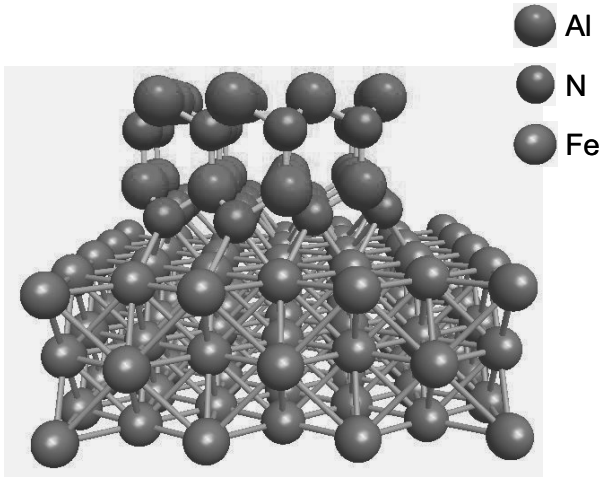
これまで窒化物半導体素子はサファイアや SiC と言った高価で固いバルク単結晶ウェハーを出発材料として用いてきた。しかしながら、PSD 法による低温成長技術を用いると、基板と窒化物薄膜との界面反応が抑制できるため、いままで利用されてこなかった反応性の高い基板の利用が可能となる。ここでは、窒化物素子の新しい展開の一例として低価格の大面積結晶用基板について考える．製造コストを低減するためには，ガラス基板やポリマーフィルムといった安価な基板を利用することが望ましい．しかしながら，これらの材料はアモルファスであるため，結晶性の材料を成長するために必要な長周期結晶構造情報を有していない．中・長周期構造を持つ低コストの結晶性基板材料としては金属板の利用が考えられる．一般に金属板は微小の結晶粒（グレイン）の集合体から成る多結晶であり，また，半導体との反応性も高いので結晶成長には適さないと考えられてきた．しかしながら金属のグレインは圧延や熱処理を施すことにより容易に巨大化することができ，さらに低温成長技術を用いれば，半導体単結晶を成長できる可能性が無いとはいえない．我々は実際に巨大なグレインを持つ金属箔上への半導体の低温成長を試みた．これまでに，銅やニッケルといった fcc(面心立方)構造金属箔の(111)面上や，鉄やモリブデン，タンタルといった bcc(体心立方)構造金属箔の(110)面上，さらにはルテニウム，ハフニウムなどの hcp(六方細密充填)構造金属箔の(0001)面上に窒化物半導体の結晶成長が試され，パルス供給による低温成長技術を用いると半導体結晶成長が可能となることがわかっている．[文献 5-9]　ここで，fcc，bcc，hcp 全てにおい

て最密結晶面が利用されているのは，最密面が化学的に安定で半導体との反応性が低いためである．図３のに窒化アルミニウム薄膜を、bcc 構造を持つ Fe (110)面上に成長した場合の界面の原子配列を示す．

金属以外の低コスト基板としてはマイカやポリマー焼結グラファイトシートといった２次元性物質にも期待ができ，実際に結晶成長が可能である．[文献 10] 一般に単結晶ウェハー上に半導体薄膜を結晶成長するためには，ポリッシングや表面酸化膜除去などの複雑な前処理が必要であるが，これらの２次元性物質は表面が化学的に安定で，原子レベルで平坦なため，ラッピングや成長前処理不要の低コストな結晶成長が実現できる．また成長後の基板の剥離も容易なため，繰り返し同じ基板で結晶成長ができるというコスト面での利点もある．

図４に圧延した巨大グレイン金属基板とマイカシート，ポリマー焼結グラファイトシートの写真を示す．これらの低コスト大面積基板は一般には格子定数が半導体材料と大幅に異なり，結晶欠陥の発生などの点でバルク単結晶半導体ウェハーに比べ不利と考えられる．しかしながら窒化物半導体などの分野では格子定数が大幅に異なる材料上に発光ダイオード（LED）や高電子移動度トランジスタ（HEMT）が現実に作製・市販されており，材料系を選べば，ある程度受け入れられるものと考えられる．また，前述したとおり，これらの基板は一般に半導体との反応性が高く通常の結晶成長温度（1000℃程度）では良質な薄膜を得ることができないが，低温結晶技術を用いれば半導体/基板界面での反応を抑制できることがわかっている．上述の低コスト大面積基板と PSD 法を組み合わせれば，安価な大面積無機結晶性半導体素子が実現すると考えられる．さらに，低コスト大面積結晶基板上に形成した半導体素子をガラス板やポリマー，セラミックスをいった材料に転写することによって，これまで構造材料としてしか利用されてこなかった物質に演算，記憶，通信といった無機結晶半導体素子の知能を付与することが可能になる．図５にこの素子転写プロセスの工程フローを示す. この図の⑤に示す写真は実際に金属基板上に成長した単結晶 GaN 薄膜をポリマーフィルム上に転写した例である．このポリマー上に転写した単結晶半導体薄膜は極めてフレキシブル（柔軟）であり，無機単結晶半導体素子の硬い理由が，単結晶半導体ウェハーが厚いためであることが良くわかる．この転写技術を用いると、将来、図６のイメージ図に示す様な軽くてフレキシブルなエレクトロニクスが実現できるものと期待される．

図３ AlN を Fe(110)基板上に成長したときの界面の原子構造



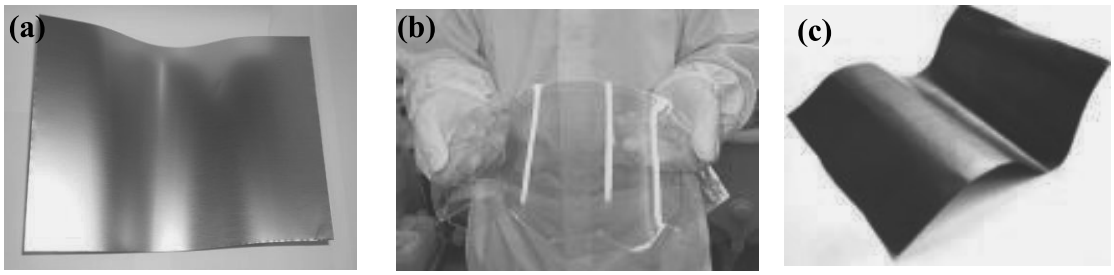


図４ 低コスト結晶成長用基板 (a)圧延した巨大グレイン金属基板，(b)マイカ板，(c)ポリマー焼結グラファイトシート

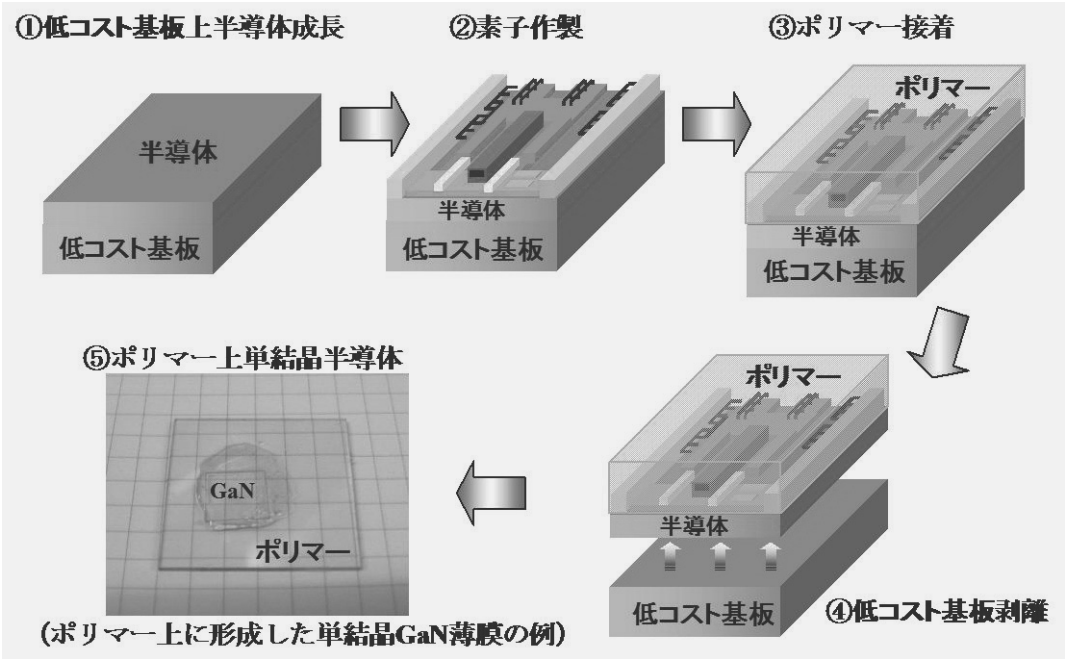


図５ 低コスト基板からの半導体薄膜転写プロセス

図６　未来の軽量フレキシブル素子のイメージ図

６．まとめ

今日の情報通信社会は多数の単結晶半導体素子を組み合わせることによって構築されている．通常これらのエレクトロニクス素子は単結晶ウェハーをリソグラフィー技術などを用いて加工することによって製造されているが，単結晶ウェハーの製造は一般に高温を要し，また，素子製造工程も複雑であるため，単位面積あたりの素子の価格は極めて高い．従って，実際に利用する場合は細かく切った素子チップを放熱性の高いパッケージにマウントして利用されている．一方,今回紹介した PSD 法と大面積基板を利用すれば，従来型の単結晶半導体では実現不可能なユニークな大面積・フレキシブル・軽量素子を作成できることとなる．さらに，一旦低コスト大面積結晶基板上形成した無機結晶性半導体素子をガラス板やポリマー，セラミックスをいった材料に転写することによってこれまで構造材料としてしか利用されてこなかった材料群に演算，記憶，通信，発光・表示，発電といった高性能無機半導体素子の知能を付与することが可能になる．この様に大面積フレキシブル無機単結晶半導体デバイスを実現する道筋は徐々に明確になってきた。

[文献]

1. K. Sato ほか, Appl. Phys. Express 2 011003 (2009)
2. 丹所昂平ほか，第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿 27a-BY-7(2011).
3. 玉木啓晶ほか，第 58 回応用物理学関係連合講演会予稿 26p-BY-10(2011).
4. 井上 茂ほか，第 71 回応用物理学会学術講演会予稿 15p-B-12(2010).
5. S. Inoue ほか, Appl. Phys. Lett. 88, 261910 (2006).
6. T-W Kim ほか, Appl. Phys. Lett. 88, 121916 (2006).
7. S. Inoue ほか, Appl. Phys. Lett. 91, 201920 (2007).
8. S. Inoue ほか, Appl. Phys. Lett. 91, 131910 (2007).
9. K. Okamoto ほか, Appl. Phys. Lett. 93, 251906 (2008).
10. N. Matsuki ほか, Solid State Communications, 136, 338 (2005).

IN1

In 系窒化物半導体の MOVPE、HVPE 成長

村上　尚[1)]、富樫理恵[1)]、稲葉克彦[2)]、熊谷義直[1)]、纐纈明伯[1)]

[1)]東京農工大学大学院工学研究院応用化学部門

[2)]株式会社リガク X 線研究所

InN をベースとする In 系窒化物半導体は、可視から近赤外領域の受光発光デバイスのみならず、高速電子デバイス材料として非常に魅力的な材料である。この10年の間に分子線エピタキシー(MBE)による InN 結晶の高品質化が実現し[1)]、近年ではP型伝導制御技術も一層の進展が見られる[2)]。有機金属気相エピタキシー(MOVPE)においても、加圧成長による成長温度の高温化[3)]や白金触媒を用いたアンモニア分解促進[4)]等の成長技術によりInN結晶の高品質化が実現してきている。我々のグループでは、ハライド気相エピタキシー(HVPE)および MOVPE による InN 成長の研究を長年行ってきており、三塩化インジウムを III 族原料に用いた HVPE によりInドロップレットを含まない厚膜 InN 成長[5)]や、MOVPE による様々な面方位を有する GaAs 基板上の InN 成長の検討を行ってきた。特に、成長する InN 結晶の極性に着目し、基板の極性を利用した極性制御や成長雰囲気中の水素キャリアガスの影響についての検討を行い、InN の各極性面の成長メカニズムの提案を行ってきた[6,7)]。最近では、GaAs(110)基板上半極性 InN 成長について、成長温度が結晶配向性に与える影響を検討し、X 線(Rigaku, SmartLab)による極性解析を行っている。

一方、GaN との混晶半導体である $In_xGa_{1-x}N$ は発光デバイスとしてのポテンシャルは非常に高いものの、均一な混晶の作りやすさの目安となる相互作用パラメーターが大きいため組成不安定領域が現れること、格子不整合に基づく高 In 組成 InGaN の結晶性の低さ等、様々な問題がある。これらの問題を解決する一つのアプローチとして、高品質の厚膜InGaN結晶の作製が挙げられる。面内で組成均一かつ高結晶性のInGaN厚膜が得られれば、未踏領域の発光波長を有する光デバイスや太陽光スペクトルの大部分を吸収可能な太陽電池の実現に大きく貢献できるものと考える。我々のグループでは$GaCl_3$、$InCl_3$およびNH_3を原料分子に用いたトリハライド気相エピタキシー(THVPE)による InGaN 三元混晶の原料生成反応および成長反応の解析を行い、成長速度および組成制御と成長条件の関係を明らかにしてきた。その結果、800℃以上という高温下においても、組成均一な InGaN 成長が可能であることを見出し、このことは成長温度の増加による結晶の高品質化の可能性を示唆しており、本結果を基に InGaN-THVPE 成長装置の構築を行い、実証試験を行っている。

本発表では、上述したトピックの中から GaAs(110)基板上半極性 InN 成長および InGaN の THVPE 成長の熱力学解析について紹介する。

[参考文献]

1) Y. Nanishi, Y. Saito, T. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 2549.
2) A. Yoshikawa, X. Wang, Y. Ishitani, A. Uedono, Phys. Stat. Sol. A **207** (2010) 1011.
3) Y. Zhang, Y. Liu, T. Kimura, M. Hirata, K. Prasertusk, S. Ji, R. Katayama, T. Matsuoka, Phys. Stat. Sol. C **8** (2011) 482.
4) K. Sasamoto, K. Sugita, A. Hashimoto, A. Yamamoto, J. Cryst. Growth **314** (2011) 62.
5) Y. Kumagai, J. Kikuchi, Y. Nishizawa, H. Murakami, A. Koukitu, J. Cryst. Growth **300** (2007) 57.
6) H. Murakami, K. Eriguchi, J. Torii, H.-C. Cho, Y. Kumagai, A. Koukitu, J. Cryst. Growth **310** (2008) 1602.
7) R. Togashi, T. Kamoshita, H. Adachi, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, Phys. Stat. Sol. C **6** (2009) S372.

IN2

OMVPE 法により作製した Eu 添加 GaN の発光特性及び赤色発光ダイオードへの応用

西川 敦，寺井 慶和，藤原 康文
大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻

１．はじめに

窒化物半導体はワイドギャップを有し、青色や緑色発光ダイオード（LED）構成する半導体材料として実用化され、街頭で見かけられるような大画面フルカラーLED ディスプレイなどに既に応用されている。この窒化物半導体を用いて、さらに赤色 LED が実現すれば、同一材料による光の三原色発光が揃うため、半導体微細加工技術を生かしたモノリシック型高精細 LED ディスプレイや LED 照明などへの応用が期待でき、現在、精力的に研究が行われている。

一般に GaN 系材料を用いた発光色制御には $In_xGa_{1-x}N$/GaN 量子井戸構造の In 組成を制御する手法が試みられてきた。赤色発光を実現するためには、高 In 組成を有する $In_xGa_{1-x}N$ 混晶の作製が必要となるが、下地層となる GaN 層との格子不整合度が増大するため、$In_xGa_{1-x}N$ 混晶の結晶性劣化および相分離が生じ、さらにピエゾ電界効果によって電子とホールの発光再結合確率が低下するため、発光効率が低下するという問題に直面している。これに対し、我々は GaAs を母体材料とした希土類添加半導体研究の知見を活かし、可視光を透過可能であるという GaN のワイドバンドギャップに着目し、GaN 中に添加された希土類イオンによる発光色の制御を提案している[1]。特に、ユウロピウム（Eu）イオンは 3 価の状態で赤色発光領域に励起準位を有するため、GaN を用いた赤色発光材料の発光中心として有望である。

Eu 添加の手法として、これまでの研究の多くはイオン注入法や分子線エピタキシャル(MBE)法によって行われてきた[2-4]。これらの試料からは紫外光照射によるフォトルミネセンスが 621nm 付近に得られており、GaN 母体材料から Eu イオンへのエネルギー輸送による発光が可能であることが

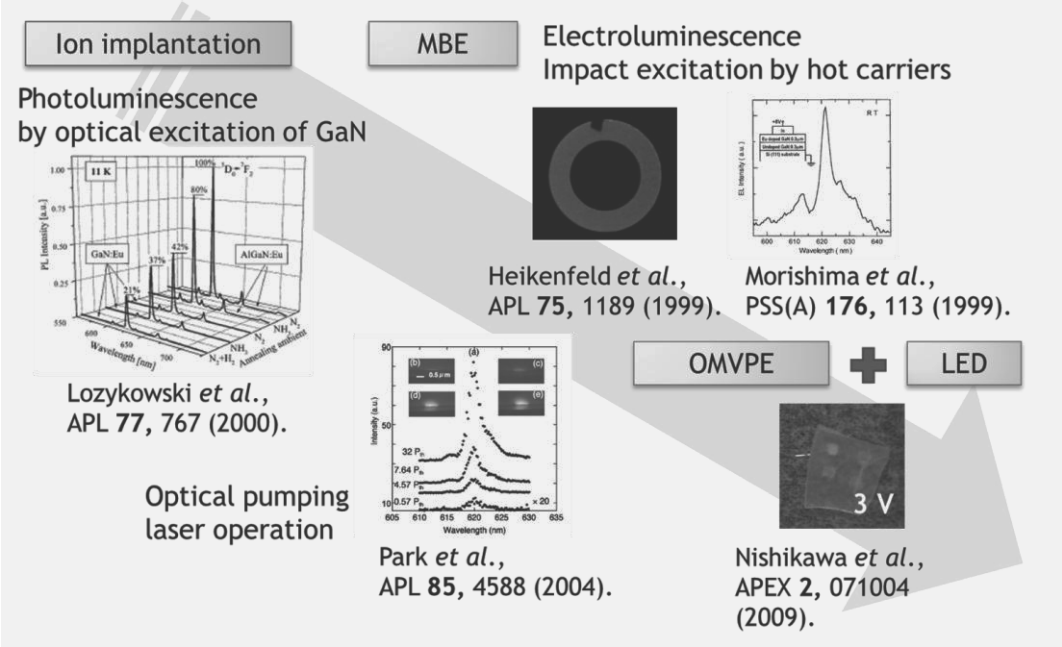


図 1. Eu 添加 GaN 研究の進展

実証されている。Eu イオンからの発光は 4f 殻内遷移に起因するため、発光線は鋭く、発光波長は温度にほぼ依存しない。また、光ポンピングによるレーザ発振が報告されており[5]、希土類元素を用いたレーザ光源への期待が高まっている。しかしながら、GaN に添加された Eu^{3+}イオンからの赤色発光は主に紫外光や電子線の照射による光励起、または数十ボルトの高電圧印加による衝突励起機構を利用した「無機 EL」として確認されるに留まっていた[2,3]。

希土類添加窒化物半導体のデバイス応用には、窒化物半導体の pn 伝導型制御などのデバイス構造作製技術と希土類添加技術の融合が必須である。この点において、発光デバイス作製に広く利用されている有機金属気相エピタキシャル（OMVPE）法が Eu 添加デバイス作製手法として最適である。OMVPE 法による Eu 添加 GaN (GaN:Eu)の作製には反応管への Eu 有機原料の供給が鍵を握る。Eu 有機金属原料は飽和蒸気圧が低く、成長に十分な供給量を得るためには配管・バルブ類などを高温に維持する必要がある。我々は Eu 有機原料供給系を最適化することによって、OMVPE 法による Eu 添加 GaN 成長に成功し、世界に先駆けて室温赤色 LED 発光を実現した[6,7]。しかし、20 mA 動作時の光出力は 1.3 μW と低く、更なる発光強度の増大が必須である。本発表では LED の輝度向上を目指し、OMVPE 法により作製した Eu 添加 GaN の発光特性及びデバイス特性について報告する[8,9]。

2． OMVPE 成長条件

試料の作製は c 面サファイア基板上に行い、III 族原料、V 族原料、Eu 有機原料にはそれぞれトリメチルガリウム(TMG)、アンモニア(NH_3)、$Eu(DPM)_3$= [$(C_{11}H_{19}O_2)_3Eu$]を用いた。とくに Eu 有機原料は飽和蒸気圧が低く、原料の供給が非常に困難である。これまで我々は Eu 供給量の増加が見込まれ減圧（10 kPa）条件下にて試料を作製してきた

が、母体材料となる GaN の結晶性向上には大気圧成長が有利であるため、今回、Eu 添加 GaN を大気圧（100 kPa）にて成長した。作製した試料構造はサファイア基板上に低温 GaN バッファ層を 30 nm、無添加 GaN 層を 1.7 μm 積層したのち、GaN:Eu 層を 400 nm 積層し、無添加 GaN キャップ層を 10 nm 積層したものである。発光特性評価としてフォトルミネセンススペクトル(PL)測定及びエレクトロルミネセンス(EL)測定を行なった。PL 測定では、励起光源として He-Cd レーザー（励起波長 325 nm）を用い、CCD を用いて検出した。Eu 濃度の同定には二次イオン質量分析(SIMS)測定を行なった。

３．フォトルミネセンス特性

図 2 に成長圧力 10 kPa 及び 100 kPa にて作製した試料の室温 PL スペクトルを示す。両試料ともに、発光スペクトルには Eu イオンの 4f 殻内遷移に起因した鋭いピークが観測された。図 2 から明らかなように 100 kPa にて作製した試料は発光強度増大が観測され、ピーク強度で 4 倍、積分強度で 10 倍強く光ることがわかった。この発光強度増大の起源として、(1) 発光中心である Eu^{3+}数の増大、(2) Eu 周辺局所構造の変化による発光遷移確率の増大、(3) GaN 母体材料の結晶性向上による Eu イオンへのエネルギー輸送効率の増大が挙げられる。そこで、両試料について SIMS 測定を行い、添加 Eu 濃度の同定を行った。その結果、興味深いことに 100 kPa にて作製した試料の Eu 濃度（$3x10^{19}$ cm^{-3}）は 10 kPa にて作製した試料（$7x10^{19}$ cm^{-3}）と比較して、約 1/2 程度減少していることがわかった。つまり、添加されたすべての Eu が発光に寄与しているのではなく、発光に寄与する Eu 量は成長条件に依存することを示す。次に、発光遷移確率の増大を調べるため、低温（10 K）にて発光寿命測定を行った。10 K においては非輻射再結合の影響を無視することができるため、発

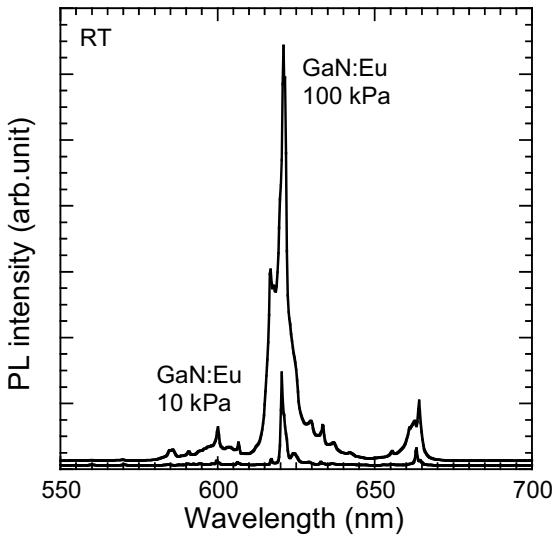


図 2　成長圧力 10 kPa 及び 100 kPa にて作製した試料の室温 PL スペクトル

光寿命測定を行うことによって、発光遷移確率を評価することができる。測定の結果、発光寿命は両試料ともに同定度（250~300 μs）であり、成長圧力の変化によって周辺局

所構造は大きく変化しないことがわかった。最後に母体材料の非輻射再結合によるエネルギーロスの影響を調べるため、PL スペクトルの温度依存性を測定した。測定温度を低下させると、図 3 に示すように、発光ピークの先鋭化及び強度増大が観測された。発光強度の温度消光に関して、100 kPa にて作製した試料は 10 kPa にて作製した試料と比較して、1/2 程度であった。これは GaN 母体材料の結晶性が向上したことにより高温においても欠陥などによる非輻射プロセスが抑制され、GaN 母体材料から Eu へのエネルギー輸送が効率的に行われていることを示す。また、非輻射再結合の影響をほぼ無視できる 10 K においても 100 kPa にて作製した試料は 5 倍強い発光示すことから、成長圧力を制御することにより発光に寄与する Eu 数が増大していることがわかった。以上により、大気圧成長によって Eu 高輝度発光が実現できることがわかった。

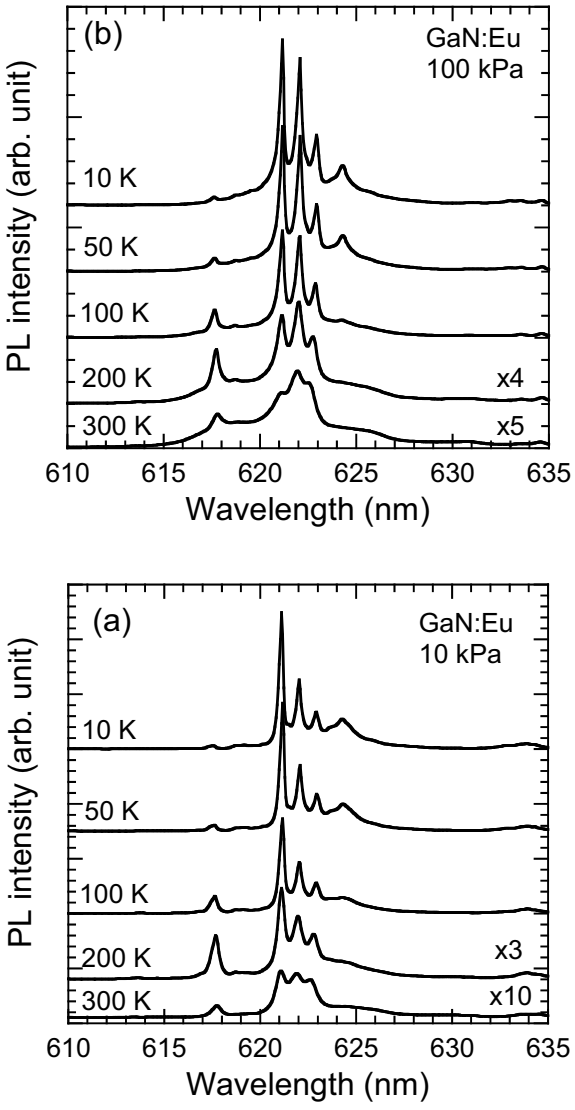


図 3　(a) 10 kPa、 (b) 100 kPa にて作製した試料における PL スペクトルの温度依存性

４．エレクトロルミネセンス特性

成長圧力による発光強度増大がデバイス特性に与える影響を調べるため、成長圧力 10 kPa 及び 100 kPa にて作製した GaN:Eu 活性層を用いた LED の EL スペクトルを測定した[8,10]。ここで、GaN:Eu 活性層の膜厚は 300 nm とした。図 4 に注入電流 20 mA 時の室温 EL スペクトルを示す。電流注入によっても、Eu イオンの 4f 殻内遷移に起因した鋭いピークが観測された。Eu 成長圧力を 100 kPa とすることにより、活性層の発光効率が増大したため、EL 発光強度は 10 kPa で作製した試料と比較して 10 倍の強度増大が観測された。積分球を用いて、光出力を測定したところ、20 mA 動作時の光出力は 17 μW と 10 kPa にて作製した GaN:Eu を活性層とする LED と比較して、10 倍超の高輝度化に成功した。

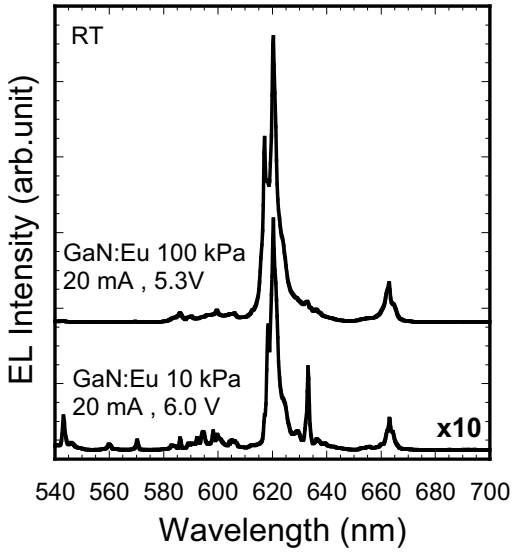


図 4　成長圧力 10 kPa 及び 100 kPa にて GaN:Eu 活性層を作製した LED の室温 EL スペクトル

次に更なる高輝度化を実現するため、GaN:Eu 活性層厚を 300 nm から 900 nm まで変化させ、活性層に含まれる Eu 数を増大させることによる発光強度の増大を目指した。20 mA 印加時の EL スペクトルを測定した結果、スペクトル形状はほぼ同一のまま、発光強度の増大が観測された。Eu イオンによる発光は母体材料である GaN で生成した電子・正孔対より輸送されるエネルギーによって生じるため、上述した結果は活性層に含まれる Eu 数によっても発光強度が律速されていることを示す。次に、各活性層膜厚における光出力及び外部量子効率の注入電流依存性を図 5 に示す。図 5 に示すように活性層膜厚の増大により光出力の増大が観測された。膜厚 900 nm とした試料において素子抵抗の増大による熱が発生するため、高電流領域において光出力の減少が観測されたが、

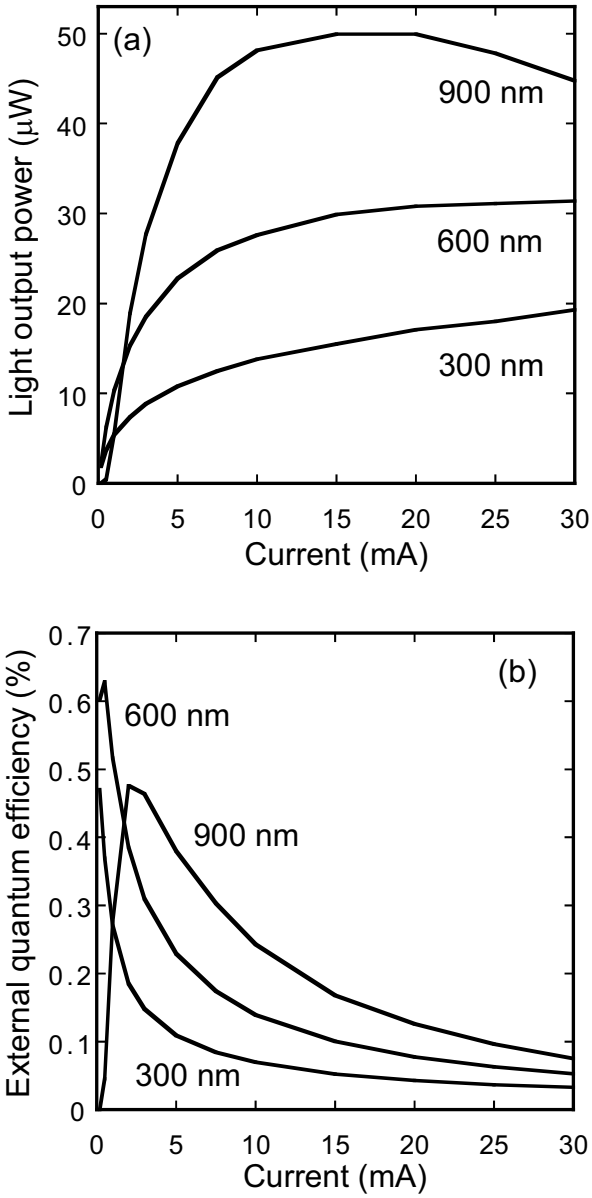


図 5　各活性層膜厚における(a) LED における光出力、(b)外部量子効率の注入電流依存性

20 mA 動作時に最大光出力として 50 μW を実現した。このとき、外部量子効率は 0.12%である。以上のように、GaN:Eu を用いた赤色発光デバイスは世界に先駆けて実現した当初と比べて、50 倍程度の輝度向上が観測されており、デバイス実用化に向け着実に進展している。

５．まとめ

OMVPE 法を用いて GaN:Eu の大気圧成長を行い、光学特性を PL 法により評価した。大気圧成長により発光強度の増大が観測され、その起源は GaN 母体材料の結晶性向上による Eu イオンへのエネルギー輸送効率の増大及び発光に寄与する Eu 数の増大であることを明らかにした。さらに大気圧成長 GaN:Eu を活性層とし、活性層膜厚を増大させることにより、世界に先駆けて LED 発光に成功した当初 1.3 μW であった光出力を 50 μW

まで増大させることに成功した。これらの結果は、GaN:Eu を用いた赤色発光デバイスの実用化に対する期待をさらに高めるものである。

謝辞　本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（学術創成研究費 No. 19GS1209）、（若手(A) No. 23686099）、グローバル COE プログラム「構造・機能先進材料デザイン教育研究拠点」による助成の下で遂行された。

参考文献

[1] 藤原康文、西川敦、寺井慶和：応用物理, **79,** 25 (2010).

[2] J. Heikenfeld, M. Garter, D. S. Lee, R. Birkhahn, and A. J. Steckl:Appl. Phys. Lett. **75,** 1189 (1999).

[3] S. Morishima, T. Maruyama, M. Tanaka, Y. Masumoto, and K.Akimoto: Phys. Status Solidi A **176,** 113 (1999).

[4] H. J. Lozykowski, W. M. Jadwisienczak, J. Han, and I. G. Brown:Appl. Phys. Lett. **77,** 767 (2000).

[5] J. H. Park and A. J. Steckl: Appl. Phys. Lett. **85,** 4588 (2004).

[6] A. Nishikawa, T. Kawasaki, N. Furukawa, Y. Terai and Y. Fujiwara: Appl. Phys. Exp. **2,** 071004 (2009).

[7] A. Nishikawa, T. Kawasaki, N. Furukawa, Y. Terai, and Y. Fujiwara: Phys. Status Solidi A, **207,** 1397 (2010).

[8] A. Nishikawa, T. Kawasaki, N. Furukawa, Y. Terai, and Y. Fujiwara: Appl. Phys. Lett. **97,** 051113 (2010).

[9] N. Furukawa, A. Nishikawa, T. Kawasaki, Y. Terai, and Y. Fujiwara: Phys. Status Solidi A, **208,** 445 (2011).

[10] A. Nishikawa, T. Kawasaki, N. Furukawa, Y. Terai, and Y. Fujiwara: Opt. Mater. **33,** 1071 (2011).

TU2

サファイア窒化法の熱力学と窒化機構およびその展開

福山博之

東北大学 多元物質科学研究所

次世代の光源として注目される紫外発光素子は，AlGaInN 系窒化物半導体から構成され，幅広い用途 (蛍光灯の代替 , 高密度DVD , 生化学用レーザー , 光触媒による公害物質の分解 , He-Cdレーザーや水銀灯の代替) が期待されている．現在，窒化物半導体用基板としては，サファイア，Si，SiC，GaN などが候補として挙げられる．大まかに各基板の特徴を捉えると，サファイアやSi は大口径基板が安価に入手できる点がメリットであるが，格子不整合が大きい欠点がある．SiCは格子不整合が小さく，3 - 4 インチ径の基板が入手できるが，高価である．GaN 基板は，2 インチ基板が報告されているが，現状では，かなり高価である．AlN 基板は ,GaN 基板に比べてさらに開発途上で1 インチ程度のサイズであり ,やはりかなり高価である .AlN は，高い熱伝導率 (320W/mK) と大きなバンドギャップ (6.2 eV) を有しており，AlN 単結晶を基板として用いれば , 格子定数の近いAlGaN 系発光素子と準ホモエピタキシャル成長ができるため , 積層した窒化物結晶の欠陥密度を低く抑えることができる．また，AlN 結晶は，200 nm の紫外領域まで透明であるため，発光した紫外線を吸収することなく，効率よく外部へ取り出せる．このため，紫外発光素子用基板材料としては，格子整合性および紫外線透過率の観点から，AlN 単結晶が最良の基板候補である．

当研究室では，上記のような窒化物素子用基板の現状とAlN 結晶基板の重要性を認識し，以下の2 つの研究を行っている．まず，

(1) 大口径化の流れが加速しているサファイア基板に注目し，サファイア基板上に高品質AlN膜を成長させ，これをテンプレートとして供給するための研究， 一方，

(2) 将来的には，サファイア基板をAlN 基板に置きかえていくことを目指してAlN バルク結晶の作製に関する研究である．

(1)に関する研究は，紫外LED だけではなく，白色その他の可視LED の低コスト化および高効率化への貢献も視野に入れている .本稿では ,(1)に関する研究として ,当研究室で開発したサファイア窒化法によるAlN 膜の作製とその薄膜をテンプレートとして用いた液相成長法や反応性スパッタ法について紹介する。

IN3

表面過飽和度制御によるGaN ステップフリー面の形成

赤坂哲也，小林康之，嘉数 誠
日本電信電話㈱ NTT 物性科学基礎研究所

半導体薄膜の結晶成長では、デバイス応用の見地から薄膜表面やヘテロ界面の平坦性を原子層レベルで制御する必要がある。理想的には、表面や界面に1 分子層のステップも存在しないステップフリー面が望ましい。原子層レベルで平坦な表面やヘテロ界面を有する薄膜は２次元成長モードで成長する。２次元成長モードには、核成長、螺旋成長、および、ステップフロー成長があり、結晶の完全性（ミスカットや貫通転位の有無）や表面過飽和度の大きさに応じて、それらの成長モードのうちのいずれかが優勢になったり、複数のモードが競合したりしながら結晶成長が進行する。

最近、我々は、GaN バルク基板上のMOVPE 選択成長法により、大きさが15～50μmの領域に1 分子層の段差も存在しないGaN ステップフリー面を形成した。図1 に示したのは、大きさが16μmの六角形状のGaN ステップフリー面のAFM 像であるが、端部分に数層の分子層ステップが存在する以外は、巨大な単一の原子テラスで覆われていることが分かる[1]。このようなステップフリー面を窒化物半導体のヘテロ構造に応用できれば、非常に単色性の優れた発光をする量子井戸や、PV 比の高い共鳴トンネルダイオード等の実現が期待される。ステップフリー面は成長領域に螺旋転位や混合転位（以下、螺旋・混合転位）が全くない場合に形成され、その成長は、テラス上への複数の２次元核の生成、２次元核の横方向成長、および、２次元核のコアレッセンスを繰り返す多核成長モードで進行することが分かった[2]。一方、成長領域に螺旋・混合転位が１本でも存在すると、その転位を起源とする螺旋成長によりGaNは成長し、表面には成長螺旋が観察された。1950 年代初頭に、核成長や螺旋成長速度の表面過飽和度依存性が、Burton、Cabrera、および、Frank により理論的に検討された（BCF 理論）[3]。ここで、表面過飽和度は螺旋成長によって表面に形成される成長螺旋の単分子層ステップの間隔から求められるが、BCF 理論が提唱された当時は分子層ステップを観察可能な走査型プローブ顕微鏡等は存在しなかった。さらに、（選択成長ではない）全面成長では、基板のミスカットに起因するステップフロー成長と螺旋成長とが競合して起こることもあり、純粋な螺旋成長速度を測定するのは容易ではない。一方、本研究で用いたGaN バルク基板上のMOVPE 選択成長法では、基板のミスカットによるステップは成長初期過程で選択成長領域の端に吐き出される。また、表面過飽和度を比較的低い値に制御するため、螺旋・混合転位の有無のみにより、核成長か螺旋成長モードで成長が進行するかどうかが決まる。すなわち、本手法を用いれば、一回の成長で同一基板上に、純粋な核成長と螺旋成長モードを実現し、これらの成長機構（成長速度の表面過飽和度依存性等）を検討することが可能である。

AFM で測定したGaN 表面の成長螺旋の分子層ステップ間隔から表面過飽和度を求めた。GaNの核成長、および、螺旋成長速度の表面過飽和度依存性を図２に示した。過飽和度の増加に対して、螺旋成長速度は２次関数的に増加する一方、核成長速度は非常に小さな値を持つことが分かった。また、図中の実線、および、破線は、BCF 理論を用いた、螺旋成長、および、核成長速度のフィッテイング結果であるが、実験結果とよく一致している[4]。

このように、本手法により、デバイスサイズのGaN ステップフリー面を実現できた上、一回の成長で同一基板上に、純粋な核成長と螺旋成長モードを実現し、これらの成長機構を検討することが可能となった。講演

では、表面過飽和度や成長速度の基板温度依存性についても議論する。

[1] T. Akasaka, Y. Kobayashi, and M. Kasu, Appl. Phys. Express 2, (2009) 191002.

[2] T. Akasaka, Y. Kobayashi, and M. Kasu, Appl. Phys. Express 3, (2010) 075602.

[3] W. K. Burton, N. Cabrera, and F. C. Frank, Phil. Trans. Roy. Soc. A 243, (1951) 299.

[4] T. Akasaka, Y. Kobayashi, and M. Kasu, Appl. Phys. Lett. 97, (2010) 141902.

謝辞

成長機構に関して議論をしていただいた東京大学名誉教授 西永 頌先生に深く感謝いたします。

本研究の一部は、科研費(基盤研究(B) No. 22360013)の助成を受けて行われた。

AW1

窒化物半導体を用いた深紫外LEDの開発

藤川紗千恵1,2、平山秀樹1,2

1独立行政法人理化学研究所、2独立行政法人科学技術振興機構・CREST

波長250-350nm帯の深紫外高輝度LEDは、医療、殺菌・浄水、生化学産業、高演色LED照明、高密度光記録、ダイオキシンやPCB、NOxガスなど公害物質の高速分解処理、バイオ工学、各種情報センシング等の大変幅広い分野での応用が期待されている。深紫外高出力発光デバイス実現において、InAlGaN４元混晶は、Inを含む混晶の物性的特長から、転位密度の増加に伴う発光効率の低下が緩やかな為、高効率紫外LEDの実現に有利であると考えられる[1]。窒化物半導体は、波長200-350nm帯の発光波長域を持ち深紫外発光素子を実現する上で最有力な材料である。しかし、発光波長が青色より短波長の紫外域での発光効率は極めて低いのが現状である。高効率深紫外LEDの実現には、AlGaN系材料の結晶成長や各種材料物性に起因する問題から下記の課題が挙げられる。①AlN/AlGaNの高品質結晶を作製する技術の確立。②p型層のホール濃度の向上。③光取出し効率の向上。本講演では、高効率紫外LEDの実現を目的とし、低速成長による高Al組成InAlGaN高品質結晶成長、Siライトドープによる量子井戸の原子層平坦化・酸素不純物濃度の低減効果等による高効率化[2,3]について述べる。また、安価な深紫外光源実現を目的としてSi基板上の280nm帯InAlGaN深紫外LED[4]について述べる。

試料作製は、減圧有機金属気相成長法（LP-MOCVD）を用いて行った。InAlGaNにSiドープ量を増やすことで表面が改善されることが確認できた（図１）。また、InAlGaN内の不純物濃度を調べる為にSIMS測定を行った。その結果、Siをドープする事で、酸素濃度が著しく減少しており、SiがInAlGaNの高純度化に寄与している事がわかった（図２）。これらの事項を取入れることで深紫外LEDの光出力改善に成功した。

Si基板上LEDの試料構造は、Si(111)基板上にアンモニアパルス供給多段AlN成長法[3]を用いて、クラックフリーなAlNバッファー層を作製し、その上にInAlGaN－LED構造を作製した（図３）。試料を室温連続動作において、EL発光スペクトルの測定を行った。その結果、室温連続動作において284nmから300nmのシングルスペクトルを観測した（図４）。この結果は、Si基板上の280nm帯InAlGaN深紫外LEDの実現に世界で初めて成功し、殺菌用途波長において、Si基板を用いた安価な深紫外LEDが実現可能であることが初めて示せた。

参考文献

[1] H. Hirayama et al., J. Appl. Phys. 97 091191 (2005).

[2] S. Fujikawa et al., Phys. Status Solidi C 6, No. S2, S784–S787 (2009)

[3] H. Hirayama et al., Appl. Phys. Lett, 91 071901 (2007)

[4] S. Fujikawa, H. Hirayama, Applied Physics Express 4 061002 (2011)

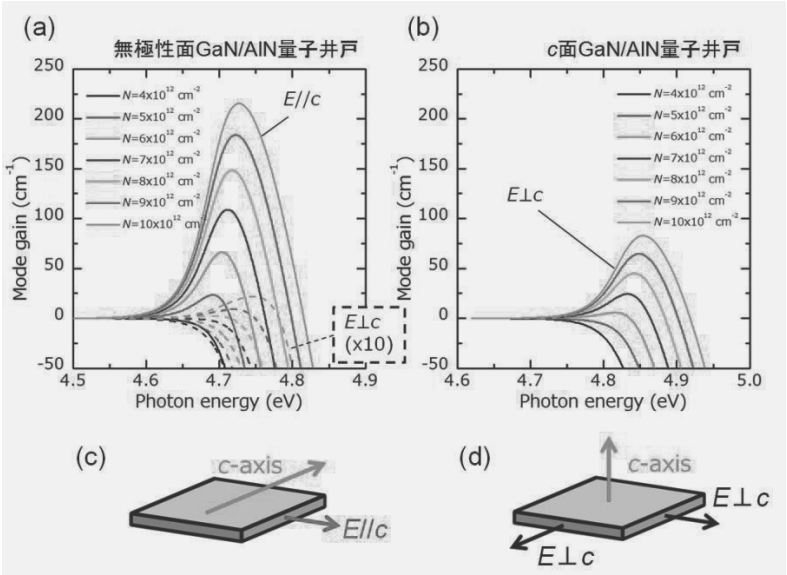
AW2

非極性面窒化物半導体の光学特性に関する理論的検討

小島一信,[a,*] 山口敦史,[b] 船戸 充,[a] 川上養一,[a] 野田 進[a]
[a]京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻
[b]金沢工業大学 ものづくり研究所
[*]Tel: 075-383-2319, Fax: 075-383-2320, E-mail: kkojima@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp

窒化物半導体は，可視領域を含む紫外から赤外までの広い波長領域で動作する発光素子材料として，近年精力的に研究が行われている．中でも，非 *c* 面上の量子井戸構造は内部電界を低減可能なため，量子閉じ込めシュタルク効果を抑制できることが示唆されている．特に InGaN 系量子井戸においては，その有用性がデバイスレベルで実証されつつある．本報告では，無極性面量子井戸構造を AlGaN 系に適用した場合に，光学特性，特にレーザダイオードとしてのしきい値特性が，*c* 面井戸と比べてどの程度改善するのかを理論的に検討する．***k*・*p*** 摂動によるバンド計算，内部電界のクーロン遮蔽を考慮した利得計算によって *c* 面および無極性面井戸の光学特性を比べた．

図(a)および(b)はそれぞれ無極性面および *c* 面 GaN/AlN 量子井戸のモード利得スペクトル，(c)および(d)はそれぞれ無極性面および *c* 面井戸レーザの発振方向を表わす. *c* 面井戸では面内で等方的に利得が発生することに対し，無極性面井戸では，光の電界 *E* と *c* 軸が垂直(*E*⊥*c*)の場合と平行(*E*//*c*)の場合で，利得の大きさが異なることが分かる. 各面方位における利得生成メカニズムを分析した結果, 無極性面では InGaN 系と同様，量子閉じ込めシュタルク効果の低減に加えて，正孔の面内質量の低下と行列要素の特定方位集中によって，利得が増強されることが分かった．また，InGaN 系と AlGaN 系では，価電子帯の頂上における価電子帯の基底が異なるので，GaN/AlN 量子井戸では *E*//*c* の利得が優勢であるなど，材料特有の性質も明らかになった．しきい値特性の面方位・混晶比依存性などの詳細は当日報告する．



図：(a)無極性面および(b)*c* 面 GaN/AlN 単一量子井戸のモード利得スペクトル(井戸幅，光閉じ込め係数はそれぞれ 1 nm，0.53%とした)．(c)無極性面および(d)*c* 面量子井戸 LD の発振方向(共振器の長手方向).

GaN 系窒化物半導体のラマン散乱分光法による評価
-ラマン散乱の基礎から InN や AlGaN などの最近の話題まで-

播磨 弘
京都工芸繊維大学

§1. ラマン散乱とは？　－ Si のフォノンスペクトル観察を例に、ラマン散乱からわかること －

ラマン散乱とは一言で言うと光の非弾性散乱である。つまり物質に入射する周波数ν_iのフォトンが物質とエネルギーのやりとりをしたあと、別の周波数$\nu_s = \nu_i \pm \Delta\nu$のフォトンとして散乱される現象である。この周波数差$\Delta\nu$はラマンシフトと呼ばれ±のどちら側でも観測できるが、通常は観察しやすい低エネルギー側、$\nu_s = \nu_i - \Delta\nu$ の方（ストークス光）を観察する。最近はμm桁の領域を観察する場合が多いので以下では顕微ラマン分光を中心に述べる。実験では単色性の高い良質なレーザー光を入射光源に使う。物質の状態を変えないように、例えば試料加熱しないように低パワーを用い、またGaNのような直接遷移型半導体が対象なら、強い蛍光で邪魔されないようにバンドギャップ付近の入射光エネルギーを避ける（逆に積極的にこれを利用する共鳴ラマン散乱という手法もある）。

例として、波長488nmのArレーザーを良質なSi結晶に入射させてSiのフォノンを観察する場合を考えよう。入射光周波数は $\nu_i = c/\lambda \sim 6\times10^{14}$[Hz]、Siの光学フォノン周波数は$\Delta\nu \sim 1\times10^{13}$[Hz]程度であるが、ラマン散乱で通常用いる周波数単位、$1/\lambda$ [cm^{-1};カイザー]で言うと、入射光は$\nu_I \sim 2\times10^{4}$[cm^{-1}]、これに比べて光学フォノンはずっと小さい$\Delta\nu \sim 520$[cm^{-1}]となる。実験では分光器に散乱光を集めて周波数分析してラマンスペクトルを観察するが、$\nu_i \sim \nu_s \ll \Delta\nu$だから、感覚的には入射光に極めて近い周波数領域を分析することになる。

ラマン散乱でなぜフォノン周波数が観察できるのか、**Fig.1** の２原子模型で簡単に考えてみよう。(a)のように原子AとBはまわりをおおう価電子雲（斜線部）のおかげで化学結合している。ここに(b)のように波長488nmのArレーザー光が入射すると、$\nu_i \sim 10^{15}$[Hz]の高周波入射交流電場に追随して(c)のように価電子雲は揺さぶられ、正負電荷の重心がずれるために電子分極が形成される。この交流分極は逆に電磁波放出アンテナの役目を果たして散乱光を生み出す。この説明だと入射波と同じ周波数ν_iの光（レーリー光）しか放出されないことになるが、実際には原子核もν_iよりずっとゆっくりした周波数$\Delta\nu$=10^{12}-10^{13}[Hz]で熱振動（結晶なら格子振動[フォノン]）しているから、散乱光はこの周波数で変調を受ける。したがって散乱光には$\nu_i \pm \Delta\nu$ の周波数成分が含まれ

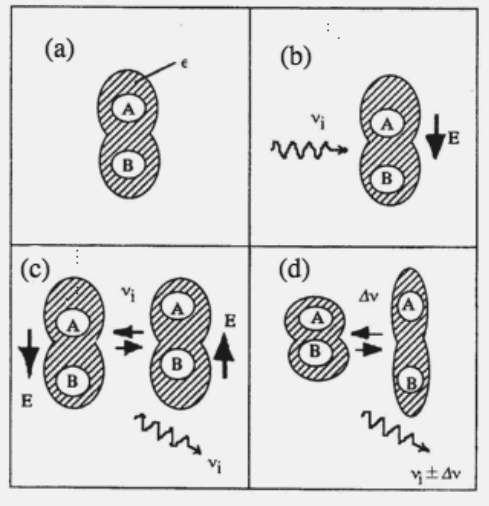


Fig.1 ラマン散乱原理

ることになる。簡単な数式を使ってラマン散乱過程を説明しておくと次のようになる。まず入射光交流電場 E を時間 t の関数として

$$E(t)=E_0\cos(2\pi\nu_i t) \qquad (1)$$

と表す。この入射電場によって次の電子分極が形成される

$$P(t)=\alpha E(t)=\alpha E_0\cos(2\pi\nu_i t) \quad . \qquad (2)$$

ここで α は電子分極率であり、これは電子雲の広がりで決まる。電子雲は周波数 $\Delta\nu$ で振動する原子核のまわりにへばりついているのだから α には $\Delta\nu$ の振動成分が含まれる。だから例えば

$$\alpha(t)=\alpha_0\,[1+\cos(2\pi\Delta\nu t)] \qquad (3)$$

のように分極率を直流、交流成分の和で表すと（両成分の強度比率はここでは無視）これを(2)より

$$P(t)=\alpha_0\,[1+\cos(2\pi\Delta\nu t)]E_0\cos(2\pi\nu_i t)$$
$$\propto \alpha_0 E_0\,\{2\cos(2\pi\nu_i t)+\cos(2\pi[\nu_i-\Delta\nu]t+\cos(2\pi[\nu_i+\Delta\nu]t)) \qquad (4)$$

となって、レーリー光（第1項）以外に、ラマン散乱光（第2項がストークス、第3項がアンチストークス成分）の放出に寄与する電子分極が表される。ここでは2原子分子を用いて電子分極率を変動させる要因として原子核の熱振動を考えたが（結晶ならフォノン）、これ以外に種々の素励起（または準粒子；プラズモン、マグノン、ポラリトンなどいろいろ）がラマン散乱の要因、つまり散乱体になり得る。

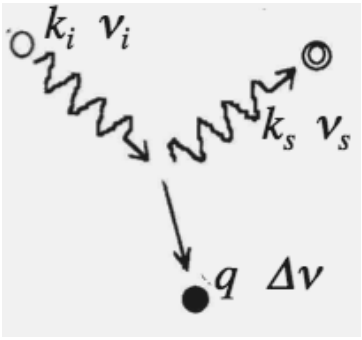


Fig.2 ラマン散乱(ストークス散乱)

次にフォノンによるラマン散乱を例に波数保存則について述べる。**Fig.2** は、入射光フォトン（波数ベクトル$\boldsymbol{k}_i$、周波数ν_i）がフォノン（波数ベクトル$\boldsymbol{q}$、周波数$\Delta\nu$）を生成したあと、散乱される（波数ベクトル$\boldsymbol{k}_s$、周波数ν_s）ストークス過程を示す。ここで

$$\nu_s=\nu_i-\Delta\nu \quad \text{（エネルギー保存則）} \qquad (5)$$

および、 $\boldsymbol{k}_s=\boldsymbol{k}_i-\boldsymbol{q}$ （運動量保存則） (6)

が成立つ。散乱光と入射光の波数ベクトル$\boldsymbol{k}_s$と$\boldsymbol{k}_i$の大きさは入射（散乱）光の波長 $\lambda_i(\lambda_s)$ と

$$k_i=2\pi/\lambda_i\ ,\ \ k_s=2\pi/\lambda_s \qquad (7)$$

の関係があるので、入射光に波長500[nm]付近の可視光を用いた場合は $k_i, k_s\sim10^5$ [cm^{-1}]程度だから、フォノン波数ベクトルの大きさも(6)より $q=|k_i-k_s|\sim10^5$ [cm^{-1}]程度になる。 **Fig.3 の左側**

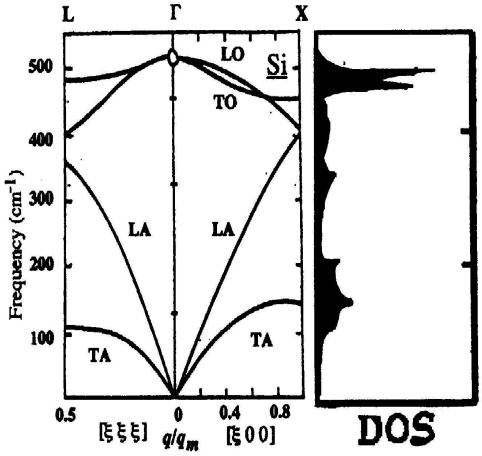


Fig.3 Si のフォノン分散(左)
とフォノン状態密度（右）

はSiのフォノン分散で、左半分に[111]方向、左半分に[100]方向に伝搬するフォノンエネルギーと波数の関係を示す。横軸の波数は原点（Γ点）ではq=0、一方[100]方向の端（X点）では$q=2\pi/a$～10^8[cm^{-1}]程度である（a=5.4Å；格子定数）。ラマン散乱に寄与するフォノン波数が10^5 [cm^{-1}]程度ということは、事実上 q～0（Γ点付近）のフォノン（**Fig.3**、左図白丸）のみがラマン観察できることを意味する。SiではΓ点でLOとTOフォノン分枝が3重縮退していて、そのフォノンエネギーは約520 [cm^{-1}]である。実際、ラマン観察される結晶Siのフォノンスペクトルには520 [cm^{-1}]付近に半値幅3 [cm^{-1}]程度の鋭いローレンツ型対称ピーク形状が現れる。しかし結晶が多数の欠陥を含む場合や、nmサイズの微結晶が観測対象になると事情が異なってくる。領域Δxにフォノンが閉じ込められると、不確定性関係より理解できるようにフォノン波数はΔq~1/ Δx程度の広がりをもつ。つまり**Fig.3**、左側の白丸位置のフォノンを中心にΔq程度の領域のフォノンがスペクトルに寄与することになって、低波数側に大きく非対称形状にフォノンピークは広がっていく。**Fig.3** の右側はフォノン状態密度(DOS)である。Δxが数nm程度まで小さくなるとラマンスペクトルピーク形状はこのDOSをよく反映したものになる。**Fig.4** はこの変化を示すシミュレーションで、Si中の結晶子サイズ$\Delta x=L$ をパラメータにとっている（L=∞が理想結晶に相当）。この変化はラマン散乱で試料の結晶性の乱れを評価するときによく用いられる便利な現象である。

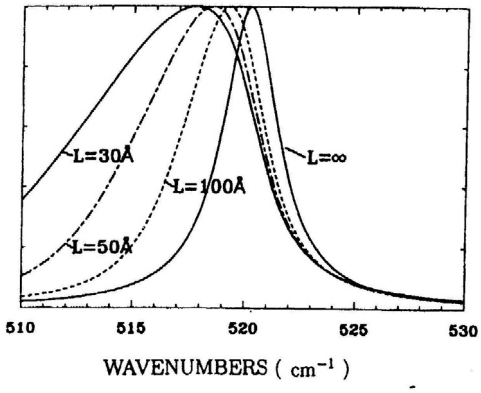


Fig.4　Si フォノンスペクトルシミュレーション（L は結晶子サイズ）

結晶子サイズ以外にも種々の要因でラマン信号フォノンピークは影響を受ける。Fig.5 はその概要である。例えば、圧縮/引張り歪みに対応して大抵のフォノンピークは高/ 低波数側にシフトする。また空間的な歪みの不均一があればピーク幅が広がる。また欠陥の無い理想的な結晶試料では試料構造と散乱配置で特定のフォノンピークが観測されるかどうか決まるが（ラマン選択則）、結晶性が乱れるとこの規則は緩和する。

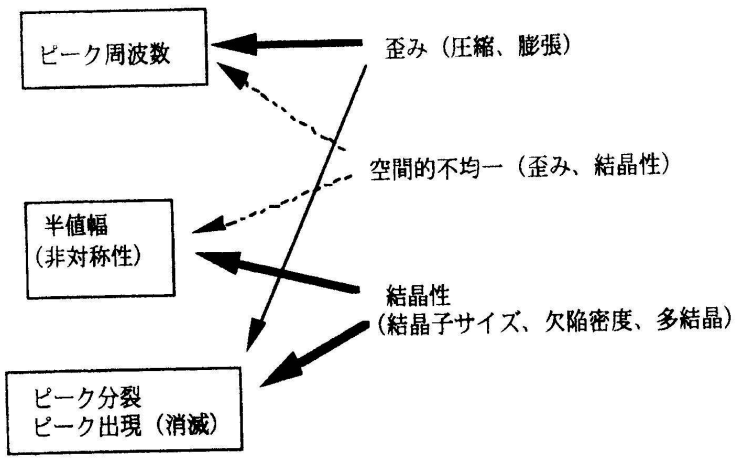


Fig.5　ラマン散乱フォノンピーク形状に影響する因子

§2.Ⅲ族窒化物半導体フォノンの分散とラマンスペクトル　－ GaN を例に －

GaN フォノン分散関係について簡単に述べる。**Fig.6** は GaN の 2 つの結晶多形、つまり立方晶（ジンクブレンド型）と六方晶（ウルツ鉱型）GaN 構造を示す。**Fig.7** には立方晶

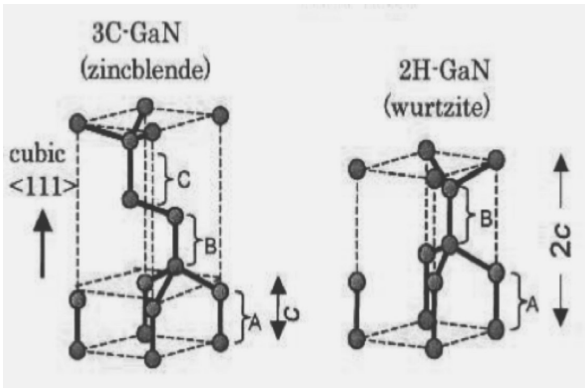


Fig.6　立方晶 GaN<111>方向（左）と六方晶 GaN<0001>方向（右）積層構造

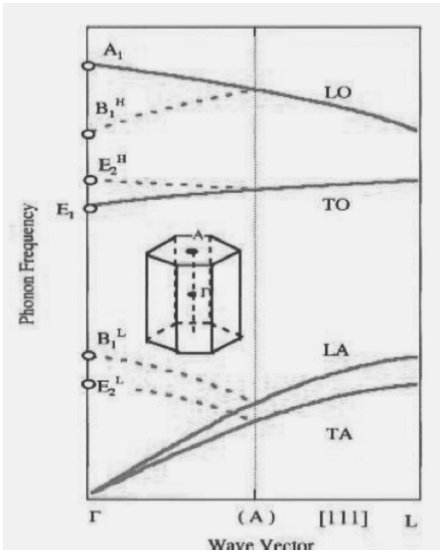


Fig.7　フォノン分散模式図。実線は立方晶 GaN の<111>、破線は六方晶 GaN<0001>方向に伝搬するフォノンに対応

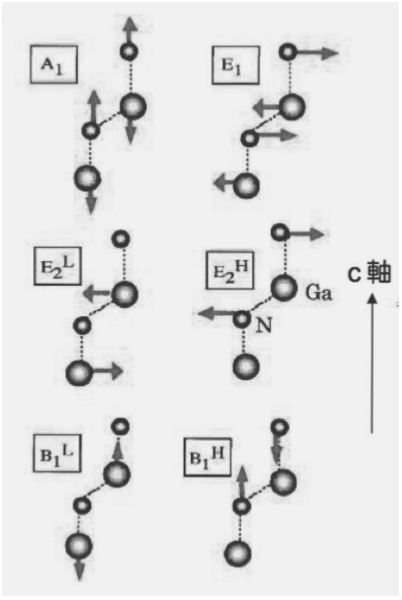


Fig.8　六方晶 GaN の光学フォノンモード

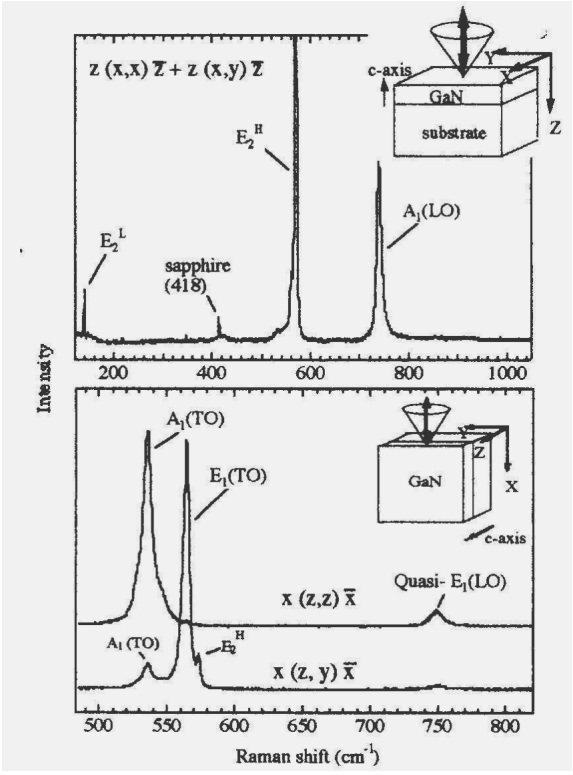


Fig.9　六方晶 GaN のフォノンラマン散乱スペクトル

GaN<111>方向フォノンの分散を示す（実線）。立方晶では Ga-N 原子対が A、B、C…サイトの順に積層し、1 つの Ga-N 原子対（厚み c）が基本単位となるので、第 1 ブリリュアンゾーンの端（L 点）の波数は π/c で与えられる。一方、六方晶では c 軸方向に A、B、A、B…サイトの順に積層し、2 つの Ga-N 原子対

(厚み 2c)が基本単位となるから、c 軸方向の第 1 ブリリュアンゾーン端（A 点）の波数は $\pi/2c$ で与えられる。このような場合、六方晶の c 軸方向に伝搬するフォノンの分散関係は、立方晶のフォノン分散図を半分に折り返すことで近似できる（zone-folding）。原点（Γ点）に折り返された 6 つのフォノンモード、すなわち A_1(LO), B_1^H, E_2^H, E_1(TO), B_1^L, E_2^L はウルツ鉱型結晶のΓ点光学振動モードに対応する。これらの振動様式を **Fig.8** に示す。A_1, B_1^H では c 軸向き、E_1, E_2^H, E_2^L では c 軸に垂直な向きに原子が変位する。これらのうち B_1^H と B_1^L はラマン観察できない禁制モードであるが、それ以外は許容モードであり適当なラマン散乱配置のもとで観察できる。**Fig.9** に六方晶 GaN の典型的なフォノンラマンスペクトルを示す。**Fig.9** 上図は c 面後方散乱、下図は c 軸を含む面について後方散乱配置で観察したもので、下図では偏光測定を行い、入射光と散乱光の電場成分が共に c 軸に平行な場合（上側）と直交させた場合（下側）で、ラマン選択則で予見されたように異なるスペクトルが観察される。なお図中の $x(z,y)\bar{x}$ などは散乱配置を示す表記（Porto 記号）で、c 軸を z 軸にとって括弧の中の左（右）側記号で入射（散乱）光の偏光方向を記し、括弧の外の左（右）側記号で入射（散乱）光の進行方向を示す。AlN、GaN, InN のフォノン周波数報告例を **Table 1** に記す。[1-4] 1 つのフォノンモードについて化合物間で周波数を比較すると、原子対の換算質量から容易に想像されるようにⅢ族元素の質量が増すにつれ周波数は低下していく。

Table 1 ラマン散乱で観察されたフォノン周波数（室温）

	AlN	GaN	InN		AlN	GaN	InN
wurtzite				zincblende			
E_2^L	248.6	144	87	TO	655	555	457
A_1 (TO)	611	531.8	447	LO	902	741	588
E_1 (TO)	670.8	558.8	476				
E_2^H	657.4	567.6	488				
A_1 (LO)	890	734	586				
E_1 (LO)	912	741	593				

§3 .Ⅲ族窒化物半導体の代表的なラマン散乱評価 － GaN を例に －

3 .1. イオン注入試料の構造乱れ

§1 で述べたように構造乱れがあるとフォノンピークが広がったり新たなピークが出現することがある。その例を **Fig.10** に示す。[5] 左側 (a)で良質六方晶 GaN（一番上のスペクトル）に Ca^+イオンを注入し（一番下のスペクトル）、その後、スペクトルの下から順に温度を 900℃から 1150℃まで上げながら熱処理した場合のラマンスペクトル変化を示す。一方、右側(b)は Ca^+イオン注入試料を種々の偏光配置で測定したスペクトルである。(a) で丸印を付けたピークは、偏光特性を示さず、熱処理が進むと消滅するか、鋭いピーク形状に変わっ

ていくことからイオン注入による構造乱れ、つまり周期的な原子配列の長距離秩序が崩れたことに起因しているのがわかる。これは結晶子が nm サイズに小さくなった場合に見られる

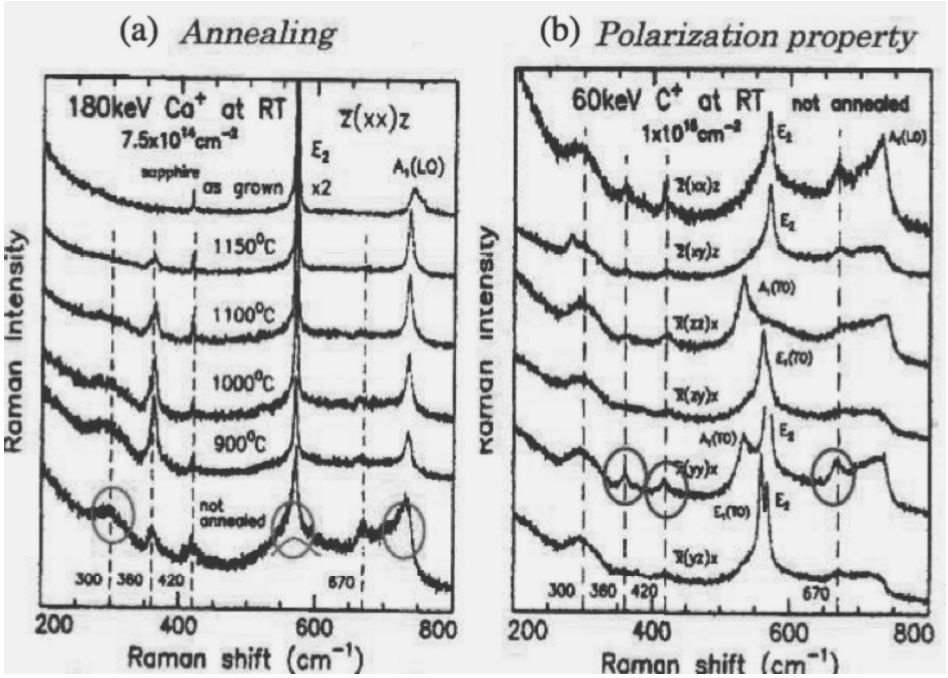


Fig.10　(a) イオン注入六方晶 GaN の熱処理温度依存性。一番下が熱処理前。(b)熱処理前の偏光観察。

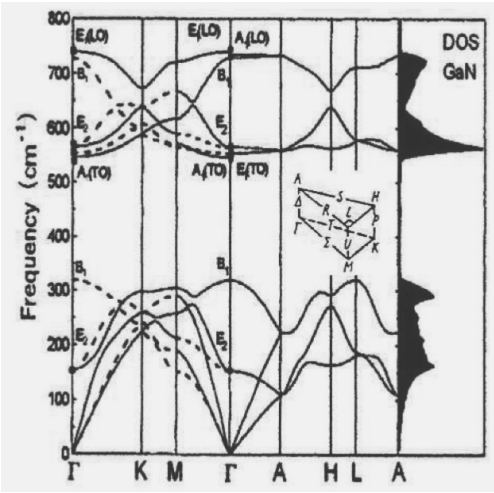


Fig.11　六方晶 GaN フォノン分散と状態密度(DOS)

現象と同じである。**Fig.11** は GaN フォノン分散と DOS の計算例 [1] であるが、熱処理前の Fig.10(a)丸印のピーク形状はフォノン DOS をよく反映している。一方、Fig.10 (b)で丸印を付けたピークは、必ずしもこのようなフォノン DOS の特徴と対応がない。しかしその一方で、偏光特性を示すことから、この原因には構造対称性が反映している。これらの信号が注入イオン種に依らないことが確認されていることから、[5] これらの信号は欠陥起因のモードで、具体的な候補としてイオン注入に伴って生じた格子欠陥（窒素空孔など）の関与が考えられる。

3 .2. 格子位置に置換した不純物（局在振動モード）

Ⅲ族窒化物半導体では最もよく調べられている GaN を例に不純物振動モードについて述べる。[6]　過去に GaN の p 型化を妨げてきた主要原因として、Mg などのアクセプターを水素不純物が不活性化したとする説明はよく知られている。簡単にはこの過程は **Fig.12** に示すよ

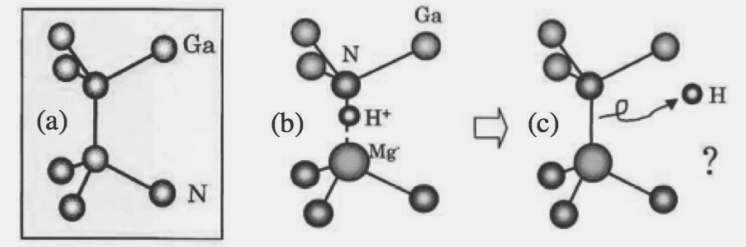


Fig.12　GaN 母体格子(a)、Mg-H 対による置換(b)、水素の熱脱離(c)のモデル

うに、Ga サイトに Mg イオンが置換した場合、近くに水素イオンが位置するとこれが Mg のアクセプター活性化を妨げるが、もし水素イオンが電子線照射や 600℃程度以上の熱処理で脱離すれば活性化されると考えられている。このモデルを支持するラマン測定結果を **Fig.13** に示す。これは CVD 成長させた Mg ドープ GaN 膜試料の熱処理前（一番下）、さらに 500℃から 1000℃まで温度を変えて熱処理した後（その上）のラマンスペクトルを比較したもの

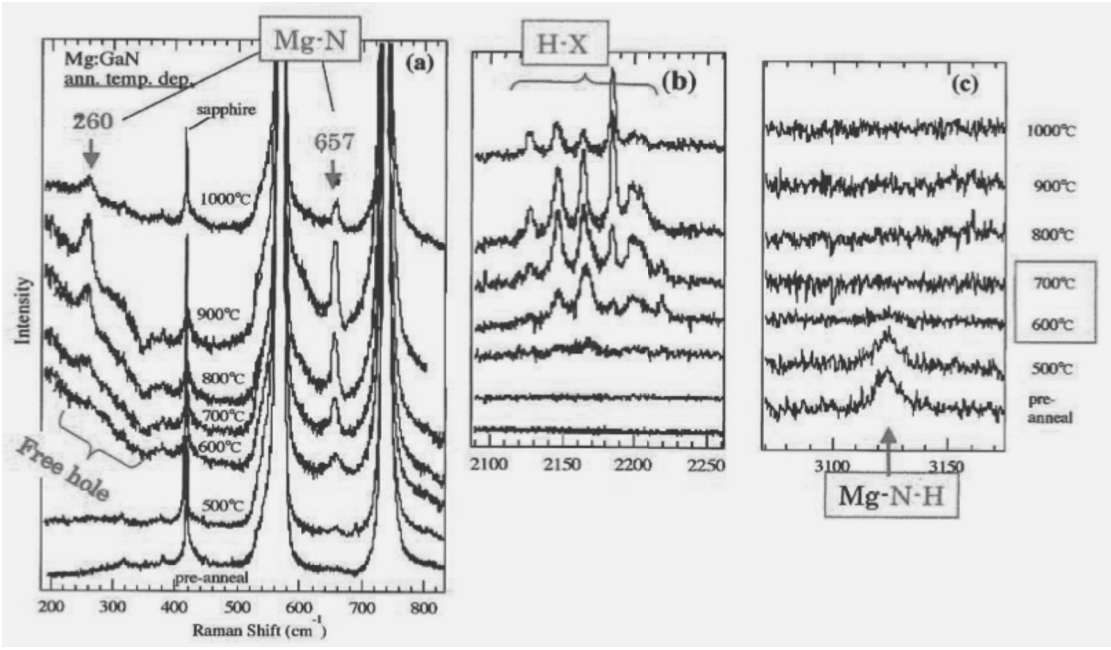


Fig.13　Mg ドープ六方晶 GaN の熱処理効果（一番下が熱処理前）

である。３つの異なる周波数領域について示しているが、まず最も高波数の領域（c）を見ると、熱処理前や 500℃の比較的低温の熱処理後では試料中に Mg と水素が取り込まれていることを示す水素関与の不純物振動モードが 3125cm^{-1} 付近に現れる。このモードは 600～700℃の熱処理で消滅するが、これと呼応して (b)に見るように 2100-2250cm^{-1} の領域に逆に 600～700℃の熱処理後に多くの新しい信号ピークが出現する。また最も低波数の領域（a）を見ると、熱処理前や 500℃熱処理では標準的な六方晶 GaN のフォノンピークしかないが、600～700℃の熱処理によって 657、260cm^{-1} 付近に新たな信号ピークが出現し、また 300cm^{-1} 程度以下の低波数域においてスペクトルのベースラインが左上がりに上昇しているのがわか

る。（a）で熱処理後に出現する 657cm^{-1} のモードは偏光特性や、また Mg-N, Ga-N 間の換算質量比較などから、水素脱離後に観測される Mg-N 間の不純物振動モードと解釈できる。260cm^{-1} のモードも同様である。また（b）で逆に 600～700℃の熱処理で新たに出現する信号は Mg との結合から離れた水素が試料中に新たに作る不純物振動モードと考えられる。さらに 300cm^{-1} 程度以下の低波数域に出現する連続的な信号は p 型試料固有の価電子帯間遷移に対応すると考えられる。以上の解釈はすべて、Mg 付近からの水素脱離に伴う Mg の活性化、すなわち試料の p 型化を支持するものである。ついでながら 1000℃まで熱処理温度を上げると（一番上のスペクトル）、（a）で 657cm^{-1} などの Mg-N 不純物振動や低端数域の連続帯信号は強度減少し、かえって p 型化が抑制されることがわかる。これはおそらく窒素脱離などによって格子欠陥が増したためにキャリア捕獲が促進するためと解釈される。

上記で述べた不純物振動は、Mg や水素(H)などのように母体格子中に取り込まれた異種原子のごく近傍に限定された原子の熱振動であるため局在振動モード（local vibration mode）と呼ばれる。その信号強度は不純物密度の低いうちはその密度に比例し、また置換した不純物サイトまわりの構造対称性を反映した偏光特性を示す。

このような局在振動モードはⅢ族窒化物半導体では GaN は比較的よく調べられている。上記の Ga サイトに置換した Mg 以外に、窒素サイトに置換した炭素や酸素、さらに Mg、Si などやこれらと結合した水素、Ga サイトに置換した As、Ga サイト欠陥（空孔）などが関与した局在振動モードなどの報告例がある。Fig.10(b)で触れた格子欠陥信号も同じく局在振動モードに属する。

3 .3. LO-フォノン-プラズモン結合モード

本稿はフォノンによるラマン散乱を中心に述べているが、§1 で記したようにフォトンが種々の素励起とエネルギー、運動量のやり取りをすればラマン散乱は観察される。Fig.13(a)で触れた価電子帯間遷移はキャリアの個別励起であるが、キャリアの集団励起（プラズモン）も観察される。Ⅲ族窒化物半導体のような極性半導体では

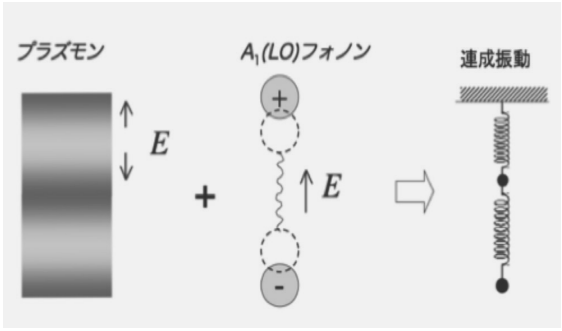


Fig.14　LOPC モードの概念図

Fig.14 に示すように、同じ縦波のプラズモンと LO フォノンが付随する電場を通じて結合して LO-フォノン-プラズモン結合モード（LO-phonon-plasmon-coupled mode、以下 LOPC）を形成する。n 型 GaN ではこれがよく調べられている。観察例を **Fig.15** に示す。上から下に、キャリア濃度が 2x10^{17}cm^{-3} から 4x10^{18}cm^{-3} 程度まで増えると 2x10^{17}cm^{-3} では鋭かった A_1(LO)フォノンモードは高波数側にピークシフトしながら非対称形に幅が広がる（この結合モードは高波数側 LOPC モードまたは単に L^{+}モードと呼ばれる）。また同時に低波数側にもキャリア

濃度増大につれて高波数側にピークシフトする L^-モードが現れる。L^-モードは L^+とは逆にキャリア濃度が増すとピーク幅が鋭くなる。これらの２つの LOPC モード周波数をキャリア密度に対してプロットすると **Fig.16** の変化を示す。すなわち、キャリア密度が低いとき L^+モードは LO フォノンモードと一致し、片方の L^-モードはプラズモン周波数に近い。一方、キャリア密度が高い極限では L^+モードはプラズモンに、L^-モードは TO フォノン周波数に漸近する。さらにこれらの中間のキャリア濃度領域、つまりキャリア濃度 $10^{18}cm^{-3}$付近では両者の性質が混ざった典型的な LOPC モードらしい振る舞いを示す。

LOPC モード周波数やスペクトル形状は上記のようにキャリア濃度に敏感であることから、信号ピークの周波数や形状はをもとにキャリア濃度の議論ができる。実はキャリア移動度にも敏感であるため、詳しいスペクトル形状解析をすればキャリア濃度や移動度のようなキャリア伝導に関わる基本的なパラメータを純光学的な手法で知ることができる。これは、Hall 測定のように電極付けの操作を要しないこと、非接触・非破壊診断であること、顕微測定をすれば１μm 程度の横方向空間分解で 2 次元測定できること、プローブレーザー光の波長を変えて試料への侵入長を変えれば深さ方向の分解も可能なことなどの利点を生かして、基板の均質性診断や電子デバイスの加工段階での電子物性評価に応用できる魅力的な手法と言える。

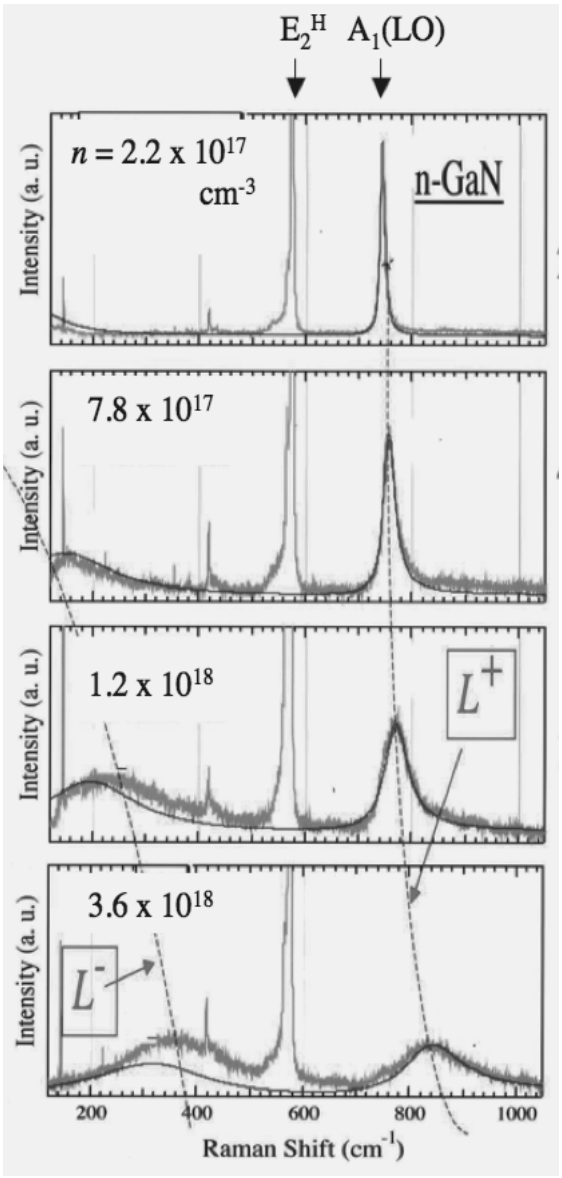


Fig.15　六方晶 n-GaN スペクトルのキャリア濃度依存性。滑らかな曲線は L^+への形状フィッティング。

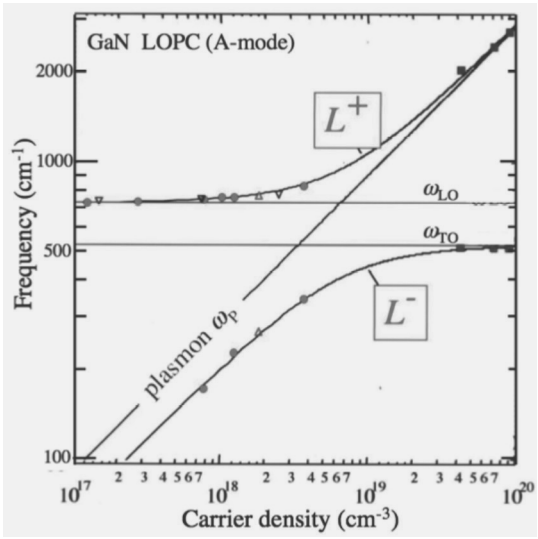


Fig.16　六方晶 n-GaN、LOPC モード周波数のキャリア濃度依存性

3.4. 残留歪み

エピタキシャル成長膜は、積層構造や基板の選択に応じて種々の残留歪みを含んでいるのが普通で、デバイス開発にとって極めて重要な評価項目であることが多い。厚み数 nm の極めて薄い層からなる多層膜の各層別の応力評価はラマン散乱でも困難であるが、バルク基板上の単層膜や、積層膜でも適当な厚みの簡単な構造物であれば応力のラマン評価は期待できる。六方晶 AlN、GaN、InN については精度の差はあれ、c 面内一様応力に対してフォノン周波数がどのような変化をするかは大体調べられている。六方晶 GaN の初期の測定例を **Fig.17** に示す。[7] ここで上図は A_1(LO)、下図が E_2^H フォノンモードの周波数変化で、c 面内一様応力（横軸）に対してプロットしてある。この応力印加範囲ではほぼ直線的な変化が見られ、この勾配、すなわち A_1(LO)で 0.8cm^{-1}/GPa、E_2^H で 2.9cm^{-1}/GPa を使って残留応力の評価ができる。この例に見るように窒素の c 面内振動に対応する E_2^H モードは c 面内残留応力に対して敏感で、他のⅢ族窒化物でも同様であるが、基本的にはこの E_2^H モードを使って c 面内応力が評価される。

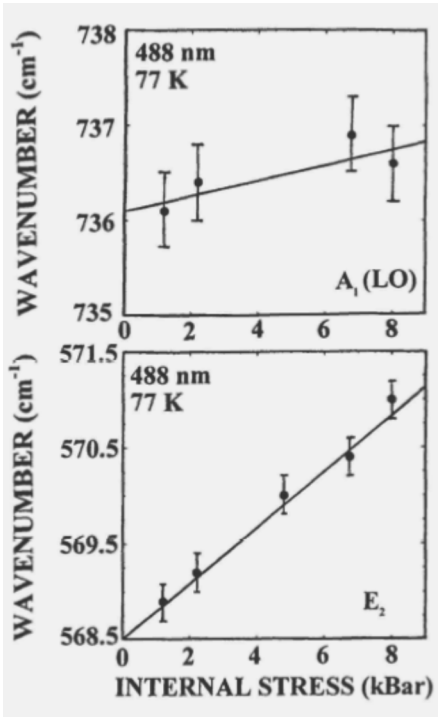


Fig.17 六方晶 GaN フォノン周波数の c 面内応力依存性。上：A_1(LO)，下 E_2^H モード

3.5. 三元混晶の組成

Ⅲ族窒化物半導体の大きな魅力は AlN、GaN、InN 間の組み合わせで自在にバンドギャップを制御できる可能性にあり、これまでに実用化された素子例や現在の開発傾向を見ても明らかである。ラマン散乱でも混晶の評価でいくつか貢献できそうな点があるが、最も基本的なものとして 3 元混晶組成の評価がある。例えば $Al_xGa_{1-x}N$ 混晶を例にとると、負イオン(N)から見て正イオンが Al であれ Ga であれ、

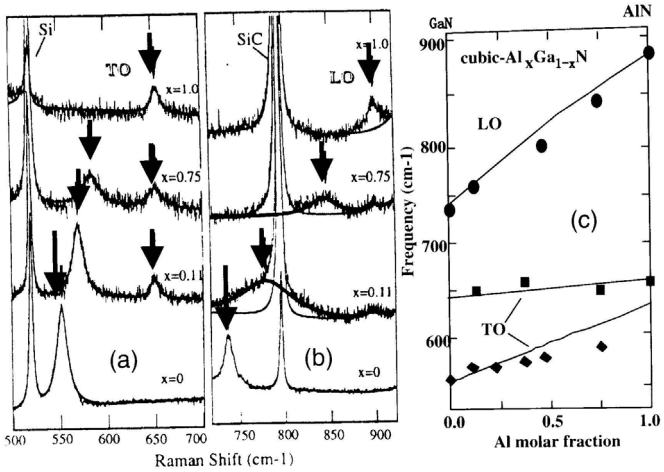


Fig.18 立方晶 AlGaN のフォノンスペクトル（SiC/Si 基板上）と周波数変化

化学結合力があまり変わらなければ、Al モル分率 x に応じて正負イオン間の換算質量は滑らかな変化をし、したがってフォノン周波数も単純な変化をするはずであるが、実際は注目するフォノンの種類に応じてやや複雑な変化をする。**Fig.18** は立方晶 $Al_xGa_{1-x}N$ 膜のフォノンスペクトル（左側）と、そのフォノン周波数の Al モル分率依存性（右側）である。立方晶の場合、Fig.7 実線で示したように Γ 点フォノンは TO、LO フォノン各 1 本ずつある。**Fig.18** のスペクトルに現れる Si と SiC 基板信号を無視してわかるように、矢印を付した TO フォノンは混晶では 2 本に分裂するのに対し（２モード型）、LO フォノンは分裂しない（1 モード型）。このようなモード分裂の違いを引き起こす物理的要因はここでは触れないことにするが、フォノン周波数から混晶組成を求めるには実用上、この立方晶 $Al_xGa_{1-x}N$ の LO フォノンのように、できれば 1 モード型でしかも組成に応じて大きく周波数変化をするモードを選ぶのが有利である。立方晶より複雑な六方晶 $Al_xGa_{1-x}N$ 混晶でも **Fig.19** に示したような細かい観察例がある。[8)]

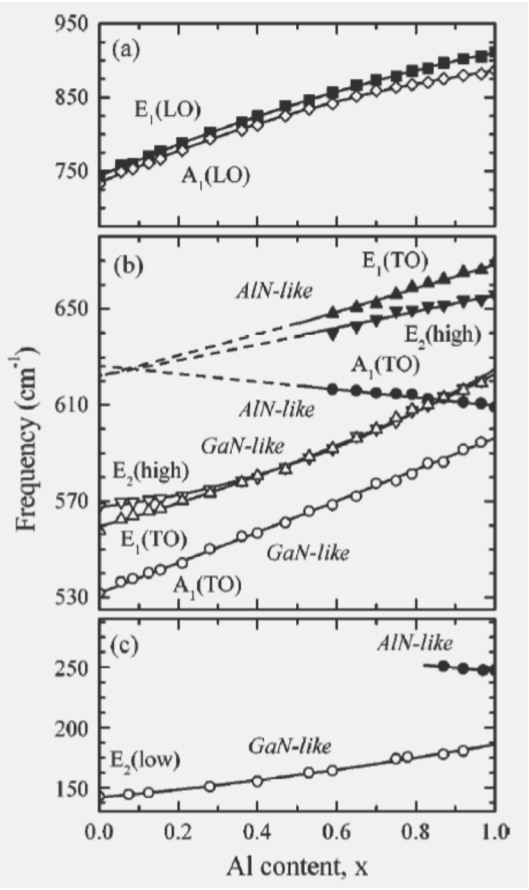


Fig.19　六方晶 AlGaN フォノン周波数の Al モル分率依存性

フォノン周波数から混晶の組成を精密に求めるうえでの留意点を付記しておくと、種々のフォノン周波数シフト要因が混在する場合、その影響を分別する必要がある。例えば§3.3 で述べた LOPC モードのように自由キャリアの存在によって周波数シフトすることがあり得る。また§3.4 で述べたように残留応力が無視できないときはこの影響を考慮することも重要である。

§4　まとめと最近の話題

本稿では、結晶中のフォノンによるラマン散乱の簡単な原理説明から始めて、六方晶 GaN を中心にフォノンの特徴を述べたあと、Ⅲ族窒化物半導体を対象として過去にどのようなラマン散乱評価がされてきたかを紹介した。代表的な話題としてまず取り上げたのは、(1)イオン注入試料の構造乱れ、(2)不純物の関与する局在振動、(3)LO-フォノン-プラズモン結合モードで、これらはどれも母体格子の単純なフォノン信号とは異なるユニークな特徴を持つ。すなわち、新たな信号ピークを生じたり、自由キャリア濃度や移動度に敏感に反応して周波数や形状が変化する。したがってこれらの特徴を生かして、周期構造の乱れ、不純物の種類

やその置換サイト、さらに自由キャリア濃度や移動度などの伝導に関わる情報が得られることがある。次に取り上げたのは、(4)残留応力の影響、(5)三元混晶のスペクトルで、試料中の残留応力や組成評価にラマン散乱が有力な道具になることを述べた。

重要度ではこれらに劣らないものの、本稿で取り上げなかったⅢ族窒化物半導体関連のラマン散乱評価トピックスとしては、(6)基板界面の問題、(7) 加熱効果、(8) p 型試料の電子物性、(9)共鳴ラマン散乱、(10)ナノ構造などがある。(6)では異種界面近くの構造乱れやそれに伴う電子物性の評価、(7)では残留応力の温度変化や構造安定性が主な検討事項になる。(8)で、p 型では低いキャリア移動度のために n 型のような典型的な LO-フォノン-プラズモン結合モードは観測されないため、多少の困難はあるものの、電子的性質評価の多少の手がかりはある。(9)は励起レーザーをバンドギャップエネルギーに同調させる手法で、薄膜の高感度評価などに有用である。また(10)に関して最近、ナノ粒子、ナノロッドのように数 nm 桁の構造物が制御性良く作成される手法が開発され、ラマン散乱評価もよく行われている。表面フォノンモードのようにバルク結晶にないナノ構造物独特のユニークなスペクトル上の特徴が報告されている。

以上は主にラマン散乱技術の利用法の観点で見てきたが、一方で発表件数的にはずっと少ないものの、Ⅲ族窒化物半導体の基礎物性そのものの解明にラマン散乱の立場で取り組むべき対象も依然として数多く残されている。例えば、InN は多くのミステリアスな性質を持っていそうであるが、これまでラマン散乱がその解明に大いに貢献してきたとは言い難い。他に、例えば混晶をあげると、AlGaN は比較的データが出始めているが、良質結晶の成長が困難な InGaN は解明が遅れているし、AlInN などの混晶ではまとまったラマンデータはほとんど無い。さらに四元混晶や、GaAsN のような他元素との組み合わせも調べられていない。良質で系統的な試料作成が大いに期待される課題が多い。

最後に付記すると、Ⅲ属窒化物半導体ラマン散乱評価例について本稿ではあまり丁寧には参考文献をあげていない。本稿で取り上げた仕事は主に 2002 年頃までの話であるがこれらの文献については例えば私のもう少し詳しいレビュー[9] をご覧頂きたい。

参考文献

1. V.Yu.Davydov, *et al.*, *Phys.Rev.B*, **58** 12899 (1998).
2. A.Tabata, *et al.*, *Appl.Phys.Lett.*, **74** 362 (1999).
3. H.Harima, *et al.*, *J.Cryst.Growth*, **189/190** 672 (1998).
4. H.Siegle, *et al.*, *Solid State Commun.*, **96** 943 (1995).
5. W.Limmer, *et al.*, *Appl.Phys.Lett.*, **72** 2589 (1998).
6. H.Harima, *et al.*, *Appl.Phys.Lett.*, **75** 1383 (1999).
7. F.Demangeot, *et al.*, *Solid State Commun.*, **100** 207 (1996).
8. V.Yu.Davydov, *et al.*, *Phys.Rev.B*, **65** 125203 (2002).
9. H.Harima, *J.Phys.:Condens. Matter* **14** R967 (2002).

結 晶 の 皺(しわ) を 鑑(み) る

― 電子顕微鏡による欠陥の解析 ―

桑野　範之
九州大学　産学連携センター（先端機能材料領域）
〒816-8580　福岡県春日市春日公園６－１

緒　言

機能材料の特性発現にはその微細組織が大きく関わっているので、新規機能材料・デバイスの開発においては、材料の微細組織制御が不可欠である。そのためには精密な結晶評価・解析が重要となる。結晶評価・解析にはその目的によって最適な手法を選択すべきであるが、電子顕微鏡（以下、電顕と略する）法は空間分解能の点からも強力な手法といえる。しかしながら、観察条件によって観察される電顕像コントラストが変化したり、微細組織が必ずしもそのまま直結したコントラストとして現れないこともあって、利用するにはどうしてもバリアーを感じてしまうことが少なくない。それでもなお電顕法は他の手法では取得できない貴重な情報が得られるので、たとえ直接使用しなくとも、電顕を使うと何がわかるのかを理解しておくのは機能材料研究を進める上で大きなメリットとなる。ここでは、まず電顕の概要を説明し、窒化物半導体結晶での結晶評価・解析の代表的なテーマのひとつである転位を例にとって、結晶評価・解析の実践を紹介する。さらに、機能材料研究における「結晶評価・解析」や「組織制御」の役割についても議論したい。

電子顕微鏡の種類と概要

電顕とは文字通り、電子線を光源として対象物の拡大像を観察する装置である。電顕は結像方法により次の 3 種類に分類できる。（図 1）

①透過型電顕(TEM)、　②走査透過電顕(STEM)、　③走査型電顕(SEM)

透過型電顕(TEM）は、電子線を光源として対物レンズが結像した拡大実像をさらに拡大し蛍光スクリーンに投影するもので、投射機能付の光学顕微鏡（光顕）に類似している。透過型電顕と光顕の大きな違いは、空間分解能とコントラスト発現機構である。顕微鏡の空間分解能の極限は用いる光源の波長とレンズ特性に依存する。可視光線を光源とする光顕での試料平面上の空間分解能は、たとえ理想的なレンズであっても数百ナノメーターより上回ることはできない。これに対して透過型電顕で用いる電子線の波長は、加速電圧が 200kV の場合でも 0.0025 nm と短いので、１Å 以下の空間分解能を得ることも不可能ではない。

通常の光顕では、試料を透過（あるいは反射）してくる光の吸収に波長依存があるため、色彩や明度によるコントラストがつく。（偏光顕微鏡や干渉顕微鏡、蛍光顕微鏡などは特殊な部類とする。）これに対して、透過型電顕では、①吸収、②回折、③干渉がコントラストを与える。通常の透過型電顕（CTEM; conventional TEM)では一定の加速電圧の下での電子線を用いるので、当然ながらモノクロである。

CTEM では電子線を試料の観察領域全体に広げて照射てレンズで結像するのに対して、STEM では電子線を細く絞って試料上に照射し、それを走査することによって 2 次元像を得る。いずれも試料を透過してきた電子を使って像を得るので、光の相反定理により、一般的な像は TEM と STEM とでは基本的には同一のコントラストが得られることになる。しかしながら、実際には像形成のために取り込む電子の出現過程などが異なるため、それぞれ独自なコントラストとなる。STEM では用いる電子検出器の位置と大きさにより、試料から出てくる電子の散乱角度を選択できる。入射光軸に近い電子で形成される像を明視野(BF; bright-field)像、環状検出器で回折斑点を取り込んで得られる像を環状暗視野(ADF；annular dark-field）像、回折斑点が認められないほど高角度方向に散乱した電子(温度散漫散乱による非干渉性電子など）を取り込んで得られる像を高角度環状暗視野(HAADF；high-angle annular dark-field）像と呼ぶ。HAADF 像コントラストは、試料構成原子の原子番号の 2 乗に比例した明度を示す（z-contrast)、回折現象の影響が少ない、などの特徴を有しているとされている。

走査型電顕は、STEM と同様に、電子線を細く絞って試料上を走査させながら試料から放出される電子を検出して像にする。試料から放出される電子は大きく分けて二次電子と後方散乱電子（反射電子）があって、通常は、二次電子像は表面形状を、後方散乱電子像（反射電子像）は表面凹凸および平均組成を観察する場合に用いられている。最近では試料に入射された電子の回折現象や試料結晶の電子構造によって二次電子放出量が異なることに由来するコントラスト（チャネリングコントラスト、電位コントラスト、ドーパントコントラストなど）が注目されてきている。すなわち、SEM は試料形状を見るだけの安直な装置ではなく、結晶微細構造などの情報が得られる新規解析機器となりつつある。

装置の構造に注目すると、STEM は電子検出器が試料の下方に設置させているのに対して SEM は上方に設置されているという違いしかない。観察対象が担持された単原子（群）もしくは単原子膜のような場合は、SEM は散乱角度が極めて大きい STEM とみなすこともできよう。加速電圧の点では既に、STEM では 1000 kV 以上から 40 kV 以下まで、SEM は 40 kV から数十～数百 V 以下までの範囲がカバーされているので、両者の間には切れ間がない。さらに低加速電圧側では（走査型）低エネルギー電顕(LEEM, SLEEM)につながってくる。STEM-SEM-SLEEM は一連の解析機器であると認識して、利用していくことが望ましい。[1]

STEM, SEM, SLEEM の共通した特徴は、電子線を細く絞って照射するので照射した微小領域の情報が得られることである。このときに検知するのは電子の強度、回折パターン、エネルギー分散、散乱角度分散のみならず、特性X線や蛍光、あるいは試料電流などが対象となる（たとえば、EPMA やμ-CL, EBIC など)。したがって、その観点からは、SEM, STEM は電子線をプローブとした走査プローブ顕微鏡(SPM; scanning probe microscope)の範疇に入ると捉えてもよい。

透過型電顕の構造と結像原理

ここでは、最も基本的な通常の透過型電顕(CTEM)について概略を説明する。透過型電顕は垂直のコラム構造であり、上から電子銃、照射レンズ系、試料室 - 結像レンズ系、中間レンズ系、投影レンズ系、観察 - 記録系で構成されている。CTEM で最も重要なのは結像レンズ

系（対物レンズ）－中間レンズ系である。（図 2）

入射した電子線が試料の微細組織に対応して吸収したとすれば、それは明暗のコントラストとなりうるが、単に散乱されただけならば、対物レンズで結像させても元の強度に戻るだけでコントラストを与えない。これに対して、①散乱された電子波の一部を選んで結像する、②散乱された電子波同士で干渉させる、③位相が異なる電子波（あるいは、位相を変えた電子波）と重ね合わせると、散乱状況の違いを像コントラストとすることができる。上記の例では、①回折コントラスト（明視野像、暗視野像など）、②多波干渉コントラスト（格子像、モアレ像など）、③位相コントラスト（位相像、格子像、ホログラフィーなど）を挙げることができる。①や②では、結像に用いる電子波は「対物絞り」で選択する。

対物レンズ（凸レンズ）には 2 つの結像位置がある。平行ビームがレンズを通ると焦点距離のところ（すなわち焦点面）で収斂する。光軸から傾いている平行ビームでは、焦点面上で光軸からその傾きの分だけずれて収斂する。すなわち、散乱強度の散乱方向分布が結像することになる。一方、試料下面の一点から発せられた電子線は再び収斂し（この位置は像面と呼ばれる）、実像を結像する。言い換えると、焦点面には回折パターンが、像面には組織像が同時に得られている。このどちらを観察するかは、中間レンズの焦点を調整することによって選択する。また、このことから、上記の対物絞りは原則的には対物レンズの焦点面の位置にあることが理解される。

転位の電顕像コントラスト

ここでは通常の透過電顕での観察について述べる。転位などの欠陥は原子配列が正規のものからずれているのであるから、物質そのものが大きく変化したものではない。したがって、試料中を通過する電子波の全体の強度は変化しないとみなしてよい。従って、試料を通過してきた電子線をそのまま結像しても、干渉コントラスト以外は出てこない。電子線は本質的には波動であるので、試料結晶を通過する場合には必ず回折現象がおきる。転位線の近傍では格子面の方向がずれているとみなすと、Bragg 反射の状況が変化するので、その位置からの回折強度は変化することになり、回折コントラストを与えることになる。このように考えると直観的には分かり易いが、さらに詳細に議論する場合は、欠陥部で周期性が乱れた結晶ポテンシャルによって電子波動がどのような挙動をとるかを考える必要がある。

運動学的回折近似では、回折した電子線の振幅は結晶構造因子の値に比例して変化する。したがって、転位が回折コントラストとして観察されるかどうかは、転位の存在が結晶構造因子の値に影響を与えるかどうかを見ればよい。転位による結晶格子の位置変位を $\boldsymbol{R}$ とすると結晶構造因子 $F(\boldsymbol{r}^*)$は

$$F(\boldsymbol{r}^* = h\boldsymbol{a}^* + k\boldsymbol{b}^* + l\boldsymbol{c}^*) = f\sum \exp\{-2\pi i(\boldsymbol{x}_j + \boldsymbol{R})\boldsymbol{r}^*\} = f\{\sum \exp(-2\pi i\boldsymbol{x}_j\boldsymbol{r}^*)\}\exp(-2\pi i\boldsymbol{R}\boldsymbol{r}^*)$$

ここで、$\boldsymbol{r}^*$は逆格子ベクトル、$\boldsymbol{x}_j$はブラベ格子点位置、fはブラベ格子点に関する構造因子である。回折条件から、回折波の振幅には $F(\boldsymbol{g}=\boldsymbol{r}^*)$の変化が与えられる。すなわち、正常な結晶と比べ $\exp(-2\pi i\boldsymbol{R}\boldsymbol{g})$ の位相差を生じさせる。結局 $\boldsymbol{g}\boldsymbol{R}$=integer であれば、位置変位 $\boldsymbol{R}$ は回折波

には影響を与えないので、転位があったとしても見えないことになる。転位芯での位置ずれをバーガースベクトル $\boldsymbol{B}$ で表すと、転位芯からの距離により連続的に変化する転位周りの変位は大よそ $\boldsymbol{R//B}$ と近似できる。したがって、転位では $\boldsymbol{gB}$=0 が転位像が消失する条件となり、これから $\boldsymbol{B}$ の方向を求めることができる。一方、積層欠陥のように、格子位置が不連続に変位し、欠陥面以外では $\boldsymbol{R=0}$ となる場合は、像コントラスト消失条件は $\boldsymbol{gB}$=integer となる。このように回折条件を選んでコントラストの出現・消失から $\boldsymbol{B}$ を解析する手法は一般に $\boldsymbol{gB}$ 法と呼ばれている。もちろん、上記の $\boldsymbol{R}$ と $\boldsymbol{B}$ の関係が完全に満足されていない場合は、欠陥像は完全には消失せずに弱いコントラスト(faint contrast)を示すことが多い。

バーガースベクトルの解析

透過型電顕の組織観察では、転位の有無のみならず、形状やバーガースベクトルを観察・解析を行う。そのためには、まず、電子線を結晶の晶帯軸から入射させて明視野像を観察し、できるだけ多くの転位の位置を確認する。ただし、この場合でも入射方向に平行な $\boldsymbol{B}$ をもつ欠陥は見えない。次に、特定の回折斑点のみを強く励起させた条件下（2 波励起条件）もしくは回折斑点が一列に並んで強く励起した条件（系統列反射条件）で、明視野像もしくは暗視野像を観察して $\boldsymbol{gB}$ 法を応用する。この場合は明視野像と暗視野像とでは、明暗が逆転することが多いが、コントラスト消失に関してはほとんど同じ情報を与える。転位線の細部を観察する方法としては、回折条件をわざとはずした回折斑点を用いて結像する「弱ビーム暗視野法」がある。いずれの場合でも $\boldsymbol{gB}$ 法を用いる場合は、注目した回折斑点（系列）以外からの影響が無いように留意する必要がある。

$\boldsymbol{gB}$ 法ではバーガースベクトルの方向は解析できるが、大きさと符号（向き）は分からない。これを解析するには他の方法を用いる。たとえば、転位周りの歪場のために出現する特徴的な非対称の明暗コントラストに注目すれば、$\boldsymbol{B}$ の向きを評価することができる。あるいは等厚干渉縞や収束電子回折(CBED; convergent beam electron diffraction)パターンを用いる方法、格子像から直接評価する方法などあるが、それぞれメリット・デメリットがある。いずれも方向だけではなく向きを規定することから、観察イメージの裏表や反転、組織像と回折像との 180 度回転などには注意する必要がある[2]。このことはバーガースベクトル解析のみならず、結晶極性などの解析においても同様である。

SEM, STEM による転位の観察

STEM-BF 像や STEM-ADF 像では転位は CTEM での晶帯軸入射での BF 像に類似したコントラストとなる。収束した入射電子を用いるので回折条件からのずれが混ざった像となる。そのため、等厚干渉縞(thickness fringe)やベンド縞(bending contour)が打ち消されて見易い像コントラストとなるので、厚い試料や湾曲した試料などのやや状態が良くない試料にも有効である。転位のバーガースベクトルの解析には、CBED パターンが有効となる。

SEM においても電子線という波動を結晶に入射するのであるから、当然ながら回折現象が起きる。後方散乱電子（あるいは反射電子と呼ばれる）によるチャネリングコントラストや電子線後方散乱回折(EBSD; electron back-scatter diffraction)はその表れである。これらを応用す

れば転位も観察できる。電子チャネリングコントラスト像(ECCI; electron channeling contrast image) [3]や EBSD でのクォリティーマップ（IQ map; image-quality map)などはその例である。最近の SEM 機器や EBSD ソフトウェアを用いると、通常の試料配置でも転位を直接観察できることがある[4]。また、EBSD パターンから格子歪を 0.02%の相対精度で測定できるようになってきており[5]、転位周辺の歪を測定することで ***B*** の絶対値を直接評価することもできる段階にきている。

結晶成長と転位の挙動

TEM を用いて転位を解析した例を紹介する。

１．低温バッファ層の効果

サファイア(0001)基板上に GaN を直接成長させると、多くの貫通転位や横方向転位（水平転位）が発生するが、予め基板上に低温で AlN や GaN を堆積しておけば、良質の GaN が得られる（二段成長法)。この観察により、AlN 層はこの段階では細かい柱状晶からなっていること、GaN 層は AlN バッファ層直上では AlN と同様な柱状晶をなすが、高さが 50nm 程度の台形島状晶が覆っていること、その島状晶をさらに覆うように良質晶領域が発展して GaN 層上部領域を形成していること、残留する貫通転位は GaN/AlN 界面近傍から伸展していることがわかる。これらの結果から、低温バッファ層が適度な大きさの島状結晶を均一に発生させ、その後の横方向成長によって転位が消滅していくプロセスが解明できた。[6]（図３,４）

２．貫通転位の傾斜

AlN や AlGaN テンプレート上に GaN や AlGaN 層を堆積すると、テンプレート内の貫通転位の多くは上部層に受け継がれる。このとき、貫通転位は傾斜する。***gB*** 法で ***B*** の向きを評価してみると、傾斜の方向は<01$\bar{1}$0>であり、***B*** とは直交していることがわかる。（図５）これは、貫通転位（*a*-型転位、この場合は刃状転位）に伴う過剰原子面(excess half-plane)の面積を小さくすることによって上層内の圧縮応力を緩和している結果である。このモデルの確証は ***B*** の方向だけではなく向きも決定する必要がある。それは等厚干渉縞の本数の増減から確かめている。

貫通転位の傾斜方向は ***B*** を含むすべり面（slip plane)上にあることもある。この場合は貫通転位は一般にやや湾曲している場合が多い。[7]

転位が表面に出ている場合は、転位には表面に垂直になろうとする力（image-force)がかかる。また、結晶の成長方向に引っ張られる効果がある。そのため、マクロステップを伴う成長の場合は、そのマクロステップと交差する部分で貫通転位は曲がる。逆に、膜内に貫通転位が一方向に折れ曲がっている帯状組織が見られたら、それはマクロステップが進行した跡ということになる。これは、薄膜成長過程の解析に重要な手がかりになる。（図６）

３．貫通転位の消滅

１つの結晶の内部では転位は単独では消滅できない。そのため、転位本数を減らすには、横方向に伸展して結晶の外に逃がすか、転位同士が合体させる以外にない。そのため、均一な２次元成長では転位は直伸するだけで転位は合体できないことが多いので、結晶の質は保持できても転位密度を減らすことはできない。そのため、成長途中で何とか転位を曲げるこ

とが不可欠である。これまで種々の転位密度減少方法が提案されているが、いずれもいかにして転位を曲げるかを工夫した手法である。たとえば、島状結晶成長の横方向成長では、転位は成長方向に引き伸ばされ、ついには島状結晶同士の谷間（ピット）に集められ（sweep-up）、合体を果たすことになる。[8]（図７）

一方、前出の GaN/AlGaN の場合は多少状況が異なる。GaN 層に発生する圧縮応力が駆動力となって転位が傾斜していくことになるが、GaN 層が薄い間は駆動力が小さく、貫通転位の多くは曲がらずに直伸する。GaN がある程度厚くなってから、転位は GaN 結晶内を移動し、最終的には GaN/AlGaN 界面近傍に合体した転位対（ヘアピン構造）を形成することになることがわかった。以前は、GaN 堆積当初から GaN/AlGaN 界面上で転位対は合体すると思われていた。この転位の結晶内の移動は、過剰原子面の面積を変化させる方向なので、所謂、上昇運動(climb motion）となり、大きなエネルギーと原子拡散を必要とする。貫通転位が湾曲するにはなにかトリガーが必要となると考えられる。AlGaN では GaN に比較して結晶は硬く原子拡散係数も小さいので、転位は結晶内で移動することは困難となる。このことが AlGaN/AlN では期待するほどに転位の合体が進まないことの原因の１つである可能性がある。（図８）[9]

あとがき、　－　微細構造評価・解析とは　－

電顕による欠陥の観察について、その基本となるところを述べた。電顕による欠陥の観察については、このほかにも動力学的回折効果の利用、3 次元トモグラフィー技術など多くの解析技法がある。それらについては別の機会に記述する。

電顕による欠陥の解析は一般に「結晶評価」として取り扱われる。しかしながら、単に「評価」といえば、結晶の良し悪しの点数をつけることで終わる。個々での「評価・解析」というのは、観察結果から微細組織を解析するに留まらず、その微細組織がどのようにして形成されてきたか、これから先にどのように変化するかを解明することである。すなわち、試料内の静的な状態(stationary state)ではなく、微細組織の形成過程および形成機構を kinetics あるいは dynamics の観点から捉えることが重要である。そのためには、解析技術のみならず、解析対象の材料についての十分な理解、関連する固体物性学や熱力学、結晶学を始めとする広い範囲の科学技術の結集が不可欠となる。観察結果の細かいところも、その背後に重要な情報がある可能性があるので疎かにはできない。そのような重要な観察結果が得られるは「偶然」の賜物かもしれないが、それを逃さない注意力(serendipity)が必要となる。観察・解析で実際に得られる情報量には限りがある。その少ない情報から微細組織形成過程の全体を解き明かすことになる。「顔に刻まれた皺をみる」など限られた条件から、その人がどのような性格なのか、どのような人生を送ってきたのかを推しはかる技術は「プロファイリング」と呼ばれる。すなわち、微細構造評価・解析とは、その結晶試料に対するプロファイリングなのである。

参考文献

[1]　越川孝範：表面科学 23(2002), 262-270.

[2] 桑野範之、釘山裕太、木庭大作、福島豊仁、江崎哲也 : 九州大学超高圧電子顕微鏡室研究報告, **32**(2008), 78-79.

[3] C. Trager-Cowan, F. Sweeney, P. W. Trimby, A. P. Day, A. Gholinia, N-H. Schmidt, P. J. Parbrook, A. J. Wilkinson and I. M. Watson, Phys. Rev., **B75**(2007), 085301.1-8.

[4] N. Kuwano, M. Itakura, Y. Nagatomo and S. Tachibana: J. Electr. Micros., **59**(2010), S175-S181.

[5] D. J. Dingley, J. Wilkinson, G. Meaden, and P. S. Karamched: J. Electr. Micros., **59** (2010), S155-S163.

[6] K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki, N. Kuwano, T. Shiraishi and K. Oki: J. Crystal Growth , **115** (1991), 628-633.

[7] N. Kuwano, Y. Kugiyama, Y. Nishikouri, T. Sato and A. Usui, J. Crystal Growth, **311**(2009), 3085--3088.

[8] M. Hijikuro, N. Kuwano, M. Takeuchi and Y. Aoyagi: Phys. Stat. Sol., **(c)3**, No.6 (2006), 1832-1835.

[9] N. Kuwano, H. Miyake, K. Hiramatsu, H. Amano and I. Akasaki: Phys. Stat. Sol., **(c)8**, No. 5 (2011), 1487-1490.

TEM による解析に関する参考文献

・P. B. Hirsch et al.: Electron Microscopy of Thin Crystals, Butterworths, London (1969)

・坂　公恭：結晶電子顕微鏡法，内田老鶴圃，(1997)

・桑野範之：化合物半導体の欠陥組織観察，材料開発のための顕微鏡法と応用写真集，(社)日本金属学会，(2006), p.82

・桑野範之:窒化物結晶における構造欠陥(TEM による解析の実践), 日本結晶学会誌, **36**(2009), 48-54.

・桑野範之：　貫通転位は制御できるか　－電顕による評価と生成・消滅機構の解析，　応用物理学会工学分科会第 131 回研究会テキスト(2009)

・桑野範之：　結晶欠陥の評価　－転位などの結晶欠陥の見方・考え方－，第 1 回結晶工学講演会テキスト，応用物理学会結晶工学分科会　(2010).

・桑野範之：　微細組織制御による機能性材料特性の高度化，未来材料，**11**(4) (2011),56-61.

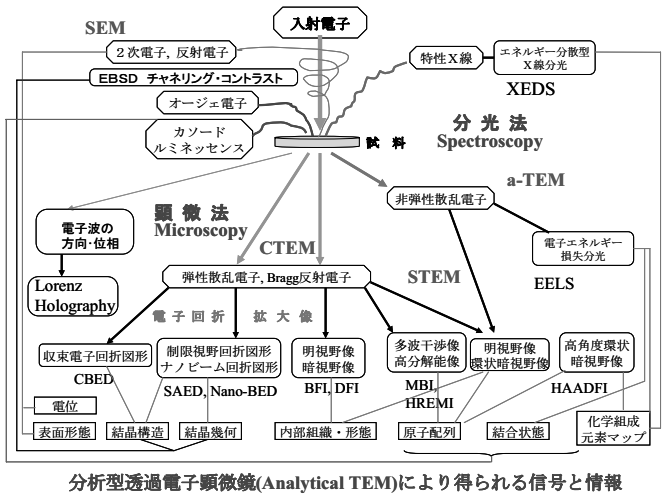


図 1　電子顕微鏡群の関連（SEM-TEM STEM)

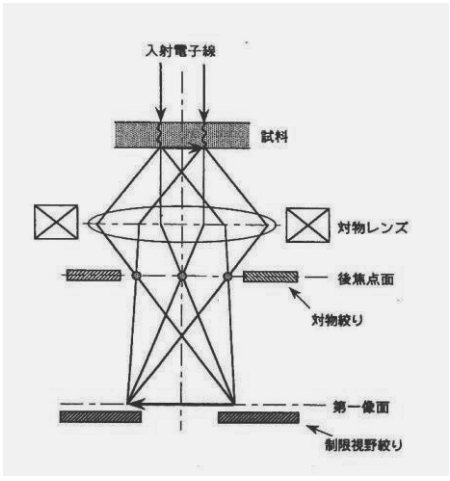


図2　通常のTEMにおける対物レンズによる光線図

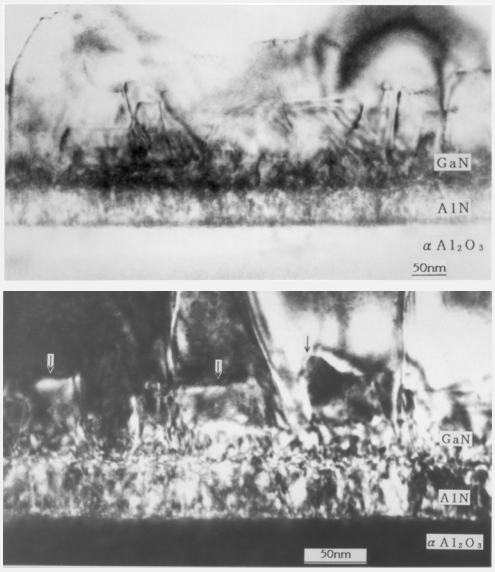


図 3　2 段成長法による貫通転位の減少
低温堆積 AlN バッファ層は霜柱状をなしている。

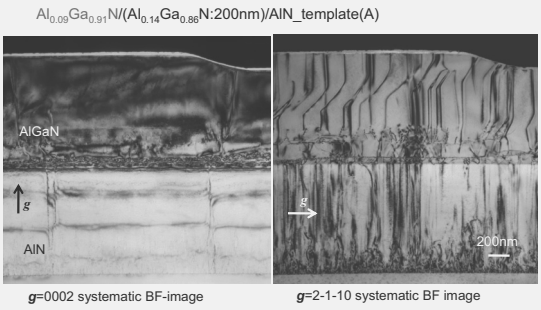
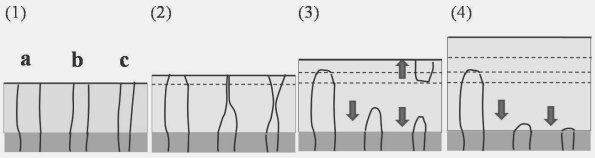


図 6　AlGaN/AlN_template における a-型貫通転位の曲がり（ジョグ）
表面マクロステップに繋がっている。



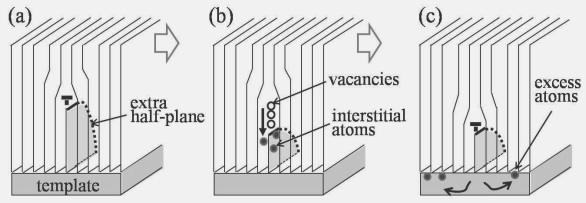


図 9　転位対の合体による消滅機構
結晶内での転位の上昇（下降）運動(climb-down motion)には過剰原子の拡散が必要となる。

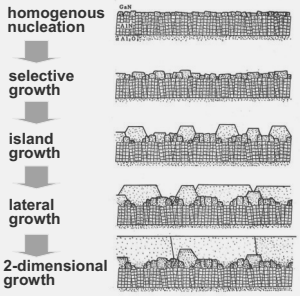


図 4　2 段成長法における成長モデル

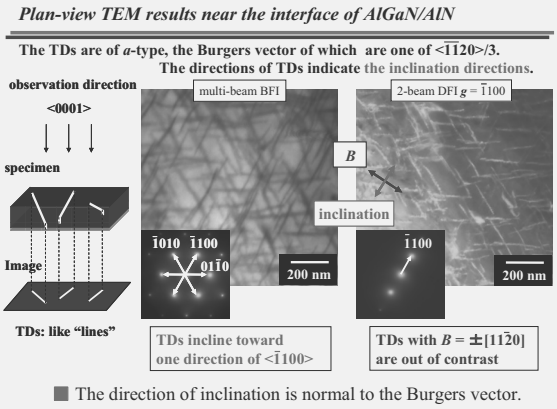


図 5　*a*-型貫通転位の傾斜方向と
バーガースベクトル

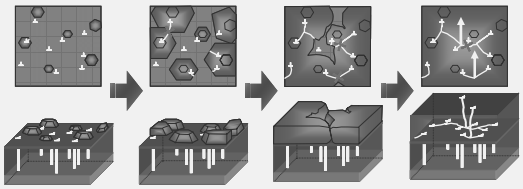


図 7　島状結晶成長に伴う貫通転位の集合・合体過程（sweep-up モデル）

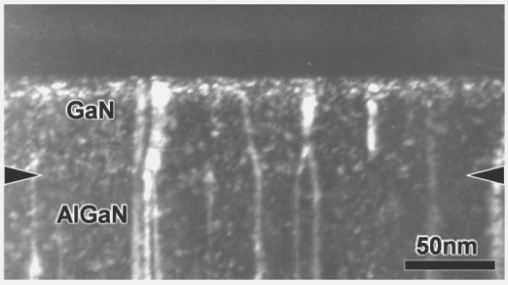


図 8　GaN/AlGaN での転位対の合体

23 ME－S3

（研究集会）

海洋エネルギー利用・海洋環境問題に関する力学問題

研究代表者
大阪大学大学院工学研究科教授
柏　木　　正

１．目 的

近年、CO2 排出による地球温暖化や化石エネルギー資源の枯渇が深刻な問題になっており，日本でも地球温暖化防止会議(COP3)で決定された CO2 排出削減目標に向けて、さまざまな努力が続けられている。その中，自然エネルギー利用技術の確立は急務となり，特に海洋エネルギーの利用は重要な位置つけになっている。

海洋工学分野の研究は，海上風，潮汐，波浪を利用した発電技術や，それに伴う海洋環境への影響の評価に関する課題に関心が集中されつつある。本研究集会では，これらの研究課題に関わるまた未解決な流体力学的な諸問題について，基礎的・実用的な研究を行っているいろいろな分野の研究者が一堂に会し，研究成果の発表，研究情報の交換を行うことが目的である。また，国内だけでなく海外からの参加者も加え，海洋エネルギー利用・海洋環境問題などをキーワードとする研究の国際的情報発信源としての役割を果たすことも重要な目的となっている。

２．研究集会の開催日時，場所

開催日時：平成23年12月16日（金）13：00～18：00
　　12月17日（土） 9：00～12：00
開催場所：九州大学応用力学研究所2階会議室

３．講演プログラムと概要

講演プログラムは末尾に示しているので，ここでは講演の順番に従ってその概要，並びに全体的な雰囲気，参加者からの感想などについて述べておく。なお，目的にも書いたように，この研究集会は既に国際研究集会として認知されており，今回も講演，討論はすべて英語で行われたことを申し添えておく。

Coupled Problem of Dam-Break Flows

Alexander Korobkin (University of East Anglia, UK)

Initial stage of the flow with a free surface generated by a vertical wall moving from a liquid of finite depth in a gravitational field is studied. The liquid is inviscid and incompressible, and its flow is irrotational. Initially the liquid is at rest. The wall starts to move from the liquid with a constant acceleration. It is shown that, if the acceleration of the plate is small, then the liquid free surface separates from the wall only along an exponentially small interval. The interval on the wall, along which the free surface instantly separates for moderate acceleration of the wall, is determined by using the condition that the displacements of liquid particles are finite. During the initial stage the original problem of hydrodynamics is reduced to a mixed boundary-value problem with respect to the velocity field with unknown in advance position of the separation point. The solution of this problem is derived in terms of complete elliptic integrals. The initial shape of the separated free surface is calculated and compared with that predicted by the small-time solution of the dam break problem. It is shown that the free surface at the separation point is orthogonal to the moving plate. Initial acceleration of a dam, which is suddenly released, is calculated.

Simulation of 3D Fully Nonlinear Water Waves based on GN Theory

Wenyang Duan (Harbin Engineering University, China)

The Green-Naghdi Theory (Demirbilek and Webster, 1992) is developed to Level 7. The linear analytical solution corresponding to Level 1 up to Level 7 GN shallow water waves has been derived. It's found that Level 7 GN theory can predict the waves with kh<26 (k is the wave number, h is the water depth). An experiment conducted by Luth et al.

(1994) was reproduced numerically. The Level 5 GN theory shows convergence compared with Level 7 GN theory. The Level 5 GN theory can predict the wave transformation accurately compared with experimental values. Another experiment by Zou et al. (2008) was also reproduced numerically. It's shown that the GN theory can predict wave transformation over uneven seabed accurately, including the fast varying bathymetries.

Added Resistance Computation by Using Far- and Near-Field Approaches

M.G. Seo, D.M. Park, K.H. Kim, Y. Kim (Seoul National University, Korea)

This paper presents a comparison of the computation results of added resistance on ships in waves. Recently, the design of ships with less green-house gas is of great interest in naval architecture fields. Ship designers need to find optimum hull forms with minimum resistance in ocean waves. Therefore, an accurate computation of added resistance is getting more important for the prediction of power increase on ships in random ocean waves. This study focuses on the numerical computation of added resistance in different methods. To calculate added resistance on ships in waves, three different methods are considered. One is a direct pressure integration method, another is a momentum conservation method, and the other is a radiated energy method. The direct pressure integration method and the momentum conservation method are combined with a higher-order Rankine panel method, and the radiated energy method is combined with the strip method. The computational results are validated by comparing them with experimental data on Wigley hull models, Series 60 hulls, and S175 containership. Reasonable agreements are observed for all the models. The study is also extended to the analysis of added resistance in short wave range. To complement the results of added resistance in short wave, the established asymptotic calculation methods are examined.

Large-Scale GPU Tsunami Simulation on a Multi-Level Mesh

Marlon Arce Acuna (Tokyo Institute of Technology)

We present a new research for Tsunami simulation computed with the speed up of GPU for a large domain case, such as the Pacific, with a Multi-Level Mesh Refinement Technique. The level set method is used to determine the coastline and based on this value we define different distances for which each refined level is created. These meshes and the interpolation are computed on the GPU as is the main mesh. This boosts the performance several times compared to that of the CPU. A refinement based on ocean depth was also introduced, since the wave moving in the open ocean can be solved in a much coarsen grid. Preliminary results show correct detection of the coast and refinement for the several levels created when a Tsunami simulation is tested..

Application of Lattice Boltzmann Method for Environmental Flow Simulation

Fei Jiang, Changhong Hu (Kyushu University)

The ocean sequestration of carbon dioxide (CO2) in the deep sea by forming a liquid CO2 lake on the ocean floor is considered as a hopeful method for the mitigation of the global warming. However the liquid CO2 is expected to dissolve in the seawater. The rate of dissolution is amplified under the conditions of ocean currents and turbulence. In this paper, we propose a Lattice Boltzmann Method (LBM) for accurate modeling and large scale simulation of the CO2 dissolution, diffusion, and convection process, in the condition of complex ocean current, turbulence and varying topography of the ocean floor. This method is carefully validated by using several benchmark test cases. A two-dimensional simulation of CO2 dissipation from a CO2 lake is carried out to demonstrate and discuss the capability of the proposed method.

Development of Tidal and Ocean Current Generator System Suitable for the Sea around Japan

Yoshimasa Minami (National Maritime Research Institute)

This research is focused on cost reduction and higher power for tidal and ocean current power plant. In this presentation, we report some recent researches. We have developed the design tool for elastic turbine for tidal power plant. The effectiveness of these systems was verified in model test. In the performance of turbine in wave, the averaged power coefficient is almost the same as the performance of turbine in calm water. In a case study, maximum deformation of torsion angle is about 10 degree at wing tip. The sequence of composite material can be designed for this change of torsion angle and wing load. In economical evaluation, tidal power system using elastic turbine can reduce capital cost and maintenance cost. The concept of the power generation system using a multi rotor will be proposed, the performance

test has been carried out by changing the distance between rotors and a phase angle..

Model Testing and Performance Evaluation of a Shrouded Horizontal Axis Tidal Turbine

Huihui Sun, Yusaku Kyozuka (Kyushu University)

Model experiments for the bare turbine and the shrouded turbine were carried out in CWC respectively. Experimental results show that improvements of toque and power coefficients are apparent by attaching the diffuser. Performance evaluation was done through BEM and CFD for the bare turbine and the shrouded turbine. Considering the calculation time and operating interval, BEM is superior to CFD for evaluating the performances of the bare turbine and the shrouded turbine.

Fundamental Research on the Energy Transmission Efficiency of a Rotating Pendulum-type Wave-power Generator

Saki Nishimatsu, Masashi Kashiwagi (Osaka University)

In this presentation, I proposed the rotating pendulum-type wave-power generator. The smaller cylinder rotates on the interior surface of circular cylinder of floating body without sliding. The electric generator is set at the center of smaller cylinder. The coupled motion equations between the floating body and smaller cylinder inside are established and solved using computed hydrodynamic forces acting on the floating body, then the energy transmission efficiency is calculated. The efficiency becomes higher when the motions are resonant. In order to achieve a high value of efficiency in wider range of frequency, the balance of the resonant frequencies between the floating body and smaller cylinder inside is very important.

Tank Tests about TLP Type Offshore Wind Turbine Using an Elastic Model

Minori Kozen, Yasunori Nihei, Kazuhiro Iijima (Osaka Prefecture University)

In this presentation, some recently obtained research results are presented on the design of a new Tension Leg Platform (TLP) type offshore wind turbine. An experiment in the towing tank using a new elastic model was carried out. Motion characteristics of the floating body, dynamics of tower and mooring lines, and other electricity generation issues are discussed.

Coupled Horizontal and Torsional Response of a Floating Structure by an Advanced Torsional Beam Theory

Nao Kameyama (Osaka University)

1D beam representation for coupled horizontal and torsional response of a container ship's hull girder is addressed. It may help reducing the preparation cost of the structural model instead of using the shell finite elements. Firstly, problems with the 1D beam representation for the container ship are reviewed. They include the effect of transverse members such as bulkheads on torsional response, discontinuity of longitudinal displacements between open and closed sections, and variation of vertical position of shear center along the ship's length. Then, an advanced torsional beam theory to solve the above problems is presented. Finally, it is shown that the present torsional beam theory compares well with the results from shell finite elements in terms of torsional deflection, natural frequency, natural modes and warping stress distributions.

Fluid/Structure Impact: Water Entry

Guo Xiong Wu (University College London, UK)

Fluid/structure impact occurs in many engineering applications. It is usually over a very short period of time, during which physical parameters change rapidly and very large pressure can be created. The present paper is based on the velocity potential theory together with the boundary element method. The discussions mainly focus on the following problems: (1) vertical water entry of twin wedges, (2) oblique entry of an asymmetric wedge, (3) vertical water entry of a wedge in free fall motion, (4) water entry of a free fall motion in three degrees of freedom, (5) water entry of an elastic wedge, (6) liquid column or droplet impact on a wall, (7) liquid block impact on a solid wedge (8) collision of liquid wedge and solid wedge, (9) jet impact on solid wall, (10) vertical water entry of a cone through free motion, (11) oblique entry of a cone. Detailed results are provided for all these cases. Their physical implications and applications are

discussed.

Fluid Impact on a Corrugated Plate with Trapped Gas Cavity

Tatyana Ivanovna Khabakhpasheva (Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Russia)

Initial stage of incompressible liquid impact onto a corrugated elastic panel with account for a compressible gas trapping between the corrugations is studied. The liquid free surface is flat and parallel to the panel before the impact. The corrugations are modeled as rigid short structures on the surface of the main panel. Part of the panel between two corrugations is elastic. The liquid closes the gas cavity between two corrugations and compresses the gas before the fluid comes in contact with the elastic part of the panel. The elastic deflections of the plate and bending stresses due to impact are determined accounting for the presence of the gas between the corrugations. The hydroelastic problem is solved within the Wagner approach. The effect of gas compressibility on the elastic behaviour of the corrugated elastic plate is investigated. Two cases, case of finite and case of infinite panel length outside of corrugation regions are considered. It is shown that the pressure in the gas cavity and elastic deflections grow beyond all bounds for the panel of infinite length and are finite if the panel is of finite length.

Comparative Study on Sloshing Model Tests

S.Y. Kim, K.H. Kim, Y. Kim (Seoul National University, Korea)

In this study, three dimensional sloshing model tests are conducted. The selected tank model has been tested by other facility, therefore it is intended to compared the present experiment with the existing experimental data. As test conditions, two kinds of irregular seas are considered. Based on pressure data from the tests, statistical analysis has performed. Several different methods are applied to pick up global peaks and define rising time, decay time of the selected peaks. Various statistical values based on the considered methods are compared and their consistency and/or discrepancy are observed. In each test condition, repeat tests are conducted 40 times and consequently 200 hours long time test results are obtained. From the tests, uncertainty of 5 hours test are studied and using bootstrap method, margin of error in the results are discussed. In the comparison with the existing data measure at other facility, it is shown that the present measurement provides slightly less pressures. This may be due to the different sizes of pressure sensors. The overall agreement of trends between the two facilities is obvious.

Experimental Study on Water Entry of Horizontal Cylinder

Changhong Hu, Zhaoyu Wei (Kyushu University)

We experimentally reveal the complex hydrodynamics of circular cylinders entering into water horizontally for low Froude numbers. The water entry is a combination of the two-dimensional flows and three-dimensional flows. For the long cylinder, two-dimensional flow occurs near the centre of the cylinder with three-dimensional effects being important close to the ends of the cylinder. The effect of the density as well as the ratios of cylinders' length to their diameter is considered. The non-dimensional time to the intersection of the cross lines formed by flows separated from side face along different directions is also used to reveal the scaling relationship of the cavities.

Analyses and Comparison on Ship Hydroelasticity by Using Different Levels of Numerical Approach

J.H. Kim, K.H. Kim, Y. Kim (Seoul National University, Korea)

This paper considers the ship springing analysis by using WISH-FLEX which has been developed at Seoul National University for the analysis of hydroelasticity of hull girder loads in waves. WISH-FLEX is based on a hybrid BEM-FEM method to couple the boundary value problems of two distinct domains: fluid and structure. To solve the hydrodynamic field, a three-dimensional Rankine panel method is applied, while the structural responses and loads are obtained by applying Vlasov beam theory. A strong-coupling scheme is used for solving fluid-structure interaction by an iteration scheme. This study focuses particularly on the difference of computational results for different modeling of hydrodynamics and structure. Even though the same computer code is applied, the computational results can be dependent on user and/or the modeling of computational parameters such as grids, beam modeling, and the modeling of external forces. The ship model in this study is a 10,000 TEU containership which has been experimented at MOERI/KORDI as the WILS II project. The computed motion RAOs and the time-histories of load signal are compared

with experimental data, and the agreement and discrepancy are thoroughly described. This kind of observation may help us to understand the uncertainty level of numerical analysis in ship springing analysis..

An Experimental Study on Dynamic Collapse Behavior of a Floating Structure Subjected to Extreme Loads

Hiroki Hotta (Osaka University)

Experimental investigations into the collapse behavior of a box-shape hull girder subjected to extreme wave-induced loads are presented. The experiment was performed using a scaled model in a tank. In the middle of the scaled model, sacrificial specimens with circular pillar and trough shapes which respectively show different bending moment-displacement characteristics were mounted to compare the dynamic collapse characteristics of the hull girder in waves. The specimens were designed by using FE-analysis. Prior to the tank tests, static four-point-bending tests were conducted to detect the load carrying capacity of the hull girder. It is shown that the load carrying capacity of a ship including reduction of the capacity after the ultimate strength could be reproduced experimentally by employing the trough type specimens. Tank tests using these specimens were performed under a extream wave in which the hull girder collapse once and repetitive focused waves in which the hull girder collapses by the number of the focused waves. It is shown from the multiple collapse tests that the increase rate of collapse becomes high once the load carrying capacity enters the reduction path while it is slow before reaching the ultimate strength.

Numerical Simulation of a Damaged Floating Body by the MPS Method

Hirotada Hashimoto (Osaka University)

This presentation describes a research on developing a numerical method for simulation of damaged ships. The 2D simulations based on the MPS method were conducted and validated with the model experiments. As a result, it was demonstrated that the MPS method has a good potential to well predict the inflow/outflow of floodwater through damage openings and estimate hydrodynamic forces under forced roll condition. In addition, transient motions of heave and roll which are essential for capsizing/sinking disasters of damaged ships can be predicted with practical accuracy if the trapped air effects are taken into account.

Statistical Model of Ship Propulsion Plant for Performance Assessment in Actual Seas

Oleksiy Bondarenko (Osaka University)

The performance of ship in actual seas in recent time has received much research attention which is mainly focused on diminution of speed loss, ship safety and energy efficiency. However, within the framework of ship performance a small attention has paid to the efficient and safe operation of propulsion engine which is the key element of ship. In this research attention is focused on developing the statistical model of complete ship propulsion plant which is constituted of three coupled components – ship hull, propeller and engine, including model of control system. Knowing the statistical properties of propeller torque fluctuation such as the variance and the probability density function, the responses of engine can be obtained, allowing assessment and optimization of the propulsion engine performance in actual seas conditions.

４．おわりに

「海洋エネルギー利用・海洋環境問題に関する力学問題」をキーワードに多くの分野から研究者が集まり，種々の研究テーマや解析手法に関して知見を深め，情報交換をするためにこの研究集会を国際研究集会として企画した。今回の講演会では最新の研究成果を聞くことができ，学際的な研究の発展が強く実感できた。今回も外国からの研究者が参加していたため，すべての講演・議論を英語で行った。韓国・中国・日本からの参加者の交流もこの研究集会の重要な目的になっており，この研究集会がすでに有意義な国際研究集会として認知されていることを確信した。

プ ロ グ ラ ム

期　日：　2011（平成 23）年 12 月 16 日（金），17 日（土）
場　所：　九州大学応用力学研究所 2 階会議室

１２月１６日（土）

13:10 - 13:40 Coupled Problem of Dam-Break Flows
Alexander Korobkin (University of East Anglia, UK)

13:40 - 14:10 Simulation of 3D Fully Nonlinear Water Waves based on GN Theory
Wenyang Duan (Harbin Engineering University, China)

14:10 - 14:30 Added Resistance Computation by Using Far- and Near-Field Approaches
M.G. Seo, D.M. Park, K.H. Kim, Y. Kim (Seoul National University, Korea)

14:30 - 14:50 Large-Scale GPU Tsunami Simulation on a Multi-Level Mesh
Marlon Arce Acuna (Tokyo Institute of Technology)

14:50 - 15:10 Application of Lattice Boltzmann Method for Environmental Flow Simulation
Fei Jiang, Changhong Hu (Kyushu University)

（休　憩）

15:30 - 16:00 Development of Tidal and Ocean Current Generator System Suitable for the Sea around Japan
Yoshimasa Minami (National Maritime Research Institute)

16:00 - 16:30 Model Testing and Performance Evaluation of a Shrouded Horizontal Axis Tidal Turbine
Huihui Sun, Yusaku Kyozuka (Kyushu University)

16:30 - 17:00 Fundamental Research on the Energy Transmission Efficiency of a Rotating Pendulum-type Wave-power Generator
Saki Nishimatsu, Masashi Kashiwagi (Osaka University)

17:00 - 17:30 Tank Tests about TLP Type Offshore Wind Turbine Using an Elastic Model
Minori Kozen, Yasunori Nihei, Kazuhiro Iijima (Osaka Prefecture University)

17:30 - 18:00 Coupled Horizontal and Torsional Response of a Floating Structure by an Advanced Torsional Beam Theory
Nao Kameyama (Osaka University)

（懇 親 会）

１２月１７日（土）

9:00 - 9:30　Fluid/Structure Impact: Water Entry
Guo Xiong Wu (University College London, UK)

9:30 - 9:50　Fluid Impact on a Corrugated Plate with Trapped Gas Cavity
Tatyana Ivanovna Khabakhpasheva (Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Russia)

9:50 - 10:10　Comparative Study on Sloshing Model Tests
S.Y. Kim, K.H. Kim, Y.Kim (Seoul National University, Korea)

10:10 - 10:30 Experimental Study on Water Entry of Horizontal Cylinder
Changhong Hu, Zhaoyu Wei (Kyushu University)

（休　憩）

10:40 - 11:00 Analyses and Comparison on Ship Hydroelasticity by Using Different Levels of Numerical Approach
J.H. Kim, K.H. Kim, Y. Kim (Seoul National University)

11:00 - 11:20 An Experimental Study on Dynamic Collapse Behavior of a Floating Structure Subjected to Extreme Loads
Hiroki Hotta (Osaka University)

11:20 - 11:40 Numerical Simulation of a Damaged Floating Body by the MPS Method
Hirotada Hashimoto (Osaka University)

11:40 - 12:00 Statistical Model of Ship Propulsion Plant for Performance Assessment in Actual Seas
Oleksiy Bondarenko (Osaka University)

共同利用研究集会(22ME-S4)報告書

新エネルギーへの複合材料の応用及び評価

研究代表者
九州大学応用力学研究所
汪　文学

目　的

新エネルギーへの複合材料の応用及び評価、特に風力発電を代表とする自然エネルギーへの複合材料の応用及び評価についての研究を発展させることが本研究集会の目的である。

近年、化石燃料の枯渇や地球の環境変化により、再生可能な自然エネルギーを利用する社会的な要請が全世界に高まっている。中でも、風力や太陽エネルギーの利用に関する研究が盛んになっており、特に、風力発電の発展が目覚しい。また、陸地の様々な制限により、洋上発電も大きな潜在的可能性を示し始めでいる。このような状況において、従来使用されてきた鉄鋼材料の比強度や比剛性及び耐食性は限界に達しており、比強度や比剛性及び耐食性に優れた複合材料が構造材料として大きな可能性を示している。一方では、複合材料の高コスト及び非均一性と異方性、あるいは流体と構造の連成問題がもたらす構造設計の複雑性により、自然エネルギーへの複合材料の応用を実現するためには、多くの課題が解決されなければならない。このような流体、構造、材料工学を含めた複雑な課題を解決するためには、数多くの研究者の共同研究が成功の鍵となる。

研究代表者はこれまで低コストの複合材料の作製方法や力学特性について研究を進めてきた。世話人の汪准教授は複合材料の創製と力学特性の評価について研究を進めてきた。それらの研究を踏まえ、本研究集会を通じて国内外の研究者との共同研究を進め、自然エネルギーへの複合材料の応用及び評価に関する研究を前進させていきたい。

研究集会の日時・場所

日時：平成24年1月6日(金)～7日(土)
場所： 九州大学応用力学研究所西棟　W601号室

プログラム

【1月6日(金)】

司会　汪　文学（九州大学）

13:30-14:00　複合材料に関する共同利用研究集会の15年の歩み
高雄　善裕(九州大学)

14:00-14:25　せん断流動下におけるナノ粒子分散エポキシの粘度特性と微視的構造
○横関智弘(東京大学)、S. C. Schultz (Technische Universität Hamburg-Harburg)、S. T. Buschhorn、K. Schulte

14:25-14:50　層厚さの異なるCFRPクロスプライ積層板のトランスバースクラック発生評価
○栗原　謙(早大院)、 細井　厚志(名大)、 佐藤　成道(東レ)、川田　宏之(早大)

14:50-15:15　CFRP円筒材のねじり負荷における内部損傷の調査
○高橋綾希(早大院), 中村崇人, 木元尚紀(藤倉ゴム工業), 川田宏之(早大)

15:15-15:40　Elasto-Plastic Numerical Simulation of Drilling Damage in CFRP Laminates
○ SangChul PARK(東京大院)、西川雅章(京都大)、岡部朋永(東北大)、武田展雄(東京大) 、北條正樹(京都大)

15:40-15:55　休憩

司会　横関　智弘　（東京大学）

15:55-16:20　Monitoring of localized damage in indentation loaded CFRP-foam core sandwich beam using fibre-optic distributed sensing
○ SIIVOLA JUHO（東京大院）、上園隆文（東京大院）、水口周（東京大）、武田展雄（東京大）

16:20-16:45　放射音をセンサ応答として用いたCFRP構造の衝撃荷重同定に関する研究
○田中　佑樹（東北大院）、跡部　哲士（東北大）、福永　久雄（東北大）

16:45-17:10　エポキシ樹脂の硬化反応特性に関する研究
○竹原大洋（東北大・院）、岡部朋永（東北大）、平野啓之（東レ）、猪瀬啓介（東レ）

17:10-17:25　CFRP積層板の自由端損傷進展解析
○今村　洋弥　（東北大学・院）、岡部　朋永　（東北大学）、小柳　潤　（JAXA）、米山　聡　（青山学院大学））

【1月7日（土）】

司会　岡部　朋永　（東北大学）

09:30-09:55　形状記憶合金を利用したVaRTM成形CFRPのモードI破壊靭性強化
○高橋大輔（九大院），宇田暢秀，小野幸生，平川裕一，永安忠（九大工）

09:55-10:20　グリーンコンポジットの熱伝導特性に及ぼす繊維内部構造の影響
○高木均（徳島大学），中垣内アントニオ，草野剛嗣，
Ke Liu(西安交通大学), Zhimao Yang

10:20-10:55　カーボンナノフィラー/PVDFナノコンポジットの発電性能に関する研究
○中村　貴也（千葉大学大学院工学研究科）、胡　寧（千葉大）

10:55-11:20　カーボンナノチューブ／PVDFナノコンポジットによるひずみセンサの特性評価
○鎌田　太郎　（千葉大学大学院工学研究科）、 胡　寧（千葉大）

11:20-11:45　FRPリサイクルを目的とした常圧過熱水蒸気によるFRP分解メカニズムの解明
○施　建、加藤　潤、鮑　力民、剱持　潔（信州大）

11:45-12:10　CFRPクロスプライ積層板における疲労マトリックスクラッキング
○黄木　景二（愛媛大）

12:10-13:10　**昼食**

司会　鮑　力民（信州大学）

13:10-13:35　ポリイミドナノファイバーからなる名のコンポジットの力学特性
○山下義裕、徳満勝久、菊地憲次　（滋賀県立大学）

13:35-14:00　Natural frequencies of carbon nanotubes accounting for surface effects
○ Xiao-Wen Lei, Toshiaki Natsuki, Jin-Xing Shi, Qing-Qing Ni （信州大）

14:00-14:25　Wave propagation in embedded double-layer graphene nanoribbons based on

nonlocal Timoshenko beam theory
〇Jin-Xing Shi, Xiao-Wen Lei, Toshiaki Natsuki, Qing-Qing Ni(信州大)

14:25-14:50 ナイロン6クレイハイブリッド複合材料の高温クリープ特性
〇山本昌樹(福岡工大・院)、朱世杰(福岡工大)

14:50-15:15 New unidirectional arrayed chopped strands composites by introducing discontinuous angled slits into prepreg
〇Hang Li, Wen-Xue Wang, Yoshihiro Takao, Terutake Matsubara (九大)

15:15-15:40 Fabrication of Ramie Yarn/PP Composite Strands by Multi-pin-assisted Resin Impregnation Process
〇Hyun-bum Kim (山口大学), 野田 淳二, 合田 公一,
丸谷 洋正 (化薬アクゾ), 青木 憲治

15:40-15:45 閉会の挨拶
汪 文学(九州大学)

講演概要

せん断流動下におけるナノ粒子分散エポキシの粘度特性と微視的構造
横関智弘（東大）、S. C. Schultz、S. T. Buschhorn、K. Schulte（Technische Universität Hamburg-Harburg）

Abstract: This report investigates the steady-state viscosities of multiwall carbon nanotube (MWCNT)/epoxy and carbon nanofiber (CNF)/epoxy suspensions with varying filler concentrations under different shear rates at various temperatures. In-situ observation of filler networks suggests the build-up of shear induced MWCNT and CNF agglomerates at low shear rates, which correlates with the measured shear thinning behavior. The agglomeration process in MWCNT/epoxy suspensions is enhanced at lower shear rates in the case of higher temperatures, whereas, at high shear rates, both nano-fillers show good dispersion. Shear thinning behavior is observed for both types of fillers, and MWCNT suspensions exhibit a much stronger shear thinning effect compared with CNF suspensions. The optical observation also confirms that MWCNT suspensions exhibit more agglomerates under shear.

層厚さの異なるCFRPクロスプライ積層板のトランスバースクラック発生評価
栗原謙(早大院)　細井厚志(名大)　佐藤成道(東レ)　川田宏之(早大)

Abstract: In this study, transverse crack initiation in cross-ply CFRP laminates with two types of prepreg thickness under fatigue loading. Edge surface was polished and observed with the Atomic Force Microscope (AFM) in order to investigate the mechanism of transverse crack initiation. The number of cycles caused first transverse crack was predicted by the analytical model on the basis of the normalized modified Paris law. It was considered that the initiation of transverse crack depended on interfacial property between fiber and matrix by AFM observation. Moreover, the analytical model makes it possible to predict the initiation of transverse crack in the cross-ply laminates with various prepreg thickness under fatigue loading.

CFRP 円筒材のねじり負荷における内部損傷の調査
高橋綾希(早大・院), 中村崇人, 木元尚紀(藤倉ゴム工業), 川田宏之(早大)

Abstract: Application of CFRP tubes for torque transmission shafts is expected to improve fuel efficiency accelerating performance, natural frequency. CFRP cylindrical tubes using modified simultaneous multi ply winding reduced voids and fiber waviness, and improved static torsional strength by 20%. But experimental value stay only 70~80% of theoretical value. In this study, fracture mechanism of CFRP cylindrical tubes under torsional loading was investigated. Static torsion tests were conducted to evaluate strength and to investigate damage accumulations within specimen. As a result, acoustic emission indicated internal damage accumulation, but that didn't significantly influence stiffness of specimen. Because of delamination from pripreg end, experimental value remains lower than theoretical value.

Elasto-Plastic Numerical Simulation of Drilling Damage on CFRP Laminates

朴 相喆(東京大·院)、西川 雅章(京都大)、岡部 朋永(東北大)、武田 展雄(東京大)

Abstract: Numerical simulation of drilling damage by thrust load is developed by using a 2D elastic-plastic analysis and a multi-scale modeling approach, micro-modeling for interested failure region and macro-modeling for other composite region. The size effect of twist drill's chisel edge, where no cutting area, and effect toughened region in CFRP, T800/3900-2B, are reviewed numerically. For 2D drilling thrust pushing simulation, 45 and 90 degree layers are modeled into fibers and matrix separately, micro-modeling and plastic analysis, depending on fiber volume fraction. To simulate progressive failure, the initiation of composite damage is analyzed by Hashin's failure criteria, and matrix plastic failure is checked by equivalent strain, i.e. 5%. The initiation and progression of damage are compared between inter-laminar toughened CFRP and normal CFRP, and results show that the toughened CFRP are strong in both delamination and matrix crack failure. Also, sharp chisel edge at twist drilling tip caused less failure.

Monitoring of localized damage in indentation loaded CFRP-foam core sandwich beam using fiber-optic distributed sensing

SIIVOLA JUHO(東京大院)、上園隆文(東京大院)、 水口周(東京大)、武田展雄(東京大)

Abstract: Monitoring of localized and barely visible damage in CFRP-foam core sandwich beams was studied by conducting quasi-static indentation loading tests with CFRP-foam core sandwich beams. Using an optical fiber embedded in the interface and Pre-pump pulse Brillouin optical time domain analysis (PPP-BOTDA), Brillouin gain spectra (BGS) along the fiber in the face sheet-core interface was obtained during and after indentation loading tests. Observing peak shifts and width changes in the BGS during indentation tests, information about strain distribution along the fiber was obtained and compared with strain gage measurements. The used fiber optic sensing system, having high spatial resolution of 2cm, was able to detect the barely visible damage even after the loading was removed. However the measured strain distribution result was not reliable. It was also noticed that suitable material selection, such as using less dense core material which results in the deformation and therefore also the strain to occur on larger area, can make it easier to detect highly localized damage even with limited spatial resolution.

放射音をセンサ応答として用いたCFRP構造の衝撃荷重同定に関する研究

田中佑樹(東北大·院), 跡部哲士, 福永久雄(東北大)

This paper proposes a method for identifying the location and force history of an impact force acting on a CFRP structure using microphones. The impact location is identified using the

differences in arrival times of sound waves radiated from the impacted structure. The force history is identified by minimizing the deviation between the measured sound pressure and the estimated one. The estimated sound pressure is calculated from the experimentally determined transfer matrices, which relate the impact force and the sound pressure. Several identification experiments have been conducted on a CFRP stiffened panel in order to verify the validity of the proposed method.

エポキシ樹脂の硬化反応特性に関する研究
竹原大洋（東北大・院），岡部朋永（東北大），平野啓之（東レ），猪瀬啓介（東レ）

Abstract: Transport machinery components produced by composites are expected to improve the fuel consumption because high-specific strength and stiffness of composites reduce weight of the components. In that case it is important to understand curing characteristics of thermosetting polymer in molding process to mass-produce composite components of steady quality. In this study, we numerically simulate curing reaction of epoxy resin, which is the matrix of composites. The computational method uses the Molecular Orbital method and the Molecular Dynamics method, and considers activation energy, heat of formation and polarization in curing reaction. We calculated the curing time of base resin with three types of base resin and three types of curing agent, and compared computational results with experimental results to confirm accuracy of the method. As a result, we found that the computational method used in this study simulates curing reaction of epoxy and calculates curing start time accurately.

CFRP積層板の自由端損傷進展解析
今村洋弥（東北大･院), 岡部朋永（東北大), 小柳潤（JAXA), 米山聡（青山学院大）

Abstract: This paper investigates the initiation of transverse crack in carbon fiber reinforced plastics (CFRP) cross-ply laminates experimentally and numerically. We propose a new method to investigate the initiation of transverse cracks by combining 3D-FEM and Periodic Unit Cell (PUC) simulation. Detailed observations are conducted with a video microscope to comprehend the free edge effect and the damage process in the transverse ply. Experimental results correspond with analysis results in that cracking strains of transverse layers are independent of thickness of the transverse ply. We obtain strain fields by using digital image correlation (DIC) on free edge and compared with strain fields calculated by 3D-FEM. As a result, it is confirmed that transverse ply becomes biaxial tension state at free edge.

形状記憶合金を利用したVaRTM成形CFRPのモードI破壊靭性強化
高橋大輔(九大院), 宇田暢秀, 小野幸生, 平川裕一, 永安忠(九大工)

Abstract: This paper presents an experimental study on Mode-I fracture toughness of VaRTM CFRP laminates reinforced through the thickness by SMA (Shape Memory Alloy) wires. Pre-strained SMA wires tend to shrink in the CFRP by heating, and induce a recovery compressive stress in the thickness direction of the laminate. The compressive stress could be expected to increase the Mode-I fracture toughness of the laminates. The effect of SMA wires on the Mode-I fracture toughness is evaluated using DCB (Double Cantilever Beam) tests, and transferring the recovery compressive stress from SMA wires to CFRP laminates is assessed using SMA-wire pullout test.

グリーンコンポジットの熱伝導特性に及ぼす繊維内部構造の影響
高木均(徳島大学), 中垣内アントニオ, 草野剛嗣, Ke Liu(西安交通大学), Zhimao Yang

Abstract: Thermal insulation behavior of natural plant fiber reinforced composites is examined. The composites were composed of epoxy resin and two kinds of natural fibers, namely abaca fiber and bamboo fiber. These natural fibers were unidirectionally aligned in order to preserve the hollow internal microstructure which is called lumen. Several kinds of green composite samples with different fiber content were fabricated by a resin transfer molding method. The thermal conductivity of the green composites was evaluated by using a steady-state method. In the case of abaca fiber-reinforced composites, the thermal conductivity and density decrease with increasing fiber content. On the other hand, in the case of bamboo fiber reinforced composites, the thermal conductivity and density increase in a similar manner to that of glass fiber reinforced plastics. Moreover thermal conductivity of all the samples has an almost linear correlation with density; i.e. the thermal conductivity is proportional to the sample density. This unique fiber content dependence in thermal conductivity is mainly derived from the lumen size of the reinforcing fiber.

カーボンナノフィラー/PVDFナノコンポジットの発電性能に関する研究
中村　貴也（千葉大学大学院工学研究科）、胡　寧（千葉大）

Abstract: Although lead zirconate titanate is one of typical piezoelectric materials, its brittleness impedes its wide applications. In order to obtain flexible and high performance piezoelectric materials, in this study, multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) were blended with poly(vinylidene fluoride) (PVDF). The MWNT/PVDF nanocomposite was prepared by the solution casting method, and the contents of MWNTs ranged from 0.05wt% to 0.3wt%. Then, it was stretched uniaxially and poled in silicon oil in order to induce the piezoelectric effect. We investigated the effect of MWNTs on power generation capacity and internal crystal structure of PVDF. To evaluate the power generation capacity of nanocomposites, the nanocomposite films were attached a cantilever beam in excited vibration and the harvested power from the films was measured. The maximum harvested power was obtained at 0.05 wt% MWNT addition. Compared with pure PVDF, the harvested power increased above 200%. The main reason for this phenomenon is the increment of the β-phase content of MWNT/PVDF nanocomposite films with proper MWNT loading.

カーボンナノチューブ／PVDFナノコンポジットによるひずみセンサの特性評価
鎌田　太郎（千葉大学大学院工学研究科）、 胡　寧（千葉大）

Abstract: It is well-known that carbon nanotubes (CNTs) have a unique atomic structure, which lead s to their excellent mechanical, thermal and electrical properties. In recent years, they are widely appl ied for making CNT/polymer nanocomposites. Only a few content percentage additions of CNTs in a n insulating polymer matrix can yield electrical conductivity to a certain extent. In this study, by usi ng multi-walled carbon nanotubes (MWNTs), we fabricated two types of strain sensors made from M WNT/polyvinylidene difluoride (PVDF) nanocomposite. One is the resistant-type strain sensor based o n the piezoresistivity behavior of MWNT/PVDF nanocomposite, which has a much higher sensitivity compared with conventional strain gauges. The main factor for this high sensitivity is attributed to th e network change of MWNTs including tunneling effects among MWNTs and the piezoresistivity of MWNTs. The other one is the piezoelectric-type strain sensor, which is used for measuring the dyna mic strains from the voltage or electric charge change of sensor. In experiments, the dynamic strain c orresponding to 20 Hz was measured. Furthermore, the sensor with 0.05 [wt.%] loading of MWNT p ossesses the highest voltage compared with other loadings. The main reason for this phenomenon is t hat more β phase was formed with this proper MWNT loading.

FRPリサイクルを目的とした常圧過熱水蒸気によるFRP分解メカニズムの解明
施　建、加藤　潤、鮑　力民、劔持　潔（信州大）

Abstract: The objective of the present study is to investigate the effect of pyrolysis time and temperature on

the mechanical properties of recycled fiber, based on tensile strength measurements, determining the optimum decomposition conditions for fiber-reinforced plastic (FRP) by superheated steam. In this research, GFRP and CFRP were efficiently depolymerized and reinforced fiber was separated from resin by superheated steam. Tensile strength of fibrous recyclates was measured and compared to that of virgin fiber. Although tensile strength of recycled fibers were lower than that of virgin fiber, under some conditions tensile strength of recycled fibers were close to that of virgin fiber. They were the optimum decomposition conditions for FRP in our experiments. With pyrolysis, some char residue from the polymer remains on the fibers and degrees of char on the recycled fibers were closely examined by scanning electron microscopy.
Keywords: FRP, Recycling, Mechanical properties, Superheated steam

CFRPクロスプライ積層板における疲労マトリックスクラッキング
黄木 景二(愛媛大)

Abstract: This paper presents semi-empirical models for predicting matrix crack density in a carbon-fiber reinforced plastic (CFRP) cross-ply laminate with a thick transverse ply under static-fatigue and cyclic-fatigue loadings. First, a modified slow crack growth (SCG) law, that covers the whole range of stress ratio R of tension-tension fatigue (0 □ R □1), was proposed. The modified SCG law and three conventional SCG laws were then combined with Weibull's probabilistic failure concept for predicting fatigue matrix crack density in a cross-ply laminate. Matrix crack density was expressed as a function of R , the maximum stress in the transverse ply and the number of cycles. Next, fatigue tests were performed for R of 0, 0.2, 0.4, 0.6, and 1 to determine the applicability of these four models. In addition, a theoretical approach was proposed for predicting transverse cracking behavior under variable amplitude cyclic loading.

カルド構造含有エポキシによるVGCF 分散性改質ナノコンポジット
山下義裕、徳満勝久、菊地憲次 （滋賀県立大学）

カーボンナノチューブCNT の分散性の悪さが複合材料への適用を大きく妨げている。現在使用されている分散手法として界面活性剤Triton-X を用いる手法がよく知られている(図1)。しかしこれ自身はCNT と樹脂の接着性を改善する効果はないため、さらによい分散剤が求められている。我々は分子骨格にカルド構造(フルオレン誘導体)を有し、且つ分子末端にエポキシ基を持つビスアリールフルオレン(図2)がCNTの分散性改良とエポキシ樹脂の耐熱性向上の2つを兼ね備えている点に着目し、その性能と用途について検討した。

Natural frequencies of carbon nanotubes accounting for surface effects
Xiao-Wen Lei, Toshiaki Natsuki, Jin-Xing Shi, Qing-Qing Ni（信州大）

Abstract: Carbon nanotubes (CNTs) are being investigated for use as latent materials for drug carriers. However, the surface effects cannot be ignored when drugs or other functional materials, such as nickel or silver, adhere to the surface of the outer tube of a CNT. In this work, the natural frequency of CNTs, while accounting for surface effects, is studied using the nonlocal Timoshenko beam model. The results show that the natural frequency is significantly affected by the surface material and vibration mode. In short CNTs on condition of higher vibrational modes, the influence of the surface on vibration are more pronounced.

エレクトロスピニング法によるナノファイバーを用いたナノコンポジットの特性
山下義裕 （滋賀県立大学）

エレクトロスピニング法により、アラミド、ポリイミド、ナイロンのナノファイバーを作製した。これを用いてマトリックスにエポキシ樹脂ならびに熱可塑性エラストマーによるナノコンポジットを作製してその力学特性、粘弾性を評価した。それぞれのナノファイバーの結晶化度、結晶構造は汎用の繊維と比較して補強のメカニズムを明らかにした。

Wave propagation in embedded double-layer graphene nanoribbons based on nonlocal Timoshenko be am theory
Jin-Xing Shi, Xiao-Wen Lei, Toshiaki Natsuki, Qing-Qing Ni（信州大）

Abstract: Graphene nanoribbons (GNRs) are potential nanomaterial electromechanical oscillators because of their outstanding mechanical and electronic properties. Double-layer GNRs (DLGNRs), which are two-layer finite-wide counterparts of crystalline graphene sheets (GSs) coupled to each other via van der Waals (vdW) interaction forces, present two kinds of vibrational modes in flexural wave propagation. These two modes are defined as the in-phase mode and anti-phase mode. In this study, based on the nonlocal Timoshenko beam theory and Winkler spring model, the wave propagation characteristics of DLGNRs embedded in an elastic matrix are investigated by dividing the vibrational mode into the in-phase mode and anti-phase mode. This will provide more accurate guidance for the application of DLGNRs. When the nonlocal effects and elastic matrix are considered, three critical frequencies are found. These are defined as the cutoff, escape, and low-cutoff frequencies. Moreover, the results show that the wave propagation characteristics of embedded DLGNRs are significantly influenced by nonlocal parameters and the Winkler foundation modulus.

ナイロン6クレイハイブリッド複合材料の高温クリープ特性
山本昌樹（福岡工大・院）、朱世杰（福岡工大）

Abstract: Creep behavior of nylon6-clay hybrid (NCH) nanocomposite at room temperature and glass transition temperatures of 35 ^{o}C and 50 ^{o}C, and 80 ^{o}C was studied to understand creep damage mechanism and establish creep life prediction method. For the creep fracture test, creep crack propagation and fracture mechanisms were investigated by microscopic observation. According to the observation of fracture surface, we found that fracture mechanisms of 5 wt% clay reinforced nylon tested at 50 ^{o}C were different from the mechanisms tested at 35 ^{o}C. For the creep deformation tests, the simulating parameters and creep strain of each unit in Burgers model exhibited the influence of clay on the creep viscoelasticity. However, the tertiary creep could not be predicted by the Burgers model, but it could be described by a modified model.

New unidirectional arrayed chopped strands composites by introducing discontinuous angled slits into prepreg
Hang Li, Wen-Xue Wang, Yoshihiro Takao, Terutake Matsubara （九大）

UACS has bright future for the development in fabricating complex shaped composite structure as a new short fiber reinforced laminate. This paper investigates several UACS with different slit patterns. In all cases, UACS with bi-angular slit displays highest tensile mechanic properties. Young's modulus values of present UACS laminates appear a little decline compare to conventional laminate while Poisson's ratio have no obvious variation.

Slit micrographs of UACS laminate surfaces have pointed that slits are not straight exactly due to p artial fiber bundles nearby slits have transformed after curing. Transformation of fiber bundles exhibit s more obviously in UACS laminate with discontinuous slit patterns than that with continuous slit pat

tern. The difference of fracture modes will directly influence the final strength. Compared to previous UACS laminate, UACS with staggered slit and bi-angular slit shows more significant fiber breakage without decreasing the stiffness. Different slit patterns show different failure patterns, which results in the reduction of tensile strength at different levels.
Tensile strength is about to display no significant dependence on the slit length both in staggered slit pattern and in bi-angular slit pattern UACS laminate. The geometric parameter of width of chopped strands is not the decisive factor UACS laminate.

Fabrication of Ramie Yarn/PP Composite Strands by Multi-pin-assisted Resin Impregnation Process
Hyun-bum Kim (山口大学), 野田 淳二, 合田 公一, 丸谷 洋正 (化薬アクゾ), 青木 憲治

Abstract: In recent years, natural fibers have attracted attention in the field of composites as alternative reinforcements for glass fibers. Ramie is one of the strongest plant-based natural fibers because it has high proportion of cellulose and low proportion of lignin. Thus, ramie single yarns were used as reinforcement in this study. Polypropylene, representative thermoplastic resin, was used as a matrix material. Maleric anhydride modified polypropylene (MAPP) was added in order to promote better fiber-matrix interaction. Ramie yarn/PP composite strands were produced by means of a new technique, named 'multi-pin-assisted resin impregnation process without resin melt bath. In this technique, resin-coated yarns pass through in a heater, in which continuous contacting and rubbing mechanism between the yarns and pins makes the yarns flat. This leads to widen the inter-fiber spaces. As a result, resin is impregnated into inter-fibers of the yarns. After that, the fabricated strands were prepared as a lamina shape like a mono-layer. Mechanical properties of both MAPP-included and MAPP-free composite strands were measured.
It is expected that composite strands fabricated by the proposed technique can be applied as a new semi-finished material, e.g., long natural fiber thermoplastic resin pellets.

おわりに

２日間の研究集会において、多くの大学から多数の研究者が参加され、上述のすばらしい研究発表を行われた。研究交流会にも多くの研究者が出席され、盛んに交流を行われた。全ての参加者及びたくさんのご支援に感謝の意を申し上げます。

研究組織

青木　隆平	東京大学・工学研究科	教授	研究協力者
合田　公一	山口大学・工学部	教授	同上
黄木　景二	愛媛大学・理工学研究科	教授	同上
岡部　朋永	東北大学・工学研究科	准教授	同上
胡　寧	千葉大学・工学部	教授	同上
倪　慶清	信州大学・繊維学部	教授	同上
朱　世傑	福岡工業大学・工学部	教授	同上
北條正樹	京都大学・工学研究科	教授	同上
末益 博志	上智大学・理工学部	教授	同上
武田　展雄	東京大学・工学研究科	教授	同上
新川和夫	九州大学・応用力学研究所	教授	同上
高雄　善裕	九州大学・応用力学研究所	教授	同上
宇田 暢秀	九州大学・工学研究院	教授	同上
汪　文学	九州大学応用力学研究所	所内世話人・代表者	

23 ME－S5

CT 画像を利用したバイオメカニクス・シミュレーション法の開発と臨床問題への応用

横浜市立大学医学部　稲葉　裕

1. 序　言

近年，コンピュータとシミュレーション技術の発展により，CT や MRI 等の医療用生体画像を利用して，実 3 次元構造を模擬した生体の数値モデルを作成し，有限要素法を用いて生体力学的解析を行うことが可能となってきている．しかし，境界条件をいかに生体内の条件に適合させて設定するか，あるいは，得られた応力状態等の解析結果をいかに医学的考察に反映させるか等の問題が残されている．これらの問題を解決するためには，計算力学や生体力学を専門とする工学者と，臨床において骨を扱う整形外科医や歯科医が共同して研究を進める必要がある．一方，国産の骨解析ソフトウェアである Mechanical Finder（（株）計算力学研究センター）は，骨モデル作成からインプラント等を挿入したモデルへの発展，および応力解析までの一連の作業を１パッケージで行うことができる簡便なソフトウェアであり，最近では，整形外科，歯科および工学の各分野で着実にユーザが広がっている．

そこで，整形外科，歯科，工学の各分野において Mechanical Finder のユーザである者が一堂に会し，研究紹介と議論を通して親交を深め，最終的にはシミュレーション技術を骨関係の臨床問題へ応用することを目的として，本研究集会を企画し開催する運びとなった．

今回，昨年に続いて第２回研究集会を開催でき，異なる分野から多くの方にご参加頂いたことは感銘深いことである．研究集会開催にご協力いただいた諸先生方，ならびに遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げます．

2. プログラム

日時：2011 年 8 月 27 日（土）

会場：東京国際フォーラム G 棟会議室 409 号室
　　東京都千代田区丸の内 3-5-1

13:20-13:30　開会の辞　東藤　貢（九州大学）

13:30-13:50　講演１「骨密度生涯方程式とその応用-正常大腿骨と人工股関節ステム置換後の Mechanical Finder を用いた経年的３次元骨密度シミュレーション-」
月僧博和（福井医療短期大学）

13:50-14:00　講演２「筑波大学スポーツ医学研究室での取組-スポーツ動作における関節応力-」
村上憲治（筑波大学人間総合科学研究科）

14:00-14:10　講演３「インプラントアンカーを利用した臼歯遠心移動の有限要素解析」
冨塚慶徳（日本工業大学工学部）

14:10-14:20　講演４「大腿骨転子間骨折固定術におけるスクリューの緩み評価について」
坂本二郎（金沢大学理工学研究域）

14:20-14:30　講演５「同一の DICOM データから構築した３次元有限要素モデルとインプラントシミュレーションモデル」
樋口大輔（昭和大学歯学部）

14:30-14:40　講演６「人工股関節置換術後１年におけるステム周囲骨密度と応力の変化」
池　裕之（横浜市立大学医学部）

14:40-14:50　講演７「上顎中切歯傾斜角が異なる３次元有限要素モデルにおける荷重時の応力分布の違い」
駒澤大悟（明海大学歯学部）

14:50-15:00　講演８「18F-Fluoride PET の集積と有限要素法を用いた股関節応力解析の比較」
平田康英（横浜市立大学医学部）

15:00-15:15　休　憩

15:15-15:30　デ　モ「Mechanical Finder を使った解析モデル作成のテクニック」

原　直樹（株式会社　計算力学センター）
15:30-15:40　講演９「大腿骨頭壊死の患者別力学解析について」
福田恵子（筑波大学人間総合科学研究科）
15:40-15:50　講演 10「３次元有限要素法によるインプラント傾斜埋入モデルの下顎骨の構築と応力解析」
仲井太心（北海道医療大学歯学部）
15:50-16:00　講演 11「現状の人体損傷評価と有限要素解析を用いる有効性について」
伊藤安海（国立長寿医療研究センター）
16:00-16:10　講演 12「性別が異なる無歯顎症患者に対するインプラント治療の力学的検討」
荒平高章（九州大学総合理工学府）
16:10-16:20　講演 13「人工股関節置換が大腿骨に及ぼす力学的影響について」
福岡航世（九州大学総合理工学府）
14:50-15:00　デ　モ「Mechanical Finder New Lineup のご紹介」
松永　繁（株式会社　計算力学研究センター）
16:30-16:50　全体の質疑応答とディスカッションおよびMechanical Finder へのご要望

16:50-17:00　閉会の辞　稲葉　裕（横浜市立大学医学部）

３. 講演の概要

（１）講演１「骨密度生涯方程式とその応用-正常大腿骨と人工股関節ステム置換後の Mechanical Finder を用いた経年的３次元骨密度シミュレーション-」

講演者が開発した骨密度生涯方程式に関する説明．基礎となる理論は Huiskes による骨リモデリング理論であり，そのモデルに大腿骨密度の経年的変化を導入したモデルであり，２次元シミュレーションからスタートし，現在では３次元への拡張も終了している．

（２）講演２「筑波大学スポーツ医学研究室での取組-スポーツ動作における関節応力-」

スポーツ活動において，特に関節に生じる骨・軟骨障害は，発症すると治療に長時間を要し，スポーツパフォーマンスの低下が生じることもあり，発症により選手としての活動期間を短縮させる要因にもなる．そのために，関節部の骨・軟骨にどのような力が加わっているか明らかにする必要がある．そこで，我々は，スポーツ動作時に関節にかかる力を PC 上に作成した骨・軟骨モデルに与え，関節部の骨・軟骨にかかる応力を検証した．

（３）講演３「インプラントアンカーを利用した臼歯遠心移動の有限要素解析」

本研究では，講演者らが実施してきた実験による歯科矯正治療における力学的検討をさらに進めるために，ワイヤーとブラケットとインプラントアンカーを併用して下顎歯列の臼歯群を遠心方向に移動する場合について，X 線 CT 画像から作成した３次元下顎歯列モデルに不均一材料特性を割り当て，ワイヤーとブラケットをモデル化して有限要素解析した．

（４）講演４「大腿骨転子間骨折固定術におけるスクリューの緩み評価について」

本研究では，臨床で得られた CT 画像をもとにガンマネイルを大腿骨に挿入した有限要素モデルを作成し，力学解析を行うことによりインプラントの緩みの原因解明を試みた．

（５）講演５「同一の DICOM データから構築した３次元有限要素モデルとインプラントシミュレーションモデル」

Mechanical Finder では，CT 撮影時に得られた DICOM データより３次元有限要素解析モデルを構築することが可能であり，一方，歯科インプラントの分野では，DICOM データからインプラント埋入シミュレーションモデルの構築が可能となっている．そこで演者らはこれら同一の DICOM データから各モデルを構築することにより，それぞれのモデル間に関連性を持たせることが可能と考え，上顎無歯顎症例に対して検討を行ったので報告する．

（６）講演６「人工股関節置換術後１年におけるステム周囲骨密度と応力の変化」

骨リモデリングにより骨組織の材料特性は変化すると考えられ，荷重拘束条件を一定にしても解析時期により相当応力分布が変化すると予想される．今回，我々は有限要素法を用いて THA 施行前，術後１週，術後１年のステム周囲における大腿骨相当応力を測定した．また，DEXA 法を用いて大腿骨 BMD を測定し，これらの経時的変化を検討したので報告する．

（７）講演７「上顎中切歯傾斜角が異なる３次元有限要素モデルにおける荷重時の応力分布の違い」

本研究は，上顎中切歯の歯軸傾斜角度が異なる２つの３次元有限要素法モデルを作製し，上顎中切歯を口蓋側へ傾斜移動させるような荷重を与えることで，歯，および周囲組織に生じる応力分布について比較検討を行うことを目的とした．

（８）講演８「18F-Fluoride PET の集積と有限要素法を用いた股関節応力解析の比較」
18F-Fluoride PET は主に骨代謝亢進を捉える機能的画像診断である．変形性股関節症における本検査の集積像は軟骨下骨における荷重ストレスに伴う骨代謝亢進を反映しているものと推察されるが，力学的評価との関連性について検討した研究はない．本研究の目的は，股関節症症例について FEA を用いて相当応力分布を算出し，fluoride-PET における集積との関連性を検討することである．

（９）講演９「大腿骨頭壊死の患者別力学解析について」
大体骨頭壊死症は大腿骨頭の無菌性，阻血性疾患であり，壊死に引き続き起こる圧潰を生じると著しい関節機能障害を来す．圧潰を未然に防ぐことは大変重要であり，多くの研究で一定の予後予測は明らかとなっており，有限要素法を用いた壊死大腿骨の力学的解析の報告も見られるが，壊死の大きさや分布者別に力学的解析を行いそれを臨床応用し，荷重制限や禁忌肢位を個別に指導し，圧潰を未然に防ぐことを目的として研究を行っている．

（１０）講演 10「３次元有限要素法によるインプラント傾斜埋入モデルの下顎骨の構築と応力解析」
本研究では，ヒト乾燥骨骨体標本の CT データとマイクロ CT から採得したインプラントデータをもとに現実に近い有限要素モデルを構築した．また，閉口筋の付着部位に荷重を付与し，さらに下顎骨のたわみやねじれを阻害しない最適な拘束条件を検討したうえで，過去の検討よりも詳細な All-on-4 コンセプトの有限要素解析を行った．

（１１）講演 11「現状の人体損傷評価と有限要素解析を用いる有効性について」
国立長寿医療研究センターの主なミッションは，加齢による身体・認知機能の低下による認知症および転倒骨折の予防と治療を行うことである．医工連携の一環として，高齢者医療における工学的人体計測を行っており，コンピュータシミュレーションを用いた骨折予測の技術開発を試みている．本講演では，骨折リスク診断について紹介する．

（１２）講演 12「性別が異なる無歯顎症患者に対するインプラント治療の力学的検討」
本研究では，性別と年齢が異なる 2 名の上顎無歯顎患者について，6 本のインプラントと補綴装置を用いて治療を行った場合の生体力学的状態について，3 次元実構造モデルを用いた数値解析により明らかにすることを目的とした．具体的には，各患者の顎骨の CT 画像より 3 次元モデルを構築し，臨床医の指導の下，インプラント治療を模擬して設置を行い，2 種類の荷重条件で応力解析を行った．得られた結果をひずみエネルギー密度で整理して比較検討を行った．

（１３）講演 13「人工股関節置換が大腿骨に及ぼす力学的影響について」
本研究では，Mechanical Finder を用いて変形性股関節症患者の CT データより大腿骨の 3 次元モデルを構築し，全置換型人工股関節と表面置換型人工股関節をそれぞれ設置した THA モデルと RHA モデルを構築し，単純な立位状態を仮定して大腿骨部に生じる損傷発生のメカニズムを理解することを目的とした．

4. あとがき

本研究集会は，「シミュレーション」と「硬組織」をキーワードとして，医学（特に整形外科），歯学，工学において関係する研究者を一堂に会し，将来的な医歯工連携を目指して開催したものである．整形外科を中心とした医学，歯学，工学および関連する医療機器メーカから多くの方にご参加頂き，各講演とも活発な議論を展開して頂いた．次年度も引き続き第３回研究集会を開催する予定であり，本研究集会が，この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない．

（研究集会）

力学適応能、自己組織化能を有する

バイオマテリアル－生体インターフェースの創製

研究代表者
東北大学歯学研究科
佐々木啓一

1．研究集会の目的

平成19年度から平成23年度までの5年間を事業計画期間とした特別教育研究経費･大学間連携研究「生体－バイオマテリアル高機能インターフェイス科学推進事業」は本年度で修了します. この連携研究の概要は、生体－バイオマテリアル「インターフェイス」における材料、生物学、力学の研究の連携を図り、高機能化インターフェイス創製に関する新たな研究領域を開拓し、喪失した口腔及び生体の精緻な機能の新規創建治療技術開発に資すると謳われています。応用力学研究所では，生体工学グループを組む破壊力学分野と複合連続体力学分野（改組後は，新エネルギー力学部門エネルギー変換工学分野と新エネルギーシステム工学分野）がこの生体力学適応能に関する研究を行ってきました。

本共同利用研究集会は平成 24 年 3 月 2 日（金曜日）～3 月 3 日（土曜日）に．応用力学研究所西館６階会議室（Ｗ６０１）および本館２階会議室にて開催しました。上記事業に関る基礎的な問題についての 5 年間の研究総括をそれぞれの研究グループが発表しました。報告内容の概要を以下に示します。詳細は、九州大学応用力学研究所平成２３年度の本共同利用研究集会前刷集をご覧下さい。

２．講演概要

（１）総括報告

○佐々木啓一（東北大学大学院歯学研究科口腔システム補綴学分野）

本連携研究の基となった，歯学研究科における「口腔健康科学」の概念，これを中心にした東北大学金属研究所との共同研究の推進，次に，九州大学応用力学研究所，東北大学歯学研究科，東北大学金属材料研究所との 3 者による生体-バイオマテリアルのインターフ

ェイスに関わる連携研究の経緯を述べる．更に，この間の数多くの研究事業と発展を概観する．最後に，本連携事業における東北大学歯学研究科の成果を要約する．

（2）バイオマテリアルと生体界面の融合性の解明に関する研究

○鈴木　治[1]、鈴木祐子[2]、本田義知[2]、白石　成[2]、穴田貴久[1]、
折居雄介[1]、高橋信博[1]、佐々木啓一[1]
[1]東北大学大学院歯学研究科、[2]インターフェイス研究事業

骨欠損を修復するバイオマテリアルは生体親和性の高い材料が選択されるが、生体融合を促進する材料との界面の理解が緊急の課題であった。本研究では、生体・材料・材料表面の３者に焦点を当て、(1)リン酸オクタカルシウム（OCP）の結晶形態、(2)金属チタン・合金へ OCP 等を選択的に析出させる化学条件と表面条件、(3)システム工学に基づく細胞機能活性化条件を調べ、材料の物質条件が生体融合性を調節し得ることを明らかにした。本プロジェクトから今後のバイオマテリアル設計の基礎データが得られた（共同研究者：東北大学 増本博、塗溶、後藤孝、上田恭介、成島尚之、新家光雄、UCLA　Chih-ming Ho、西村一郎）

（3）バイオマテリアル－生体インターフェイスの特性を活用した安心・安全な
医療用材料の開発

○金高弘恭[1]、張　曄[1,2]、佐野有哉[2]、工藤忠明[3]、清水良央[4]、
佐々木啓一[1,2]
[1]東北大学大学院歯学研究科歯学イノベーションリエゾンセンター、
[2]口腔システム補綴学分野、[3]口腔生理学分野、[4]口腔病理学分野

近年、医療用生体材料にもより一層の安心・安全性が求められている。本研究では、バイオマテリアル－生体インターフェイスのうち、力学的特性および生体吸収性に着目し、新しい機能性医療用材料の開発を行った。

弱い力を持続的に負荷できる超弾性特性は、より穏やかな生体反応を引き起こすため、大変有用な医療用材料として広く利用されている。今回、生体安全性を考慮し、ニッケルを含まない超弾性・形状記憶合金を開発し、整形力や矯正力の発現装置として臨床的有用性を確認した。

また生体吸収性の活用では、水熱合成法での柱状結晶成長による吸収性ハイドロキシアパタイトや、合金組成や表面の結晶状態制御により、吸収性を制御可能なマグネシウム合金を作製し、生体吸収機序の解明を行った。

（4）口腔内修復のための機能性バイオマテリアルとデバイスを目指して
－ 快削性と制菌性を有するチタン合金の開発および磁性デバイスの安全性評価 －

○髙田雄京[1]、菊地聖史[1]、髙橋正敏[1]、中條和子[2]、稲垣亮一[3]、

依田正信[4]、高橋信博[2]
[1]東北大学大学院歯学研究科歯科生体材料学分野、[2]口腔生化学分野、
[3]附属技工士学校、[4]咬合機能再建学分野、

歯科の加工は、鋳造から CAD/CAM に移行しつつあり、難削材のチタンにおいても切削加工を積極的に利用する機運が高い。本プロジェクトにおいて、歯科用 CAD/CAM に適したチタン合金の開発を試み、Ti-Ag 合金が(1) チタンよりも研削性に優れていること、(2) 延性を保ち、切削力が小さいことを明らかにし、(3)快削性 Ti-20mass% Ag 合金を開発した。同時に、(4)Ti-Ag 合金にバイオフィルムが付着しにくい制菌性があることを明らかにした。また、(5)歯科用磁性アタッチメントの静磁場が骨形成に及ぼす影響や(6)磁性ステンレス鋼とチタンの異種金属接触腐食から歯科用磁性デバイスの安全性を評価した。

（5）バイオマテリアル－パラサイト・インターフェイスへの挑戦
－バイオマテリアルの生物学的劣化の理解へ－

○高橋信博[1]、真柳　弦[2]、中條和子[1]、鷲尾純平[1]、佐藤拓一[1]、
竹内裕尚[1,3]、佐久間陽子[1,3]、松尾　洋[1,3]、末永華子[3]、鈴木　治[4]、
佐々木啓一[3]
[1]東北大学大学院歯学研究科口腔生化学分野、
[2]インターフェイス研究事業、
[3]口腔システム補綴学分野、[4]顎口腔機能創建学分野

歯科医療で用いられるバイオマテリアルの特徴の 1 つは、口腔内に露出していることによる口腔パラサイト（微生物）への曝露である。本プロジェクトを通して、(1) 歯科用アクリルレジンには口腔パラサイトが侵入しその棲息環境となり得ること、(2) 口腔パラサイトの生物活性は歯科用アクリルレジンを長期的に劣化させ得ることを明らかにした。さらに、バイオマテリアル－パラサイト・インターフェイスの生物学的特徴を評価するために、(3) 蛍光色素を応用したバイオマテリアルへのパラサイト付着定量法、および(4) バイオマテリアル－パラサイト・インターフェイス pH 測定法を新規に開発した。

（6）金属/セラミックス高機能インターフェイスの創製 –総括報告–

後藤　孝
東北大学 金属材料研究所

金属系生体材料では、使用部位に要求される強度や延性を満足するため、加工熱処理により相および微細組織が調整される。本研究では、Ni 基および Co 基の生体材料の最適組成、熱処理条件を明かにした。また、金属ガラスでも、高耐食性の生体材料を見出した。しかし、金属材料では、生体内で表面に形成される不動態皮膜では、生体適合性は不十分であることから、バイオセラミックスのコーティングにより、バルクとしての特性を劣化させることなく、組織適合性を向上させる必要がある。そこで、PVD および CVD を用い、

種々のバイオセラミックスコーティングを金属基生体材料にコーティングし、生体内外試験を行い、最適な金属/セラミックス高機能インターフェイスを構築した。

（7）生体用β型チタン合金上に形成したハイドロキシアパタイト膜の密着性と表面粗さ

○仲井正昭、新家光雄、稗田純子、後藤孝、塗　溶
東北大学 金属材料研究所

生体用β型 Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr 合金（TNTZ）は、無毒性・非アレルギー性元素のみで構成され、骨類似の低ヤング率を有することから、次世代の硬組織代替材料として臨床応用が期待されている。これまでに、骨との親和性の改善を目的として、有機金属化学気相蒸着（MOCVD）法による、TNTZ 表面におけるハイドロキシアパタイト（HAp）膜の合成が検討されてきた。本研究では、酸処理により TNTZ の表面粗さを変化させ、HAp 膜と TNTZ との密着性に及ぼす表面粗さの影響について調査・検討した。酸処理後の表面は、酸の種類に依存して凹凸のでき方に違いがあったが、全体的には結晶粒界で溶解しやすい傾向が認められた。この結晶粒界の溶解は、比較的マクロなスケールの表面粗さを増大させ、アンカー効果による密着性の向上に寄与すると考えられる。

（8）電子ビーム積層造形法により作製した生体用 Co-Cr-Mo 系合金の組織および機械的特性

○黒須 信吾、松本 洋明、李 云平、小泉 雄一郎、千葉 晶彦
東北大学 金属材料研究所

近年 3 次元 CAD システムの普及および造形装置の精度向上に伴い，複雑微細構造かつ種々のネットワーク構造を有するインプラント製品を直接造形できる additive manufacturing 技術が開発されている．そのひとつとして直接電子ビームにより合金粉末を溶融させ，製品を作製できる電子ビーム積層造形(Electron Beam Melting, EBM)法がある．本研究では，EBM 法で作製した生体用 Co-Cr-Mo 系合金の組織および機械的特性を調査し，基礎的な知見を構築した．

EBM 法により作製した Co-Cr-Mo 系合金は，出発粉末の合金組成とほとんど変化なく，密度 100%の緻密体が得られた．組織観察より積層の境目は確認されず，積層方向に沿ってデンドライド組織が形成していた．析出物(主に炭化物)は，粒界および粒内に存在し，サブミクロンオーダーで等間隔に分散していた．

（9）熱酸化法によるチタン上へのアナターゼ形成と評価

○成島尚之[1]、梅津信幸[2]、佐渡翔太[3]、上田恭介[1]
[1]東北大・工、[2]東北大・院、[3]東北大・学

チタン表面の TiO_2 皮膜は耐食性、骨適合性、血液適合性などチタン特性に大きな影響を

及ぼす。熱酸化法は安価簡便かつ高い密着力を有する酸化皮膜を作製できることから有力な TiO_2 皮膜形成手法である。しかしながら、チタンの熱酸化における酸化生成物は主にルチル相であり、生体適合性が期待されるアナターゼ相形成に関する報告は極めて少ない。本研究では Ti(C,N)相を経由した二段階酸化法によりチタン表面にアナターゼ相を形成し、生体適合性の基礎データとして UV 照射下における水接触角測定およびセルフクリーニング性能試験を行った。形成される酸化皮膜中のアナターゼ相分率が 0.7 を超えると超親水性と迅速なオレイン酸分解が観察された。

（１０）高いガラス形成能を有する Ti 系バルク金属ガラスの開発とその生体適合化

Eun Soo Park、A. D. Setyawan、和田　武、○加藤秀実
東北大学 金属材料研究所

本研究は、毒性元素を低減した新規Ti 基金属ガラス合金のガラス形成能向上と新規表面処理技術によるTi 基バルク金属ガラスへの生体活性機能付与を通して高生体親和性を有する新規金属生体材料を開発すること目的としている。Be フリーかつNi フリーの Ti 基合金において臨界ガラス化直径が1 cm を超える最大級のガラス形成能を有する合金組成を発見し、その金属ガラスの機械的、化学的性質を明らかにした。また、従来、水溶液を用いたTi 基金属ガラスへの生体活性チタン酸化物コーティングには高温が必要とされてきたが、本研究が新たに考案した手法では室温においても高温水溶液を用いた場合と同様の生体活性セラミックスコーティングが達成できることを明らかにした。

（１１）総括報告

高雄善裕（九州大学応用力学研究所）

本連携研究開始前の，応用力学研究所における Biomechanics と Biomaterials に関する研究内容をまとめる．次に，研究所各研究グループの今回のバイオ研究に関する当初の問題設定は，それぞれの研究グループの基礎学問と深く関わってきたことを述べる．しかし，5 年間の連携研究を経て，研究対象が求める物に大きく傾斜していったグループと，研究方法の展開として研究対象を見ているグループに分かれてきたことを示す．最後に，応用力学研究所の研究を 4 グループ分けて，この 5 年間の個別の研究成果の概要を報告する．

（１２）歯科インプラントの界面形成と制御

○鮎川保則、古谷野　潔
九州大学大学院歯学研究院口腔機能修復学講座インプラント・
義歯補綴学分野

歯科インプラントは骨、歯肉結合組織、歯肉上皮および口腔内細菌と界面を形成する構造体である。これまでに我々は、インプラントの種々の界面に関して知見を蓄積してきた。

その結果、骨との界面に関しては、１．インプラント材料の機能化、特にチタンの水熱

処理、および２．生体の活性化、特にスタチン系薬剤による骨形成の促進を通して界面の獲得・維持を促進する方法について報告した。

また、インプラント－口腔軟組織界面の強化についても検討を加え、その詳細な形態について明らかにしつつ、前述の水熱処理が軟組織との界面強化にも寄与することを見出した。

さらに、チタン表面に付着する細菌叢に関し、網羅的手法により種々のインプラントアバットメント材料に対する細菌付着プロファイルについて明らかにした。

（１３）下肢運動器再建のためのバイオマテアリアルとバイオメカニクス

東藤　貢
九州大学応用力学研究所

関節に生じた変形性関節症や骨に生じた悪性腫瘍により，下肢運動機能は大幅に低下する．東藤グループは，失われた運動器再建のための整形外科手術の支援を目的として，工学的観点からバイオマテリアルとバイオメカニクス研究を進めてきた．末期的な変形性関節症の場合には，人工関節置換術が正常な運動機能を取り戻すための唯一の治療方法であるが，人工膝関節脛骨インサートの摩耗や破損，人工股関節ステムの周囲骨組織の吸収による緩みや骨折等が問題となっている．これらの諸問題に対して，３次元実構造の有限要素解析の手法を用いて研究を進めた結果，深屈曲時の脛骨インサートにおける応力変動，大腿骨ステム周辺部での骨吸収メカニズム，表面置換型人工股関節における頚部骨折のメカニズム等を明らかにした．

一方，悪性骨腫瘍により大規模な骨欠損が生じた場合には，人工材料を用いた骨再生治療が必要となる．本研究では，生体高分子や合成高分子とリン酸カルシウム系バイオセラミックスの複合系多孔体を作製し，骨芽細胞や間葉系幹細胞を用いた培養実験を行い，in vitro での骨組織形成に関する基礎研究を実施した．その結果，強化構造を導入した新規 scaffold の開発に成功し，さらに，圧縮力学刺激が細胞の増殖に及ぼす影響，幹細胞の分化挙動に及ぼすバイオセラミックスの影響等について重要な知見を得ることができた．

（１４）圧電性高分子による天然歯感覚の安全性の高い歯科インプラント

新川　和夫
九州大学応用力学研究所

本研究では，圧電性高分子を応用し，天然歯のような感覚を有し，かつ安全性の高い歯科インプラントを提案している．本年度は，実用化のために解決すべき課題である，人工歯根膜の弾性率をヒト生体歯根膜に近づけること，また微弱電流と生体(神経)との相互作用に関する研究に展開した．具体的には，インプラントモデルに模擬的な咬合力が作用した際の変位計測を行った．またヒト生体歯の変位を計測し，両者の対応関係から人工歯根膜の弾性率の評価を行った．さらに，ヒト生体歯に咬合力または微弱電流が作用したときの

脳活動を近赤外線光により計測し，咬合力と微弱電流との対応関係を調べた.

（１５）ひずみ勾配を有する伸縮刺激下での間葉系幹細胞の分化特性解析に関する研究

○森田康之、渡邉早智、巨陽
名古屋大学工学研究科

本研究は，ヒト骨髄由来の間葉系幹細胞に機械的伸縮刺激を付与し，腱細胞への分化および腱組織の構築を目的とする．この分野における既存の研究は，間葉系幹細胞に一様な機械的伸縮刺激を付与するが，本研究ではひずみ勾配を有した機械的伸縮刺激を付与することを特徴とする．機械的伸縮刺激に対する細胞の配向はよく観察される現象であるが，ひずみ勾配場を用いることにより，配向現象の閾値となる許容限界軸ひずみを系統的に明らかにすることに成功した．また，腱細胞への分化に関しては，ひずみ勾配場を用いることにより，分化に最適な伸縮強度を定量的かつ高精度で明らかにすることを可能とした.

３．まとめ

生体－バイオマテリアル高機能インターフェイス科学推進事業に関する第６回目の最後の研究集会である．３研究機関から合計１５件の講演発表があり、活発な討論が行われた。参加者の内訳は３機関からは九大１３名（内院生４名），東北大１２名であった。

本共同研究集会は，連携事業における主に生体力学的議論の場を提供した．この連携事業は数々の実績を上げており，外部評価を受けてこれまでの事業の発展として，平成 24 年度からは特別経費「生物－非生物インテリジェント・インターフェイスの創成」関する事業が再スタート（５年間の研究経費がH24 年度概算の内示を受けている）する.

応用力学研究所は本連携事業の終了を区切りにバイオ分野の基礎研究を所研究方針から外し，新エネルギー関連の基礎研究・開発の強化を謳っている．このため，再スター事業には参加しない．再スター事業からは biomechanics の視点は薄まり，bio-imaging の充実が図られている.

九州大学応用力学研究所

〒816-8580　福岡県春日市春日公園６丁目１番地
連　絡　先　九州大学応用力学研究所事務室

電　　話　092-583-7702
Ｆ　Ａ　Ｘ　092-583-7701