

平成 17 年度

力 学 分 野
共同研究成果報告

荒天下非線形船体運動および抵抗増加に関する研究

広島大学大学院工学研究科
助教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

特定研究1 課題「水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究」に関連する実際の問題として、荒天下を航走する船舶の耐航性能に関わる諸問題がある。中でも波浪衝撃荷重、海水打ち込み、スラミングなどの非線形現象は、非線形船体運動と直接的に関連しており、荒天下の船体運動や抵抗増加の推定はこれらの問題を扱う際の基礎となる。

本研究では、荒天下の船体運動および抵抗増加に関する実験データの取得、その解析による非線形性の特性の把握、およびそれらの理論計算による推定を行い、付随する非線形諸問題を扱う際の基礎構築に資することを目的としている。

2. 研究方法

今回は、一般船と比べて非線形性が顕著に見られる波浪中を高速で航走する多胴船を対象とする。この船型に関し、次の手順により研究を遂行する。

- (1) 1.5m 供試模型を製作し、深海機器力学実験水槽において波浪中運動計測試験を行い、船体運動および抵抗増加を計測する。
- (2) 同供試模型主船体両サイドにアウトリガーを装着し、多胴化することによる船体運動および抵抗増加へ及ぼす影響について調査する。
- (3) 取得データを解析し、非線形性の特性についてまとめる。
- (4) 非線形問題を扱える理論推定法として当方の開発した周波数領域境界要素法を適用し、水槽試験に対応した数値計算を実施し、結果を比較することにより推定法の妥当性や問題点等について考察する。
- (5) 一連の研究を総括する。

3. 結果

Fig.4 に示されるトリマランの運動特性および主船体とアウトリガーとの干渉影響を調べるために、曳航水槽にて運動計測試験を実施した。Fig.1 には静水面中を曳航して得られた抵抗(剰余抵抗係数)、シンケージ、トリム量の有次元値を示している。アウトリガーを装着してトリマラン化することにより、剰余抵抗の全般的な増加と、船首上げトリム量の増加が窺える。本来アウトリガーは主船体とアウトリガーの造る波を干渉させることにより造波抵抗の低減を目的としていることを考えると、今回の実験におけるアウトリガーの配置がそうした干渉影響が顕著となるような位置に適切に設置されていないこと言わざるを得ない。実験では、主船体の造る波がアウトリガーに当たり大きな干渉波を形成していることが観察されており、今後その配置を変えた実験を行なうことにより、適切なアウトリガーの配置を選定していく必要がある。なお、実際には主船体の波を受けることによりアウトリガーの浸水面積は停止時と比べて大きく変化しているが、今回の剰余抵抗係数の算出にはその影響は考慮せずに喫水以下の面積を用いて摩擦抵抗係数を算出し差し引いている。この部分は非線形影響と考えることができるが、そうした場合には剰余抵抗係数の定義自体に再考の必要があると思われる。

Fig.2 に正面向い波中で模型を曳航して得られた船体運動，Fig.3 に抵抗増加の結果を示している．トリマラン状態では，特に heave 運動の同調点近傍が大きな値となり，結果としてその周波数域において抵抗増加が増加することが分かる．少なくとも今回のアウトリガー配置の下では，主船体単独と比べて向い波中のトリマランの耐航性能の長所を見出すことはできない．

波浪中船体運動を推定するための理論計算法として周波数領域ランキンパネル法を用い，パイロット計算として波浪変動圧を計算してみた．Fig.4 にその結果を示している．Fig.5 には同時に計算で得られた diffraction wave の鳥瞰図と等高線図を示している．船首からの非定常波の造波は少なく，主船体のトランザム船尾からの造波が顕著であることが分かる．非定常問題において，このトランザム船尾の理論計算上の取扱法に関しては未だ確立された計算モデルが存在しないことから，今後その確立が重要となってくるものと思われる．実験を通しては，波浪中でもトランザム船尾はドライコンディションであることから，たとえば線形理論の枠内で考えれば，船体の造波する非定常波の波振幅と入射波の波振幅を加えたものがトランザム船尾部においてゼロとなる条件を付加するのが合理的なモデルの一つになると思われる．

4. まとめ

非線形影響が通常船舶と比べて顕著となると思われる高速船を対象として，主船体にアウトリガーを配したトリマラン船の波浪中船体運動および抵抗増加の計測を行い，主船体単独と比べてトリマラン船の耐航性能を調査した．本研究を通じて以下の知見を得ている．

- (1) 静水面中の曳航試験において推進性能を調べた結果，トリマランは単胴と比べて，剰余抵抗係数が大きくなることが分かった．今回のアウトリガー配置が適切でなかったことがその要因の主たるものと考えられ，他のアウトリガーの配置についても調べてみる必要がある．
- (2) 波浪中船体運計測試験においては，今回のトリマランは heave 運動が大きく，結果として抵抗増加も全般に大きくなることが分かった．向い波中の耐航性能上，単胴と比べて優位な点を見出すことはできなかった．これについても，他のアウトリガー配置の場合について追試してみる必要がある．
- (3) 既存の理論推定法を用いてトリマランの波浪変動圧および diffraction wave を計算した．理論計算上は主船体のトランザム船尾部の流場のモデル化が必要である，今後，実験観察等をベースに合理的なモデルの提案が必要であることが分かった．

5. 研究成果報告

研究継続中につき，現段階で特になし．

6. 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地球環境工学講座	助教授	代表者
渡部 雅晃	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程 1年	実験補助
笹重 修平	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程 1年	実験補助
沖野 健司	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
黒川 桂介	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
柏木 正	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

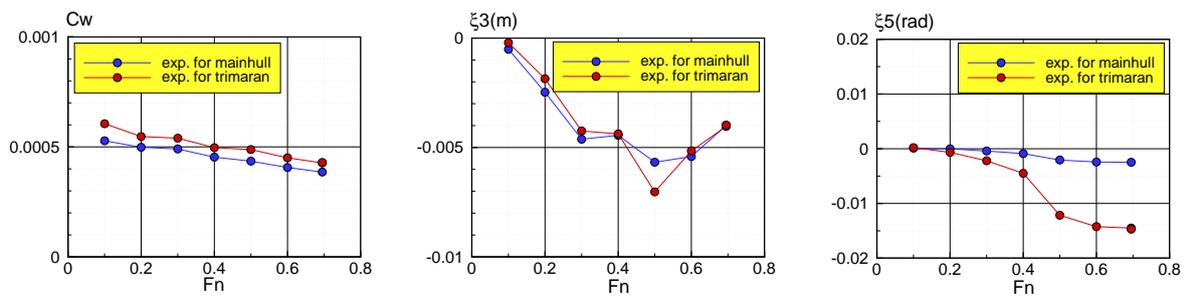


Fig.1 Measured steady resistance, sinkage and trim for two hull forms

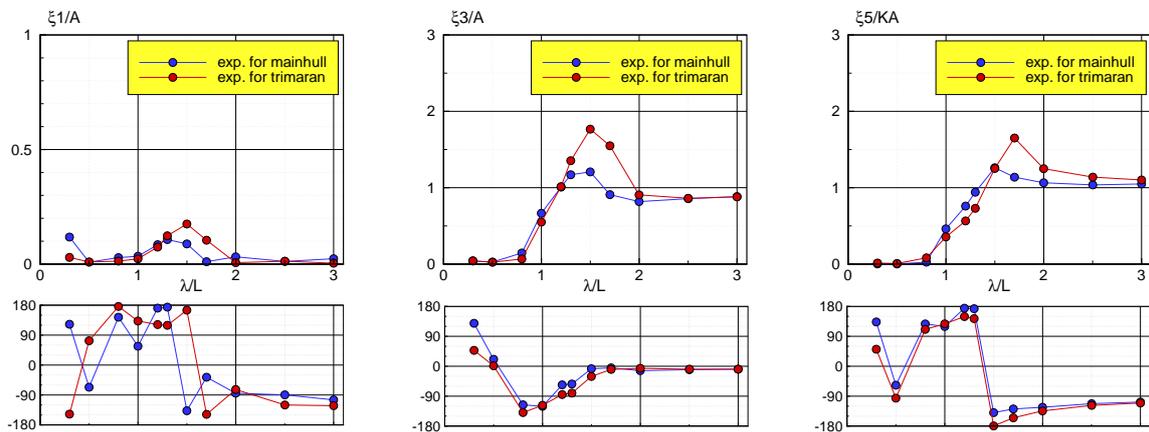


Fig.2 Measured ship motions in regular head waves for two hull forms

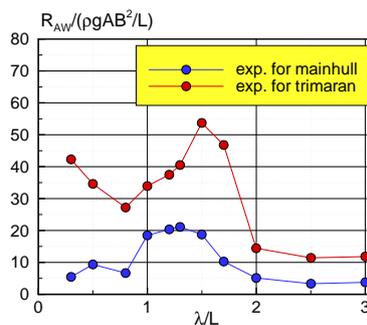


Fig.3 Measured added wave resistance for two hull forms

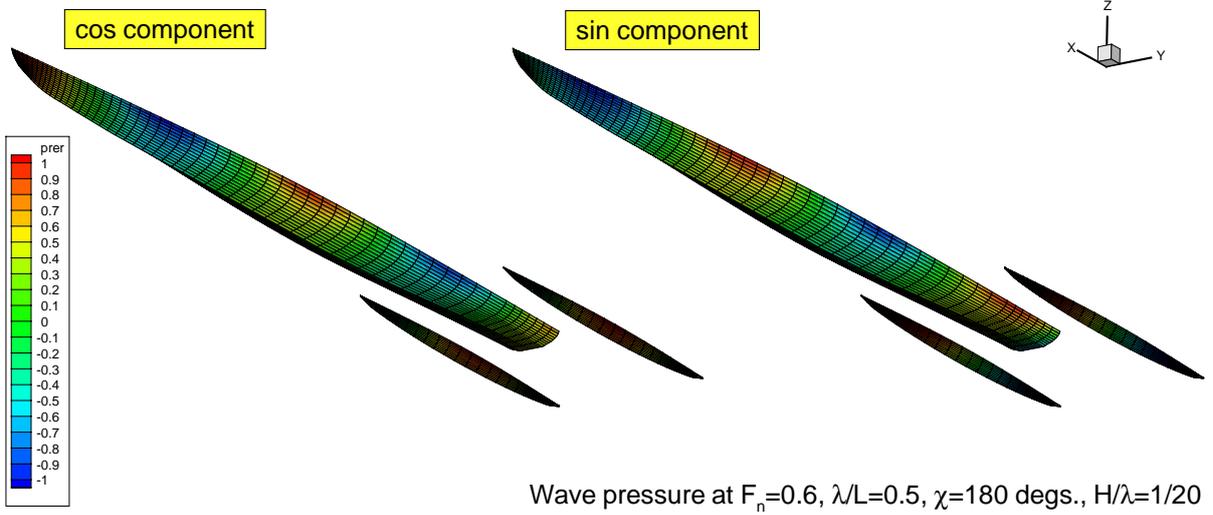


Fig.4 Computed wave pressure on the trimaran

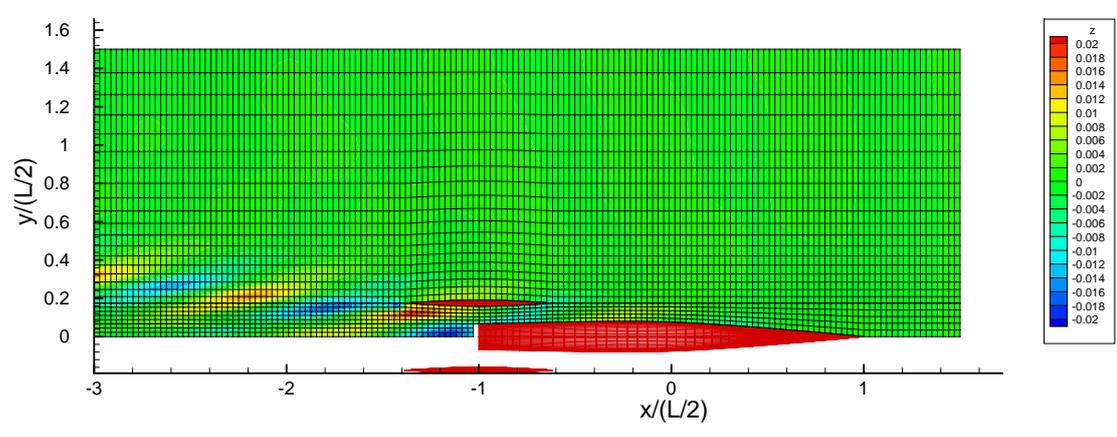
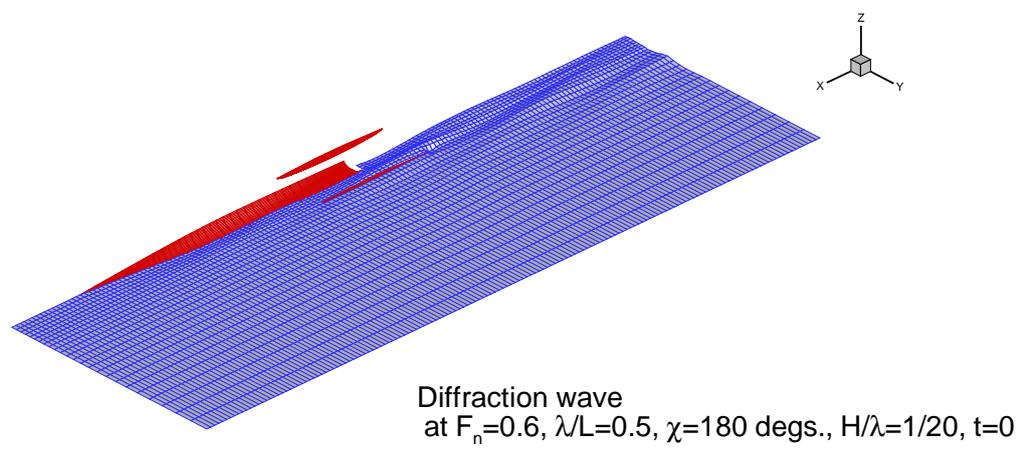


Fig.5 Computed diffraction wave for the trimaran

(研究集会)

海洋巨大波の実態と成因の解明

研究代表者

海上技術安全研究所

富田 宏

目 的

最近、従来の設計基準では想定されていなかった巨大な波が船舶や海洋構造物に大きな被害をもたらすことが認識されてきた。これらは freak wave あるいは rogue wave と呼ばれ、長い間船乗りの伝説としては語り伝えられていたものであるが、目撃情報や観測データなどの集積によって、最近になって研究者の注目を引くようになったのである。このような巨大波の実態や生成機構を理解することは船舶や海洋構造物を設計する上で極めて重要である。freak wave は深海域でも浅海域でも起こるといわれており、また様々な生成機構が提案されている。わが国でもいくつかのグループが異なる観点・手法で freak wave の研究に取り組んでいる。これらのグループの成果・情報を交換することは互いの研究の発展に対して極めて有意義と考えられる。そのため、特定研究「水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究」のサブテーマとして「海洋巨大波の実態と成因の解明」という題目及び下記のような組織で小規模な研究集会を開催する。

研究集会の日時・場所

日時：2006年3月10日(金)・11日(土)

場所：九州大学応用力学研究所 W601(多目的研究交流室)

プログラム

3月10日(金)

- 13:00-13:05 開会の挨拶
及川 正行(九州大・応力研)
- 13:05-13:50 フリーク波研究の歴史と現状
富田 宏(海上技術安全研究所)
- 13:50-14:50 Freak Wave の発生と非線形干渉の関係について
森 信人, 渡辺 淳也(大阪市大・工)
- 14:50-15:50 直接数値シミュレーションによる Hasselmann の非線形エネルギー
輸送の検出
田中 光宏(岐阜大・工)
- 16:05-16:50 Simulation of the ocean waves and appearance of Freak waves
Igor Ten, 富田 宏(海上技術安全研究所)
- 16:50-17:35 ICMS(エディンバラ)主催 Workshop on Rogue Waves 報告
早稲田 卓爾(東京大・工)

3月11日(土)

- 9:00-10:00 変調波列における最大波について，水槽実験と弱非線形計算の比較
早稲田 卓爾(東京大・工)，木下 健(東京大・生産研)
木下 信(全日空)，亀岡 福太郎，栗本 優(東京大・工)
- 10:00-10:45 フリーク波による船体縦曲げ荷重の推定
中住 昭吾，鈴木 克幸，石 江水(東京大・工)
木下 健(東京大・生産研)
- 11:00-11:45 フリーク波中の船体応答と波浪荷重の推定
南 真紀子，谷澤 克治，沢田 博史(海上技術安全研究所)
- 11:45-12:30 風波生成の数値シミュレーション
三富政秀，川村隆文(東京大・工)
- 13:30-14:15 マイクロ波レーダーによる海洋波浪観測
林 昌奎(東京大・生産研)
- 14:15-15:00 浅水領域における孤立波の二次元相互作用と振幅の増幅について
辻 英一(九州大・応力研)，丸野 健一(九州大・数理学)
A.V.Porubov (A.F.Ioffe Physical Technical Institute, Russia)
及川 正行(九州大・応力研)
- 15:00-15:30 東大・海技研フリーク波研究プロジェクトの中間総括
木下 健(東京大・生産研)
- 15:30-15:35 閉会の挨拶
富田 宏(海上技術安全研究所)

講演概要

フリーク波研究の歴史と現状

富田 宏：海上技術安全研究所

フリーク波に関する研究の始まりはこの現象を主題とした論文に限っても1980年代に遡る。近年，とくに21世紀に入って世界各国の海洋工学関係の研究者の間でフリーク波に対する興味が高まり，過去数回の国際研究集会も開催されている。ここでは，フリーク波の研究の歴史から説き起こして最近の研究動向，さらに依然として存在するフリーク波の定義についての意見の相違や問題点等，「フリーク波とは何か？」について概説する。

Freak Waveの発生と非線形干渉の関係について

森 信人，渡辺淳也：大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻

現在，海流や地形の影響が無視できる外洋では，3次の非線形干渉の影響がFreak Waveの発生の主要な原因であるとの見方が主流となっている。しかし，その発生頻度についてRayleigh分布に代表される線形理論との違いについて定量的な評価が為されていない。本研究では，Freak Waveを有義波高の2倍を超える最大波として定

義し, Gauss 過程・Rayleigh 分布からの乖離と 3 次の非線形干渉の関係について明らかにする. まず始めに, 3 次の非線形干渉によって発達する Freak Wave の出現特性を把握するため, 方向スペクトルと水面変位の高次モードの関係について定式化を行う. ついで, 水面変位の高次モードを軸に最大波高分布を求め, Freak Wave の出現とスペクトル形状の関係について明らかにする.

直接数値シミュレーションによる Hasselmann の非線形エネルギー輸送の検出

田中光宏: 岐阜大学工学部数理デザイン工学科

Janssen (JPO 33(2003), 863–884) は, $T = O(1/\epsilon^4\omega_0)$ よりずっと短い時間スケールにおいては, 現在大部分の数値波浪推算モデルに採用されている, Hasselmann の 4 波共鳴相互作用に基づく非線形エネルギー輸送ではなく, 共鳴条件を満足しない 4 波相互作用によるスペクトル変動が重要であると主張している. しかしこれは, 線形波の重ねあわせから出発してたった 25 周期にわたる波動場の時間発展の直接数値シミュレーションから, Hasselmann の 4 波共鳴相互作用に基づく非線形エネルギー輸送の検出に成功した Tanaka (JFM 444(2001), 199–221) の結果と明らかに矛盾しているように思われる. 今回は異なるスペクトル形も含め再度計算を行い, Tanaka (2001) の正当性を再確認するとともに, 断面 2 次元 (1 次元伝播) の計算結果から平面 2 次元のスペクトル変動について推測することの危険性についても言及する.

Simulation of the ocean waves and appearance of Freak waves

Igor Ten, H. Tomita: 海上技術安全研究所

Freak wave is one of the natural disasters in the ocean, characterized by an isolated majestic wave, which more than 2 times greater in height than its surrounded waves. In the paper, we study mechanisms of creation of such waves in the ocean by applying numerical wave tank (NWT). NWT is based on Boundary Integral Equation method with mixed Euler-Lagrangian condition to satisfy free surface boundary condition exactly. We consider several mechanisms of creation: focusing waves, Benjamin-Feir instability, algebraic and breather solitons, which are possible different stages of Freak wave generation. Finally, we make fairly long time random simulation of the ocean waves by adopting spectra: Swell, Pierson-Moskowitz spectra.

ICMS (エディンバラ) 主催 Workshop on Rogue Waves 報告

早稲田卓爾: 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

2005 年 12 月, International Center for Mathematical Sciences で行われた, Rogue Wave Work Shop の報告をする. この WS は, Rogue Wave を数学的な観点から議論するということが, 主たる目的であったが, 石油会社や MaxWave プロジェクトを代表する発表者や, 観測, 実験など幅広いテーマで 3 日半, 十分時間をかけて議論した. プレゼンテーションは,

<http://www.icms.org.uk/meetings/2005/roguewaves/index.html>

に掲載されているが、筆者の感想も含めた紹介をする。その際、発表と関連した、最新の研究動向についても、可能な限りレビューを行いたい。

変調波列における最大波について、水槽実験と弱非線形計算の比較

早稲田卓爾，木下健，木下信，亀岡福太郎，栗本優

早稲田卓爾，亀岡福太郎：東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

木下健：東京大学生産技術研究所

木下信：全日空

栗本優：東京大学工学部システム創成学科

近年海洋波における突発的巨浪の発生機構の一つとして、波列の変調不安定が着目されている。主に弱非線形仮定の枠組みで議論されており、発生した巨浪の強い非線形性に起因する砕波などを議論した研究は決して多くない。本研究では、東大生産技術研究所海洋工学水槽で行った、水槽実験と Dysthe による拡張シュレーディンガー方程式と、Krasitskii による Zakharov 方程式の数値解とを比較した。まず、もっとも単純なケースである、Benjamin-Feir 不安定波列について、初期岨度-周波数バンド幅の広いパラメータ空間の中で検証した。得られた、最大波高は、初期岨度 0.1 程度より低い場合は初期岨度の関数となるが、ある程度初期岨度が大きくなると、砕波により、波高が抑えられほぼ一定となることが実験との比較でわかった。この結果を参考に 1 次元連続ガウススペクトル波列の発展を Zakharov 方程式の解として求め比較した。ガウススペクトルの場合もほぼ BF 不安定の場合に準じた結果となるが、そうでない場合もあり、この点はアンサンブルを増やすなど、現在検証中である。最後に、海洋工学水槽で行った 3 次元造波について簡単に報告する。Tertiary Wave Interaction、分散性・多方向線形集中波について報告し今後の研究の方向性を述べる。

フリーク波による船体縦曲げ荷重の推定

中住昭吾，鈴木克幸，石江水，木下健

中住昭吾，鈴木克幸，石江水：東京大学大学院 工学系研究科

木下健：東京大学生産技術研究所

Freak Wave とは海洋に突然現れる巨大な波浪であり、Freak Wave に遭遇した船舶の破損・沈没等を防ぐためには、Freak Wave 下での船体運動及び船体への波浪衝撃荷重を解明することが必要である。本報では Freak Wave を想定して行った模型船水槽実験の結果を報告する。具体的には、Freak Wave として規則波に線形集中波を重畳させた波、及び Benjamin-Feir 変調理論に基づく不安定波を用意し、それらの向波及び斜め波を弾性模型船に作用させた。計測は船体運動応答及び船体曲げ荷重とし、解析においては船体構造強度の観点から特に重要となるホイッピングに着目することとした。また、実験と併せて SRSLAM による数値シミュレーションも行い、両者の比較検証を行った。

フリーク波中の船体応答と波浪荷重の推定

南 真紀子，谷澤 克治，沢田 博史：海上技術安全研究所

Freak Wave とは海洋に突然現れる巨大な波浪であり，Freak Wave に遭遇した船舶の破損・沈没等を防ぐためには，Freak Wave 下での船体運動及び船体への波浪衝撃荷重を解明することが必要である．本報では FreakWave を想定して行った模型船水槽実験の結果を報告する．具体的には，FreakWave として規則波に線形集中波を重畳させた波，及び Benjamin-Feir 変調理論に基づく不安定波を用意し，それらの向波及び斜め波を弾性模型船に作用させた．計測は船体運動応答及び船体曲げ荷重とし，解析においては船体構造強度の観点から特に重要となるホイッピングに着目することとした．また，実験と併せて SRSLAM による数値シミュレーションも行い，両者の比較検証を行った．

風波生成の数値シミュレーション

三富政秀，川村隆文：東京大学 大学院工学系研究科 環境海洋工学専攻

風波水槽を模した 2 次元シミュレーションの結果を報告する．初期に平らであった水面に風が吹き始めた状況のシミュレーションでは最初に短い波が発生し，それが指数的に成長し，その後長い波に発達して行く過程が再現された．Kawai(1979) の実験と比較すると，スペクトルの形状，ピーク位置，時間発展においてよく一致した．波長 37.5cm の「うねり」の上に風が吹き始めた条件のシミュレーションではうねりの存在によって小スケールのリップルの成長が抑制されることが確認された．

マイクロ波レーダーによる海洋波浪観測

林 昌奎：東京大学生産技術研究所

海洋空間利用・開発において，最も重要とされる海洋環境要素の 1 つは海洋の波浪である．海洋波浪，潮汐流及び海流に代表される海面の物理現象の基本は，水粒子の運動である．海洋波浪は，周期が数秒から十数秒の水粒子の運動現象と言える．マイクロ波レーダーは後方散乱するマイクロ波を計測する装置で，海面から後方散乱するマイクロ波には，海面形状及び海面付近水粒子の運動特性が含まれる．そのため，海面から後方散乱するマイクロ波を解析することで，海面の特性を知ることが可能である．本研究ではマイクロ波レーダーを用いた最適海洋波浪観測アルゴリズムの開発のために行っている研究及び今後について述べる．

浅水領域における孤立波の二次元相互作用と振幅の増幅について

辻英一，丸野健一，A.V.Porubov，及川正行

辻英一，及川正行：九州大学応用力学研究所

丸野健一：九州大学数理学研究院

A.V.Porubov：A.F. Ioffe Physical Technical Institute (Saint-Petersburg)

多くの研究で Freak Wave は深水波として取扱われているが，ここでは浅水領域において Freak Wave と同様の特徴を持つような大振幅波動の生成に関する研究を報告す

る．具体的には，この系で安定に伝わる孤立波に着目し，それらの二次元的な相互作用が波の振幅にどのような効果を与えるか，という点を特に調べた．解析には基礎方程式より近似的に導出される二次元ソリトン方程式— Kadomtsev-Petviashvili(KP)方程式—を用いる．そして(1)曲がった峰を持つような孤立波の相互作用による振幅の増幅の数値的な解析(2)多数の孤立波の共鳴的相互作用による非定常パターンの生成と振幅増幅のソリトン理論による解析を行った結果を示す．

東大・海技研フリース波研究プロジェクトの中間総括

木下 健：東京大学生産技術研究所

東大・海技研フリース波研究プロジェクト2年半で成し遂げたことと達成出来ていないことを整理して，今後数年間でなすべきことを私見を交えて述べる．

おわりに

目的にあるような趣旨でこの研究集会を開催することを企画した．当初，昨年内の開催を目指したが，参加者の都合がつかず，3月の開催となった．freak wave は国際会議の開催や雑誌の特集号が組まれるなど注目を集めている話題である．プログラムを見ると理論，実験，数値シミュレーション，深水域から浅水域の話題と当初目論んだ通りの多様な講演を用意できた．この研究集会の目的は国内の主要な研究グループに集まっていただき集中的に議論し，今後の発展を図ることであるが，一般にも公開し，研究者層の幅を広げる目的もあり，それらが達成できるものと確信している．

研究組織

富田 宏(海上技術安全研究所)	研究代表者・海洋波浪
川村 隆文(東京大学工学系研究科)	研究協力者・計算流体力学
Igor K. Ten(海上技術安全研究所)	研究協力者・海洋流体力学
木下 健(東京大学生産技術研究所)	研究協力者・海事流体力学
早稲田 卓爾(東京大学工学系研究科)	研究協力者・海洋環境流体力学
亀岡 福太郎(東京大学工学系研究科)	研究協力者・海事流体力学
森 信人(大阪市立大学工学研究科)	研究協力者・海岸環境工学
田中 光宏(岐阜大学工学部)	研究協力者・非線形波動
及川 正行(九州大学応用力学研究所)	研究協力者・非線形波動
辻 英一(九州大学応用力学研究所)	研究協力者・非線形波動
柏木 正(九州大学応用力学研究所)	所内世話人・海洋工学

水波と浮体に関する強非線形問題の数値シミュレーション技術の開発

独立行政法人海上技術安全研究所

実海域性能評価プロジェクト長 谷澤克治

研究の目的

これまで船舶海洋工学の分野ではスラミング、甲板打込、スロッシング等の激しい流体現象の数値解析が困難であったが、近年では粒子法や CIP 法等のロバストな新しい数値計算手法が開発され、激しい流体現象についても数値計算が可能になって来ている。本研究の目的は、これらの新しい数値計算手法を用いて水波と浮体に関する強非線形問題の数値シミュレーション技術を研究開発し、荒天海域における船舶の耐航性能評価ツールとして用いるための種々の課題について検討することにある。

応用力学研究所の柏木教授は船舶の耐航性能分野全般におけるエキスパートである。また柏木研究室には CIP 法では胡助教授、粒子法では末吉助手と数値計算の分野で先導的役割を果たしている人材が揃っている。応力研と共同研究を実施することにより、海技研の若手研究者の育成と、コードの円滑な開発およびその検証が期待できる。また、互いの計算結果ならびに過去に実施した互いの水槽実験結果を持ち寄り、比較検討することで、コードの精度と信頼性を高める。

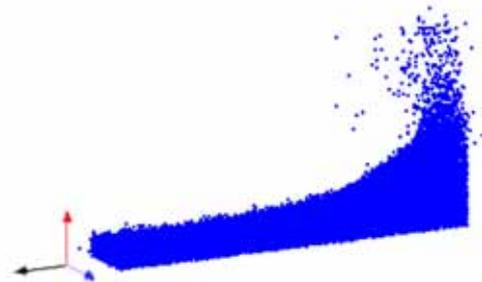
数値シミュレーション手法

荒天中をスラミングや甲板冠水を伴って航走する船舶の応答を数値計算する技術を確立するため、粒子法と CIP 法を用いた数値シミュレーション法を研究開発する。コード開発は応力研と海技研で独自に行い、数値計算上の共通する問題点の解決に連携して取り組む。

開発状況

1. 粒子法による波浪衝撃解析コードの拡張

東京大学の越塚教授により開発され、公開されている粒子法コードをベースに、不均一粒子を配置して局所的に粒子数密度を上げるアルゴリズムを用いてプログラムを拡張中。これにより、粒子法コードの計算精度と計算時間の向上を目指している。試計算として、タンク内液体のスロッシン



粒子法によるスロッシングの計算例

グ現象を対象にしたシミュレーションを実施した。

2. CIP法による計算コード開発

CIP法による波浪中船体運動計算コードを試作し、Added-mass, Damping coefficient の計算を行い妥当性を検証すると共に、Stokes 近似を利用した造波の方法を開発し、波浪中を航走する船舶のシミュレーション計算を試行した。本コードでは船の形状表現法を 2 次元関数で近似し滑らかな船首、船尾を造っている。現在、界面捕獲法の精度向上、Ghost Fluid Method の利用検討、船に働く力の計算の精度、船周辺の流れ場の精度向上方法の検討、保存系手法への移行を検討中。



CIP法による波浪中船体運動の計算例

考察

粒子法は 2 次元問題の計算では実用的な規模の計算が可能であるが、3 次元では計算時間と計算機のメモリ容量等の観点から実用規模の計算は、まだ困難である。3 次元の実用計算法として活用するには、計算アルゴリズムの高速化等の研究が今後も不可欠である。また、圧力の計算結果に見られる激しい振動を抑制する必要があり、船舶の設計ツールとして実用化するには、これらの問題の解決が必須である。

CIP法では、造波方法の更なる改良、船体表面での境界条件をより厳密に満足させるためのスキームの導入、界面捕獲法の精度向上、保存系手法への移行等、計算法自体にまだ多くの課題が残されている。また、これも船舶の設計ツールとして実用化するには、計算時間の短縮化が必要であり、今後も研究開発を続ける必要がある。

成果報告

T.Yabe, K.Takizawa and T.Tezduyar, HIGHER-ORDER MULTI-PHASE FLOW SOLVER IN MESH-LESS-LIKE SOROBAN SCHEME, 8th US National Congress on Computational Mechanics

K.Takizawa, Computation of Free-Surface Flows and Fluid-Object Interactions with the CIP Method Based on Adaptive Meshless Soroban Grids, 講演会集「水波と浮体の相互干渉に関する力学」

滝沢 研二, CIP ソロバン格子による船舶シミュレーション, 287, 第 55 回理論応用力学講演会集

K.Takizawa, Ship Simulation with the Soroban CIP method, 研究集会報告集「移動境界まわりの強非線形流れ解析」

(研究集会)

移動境界まわりの強非線形流れ解析

研究代表者
東京工業大学学術国際情報センター
青木 尊之

1. 目的

移動境界と考えられているのは、波浪中での浮体や水中曳航体のように、規則的あるいは不規則に動く物体である。それによって引き起こされる物体まわりの流れ解析や、物体の運動と流れの相互作用に関する問題は、最近の発展が著しい数値流体力学の分野でも難しい研究テーマの一つである。それらに対する新しい解析手法を探り、種々の知見を得るために、同様の研究を行っている多くの分野の研究者が一同に会し、研究成果の議論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、移動境界、界面、強非線形問題、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18年1月27日(金) 13:15~17:50

1月28日(土) 9:00~15:20

開催場所：九州大学応用力学研究所西館6階多目的交流室(W601号室)

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国内外に認知されており、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。

最初に、この研究集会世話人である、応用力学研究所・柏木教授より、今回の招待講演者(東京大学・越塚誠一教授, Alessandro Iafrati 博士 (INSEAN, Italy))および海外からの参加者(Bin Teng, Dalian University of Technology, China)の紹介、並びに招待講演をお願いするに至った経緯などが披露され、研究集会がスタートした。

Numerical Analysis and Visual Processing Using a Particle Method

越塚誠一(東京大学工学系研究科システム量子工学専攻)

MPS(Moving Particle Semi-implicit)法は数値拡散がなく、砕波も容易に取り扱えるので、多くの工学・科学分野で用いられるようになってきている。船舶甲板への海水打ち込みを初めとして、臓器内の血液の流れなど生体流体力学やコンピュータシミュレーションを応用したゲームソフトの開発やアニメーションの分野まで応用されつつある。それらの現状を紹介し、今後の課題・展望について説明した。

3-D Large Eddy Simulation of Wave Breaking and Its Application

鈴木崇之(港湾空港技術研究所), 岡安章夫(東京海洋大学)

海岸へ押し寄せる波が砕ける際に引き起こる種々の現実の現象(例えば砂の巻き上げや防波堤への越波など)をシミュレートするために、乱流モデルとしてLESを用い、速度場の計算および界面捕捉法としてCIPスキームを適用した方法、ならびにその計算結果と実験結果との比較について説明した。

Free-moving Boundary Problem for Large Deformation Solid Analysis

岡澤重信 (広島大学工学研究科社会環境システム専攻)

各種の材料あるいは構造物の弾性・塑性大変形をシミュレーションするために、オイラー格子を用いた数値“流体”力学的手法の紹介とその応用例について解説した。機械材料の加工や衝撃力による材料の破壊、亀裂の伝播なども取り扱うことができ、流体・構造の連成問題は今後の重要な研究課題であることを指摘した。

Numerical Simulation of Fully Nonlinear Irregular Wave Tank

Bin Teng (Dalian University of Technology, China)

時間領域での3次元非線形高次境界要素法の開発およびその応用について研究しているが、計算の安定性、精度向上、計算時間短縮のための工夫(例えば側壁の境界条件を解析的に満たすために鏡像の導入と無限級数の収束を早める方法の提案)、不規則波中でのシミュレーションの現状・問題点、今後の研究課題について説明した。

New Approach to Solve Higher-Order Potentials in the Interaction Problem of Low-Frequency Motion and Waves

二瓶泰範 (東京大学大学生産技術研究所)

波浪中での浮体に働く長周期変動の流体力(特に Wave Drift Added Mass)を計算するために取り組んでいる固有関数展開法と低次の解の微分から求解する方法について説明した。これを用いれば、従来の方法より高速に計算できると思われるが、その検証は今後の研究課題である。

Numerical Simulation of 2D Floating Body Motions with Deck Water

末吉 誠 (九州大学応用力学研究所)

甲板への海水打ち込みを伴う場合の波浪中での浮体の動揺を MPS 法で計算しているが、その現状・問題点などを整理して説明した。2次元水路での実験結果との比較も行っているが、造波機で造られた波の振幅が進行するにつれて少しずつ減衰するので、数値計算結果は実験値より小さく、また漂流運動も正しくシミュレートできていない。これらを改善するための方法を検討している。

A Study of Airfoil Design Suitable for Vertical Axis Wind Turbine and an Application of Wind Collecting Structure for Higher Performance

高橋周平 (九州大学工学府航空宇宙工学専攻修士課程)

大屋裕二, 烏谷 隆, 渡辺公彦 (九州大学応用力学研究所)

風レンズと組み合わせた水平軸型風力タービンの開発における流体力学的ノウハウを用いて、垂直軸型(ダリウス型)風力タービンの高効率化に取り組んでいるが、その過程で行った風洞実験と直交格子での差分法を用いた回転翼まわりの DSN 乱流計算の結果について説明した。翼断面および風レンズの形状と風力エネルギー吸収効率の関係について論じた。

Numerical Investigation of Highly Nonlinear Free Surface Flows through Interface Capturing Methods

Alessandro Iafrati (INSEAN, Italy)

最初に、INSEAN で取り組んでいる高速船まわりの波崩れを伴う流場に関する研究について概説した後、風波(自由表面波)の安定性に関する数値計算法とその結果について詳しく考察を述べた。渦と自由表面との相互干渉や空気ジェットの水面上突入問題などについて、流体科学と船舶海洋工学の接点を中

心にして解説した。

Model Experiments and Numerical Computations on Tsunami Force

有川太郎（港湾空港技術研究所）

津波による被害におけるメカニズムを理解し、津波防災対策を講じるために、実験的および数値流体力学的研究を行っている。数値計算はCADMAS-SURF というコード（直交格子を用い、界面捕捉はVOF法、乱流モデルは $k-\varepsilon$ モデル）を用いているが、壁への水波の衝撃を中心とした検証例を示した。また大規模スケールの大振幅波の発生に関する実験例をビデオで紹介した。

Numerical Analysis of Large Geomaterial Deformation Using CIP Method

森口周二（岐阜大学工学部社会基盤工学科）

土石流による被害を予測・解析するために、地盤材料を Bingham 流としてモデル化し、これに対して CIP 法を適用した研究例を紹介した。ダム崩壊問題を使った計算コードの基本的な検証や、実際の地滑りのシミュレーション、実験室における実験結果との比較などを通して、地盤材料のモデル化や計算手法の妥当性について論じた。

Aerodynamic Analysis of a WIG Flying over the Waves

岩下英嗣，渡部雅晃（広島大学工学研究科社会環境システム専攻）

水面上を飛行する WIG の流体力学的解析と実際の飛行実験のために製作した無線制御（RC）モデルの設計法について説明した。水槽を用いた実験の結果と、時間領域非線形境界要素法による計算結果との比較によって 3次元翼の空力特性を調べた後、RC モデルのための翼配置や設計上考慮した点を述べた。さらに実際に製作した RC モデルの飛行状況のビデオも紹介した。

The Extension of CIP-based CFD Method Combined with Multigrid Technique for 3D Simulation and Its Application to Free-Surface Problems

西 佳樹（九州大学応用力学研究所）

A computational fluid dynamics method is investigated for numerical simulations of strongly nonlinear phenomena involving the large deformation of free surface. The numerical solution method of this study is based on the CIP (Constrained Interpolation Profile) scheme, and the multi grid technique for solving a pressure Poisson's equation with high efficiency and robustness. This paper particularly focuses on the strategy of the code extension from 2D to 3D in the iterative algorithm using the MG technique. The present study has considered the 'plane by plane's weeping schedule of iterative solver. The developed method was applied to the dam breaking, and sloshing in a tank. The numerical computations confirmed that the developed method performs fairly well in 3D simulations.

High-Performance CFD-Based Optimization for High-Speed Ship

田原裕介（大阪府立大学工学研究科海洋システム工学分野）

The object of the present research is to develop general formulation high-performance CFD-based global optimization method and overcome the limitations of optimal design tools based on local optimization methods via the development and application of global optimization algorithms. These include the categories: CAD-based hull form modification for high-speed ships, multi-objective genetic algorithm (MOGA) and scaleable message passing interface (MPI), and CFD method which is capable for application to high-speed ships. The resulting optimization software will be applied to the solution for high-speed ship design problems and an

experimental activity will be carried out to assess the success of the optimization process. This research project is based on close interactions with both IIHR (U. Iowa) and Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale (INSEAN)

Ship Simulation with the Soroban CIP Method

滝沢研二（海上技術安全研究所）

CIP 法に属する計算手法の中でも、モニター関数として使っているある物理量の変化が大きいところにグリッドを自動的に集中させることができる「そろばん」CIP 法を用いて、波浪中での船体運動のシミュレーションを行っているが、その進捗状況について紹介した。既に 3 次元計算ができるようになっているが、計算結果の妥当性については検討の余地がある。

Recent Development of RIAM-CMEN

胡 長洪（九州大学応用力学研究所界面動力学分野）

応用力学研究所で開発してきている、水波と物体の相互作用に関する強非線形流体力学問題に対する計算コード（RIAM-CMEN: Computation Method for Extremely Nonlinear Hydrodynamics）の現状について説明した。特に、界面の鮮明さを向上させるための界面捕捉法としていくつかの方法を検討していること、物体表面での境界条件を正確に満足させるために工夫していることの説明の後、validation として行った 2 次元浮体の波浪中動揺に関する実験結果との比較、前進速度を持つ 3 次元浮体（船舶）の計算例を示した。

The Effect of Freeboard on the Seakeeping Performance of a Ship

小川剛孝，石田茂資（海上技術安全研究所）

シリーズ模型を使った実験と時間領域非線形ストリップ法を用いて、波浪中船体運動に対する乾舷の量と甲板の反り角度の影響について調べ、構造強度や甲板への海水打ち込みの発生確率などの検討を通じて、船の安全性の定量的評価を試みた。

4. おわりに

今年度も昨年度に引き続き、多くの分野で関連の深い「移動境界まわりの強非線形流れ解析」を取り上げ、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。今回の講演会でも「数値流体力学」を共通のキーワードとしていろいろな分野における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。特に、数値計算法の中に強非線形現象に対して有効と考えられている「CIP 法」「MPS 法」に関して、いくつかの論文が発表され、集中した議論・理解ができた。さらに、特別招待講演として、東京大学の越塚誠一教授、イタリア INSEAN の Alessandro Iafrati 博士から最新の研究成果をじっくり聞くことができた。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。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つつあることを確信した。

この種の研究集会は、特に若い研究者（大学院生も含む）にとって大変良い刺激になっていることは事実であり、数値計算が若い人によって行われていることを考えれば、優秀な人材育成のためにも、この研究集会を継続して行うべきだと考えている。

プログラム

期 日： 2006（平成18）年1月27日（金），28日（土）

場 所： 九州大学応用力学研究所西館6階多目的交流室（W601号室）

1月27日（金）

- 13:15～13:20 代表者挨拶
青木尊之（東京工業大学学術国際情報センター）
- 13:20～14:10 招待講演：
Numerical Analysis and Visual Processing Using a Particle Method
越塚誠一（東京大学工学系研究科システム量子工学専攻）
- 14:10～14:40 3-D Large Eddy Simulation of Wave Breaking and Its Application
鈴木崇之（港湾空港技術研究所），岡安章夫（東京海洋大学）
- 14:40～15:10 Free-moving Boundary Problem for Large Deformation Solid Analysis
岡澤重信（広島大学工学研究科社会環境システム専攻）
- （休憩）
- 15:30～16:20 Numerical Simulation of Fully Nonlinear Irregular Wave Tank
Bin Teng（Dalian University of Technology, China）
- 16:20～16:50 New Approach to Solve Higher-Order Potentials in the Interaction Problem
of Low-Frequency Motion and Waves
二瓶泰範（東京大学大学院生産技術研究所）
- 16:50～17:20 Numerical Simulation of 2D Floating Body Motions with Deck Water
末吉 誠（九州大学応用力学研究所）
- 17:20～17:50 A Study of Airfoil Design Suitable for Vertical Axis Wind Turbine and
an Application of Wind Collecting Structure for Higher Performance
高橋周平（九州大学工学府航空宇宙工学専攻修士課程）
大屋裕二，烏谷 隆，渡辺公彦（九州大学応用力学研究所）
- （懇親会）

1月28日(土)

9:00 ~ 9:50 招待講演：
Numerical Investigation of Highly Nonlinear Free Surface Flows through
Interface Capturing Methods
Alessandro Iafrati (INSEAN, Italy)

9:50 ~ 10:20 Model Experiments and Numerical Computations on Tsunami Force
有川太郎 (港湾空港技術研究所)

10:20 ~ 10:50 Numerical Analysis of Large Geomaterial Deformation Using CIP Method
森口周二 (岐阜大学工学部社会基盤工学科)

(休憩)

11:10 ~ 11:40 Aerodynamic Analysis of a WIG Flying over the Waves
岩下英嗣 (広島大学工学研究科社会環境システム専攻)
渡部雅晃 (広島大学工学研究科社会環境システム専攻)

11:40 ~ 12:10 The Extension of CIP-based CFD Method Combined with Multigrid Technique
for 3D Simulation and Its Application to Free-Surface Problems
西 佳樹 (九州大学応用力学研究所)

(昼食)

13:15 ~ 13:45 High-Performance CFD-Based Optimization for High-Speed Ship
田原裕介 (大阪府立大学工学研究科海洋システム工学分野)

13:45 ~ 14:15 Ship Simulation with the Soroban CIP Method
滝沢研二 (海上技術安全研究所)

14:15 ~ 14:45 Recent Development of RIAM-CMEN
胡 長洪 (九州大学応用力学研究所)

14:45 ~ 15:15 The Effect of Freeboard on the Seakeeping Performance of a Ship
小川剛孝, 石田茂資 (海上技術安全研究所)

16:00 ~ 16:05 閉会の挨拶
柏木 正 (九州大学応用力学研究所)

水圧荷重下の大規模シェル構造の並列化崩壊解析システムの開発

広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 藤久保昌彦

1. 研究背景と目的

構造解析によりその崩壊挙動を的確に評価することは、極限条件下における万が一の事故の際の挙動の把握や、合理的な構造設計等において必要不可欠である。これまでの精力的な数多くの研究により、部材レベルでの崩壊挙動はすでに解明されていると言っても過言ではない。しかしながら、より詳細な実構造全体の崩壊挙動の解明のためには、部材レベルに留まらない全体構造を扱うような大規模な解析が要求される。構造物の崩壊解析ツールとしては有限要素法が用いられている。有限要素法は非常に強力なツールであるが、大型構造物全体の終局的な崩壊解析を扱うことは、今日の計算機能力をもってしても困難である。

以上のような背景において、本研究の目的は、大規模シェル構造の崩壊解析を現実的な計算コストで実行するための並列化システムを開発することである。将来的に本解析システムに流体解析部分を組み合わせることで、波浪衝撃を伴う船体の崩壊挙動などが可能になる。近年では、計算機ハードウェアの性能向上及び低価格化によるコストパフォーマンスの向上と、それらを取り巻くソフトウェア環境の発達により、個々の計算ノードが記憶容量を有する分散メモリ型の並列計算機が台頭している。よって本並列化システムを開発することは、社会のニーズに合致した好機であると言える。

2. 並列シェル有限要素解析コード

構造解析のための並列化システムはこれまでも数多く存在している。既存の並列化システムで扱う有限要素は並進変位のみを有する固体要素を用いており、さらに剛性方程式における連立1次方程式の解法は共役勾配法などに代表される反復法である。一方、本研究で扱うようなシェル有限要素においては並進変位と回転変位が混在し、これらに対する剛性のオーダーの違いから連立1次方程式の解法として反復法の適用が困難であることは数多く報告されている。よって大規模シェル構造を対象とした本並列化システムにおいては、連立1次方程式の解法として直接法の導入が必要不可欠である。

有限要素法での剛性方程式の解法に直接法を用いた場合は、その部分の並列化は不可能であるか極めて困難である。直接法を用いた商用コードが未だに分散メモリ型の並列化システムに対応していないのもそのためである。本システムは剛性方程式の解法として直接法を用いた初の並列化システムである。

3. ボックス・ガーダーの崩壊解析

本システムを大規模なボックス・ガーダーの崩壊解析に適用した。図1は載荷梁をも含めたボックス・ガーダーの解析モデルである。パネル板厚は3.2mm、防撓材高さは50mm、防撓材板厚は4.5mmである。このモデルの両端を単純支持し、矢印の箇所に下向きの強制変位を与えた。要素数32808要素で、約18万自由度となる。材料定数は材料引張試験より求めた値、ヤング率189930MPa、ポアソン比0.273、パネル降伏応力231MPa、防撓材降伏応力314MPa、ひずみ硬化係数950MPaを用いた。

本解析においては、まずは防撓材の横倒れ座屈が発生した後に最終強度後に上部パネルの座屈が発生し、さらに変形の局所化が発生して最終的な崩壊に至った。図2および図3はそれぞれ最終強度時および最終強度後の変形図である。そして図4は変形の局所化による最終的な崩壊挙動である。なお本解析を商用コードABAQUSで実行した場合には、解析に数週間の時間を要し現実的な時間では解析が終了しないことを付記する。

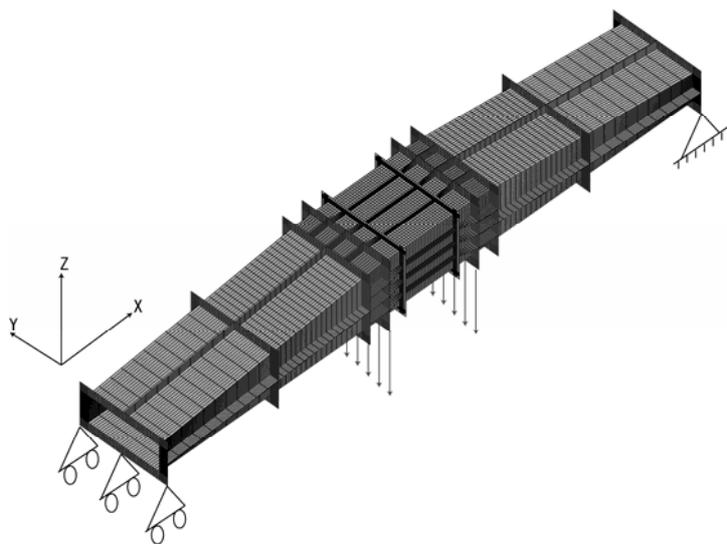


図1 ボックス・ガーダーの解析モデル

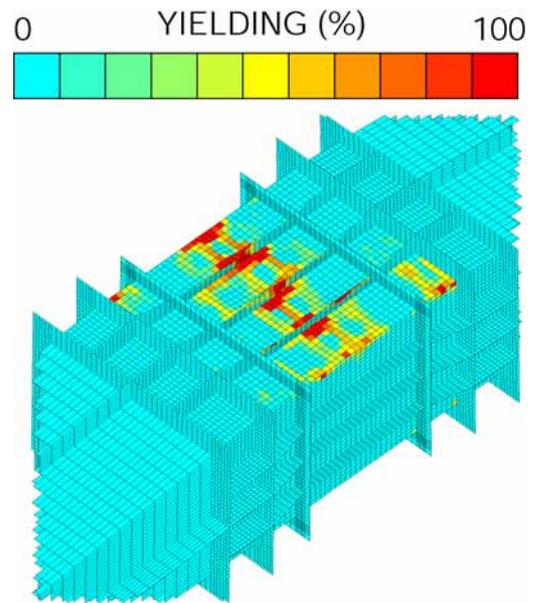


図2 最終強度時での変形状態

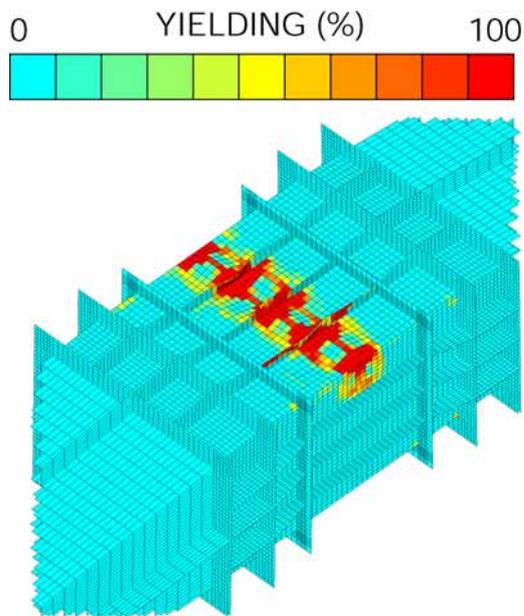


図3 最終強度後の変形状態

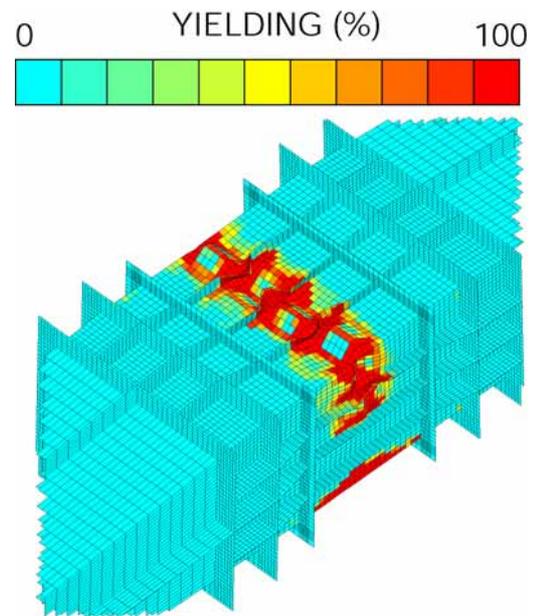


図4 変形局所化による崩壊状態

5. 結言

本研究では、大規模シェル構造の並列化崩壊解析システムを開発した。既存の並列化システムが剛性方程式の解法に反復法を用いているのに対して、本システムでは直接法を採用している。その結果として、回転自由度を有するシェル構造解析コードの並列化に成功すると共に、通常の解析コードでは困難な大規模なシェル構造解析を可能とした。また実験との比較を行い本システムの正当性も確認した。今後は、流体力を扱えるようにシステムを改良して、構造 流体連成解析へと拡張していくことが課題となる。

1. 緒言

高分子基複合材料なかでも炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は軽量構造部材としてさまざまな分野で使用されているが、金属との接合あるいは接着構造をとることによって自動車や産業機械への用途拡大が期待されている。しかしながら、金属と高分子は融点が大きく異なる上に化学結合を形成しにくいことから、両者を強固に結合する方法の確立が望まれている。

本研究ではCFRPと金属を主に樹脂系接着剤で接合したCFRP/金属接合体の接着界面について、機械的および電気的な手法により評価を行い、接着強度の高強度化のための基礎的検討を行った。

2. 実験方法

まず、CFRP/金属界面強度の検討として、下記の2種類のCFRP/金属接着試験片を作製した。鉄鋼（SS400）とCFRPプリプレグ（T700S/#2500，東レ）をコキュアすることによって両者を接着した試験片、先にキュアしたCFRP積層板にフィルム接着剤（AF126-2及びAF163-2K，3M）を用いて金属に接着した試験片について強度特性と破壊挙動を調べた。

試験片についてはサンドペーパーで表面を研磨したSS400上（300mm x 300mm x 3mm）にCFRPプリプレグをクロスプライ積層（[0/90/90/0]）して、コキュア（130℃，5気圧）により板（300mm x 300mm）を作成した。キュア後のCFRP層の厚さは約0.6mmである。次に、この板を切断することにより、曲げ試験用の短冊形試験片（L150mm x W25mm）を得た。カット後の試験片は熱残留応力により反り変形を生じている。

試験片については、サンドペーパーで表面を研磨したSS400と先にキュアさせたCFRP一方向板をフィルム接着剤にて加熱接着して接合板を作成した。各接着剤の加熱加圧条件を表1に示す。これをカットすることにより、引張り試験片、3点曲げ試験片、シングルラップ試験片（せん断試験用）を作成した。表2に各試験片のサイズ、接着剤の種類を示す。ここで3点曲げ試験におけるスパンは100mmとし、シングルラップ試験片のラップ部長さは12.5mmとした。なおカット後の試験片に反り変形は見られない。

3. 結果

図1に試験片の曲げ荷重-変位曲線を示す。A点までは線形変形であり、それ以降、Steelの塑性変形により曲線の傾きが減少した。B点までの何段階かで負荷を途中で止めて微視的に観察したところ、CFRP/Steel界面、CFRP表面ともに顕著な亀裂やはく離などの損傷は認められなかった。B点でCFRP表面の最大引張応力部に繊維破断が生じ、荷重が低下した。さらに負荷を加えると繊維破断部付近の界面ではく離が生じ、荷重が段階的に低下した。図2に試験後の試験片の様子を示す。CFRP表面の最大引張応力部に繊維破断が生じ、その近傍の界面ではく離をしている様子が分かる。このようにコキュ

表1 接着剤の加熱加圧条件

フィルム接着剤	圧力	温度	時間
AF126-2	50psi (2.45kg/mm ²)	250 °F (約121.1℃)	60分
AF163-2K	35psi (3.5kg/mm ²)	235 °F (約112.8℃)	90分

表2 試験片の寸法と接着剤の種類

試験片	全長 x 幅	CFRPの厚さ	SS400の厚さ	接着剤	接着層厚さ
引張り	210 x 10.7	1.09	1.57	AF126-2	0.19
3点曲げ	210 x 25.5	1.09	3.00	AF163-2K	0.14
シングルラップ	300 x 25.5	2.14	2.24	AF126-2	0.05

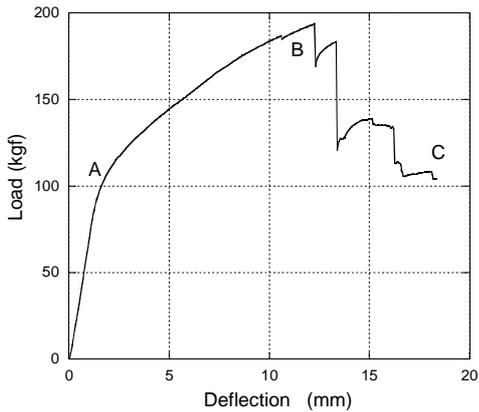


図1 試験片 の曲げ荷重 変位曲線

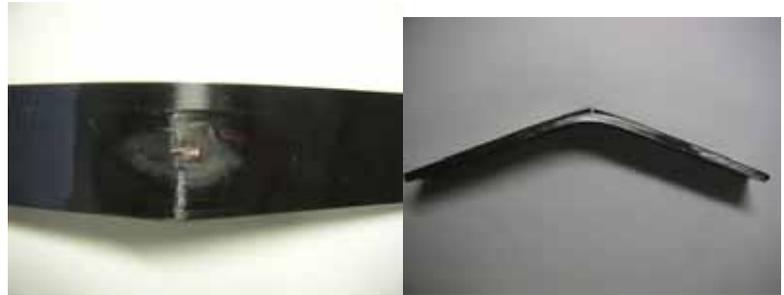


図2 試験片 の曲げ試験後の様子

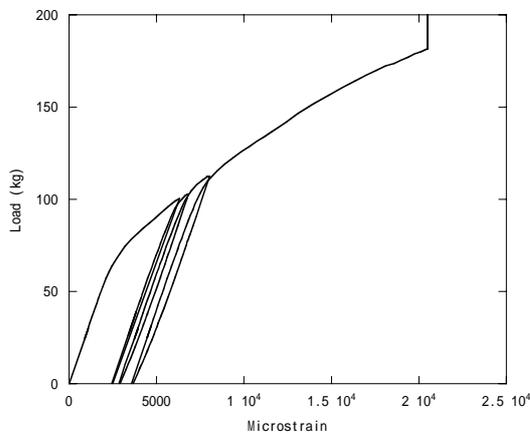


図3 試験片 の曲げ荷重 ひずみ曲線



図4 試験片 の曲げ試験後の様子

ア試験片でもSS400の塑性変形まではCFRPがSS400によく接着していることがわかる。

図3に試験片の曲げ負荷除荷試験における荷重引張りひずみ曲線を示す。SS400の塑性変形後もCFRPの接着は良好であることがわかる。図4に試験片の曲げ試験後の様子を示す。CFRP表面の端部付近の繊維の破断と縦割れ（スプリットング破壊）が起こるが、荷重負担能力は維持している。またSS400の塑性変形後も接着は極めて良好であり、接着界面に損傷は観察されない。引張り試験においても同様に塑性変形後のはく離は生じなかった。またシングルラップ試験の結果からせん断強度は約20MPaであった。このとき破壊モードは接着剤の凝集破壊であり、界面のはく離モードではなかった。以上のことから今回のフィルム接着剤によるCFRP/Steel接合構造は実用上の耐久性があると推測される。ただし、加熱硬化の接着剤では生産性が悪いいため実用上は常温硬化タイプを使用する必要がある。また現在、サンドブラスト処理したSS400とCFRPの接着試験片の作成を行っている。

一方、電気的な接合健全性モニタリング技術にはまだ不明瞭な点が多く、今後の検討課題である。

4. 研究成果報告

[1] 黄木景二, 井上宏樹, CFRPのインピーダンス特性と接合材のヘルスマニタリングへの応用, 第34回FRPシンポジウム(2005).

[2] K. Ogi and Y. Takao, "Characterization of piezoresistance behavior of a CFRP unidirectional laminate," Composites Science and Technology, Vol. 65, No. 2 (2005), 231-239.

5. 研究組織

研究代表者：黄木景二, 所内世話人：高雄善裕, 実験補佐：井上宏樹

カオス・乱流における輸送特性

崇城大学工学部総合教育物理 柴田博史 (Shibata, Hiroshi)

1. 研究目的

カオスや乱流状態にある流体について、その輸送特性を明らかにする。一般に流体の拡散係数・粘性係数・熱伝導率は、その流体の運動形態によって変化する。共同研究者達によって、レーリー・ベナール対流を行なう流体が、ソフト乱流からハード乱流へ転移する領域で、粘性係数が発散することが見出された。また、非線形方程式によって記述される流体が、どのように粘性や熱伝導を産みだしているかが共同研究者達によって研究が進められている。カオスや乱流状態にある流体において、どのように粘性や熱伝導が産みだされているのかそのメカニズムを明らかにする。

2. 研究方法

九州大学応用力学研究所の電子計算機や共同研究者各々が持つパソコンやワークステーションを用い、数値シミュレーションや数値計算を行なった。具体的には、数値計算を行ないながら、そのデータをもとに粘性係数や熱伝導率等の物理量の計算を行なった。また、理論的に導出した式をもとに、適当なモデルを使い数値計算を行なった。

3. 研究結果

柳田 金子モデルをもとにレーリー・ベナール対流のシミュレーションを行ない、運動量流れの2時間相関関数を詳しく調べた。特に時間が長い領域でのエルゴード性の破れを示す温度差領域は、システムサイズを大きくしていくと小さくなることが示された。この発散領域のシステムサイズ依存性を丁寧に調べることにより、ある相関距離がシステムサイズよりも長くなった時、粘性係数が発散しているという考え方を見出した。さらに、その相関距離が上下プレートの温度差にどのように依存しているかを明らかにした。(柴田)

標準写像における異常拡散がサリス統計によって特徴づけられることを、数値的に示した。標準写像の拡散は、ジャンプ幅が有限であるが、ジャンプ間にベキ的な長時間相関があるために異常拡散が発生する。一方、レヴィフライトは、時間相関は指数的減衰するけれどもジャンプ幅は無敵大まで許される(逆ベキ分布)の性質を持つ。そこで、標準写像において、同一方向にジャンプしている間の移動距離を表わす新しい変数 X を導入し、その変数 X の分布がサリス・エントロピー最大化原理により導出される分布と良く一致することがわかった。(石崎)

4. 研究成果

論文による発表

- [1] R. Ishizaki, N. Kodama, and M. Inoue, Anomalous Diffusion Induced by Random Walks with Hierarchical Long-Range Memory, J. Phys. Soc. Jpn. 74(9), 2443-2448(2005).
- [2] R. Ishizaki and M. Inoue, Application of Tsallis Nonextensive Statistics to the Anomalous Diffusion of the Standard Map, Prog. Theor. Phys. 114(5), 943-952(2005).
- [3] H. Shibata, Momentum flux in Rayleigh-Bénard convection II, Physica A 345, 448-456(2005).
- [4] H. Shibata, Heat flux in Rayleigh-Bénard convection, Physica A 352, 335-346(2005).
- [5] K. Ueno, H. Sakaguchi, and M. Okamura, Renormalization-group and numerical analysis of a noisy Kuramoto-Sivashinsky equation in 1+1 dimensions, Phys. Rev. E 71, 046138(2005).

会議における主な発表

- [1] 岡村 誠,
射影演算子法の大自由度カオスへの適用の有効性,
日本物理学会 2005 年秋季大会, 同志社大学, 2005 年 9 月.
- [2] 岡村 誠,
Kuramoto-Sivashinsky 方程式における射影演算子法の適用の有効性,
京都大学数理解析研究所研究集会「非線形波動の数理解と応用」, 2005 年 10 月.
- [3] 柴田博史,
レーリー・ベナール対流における熱流れ,
日本流体力学会年会 2005, 工学院大学, 2005 年 9 月.
- [4] 柴田博史,
Heat flux in Rayleigh-Bénard convection,
Dynamics Days Europe 2005, Berlin, 25/07/2005.
- [5] 石崎龍二, 富長広貴, 黒木昌一, 森 信之, 森 肇,
ヘノン ハイレス系の時間相関関数とパワースペクトルの構造,
九州大学応用力学研究所研究集会「乱流研究の異分野融合と新たな創成」,
2005 年 6 月.

5. 研究組織

柴田博史 (崇城大学・工学部), 石崎龍二 (福岡県立大学・人間社会),
岡村誠 (九州大学・応用力学研究所)

太陽電池用高品質多結晶シリコンの結晶成長に関する研究

大下祥雄

豊田工業大学 半導体研究室

1. 研究目的

世界の太陽電池生産量は、この 10 間で毎年約 20% 以上の伸びを示してきた。特に昨年度の太陽電池市場は 160% を越える大幅な伸びを記録した。その中で、結晶系シリコン太陽電池の生産量は拡大している市場の 90% 以上を支えている。それゆえ、太陽電池業界の今後のさらなる発展を目指して、特に欧米において結晶系シリコン太陽電池の高効率化ならびに低コスト化の研究開発が精力的に進められている。高効率化に関しては、オージェ再結合を考慮した結晶シリコン太陽電池の最大理論効率は 28.9% であり、その時の最適な基板厚は 80 μm 程度であること、また a-Si、a-SiC など用いたヘテロ接合を利用することにより実用効率として 26% 程度が期待できることが報告されている。しかし、現在量産されている多結晶シリコン太陽電池の変換効率は 16% 程度であり、さらなる変換効率の向上が要求されている。多結晶シリコン太陽電池の高効率化、低コスト化が実現されれば、50 円/W (発電コスト 15 円/kWh) 以下のコストダウンも可能であり、多結晶シリコン太陽電池が 2010 年以降の太陽光発電の広範な普及を担うことが期待されている。

これまで多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上させるには、多結晶シリコンの粒径を大きくすることが最も重要であるとして開発が進められてきた。また、結晶粒界については、小傾角対称境界、小傾角非対称境界、大傾角境界などの分類と境界の構造と境界エネルギーとの関係をもとに、結晶成長や境界における欠陥構造に関する議論が行われてきた。その結果、現在では $\sim\text{cm}$ 程度の大きな粒径を有する多結晶シリコン基板が開発されている。しかし、少数キャリアの拡散長 (250 μm 程度) と比較し十分に大きな粒径が実現されたにもかかわらず、その変換効率は必ずしも期待されるほどに向上していない。

その意味で、多結晶シリコン太陽電池の変換効率向上を議論する上で最も重要な事項は、粒界そのものよりもむしろ、多結晶シリ

コン中に含まれる $5 \times 10^{14} \sim 8 \times 10^{16}$ atoms/cm³ 程度の鉄、結晶成長時の雰囲気から混入する $10^{17} \sim 10^{18}$ atoms/cm³ 程度の酸素ならびに $10^{17} \sim 10^{18}$ atoms/cm³ 程度の炭素、転移などの結晶欠陥、格子間シリコンや空孔などの点欠陥、ならびにそれらの複合体であると考えられる。

また、多結晶シリコンプロセス中に生じる、酸素析出、ゲッターリング、不純物拡散などは、多結晶シリコンの電気的特性に大きな影響を与える。それゆえ、多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上させるには、これら欠陥ならびに不純物が複合した複雑な欠陥構造、さらには、それらに与える多結晶シリコン太陽電池プロセスの影響を明らかにする必要がある。多結晶シリコンにおいては、粒界が光の吸収により生成された少数キャリアの再結合中心として働く。それゆえ、これまでは多結晶シリコン太陽電池の変換効率向上のため、粒径の拡大がはかられてきた。その結果、現在では、少数キャリアの拡散長を超えた粒径を有する多結晶シリコンが実現されている。しかし、多結晶シリコン太陽電池の変換効率は、期待されるほどの高い値が得られていないのが現状である。大きな粒径を有する多結晶シリコン太陽電池の変換効率が依然低い理由としては次のことが考えられる。一つは、粒界内部に存在する、多くの結晶欠陥である。

一方、太陽電池用多結晶シリコン中には、比較的多くの炭素や鉄が残留している。これら残留不純物は、それ自体が再結合中心として働く他に、結晶欠陥との複合体として電気的特性を劣化させることが予想される。それゆえ、1) 結晶粒内に残留する応力や転位の分布状態を明らかにし、結晶成長時や太陽電池作製プロセス時における欠陥形成過程を理解すること、2) 代表的な残留不純物である炭素、酸素、鉄の分布や鉄の電子状態を明らかにすることは、多結晶シリコンの電気的特性向上のためには必要不可欠である。さらには、それら欠陥密度の低減方法や、パッシベーションなどの不活性化技術を検討する必要がある。

そこで、本共同利用研究では、九州大学が

有する結晶成長シミュレーション技術により得られた結果をもとに、太陽電池特性に悪影響を与える欠陥や不純部の分布、さらにはそれら欠陥の構造や鉄の化学状態などを明らかにし、それらをもとに高品質な多結晶シリコン成長技術の実現を目指している。以下に、それら研究成果の一部を紹介する。

2. 多結晶シリコン評価（鉄の分布とその化学状態）

2.1 実験方法

シリコン中の鉄は酸化鉄あるいはシリサイドの状態で存在していると考えられる。しかし、結晶内での分布や化学状態に関しては明らかになっていない。そこで、多結晶シリコン中の鉄の分布とその電子状態を SPring-8 の放射光を用いて調べた。使用したビームラインは BL37XU である。本ビームラインは、光源として真空封止アンジュレーターを使用しており、4.4 keV 以上のエネルギーを用いた実験に対応している。今回の実験では鉄の吸収を測定するため、K 殻の吸収に対応する 10 keV を使用エネルギーとした。測定系を図 1 に示す。X 線の吸収により生じた電子・正孔対は、蛍光 X 線の放出やオージェ過程などを通じて再結合する。その時に放出される蛍光 X 線の収量は、X 線の吸収量に比例する。そこで、マイクロサイズに絞った分光した X

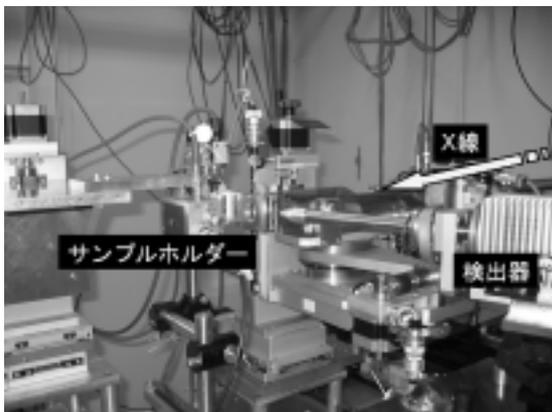


図 1 XRF、XANES 測定系

線を試料に照射し、X 線を吸収した鉄からの蛍光強度を半導体検出器で測定して、鉄の濃度分布を求めた (X-ray fluorescence (XRF) 測定)。空間分解は最大 1.5 μm とした。また、鉄の電子状態は、吸収端近傍のスペクトルを測定し、その構造を解析することにより求めた (μ -X-ray absorption near edge structure (XANES) 法)。

測定した試料は、JFE においてキャスト法により成長させた多結晶シリコン (B ドープ: $\sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、厚さ: 350 μm) であり、1) 成長後の多結晶シリコン基板、2) 鉄で汚染させた多結晶シリコン基板、3) 鉄で汚染させた後、ゲッターリング処理を施した多結晶シリコン基板、の 3 種類を測定した。鉄の汚染としては、塩化鉄水溶液中に基板を漬けた後、熱処理を行った。一方、一度汚染させた鉄を除去するため、基板裏面に P ゲッター層を形成した後に熱処理を行った。

2.2 実験結果

結晶成長後に表面のダメージ層を除去した多結晶シリコン中での鉄分布の一例を図 1 に示す。鉄は、特定の粒界にそって均一に存在

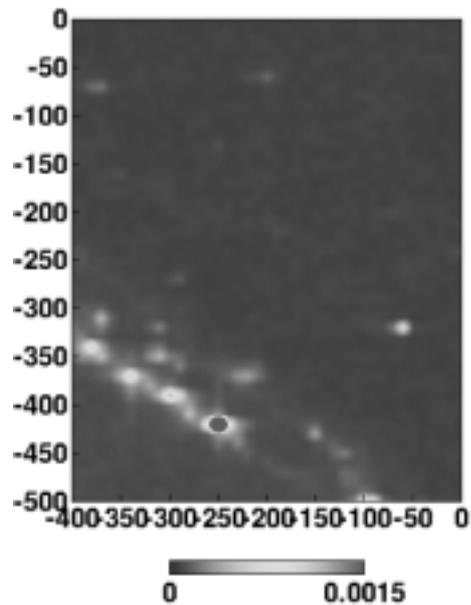


図 2 鉄の濃度分布

しているのではなく、粒界のある特定の領域に存在していることが示された(図2)。この結果は、粒界のみではなく、粒界と結晶欠陥が複合した領域に鉄が多く捕獲される可能性を示唆している。次に、その場所での鉄の化学的状態を明らかにするため、XANESのスペクトル解析を行った。その結果、そこでの鉄の状態は酸化鉄であることが示された。

多結晶中のどの場所に鉄が存在するかをより明らかにするため、鉄で汚染した試料の測定を行った。得られた結果の一例を図3に示す。ある特定の粒内、あるいは粒界の特定の場所に多くの鉄が存在していることが示された。また、それらの電子状態は、測定した限りでは酸化鉄であった(図3)。特定の粒内において多くの鉄が存在する理由は明らかではない。しかし、これまでの実験から、結晶粒に依存して炭素濃度が大きく異なることが明らかとなっている。このことから、欠陥あるいはボロンがその粒内には多く存在し、それらが鉄を捕獲した可能性が考えられる。この点に関しては、現在検討中である

一方、その他の場所で鉄が多く存在している場所では多くのエッチピットが観察された。以上の結果から、転位と粒界、あるいは転位が存在するところに、多くの鉄が捕獲されていると考えられる。

次に、図3に示した場所と同一箇所において、ゲッターリング処理を施した後の鉄の分布

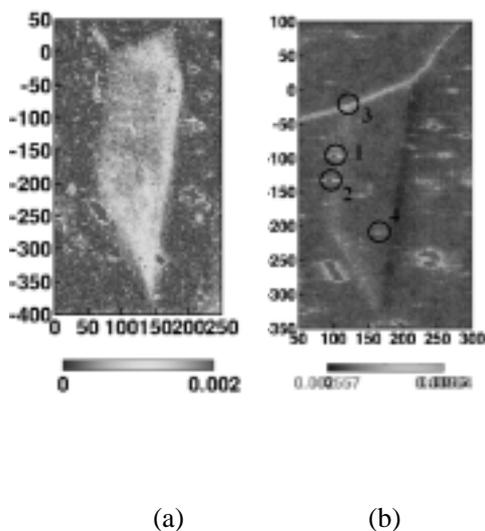


図3 鉄の濃度分布(XRF)

(a)汚染後、(b)ゲッターリング後

を図4に示す。ゲッターリング前に結晶粒内に存在していた鉄はゲッターリング処理により取り除かれた。しかし、粒界においてゲッターリング前に鉄が存在していた場所の幾つかでは、ゲッターリング処理後にも鉄が存在した。その場所での鉄の状態はシリサイドである可能性が示された(図4)。また、ゲッターリング前には鉄が存在していなかった領域に、ゲッターリング処理後に多くの鉄が集まった。ここでの電子状態も鉄シリサイドである可能性が高い。ゲッターリングプロセスのような熱処理により、鉄がどのように再分布するかに関しては現在検討中である。鉄シリサイドが形成された領域は、再結合中心として働くことが予想される。また、接合部分に鉄シリサイドが存在する場合には、接合特性を劣化させ解放電圧の低下を招くことが考えられる。

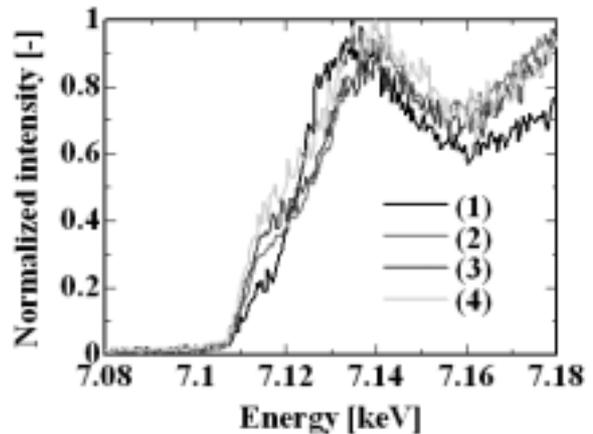


図4 ゲッターリング後の鉄のXANESスペクトル(各番号は図3(b)での測定位置に対応)

3. 新多結晶シリコン成長装置

3.1 結晶成長炉の開発

高い変換効率を有する太陽電池を実現するには、多結晶中の欠陥制御や不純物の低減が重要である。そこで、高品質な多結晶シリコンの結晶成長技術の実現を目的として、小型結晶成長炉を開発した。炉内の構造を図5に示す。半径方向の温度勾配を制御するため、従来の1ゾーンヒーター

ではなく、るつぼ側面の2ゾーンヒーターに加えて、るつぼ上部及び下部にヒーターを配置した。また、結晶成長時の不純物抑制及び固液界面制御のため、るつぼは回転可能とした。本学のクリーンルーム内に設置した小型結晶成長炉の外観写真を図6に示す

結晶炉内の温度分布は成長させた多結晶シリコン中の欠陥形成に大きな影響を与える。そこで、本小型結晶成長炉内の温度特性を調べるために、縦方向温度分布を測定した。その結果、図7に示すように、

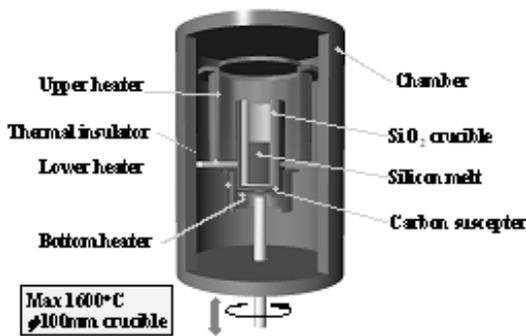


図5 小型結晶成長炉：炉内模式図



図6 小型結晶成長炉：外観写真

結晶成長部($z < 0$)では約 $15^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ の温度勾配が得られた。この温度条件を用い、多結晶シリコンの急速凝固試験を行った。図7に得られた多結晶シリコンインゴットの外観写真を示す。今後、結晶成長のシミュレーション結果をもとに、結晶成長の方向・速度等を変化させて高品質多結晶の得られる成長条件を明確にする。

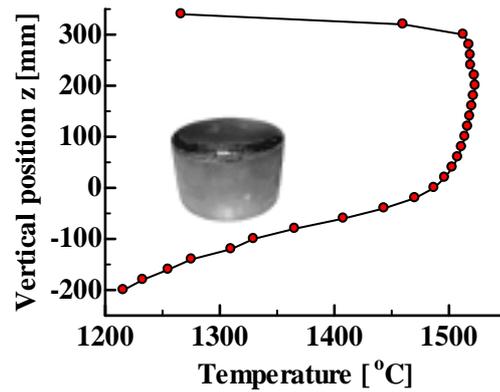


図7 結晶成長炉内の縦方向温度分布

5. まとめ

多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上させるには、多結晶シリコンの結晶学的な理解に加え、それらの知見を基にした良質な結晶を得るための結晶成長技術および欠陥や粒界のパッシベーション技術の開発が必要である。今後、今回九州大学応用力学研究所との共同利用研究活動を通じて得られた結果をもとに、高効率・低コスト多結晶シリコン太陽電池の実現を目指す。

謝辞

本共同利用研究の機会を与您頂きました九州大学応用力学研究所ならびに、共同研究を通じてご指導頂きました柿本教授に深く感謝いたします。

有限要素法による人工膝関節の応力解析

佐賀大学理工学部 萩原世也

1. 緒言

近年の高齢化社会においては、関節疾患を持つ患者が増加傾向にあり、人工関節置換術は日本国内で一般化してきている。しかしながら、現在使用されている多くの人工関節は欧米で開発された経緯から日本人の和式生活に適応していない点や、人工関節装着後に緩みを生じる可能性があるなどの問題点がある。そのため、日本人の和式生活に適応し、また緩みを生じにくい人工関節の開発が課題である。人工関節の最適設計を行うためには骨内部や人工関節にどのような応力が生じているかを知ることが重要になる。このような解析は有限要素法を用いて行うことにより知ることができるが、これらの解析を行うためには関節と人工関節の正確なモデル化などが必要となる。生体関節は複雑な三次元形状をしておりモデル化を行うためには、医療用X線CT画像を利用することが必要である。

本研究では実際の力学的条件に近い三次元での解析を行うため、医療用X線CT画像から膝関節の三次元有限要素モデルを作成し、また人工関節は製品のCADデータから三次元有限要素モデルを作成し有限要素法解析を行うことを目的とする。

2. 膝関節の三次元有限要素モデル

医療用X線CT画像から生体骨の輪郭を抽出する機能を持つ画像処理ソフトISEC2を用いて、すべてのCT画像において輪郭を抽出することで三次元の表面点群データを作成することができる。ISEC2でのCT画像と点群データ作成の様子をFig. 1に示す。次にISEC2で作成した三次元の表面点群データをRapid Form 2004を使用しポリゴンデータを作成し、その後サーフェスデータを作成する。Rapid Form 2004でのサーフェスデータ作成の様子をFig. 2に示す。Rapid Form 2004で作成したサーフェスデータをFEM解析ソフトウェアのプリ・ポストプロセッサであるMSC.Patranでメッシュ分割をおこない三次元有限要素法解析モデルを作成した。作成した健康膝関節モデルをFig. 3に、人工膝関節モデルをFig. 4に示す。

3. 解析結果と考察

解析に用いた材料定数をTable1に示す。解析には、汎用有限要素法解析コードMSC.Marcを用いて解析を行った。

本論文では、接触解析を安定的に解析するためポリエチ

レンインサート下面に強制変位を与え解析を行った。ここで、健康膝関節解析モデルと人工膝関節解析モデルの結果を比較するため、生体骨上面の全反力を同程度の値にしなければならない。そこではじめに、いくつかの強制変位を与え各変位で骨上面に発生する全反力を求めた。得られた結果をFig. 5に示す。Fig. 5に示す結果から健康膝関節解析モデルと人工膝関節解析モデルそれぞれについて内挿を行うことで、生体骨上面の全反力が600Nとなる強制変位が健康膝関節解析モデルでは1.4099mm,人工膝関節解析モデルでは0.4033mmであることがわかる。そして求めた強制変位1.4099mm,0.4033mmを各モデルに与え再度解析を行った。このとき各モデルの骨上面に発生した全反力は、健康膝関節解析モデルで598.3N,人工膝関節解析モデルで598.7Nであった。

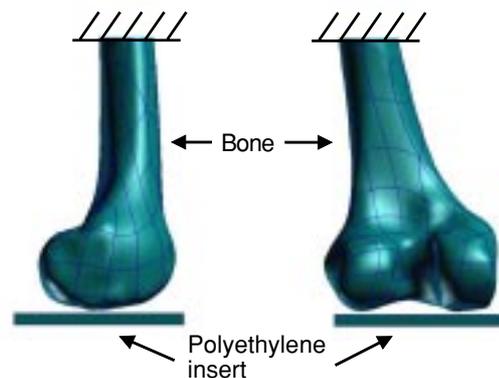


Fig.3 Boundary condition of Normal knee

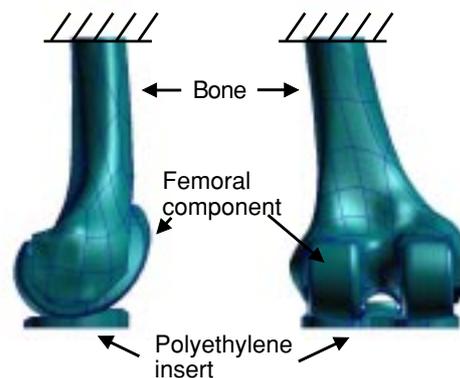


Fig.4 Boundary condition of Artificial knee

Table1 Material properties

	material	young's modulus [MPa]	poisson's ratio [-]
Bone	cancellous bone	2000	0.3
Femoral component	Co-Cr-Mo	115,000	0.3
Polyethylene insert	UHMWPE	550	0.49

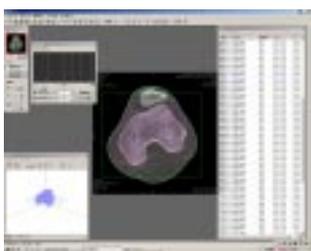


Fig.1 ISEC2

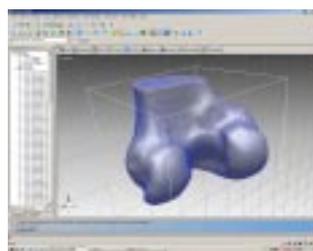
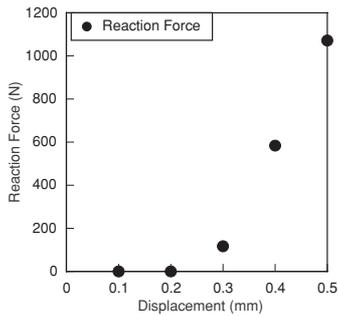
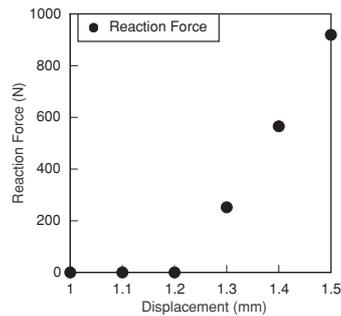


Fig.2 Rapid Form 2004



(a) Normal knee



(b) Artificial knee

Fig.5 Variation of reaction force

健康膝関節解析モデルの解析結果をFig. 6に ,人工膝関節解析モデルの生体骨の解析結果をFig. 7に ,人工膝関節解析モデルの大腿骨コンポーネントの解析結果をFig. 8に ,人工膝関節解析モデルのポリエチレンインサートの解析結果をFig. 9に示す .

大腿骨前部では ,人工膝関節装着前後において応力分布にほとんど変化が見られないが ,大腿骨後部と骨切除面においては ,人工膝関節装着後に主応力が増加している .この主応力の増加は ,生体骨と人工膝関節の接触による影響と考えられる .

また ,人工膝関節の大腿骨コンポーネントとポリエチレンインサートでは関節外側が内側に比べ広範囲で高い応力を発生しているという結果が得られた .

4 . 結言

人工膝関節全置換術による人工膝関節装着の影響を知るため ,医療用X線CT画像から三次元膝関節有限要素法モデルを作成し有限要素解析を行い ,生体骨における応力分布の違いを確認した .また ,人工膝関節内の応力分布も求めた .そして ,人工膝関節装着後に大腿骨に応力の高い部分が存在することが分かった .

5 . 研究組織 (共同研究者)

九州大学 応用力学研究所 東藤貢
九州大学 応用力学研究所 新川和夫
片井整形外科病院 長嶺隆二
福岡県工業技術センタ 小金丸正明

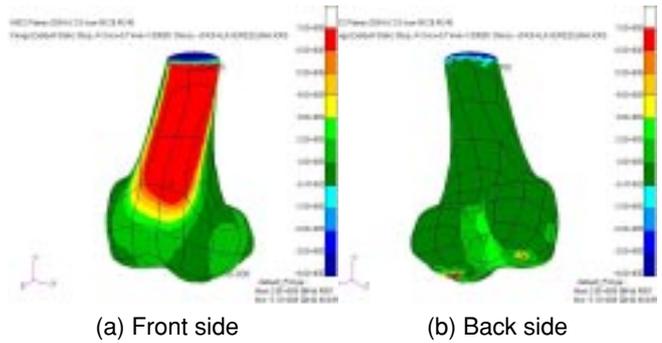


Fig.6 Distributions of the maximum principal stress in normal knee

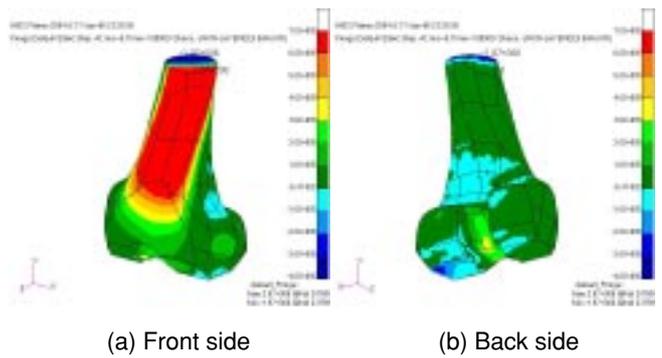


Fig.7 Distributions of the maximum principal stress of bone

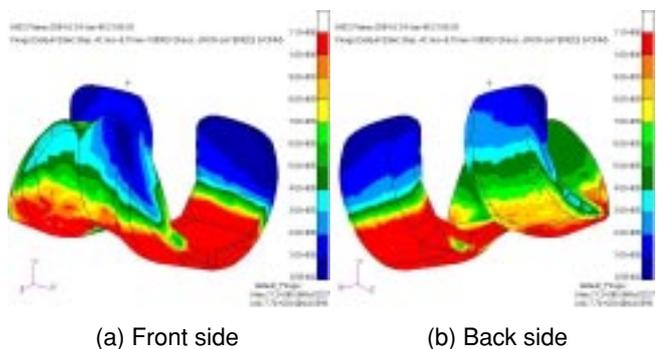


Fig.8 Distributions of the Mises stress of femoral component

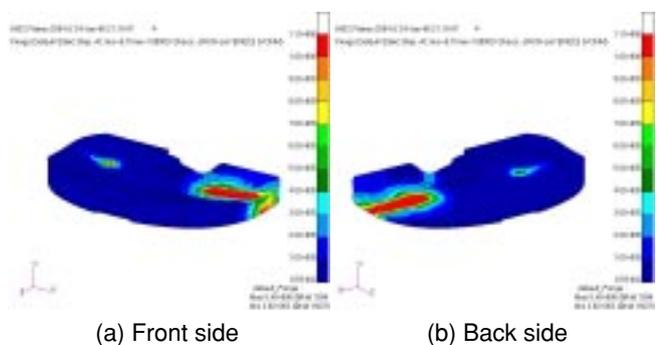


Fig.9 Distributions of the Mises stress of polyethylene insert

骨固定用インプラント材料の変形・破壊メカニズムに関する研究

Study on deformation and fracture mechanism of bone fixation implant materials

竹之下 康治(九州大学大学院歯学研究院)

東藤 貢(応用力学研究所基礎力学部門)

1. 緒 言

口腔外科では、癌などにより切除した下顎骨を固定するために、チタン合金製のプレートが使用されるが、しばしばこのプレートに関連した人体内での破損事故、たとえばプレートの破断や固定ねじの破壊などが報告されている。プレートは湾曲した下顎骨の曲面にその形状を合わせるため、Fig.1 に示すように手術時に医師の手により強制的な塑性変形が加えられる。本研究では、このような塑性変形がプレートの破損に重要な影響を与えていると考え、プレートの 3 次元モデルを用いて弾塑性有限要素解析により、医師の手による塑性変形状態を定量的に再現した。さらに、チタン合金の破壊特性に及ぼす塑性変形の影響を評価し、解析の結果および実験の結果に基づきプレートの破損メカニズムについて考察した。

2. 解析と実験方法

2.1 有限要素解析

実際に患者の体内で破損した下顎骨固定用プレートの 3 次元形状を正確に測定し、FEM 解析用プリポストプロセッサ FEMAP によりプレート形状をモデル化した。その後、要素サイズ 0.5mm、要素数 113900(4 節点四面体要素)、総節点数 29337 で要素分割を行い汎用 FEM コードの MARC を用いて弾塑性解析を行った。解析で設定した境界条件は次の通りである。

- (1) a を拘束し、1 に強制変位
- (2) (1)を除去後、b を拘束し、2 に強制変位
- (3) (2)を除去後、c を拘束し、3 を強制変位
- (4) (3)を除去後、d を拘束し、4 に強制変位

ここで、a, b, c, d と 1, 2, 3, 4 の位置は Fig.2 に示す通りである。また、(1)と(2)の強制変位は - z 方向に 10mm、(3)と(4)の強制変位は - z 方向に 5mm である。

解析で用いたチタン合金の材料定数を Table 1 に示す。

2.2 破壊実験

破壊特性の測定に用いたチタン合金は Ti-6Al-4V であり、厚さ 2mm の板材より 200mm × 10mm の短冊状試験片を切り出した。これらの短冊状試験片の片側にノッチを導入することで SENB 試験片を機械加工により作製した。油圧サーボ式試験機を用いて負荷速度 1mm/min で SENB 試験片の 3 点曲げ試験を行い、荷重と荷重点変位の時間歴をデジタルレコーダで記録した。得られたデータから臨界エネルギー U_{max} を評価し、次式を用いてモード I エネルギー解放率 $G_{I_{max}}$ を求め破壊特性値とした。

$$G_{I_{max}} = U_{max} / BW\phi \quad (1)$$

ここで、 B は試験片厚さ、 W は試験片幅、 ϕ はき裂長さ a と W に依存する補正係数である。

また、ノッチ導入前の短冊状試験片を用いて負荷速度 10mm/min、スパン 50mm で荷重点変位が約 8mm になるまで 3 点曲げ試験を行い塑性変形を生じさせた試験片を準備した。これらの試験片の負荷点に機械加工によりノッチを導入後、上述の方法で試験を行い破壊特性を評価した。

3. 結果と考察

3.1 相当塑性ひずみ分布

Fig.3 に各境界条件(1)～(4)での相当塑性ひずみ分布を示す。拘束部とねじ穴間の連結部で応力集中が生じた結果、塑性変形が生じ、変形が進むにつれ塑性変形領域がプレート全体に広がっていくことがわかる。

Fig.4 に Fig.3(4)に示した 4 箇所での最大相当塑性ひずみの STEP 依存性を示す。a, b, c で最大

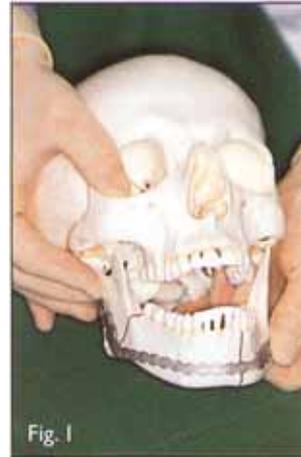


Fig.1 Bone fixation material in oral surgery.

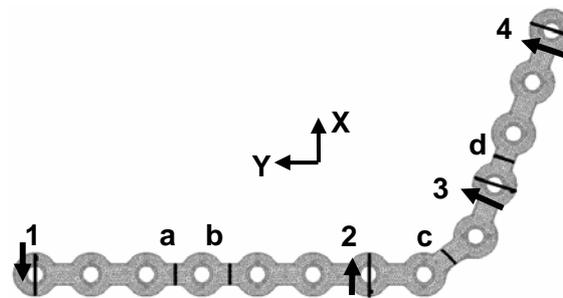


Fig.2 Boundary conditions.

Table 1 Material properties.

Material	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)
Ti alloy	4420	113	0.31	900

8%前後, d で 7%程度の塑性ひずみが生じていることがわかる.

塑性変形領域は一種の損傷領域と理解でき, 損傷の発生は破壊に対する抵抗特性を低下させる. 従って, これらの塑性変形領域の破壊特性は大きく低下していることが予測される. そのため, 下顎骨に固定された骨固定材は, たとえば食事中などに受ける繰り返し負荷により, 塑性変形領域すなわちねじ穴の連結部分のいずれかで破損することが想定される.

3.2 破壊特性値

Fig.5 に式(1)より求めた2種類の試験片 (deformed が試験片に塑性変形を生じさせてから破壊試験をしたもの)の破壊特性値 $G_{I_{max}}$ を示す. $G_{I_{max}}$ の塑性変形の影響による低下はより大きく, 塑性変形を加えることで $G_{I_{max}}$ は 65%程度低下する. このように塑性変形を加えることで破壊に対する抵抗特性は大きく低下することがわかる.

前述のようにチタン合金における塑性変形は材料内部での微視損傷の発生であると考え, それらの内部欠陥が起点となりポイドやマイクロクラックが発生し, それらの周囲で局所的応力集中が生じることでノッチ先端部での応力集中がより厳しくなり, 破壊靱性が低下するものと思われる. また, ノッチ先端部でのエネルギー散逸機構は塑性変形であるが, すでに塑性変形が生じている試験片では未変形の試験片に比べノッチ先端部での塑性変形量が限られるため $G_{I_{max}}$ が低下すると考えられる.

4.まとめ

人体内で破壊したチタン合金製骨固定用プレートの形状測定を行い 3DFEM モデルを作成した。このモデルを用いて弾塑性有限要素解析を行い、手術時の塑性変形を定量的に評価した。その結果、ねじ穴の連結部で塑性ひずみが生じ、その最大値は 8%程度であった。また、チタン合金の破壊特性に対する塑性変形の影響を調べた結果、塑性変形が生じることで破壊に対する抵抗特性(破壊エネルギー)が大幅に低下することがわかった。

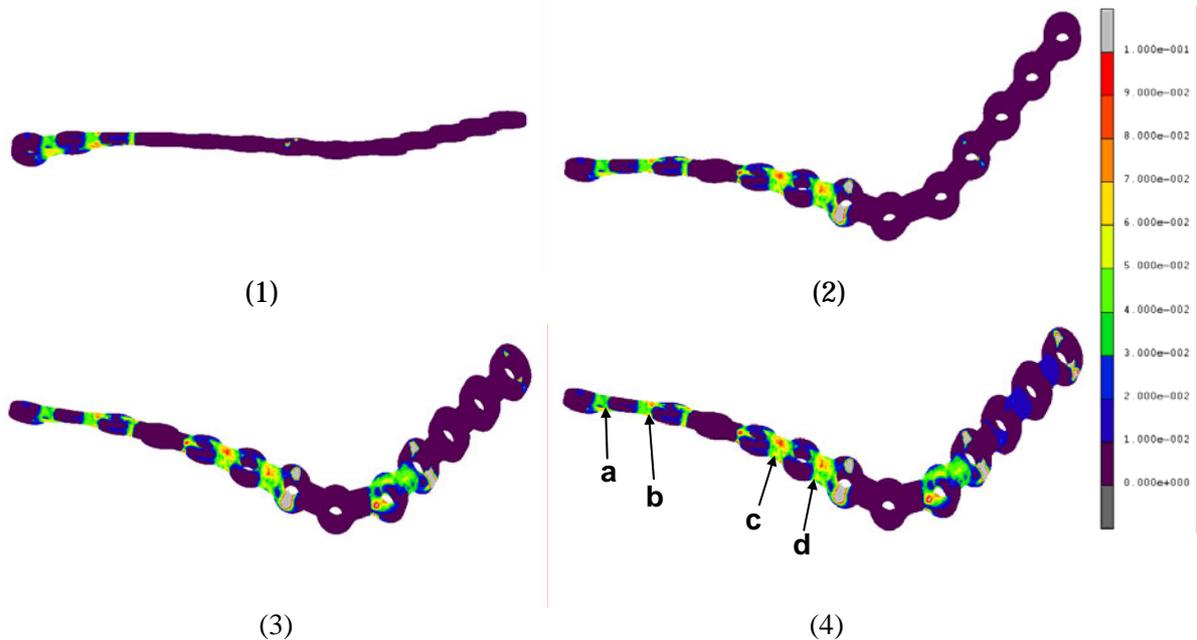


Fig.3 Equivalent plastic strain distributions.

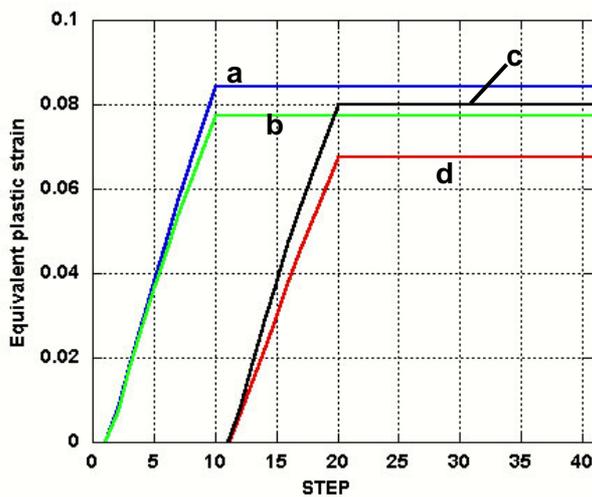


Fig.4 Maximum equivalent plastic strain value.

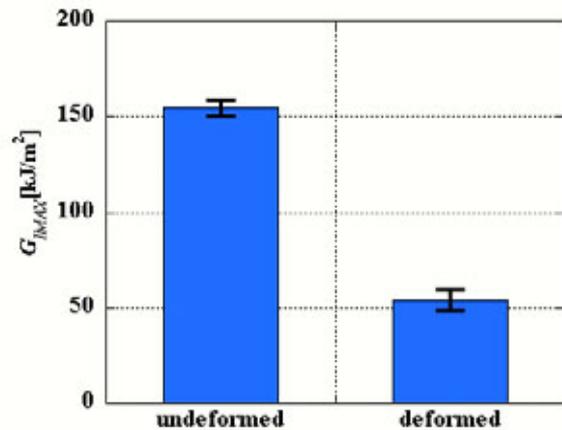


Fig.5 Fracture property, G_{max} .

成果報告

1. 高永祐樹, 東藤 貢, 新川和夫, 竹之下康治, チタン合金製骨固定材料の弾塑性変形解析と破壊挙動, M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集, 2005, 653-654.

2. 高永祐樹, 東藤 貢, 新川和夫, 竹之下康治, 口腔外科用インプラントの破壊に及ぼす塑性変形の影響, 第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 2006, 143-144.

結晶性高分子固体の延伸破損機構の構造論的解明

金沢大学 新田晃平

1. 緒言

結晶性高分子は現在身の回りの様々な用途で使用されており、今後更なる新規分野への用途拡大が見込まれている。しかし、その破損挙動に対しては、未だに十分な知見が得られていない。近赤外スペクトル測定では測定場所やサンプル形状の影響をほぼ受けずに、分子振動の倍音や結合音などの分子運動に直接関与する情報を得ることが可能である。そこで、我々は代表的な結晶性高分子であるイソタクチックポリプロピレン (iPP), 及び高密度ポリエチレン (HDPE) の延伸過程中における近赤外スペクトルを測定し、結晶性高分子の破損過程で起こる分子鎖の状態変化を直接捉えることを試みた。

2. 実験

2.1. 試料

試料として iPP ($M_w = 3.8 \times 10^5$, $M_w/M_n=4.87$) 及び HDPE ($M_w = 1.0 \times 10^5$, $M_w/M_n=5.88$) を用いた。試料をそれぞれ 230 , 210 で溶融後プレスし、その後 0 で急冷結晶化させることによって測定用シートを作成した。

2.2. 測定装置

近赤外光学体系に小型引張試験機 (アベ製作所製) を組み込むことによって、延伸過程における近赤外スペクトルと応力を同時に測定した。測定装置の概略図を Fig.1 に示す。装置内に組み込まれた小型引張試験機 (アベ製作所製) は、近赤外光が当たる延伸部が移動しないように、両袖のチャックが同時に反対方向に定速延伸できるように設計されている。

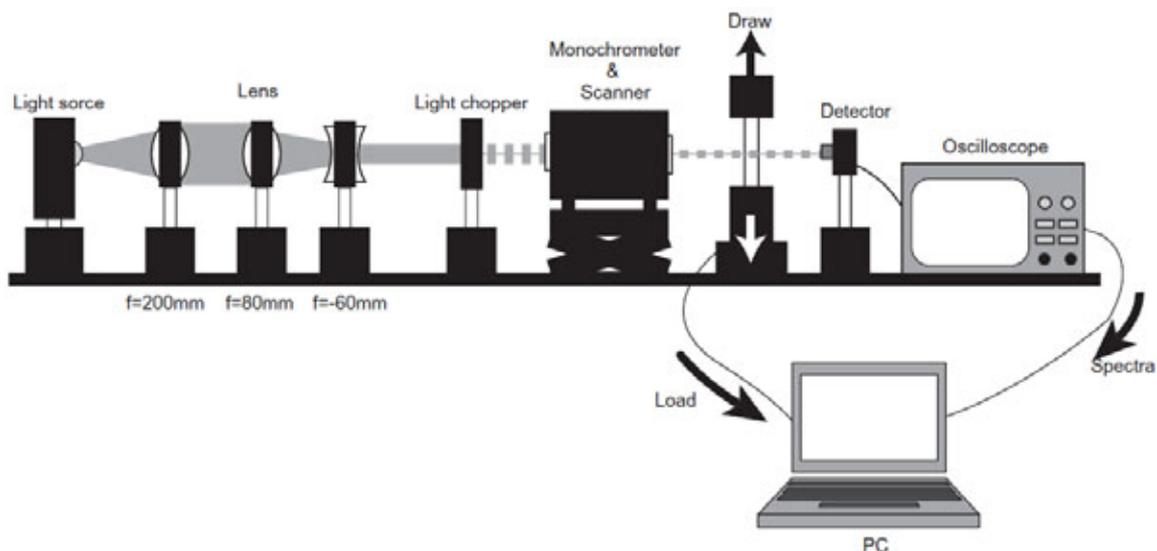


Fig.1 The experimental setup using this study.

3. 結果と考察

Fig.2 に未延伸状態と、900%延伸後の iPP のスペクトルを示す。Fig.2(a)に見られる 1705 , 1733nm のピークは共に CH_3 基中の CH 伸縮振動第一倍音, 1723 , 1768nm のピークは CH_2 基 CH 伸縮振動第一倍音と帰属がされている。1) また, 溶融 iPP スペクトルの結果より, 1723nm

はヘリックスに由来するピークであり，1768nm は非晶に由来するピークであることが分かっている．Fig.2 より，破断直前の 900%延伸後においては，未延伸状態に比べて 1723nm のピーク強度が減少し，1768nm のピーク強度が増加していることが分かる．吸光度は，各バンドに応じた分子振動等を起こすことのできる分子数に比例している．ひずみ 900%が破断直前のひずみ硬化領域であることを考えると，1723nm のピークの減少は，延伸によって，長いヘリックスが消失，もしくは，ランダムコイル状態へと変化したものと考えられることができる．また，同様に 1768nm では，結晶が破碎され，非晶に属する鎖の数が増加したことを示唆している．

Fig.3 は未延伸状態と，1700%延伸後（破断直前）の HDPE のスペクトルである．Fig.3(a)に見られる 1728，1762nm のピークは共に CH₂ 基中の CH 伸縮振動第一倍音に由来するピークである．²⁾未延伸状態と 1700%延伸後のスペクトルを比較すると，1728，1762nm のピーク形状は見かけ上変化しておらず，そのピーク強度比も延伸前後で変化しない．

一般に iPP や HDPE 等の結晶性高分子では，未延伸状態において球晶構造をとり，延伸において球晶が崩壊し，鎖が配向してフィブリル構造へと高次構造が変化する．Fig.2 と Fig.3 の結果を合わせて考えると，この高次構造が変化する際に，iPP では分子鎖のコンホメーション規則正しい螺旋構造から，ランダムコイルへと大きく変化するのに対して，HDPE 分子鎖のコンホメーションの状態は，変形過程では見かけ上変化しないことが暗示された．

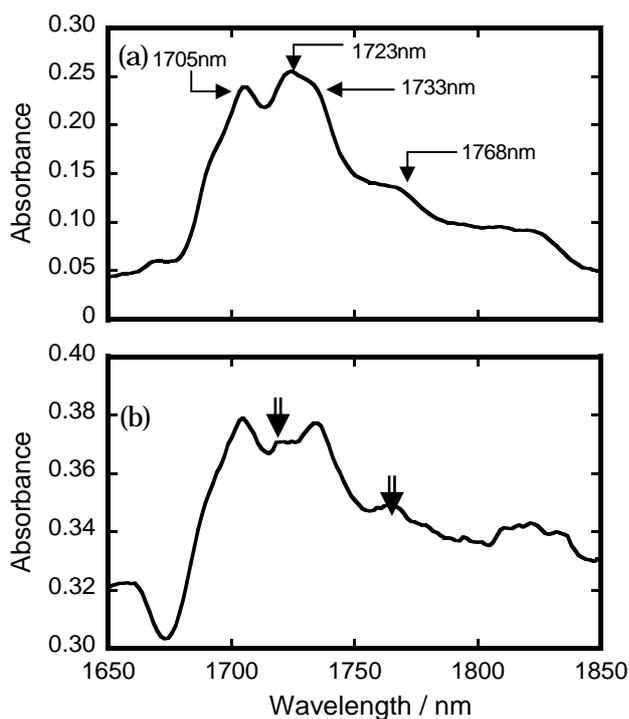


Fig.2 NIR spectra of (a) undrawn and (b) 900% uniaxially drawn iPP (just before break).

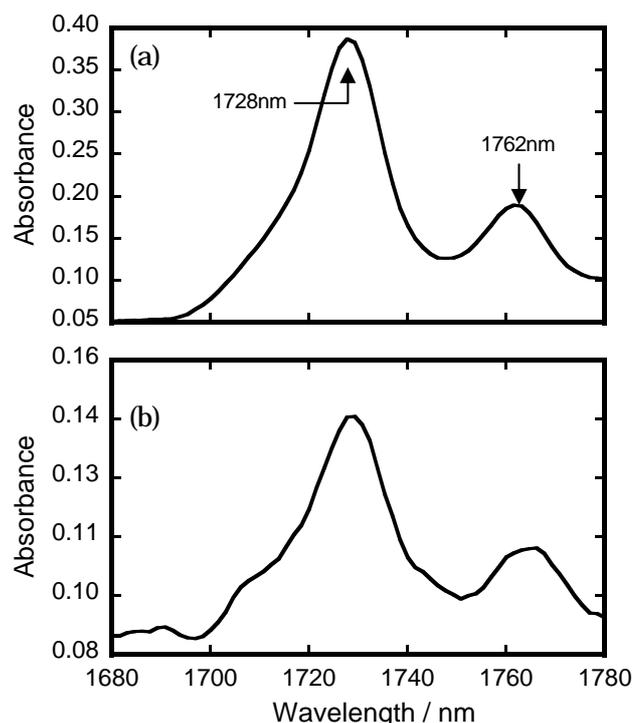


Fig.3 NIR spectra of (a) undrawn and (b) 1700% uniaxially drawn HDPE (just before break).

References:

- 1) T. Furukawa, M. Warari, H. W. Siesler, and Y. Ozaki, J. Appl. Polym. Sci. 87,616 (2003)
- 2) H.Sato, M.Shimoyama, T.Kamiya, T.Amari, S.Sasic, T.Ninomiya, H.W.Siesler,Y.Ozaki, J. Near Infrared Spectrosc. 11,309-321 (2003)

人工股関節の力学的挙動の計算力学・実験力学的解析

Analysis of mechanical behavior of artificial hip joint by computational and experimental mechanics

佛淵 孝夫（佐賀大学医学部整形外科）
東藤 貢（応用力学研究所基礎力学部門）

1 緒 言

人工股関節の骨頭には、アルミナやジルコニアのようなセラミックスが金属が多く使用されている。セラミックス骨頭は金属に比べ耐摩耗性に優れるものの、耐衝撃性や破壊靱性の点で劣り、まれではあるがアルミナ骨頭の人体内での破壊も報告されている。骨頭はステム・テーパ角との間にわずかな角度差が設けられているため、手術時の骨頭のステム先端部への嵌合の状態によっても強度が大きく変化することが知られている。したがってセラミックス骨頭の耐衝撃性を向上させるためには、セラミックス内に存在する欠陥を少なくするだけでなく、内部の応力状態を明確にして機械的な構造についても検討を行う必要がある。

本研究では、アルミナ骨頭の衝撃破壊試験を行い、荷重を測定するとともに、高速度カメラを用いて衝撃破壊挙動の可視化を試みた。また、骨頭の内部応力状態を明らかにするために、軸対称モデルを用いて有限要素法による応力解析を行った。これらの実験結果と解析結果とを比較することで骨頭衝撃破壊メカニズムについて考察した。

2 実験方法と解析方法

2.1 骨頭の衝撃破壊試験

直径 $\phi=22\text{mm}$ のアルミナ骨頭に、厚さ2mmのシリコンゴムを介して高さ0.4mから8.75kgのストライカーを落下させる落錘式衝撃破壊試験を行った。骨頭をはめ込むチタン合金製のトラニオン（ステム先端部と同じ形状）にひずみゲージを貼り付け、ひずみの時刻歴を計測した。衝撃試験と同様の試験片と試験片支持部に静的圧縮荷重を負荷することで、ひずみと荷重の関係を求めた。また、100コマ/secで撮影が可能な高速度カメラで骨頭の衝撃破壊挙動を撮影した。

2.2 FEM 解析

解析に用いた有限要素モデルをFig.1に示す。実際に臨床応用されている人工股関節のCADデータを基に骨頭およびステム先端部から構成される軸対称モデルを作成した。この2次元モデルを、要素サイズ $l_{ave}=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ でそれぞれ分割し、Fig.1に示すようにステムに強制変位を加え境界条件で静的解析を行った。アルミナ骨頭およびチタン合金製ステムは線形弾性体と仮定した。用いた材料定数をTable 1に示す。

3 結果と考察

3.1 衝撃破壊試験結果

Fig.2に衝撃試験から得られた荷重の時刻歴を示す。荷重初期のゆるやかな立ち上がりは、緩衝材として用いたシリコンゴムの影響によるものである。600 μsec を過ぎたあたりで緩衝材の影響はほぼなくなり、荷重-時間曲線はほぼ直線状になる。このことはアルミナ骨頭の線形弾性挙動に対応している。最大荷重(9.9kN)に到達後、荷重は急激に減少しているが、このことは骨頭の脆性破壊を示している。

骨頭が破壊に至る過程の高速度撮影写真をFig.3に示す。撮影開始後90 μs の(a)ではまだ骨頭に変化は起こっていないが、110 μs 後の(b)で骨頭上端部より2箇所でき裂の発生が確認できる。130 μs 後の(c)では全体にわたって縦方向にき裂が発生し、380 μs 後の(d)で円周方向にもき裂が発生後破片が飛散した。この撮影結果より、まず縦方向（負荷方向）にき裂が発生し、続いて円周方向にもき裂が発生することで骨頭は細かく分断され破片となり飛散することが理解できる。なお、衝撃破壊において発生する破片のサイズは、試験片に与えられ

た衝撃エネルギーの大きさに影響を受け、エネルギーが大きいほど発生するき裂の数が多くなるため破片はより細くなることが実験より確認されている。

3.2 FEM 解析結果

各要素サイズでの変位 0.5mm 時における、骨頭内部のカーブ上の最大主応力を比較したものを Fig.4 に示す。この結果より、 $l_{ave}=0.3, 0.4, 0.5$ では明らかに値にばらつきが大きく、 $l_{ave}=0.2$ でも一部に結果が不安定な箇所が見られるため、精度よい解析を行うためには、特に応力集中が生じる箇所では $l_{ave}=0.1$ で要素分割する必要があると言える。したがって、 $l_{ave}=0.1$ のモデルを用いて応力状態について検討を行った。

Fig.5 に、ステムにかかる荷重が骨頭破壊時とほぼ等しい荷重 9kN（強制変位 0.6mm）での最大主応力および円周方向の応力分布を示す。(a)と(b)を比較すると、骨頭内部での応力分布状態がほぼ等しいため、ステムが押し込まれることによって、円周方向で最大主応力が発生していることが分かる。このような円周方向応力は応力の方向に対して垂直な方向、すなわち負荷方向にき裂を発生させる原因となり、この結果は、衝撃実験で縦方向（負荷方向）にき裂が走る結果となったことと一致する。

なお、Fig.3(b)に示すように、骨頭表面では、き裂は骨頭上端部付近から発生しているように見受けられるが、Fig.5 に示す解析結果は、ステム・テーパとの接触部で最大主応力が生じており、この接触部におけるき裂発生を示唆している。この原因としては、内部で発生したき裂が上端部の方に伝播したことが考えられる。あるいは、セラミックスの破壊発生の起

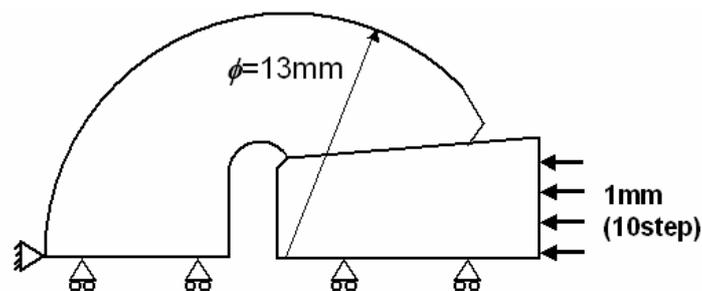


Fig.1 FEM model geometry.

Table 1 Material properties for FEM.

Material	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Al ₂ O ₃	400	0.24	3.97
Ti alloy	113	0.29	4.40

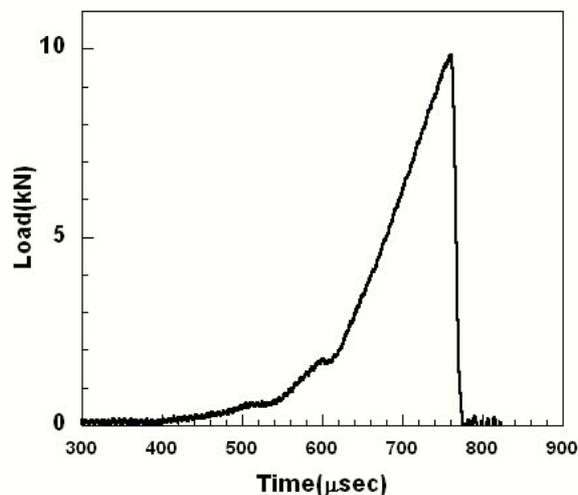


Fig.2 Load-time curve obtained from impact test.

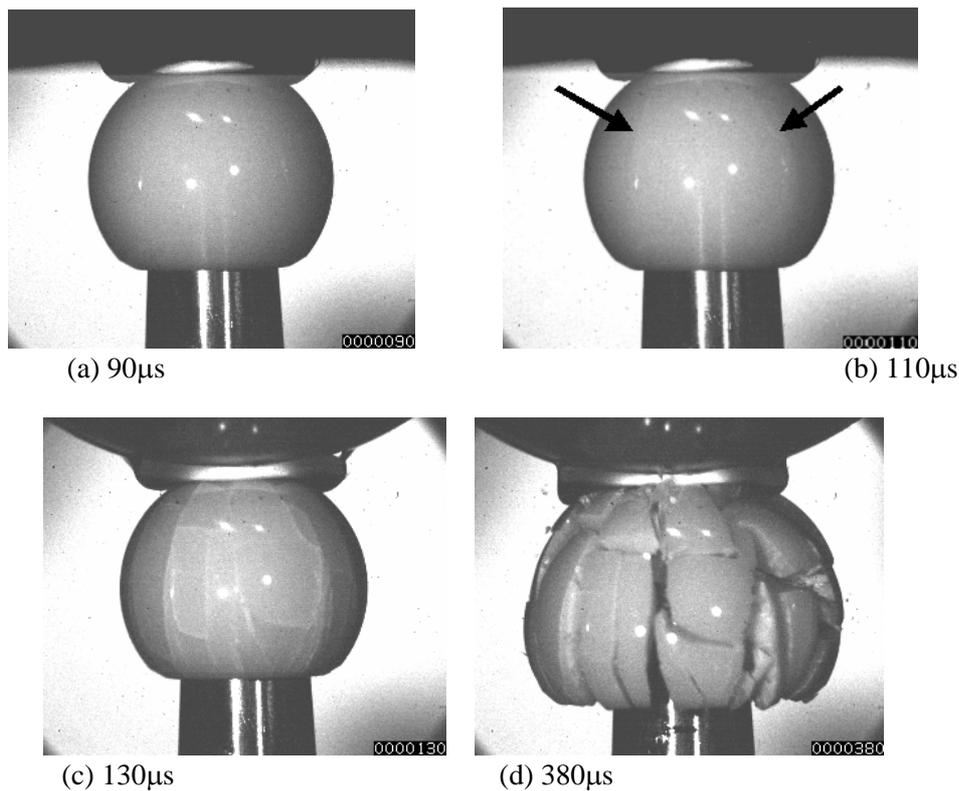


Fig.3 Impact fracture behavior of alumina femoral head.

点となるのは内部に存在する微小な欠陥であり，骨頭上端部にき裂発生の起点となった欠陥が存在したかもしれない．残念ながら，今回，高速度撮影に成功したのは Fig.3 に示した試験片のみであるため，その詳細は不明である．

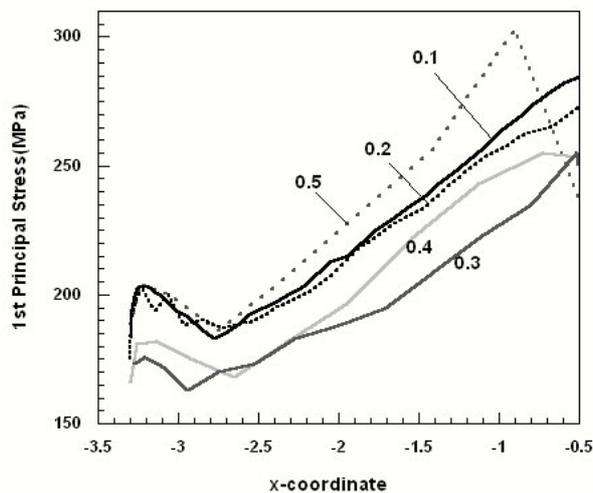
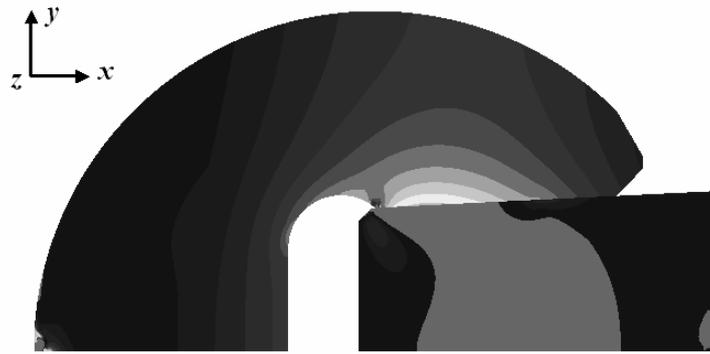


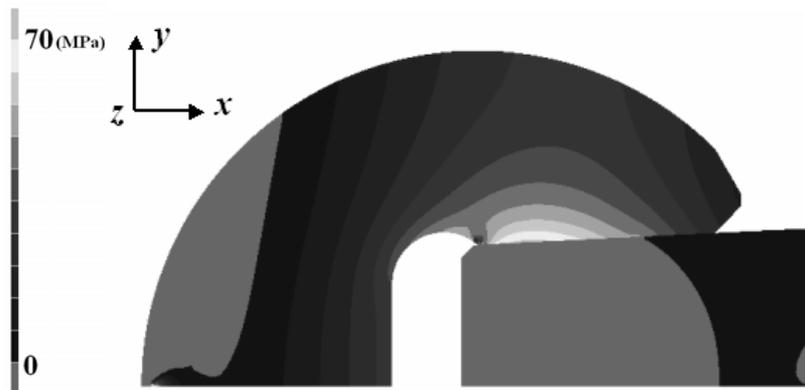
Fig.4 Comparison of the maximum principal stress distribution.

5 まとめ

衝撃破壊試験の様子を高速度カメラで撮影し，骨頭の衝撃破壊挙動を可視化することに成功した．また，軸対称モデルを用いて FEM 解析を行った結果，ステムと骨頭内部の接触部で最大主応力が円周方向に生じ，接触部において負荷方向にき裂が発生する可能性があることが示唆された．



(a) The maximum principal stress distribution



(b) z-axial stress distribution

Fig.5 Stress distribution in alumina femoral head.

成果報告

- 1 . 田中麻美、東藤 貢、新川和夫、佛淵孝夫、人工股関節用アルミナ骨頭の衝撃破壊挙動に関する研究、M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集、2005、655-656.
- 2 . 田中麻美、東藤 貢、馬渡正明、佛淵孝夫、新川和夫、人工股関節用セラミックス骨頭の衝撃破壊メカニズム、第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集、2006、175-176

1. 序論

I-III-VI₂ 族カルコパイライト型半導体は直接遷移型のバンド構造を持ち、バンド端より高い光エネルギーに対して吸収係数が大きい。中でも CuInGaSe₂ 太陽電池については広く研究されており、変換効率 19.5% [1] という報告もある。AgGaSe₂ は非線形素子として重要な材料であり研究報告も多いが、太陽電池の材料としての AgGaSe₂ の報告は少ない。AgGaSe₂ は禁制帯幅 1.8 eV を持ち、短波長側の光を吸収ができる。禁制帯幅約 1.5 eV の CuInGaSe₂ とタンデム構造を作ることによって、変換効率の向上が期待できる。本研究では、ホットプレス法により AgGaSe₂ 結晶成長を行った。ホットプレス法は低温、短時間で結晶成長ができ、真空を必要としないなどの利点がある。これまでに、CuInS₂、AgInS₂ をホットプレス法で作成し、良質なバルク結晶が得られている [2, 3]。

2. 実験方法

AgGaSe₂ バルク結晶の結晶成長を行うために、粉末二元系材料 Ag₂Se (99.9%)、Ga₂Se₃ (99.9%) を用いて化学量論的組成比になるように混合して、ホットプレス法を用いて、400~700 °C、25~80 MPa で、AgGaSe₂ バルク結晶を育成させた。



ホットプレス法は、加圧形成を高温で行い、形成と焼結を同時に進行させるものである。原料の Ag₂Se と Ga₂Se₃ は今回の成長温度 400~700 °C では固体のため、室温で粉末同士を接触させても反応することはないが、融点以下の高温に加熱すると、イオンや原子が結合を断ち切って動き始め、固相焼結が起こる。焼結の過程をモデル的に図解すると図 1 のようになる。まず、(a) のような形成形態を拡散が十分に起こる高温になれば、(b)、(c) を経て (d) のような単結晶粒子となる。焼結過程においては、表面自由エネルギー最小状態へ変化する過程で粒子間隙の空孔の消滅が起こり、その過程は初期段階での粒子接触点におけるネックの成長に基づく焼結体の大きな収縮に伴う緻密過程、次いで中間段階での粒成長を伴う課程における孤立した空孔形態で、中間段階の円筒形空孔は単調に収縮して緻密化が進行し、粒子の接する角に存在する空孔が完全に消えたとき、焼結体は理論密度に到達する。いずれの段階でも何らかの物質移動が起こる。物質移動の機構としては、①蒸発・凝縮、②体積拡散、③粒界拡散、④表面拡散、⑤粘性流動、⑥塑性流動の各機構が考えられる。

作成した試料を X 線回折によって格子定数と粒界サイズを、電子プローブマイクロ分析 (EPMA) により組成を、サーモプローブ法より伝導型を測定し、評価を行った。

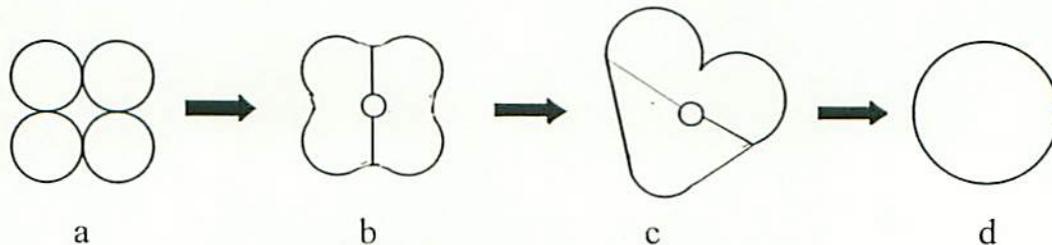


図 1 粒子の焼結過程モデル

3. 結果と考察

図2に、25MPa、400~700℃で、ホットプレス法で作成したAgGaSe₂バルク結晶を示す。表面状態は、400、500℃では粗い状態だが600、700℃の成長温度では滑らかな表面に変化した。400、500℃で作成した試料はもろく壊れやすかった。さらに原料のGa₂Se₃と思われる粒が見られた。600、700℃と高温になるにつれて、結晶性がよくなっていることがわかる。

図3にX線回折の実験結果を示す。AgGaSe₂とGa₂Se₃、Ag₂SeのJCPDSデータも示す。全ての試料は多結晶であった。400、500℃においては、原料のGa₂Se₃の相が大きく出ているが、この相は成長温度の増加とともに減少している。同時にAgGaSe₂の相は温度の増加とともに増加しており、700℃ではAgGaSe₂単相が得られている。X線回折の結果を用いて格子定数と粒界サイズの計算を行った。格子定数は温度の増加にともなってJCPDSデータに近づき、700℃ではほぼJCPDSデータと一致した。粒界サイズは成長温度に比例して大きくなり700℃の時が最大で粒界サイズ55nmが得られた。

図4にEPMAの実験結果を示す。実線は化学量論的組成比である。400、500℃においては化学量論的組成比と大きくずれているが、成長温度が増加するに伴ってAg、Ga、Seの化学量論的組成比に近づいている。600℃以下では、Ag-poor、Ga-rich、Se-richであった。X線回折の結果においても、400~600℃においてGa₂Se₃のピークが強く観察されているので、Ga、Seが過剰になっていることがわかる。欠陥はAg空孔(V_{Se})、格子間Ga(Ga_i)、格子間Se(Se_i)、AgサイトのGa(Ga_{Ag})、AgサイトのSe(Se_{Ag})などがある。700℃で作成した試料のみAg-rich、Ga-poor、Se-poorとなっている。存在する欠陥として考えられるのは、格子間Ag(Ag_i)、Ga空孔(V_{Ga})、Se空孔(V_{Se})、GaサイトのAg(Ag_{Ga})、SeサイトのAg(Ag_{Se})などがある。サーモプローブ分析により伝導型を測定したところ、試料はすべてn型伝導を示した。このことより、700℃で作成した試料のn型伝導の原因は、V_{Se}やAg_iが考えられる。

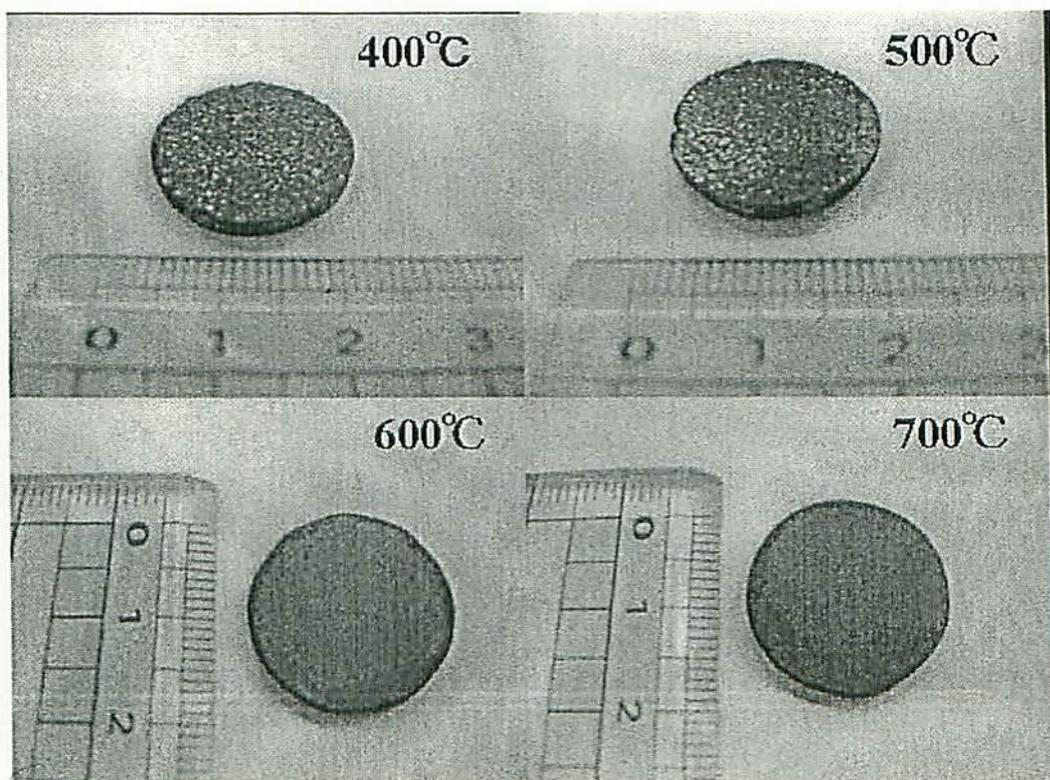


図2 試料 (25MPa)

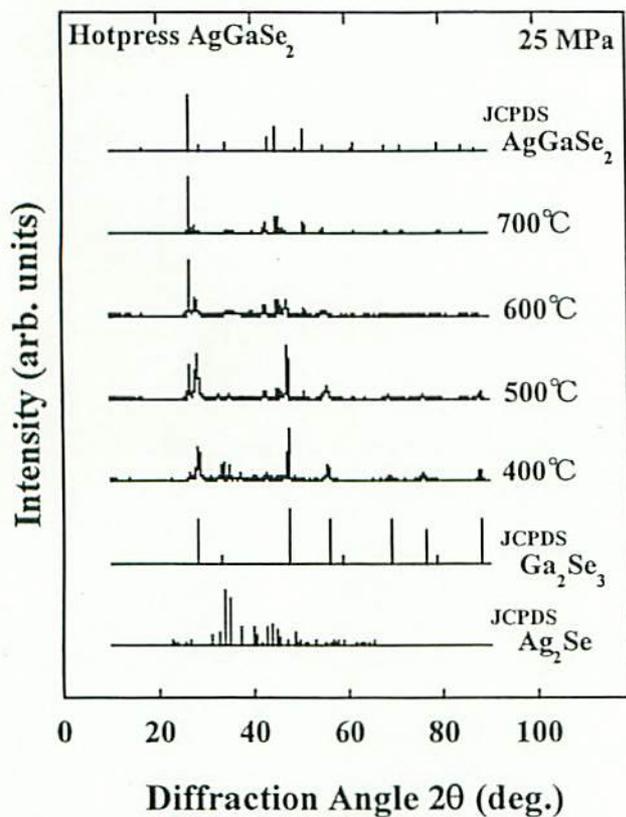


図3 XRD スペクトル

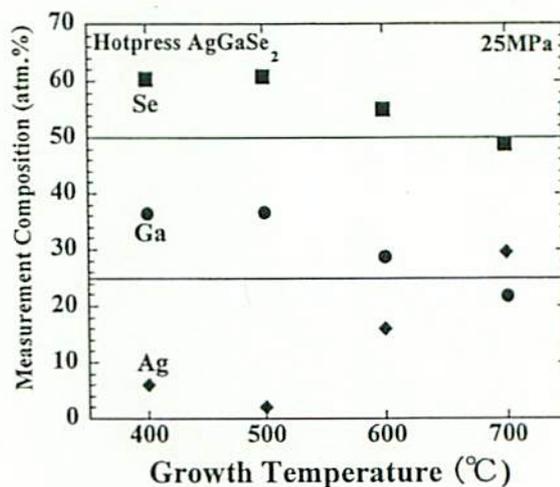


図4 EPMA 測定結果

4. 結論

カルコパイライト型化合物半導体である AgGaSe_2 バルク結晶をホットプレス法により作成した。成長条件は圧力 25MPa、成長温度 400~700 °C、成長時間一時間である。X線回折(XRD)によりX線回折法により構造特性と格子定数、粒界サイズを、電子プローブマイクロ分析(EPMA)により組成比を、サーモプローブ分析により伝導型を、四探針法により抵抗率を測定した。成長温度 700°C で AgGaSe_2 の単相が得られた。成長温度 700°Cにおいて、格子定数は JCPDS データにほぼ一致し、組成比は化学量論的組成比に最も近い値を示した。作成した試料はすべて n 型の伝導型を示した。

5. 引用文献

- [1] M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. Abushama, F. Hasoon, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, Prog. Photovol. Res. Appl. 13 (2005) 209.
- [2] H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki, T. Ikari, J. Crystal Growth 236 (2002) 253.
- [3] K. Yoshino, H. Komaki, T. Kakeno, Y. Akaki, T. Ikari, J. Phys. and Chem. Sol. 64 (2003) 1839.

モアレ干渉法による分岐切欠き周辺の変位場測定

豊橋技術科学大学 鈴木新一

1. 研究の背景と目的

脆性脆裂が破壊する際には、数百 m/s から数千 m/s の高速で進展するき裂が発生する。この様な高速進展き裂は、き裂速度が十分速い場合、進展の途中でき裂先端が 2 つに分岐することが知られている。き裂先端の分岐は、高速進展き裂の特徴的な挙動のひとつであり、これまで多くの研究者によって理論と実験の両面から研究されてきた。

動的破壊力学の最終目標のひとつは、高速進展き裂のき裂先端位置を時々刻々予測できるようになることである。この目標を達成するには、高速進展き裂が、何時、何処で、どのような力学的条件化で分岐するかを明らかにする必要がある。しかし、高速き裂分岐の力学的機構は未だ十分には解明されていない。

最近、高速度ホログラフィ顕微鏡法が、高速進展き裂の分岐の研究に用いられるようになった。高速度ホログラフィ顕微鏡法は、高い空間分解能を有しており、高速分岐き裂のき裂開口変位(COD)をき裂に沿って測定することができる。測定の結果、分岐前のき裂のき裂開口変位は、き裂先端からの距離 r の $1/2$ 条に比例することが示された。これは、動的破壊力学の理論的研究結果と一致する。また、分岐後のき裂においては、母き裂の開口変位が、き裂先端からの距離 r の $1/2$ 条に比例することが示された。しかし、分岐後のき裂において、母き裂の開口変位がどのような条件化で r に比例するかは、明らかになっていない。

この問題を解決するために本研究では、モアレ干渉法を用いて静止分岐切欠の開口変位を測定する。また、切欠を有する試験片にモアレ干渉法を適用するときの問題点を明らかにする。

2. モアレ干渉法

変位場測定に用いた PMMA 試験片を図 1 に示す。試験片の大きさは 300×300 mm であり、板厚は 3mm である。試験片中央には幅 0.3mm の切欠が設けてあり、その先端は、2 つに分岐している。分岐角は 13.5 度である。この試験片両端に引張り加重を負荷する。

モアレ干渉法による母切欠の開口変位測定を行うために、試験片表面には空間周波数 $f_s=488$ 本/mm の反射型回折格子を母切欠と平行に貼り付ける。貼り付けの手順は、以下の通りである。

- (1) 試験片表面に接着剤を塗布し、アルミニウム蒸着で製作した回折格子を試験片表面に転写する。
- (2) 切欠内部に残存する接着剤と回折格子を除去する。

図 2 はモアレ干渉法の原理を示している。試験片表面の回折格子に平行光線 A, B を入射する。無負荷の場合、レーザー光線 A の -1 次回折光 A_d , B の $+1$ 次回折光 B_d は、いずれも試験片表面に対して垂直に反射する。そのため、 A_d と B_d による干渉縞は発生しない。試験片に負荷を加えると回折格子が変形し、空間周波数は $f_s + \Delta f$ に変化する。それにより、回折光 A_d と B_d は互いに平行ではなくなり、干渉縞が発生する。発生した干渉縞から、 y 方向の変位 u_y を次式で求めることが出来る。

$$u_y = m / 2f_s \quad (1)$$

ここで、 m は干渉縞の縞次数である。

回折格子を試験片に貼り付けるときの手順(2)において、回折格子にはひずみが発生する。そのため、無負荷時においても試験片表面に干渉縞が発生する。これは、モアレ干渉法による変位計測に混入する誤差である。この問題を解決するために、本研究では負荷加重を変化させ、それによる干渉縞の縞次数の変化を測定した。

3. 測定結果

図 3(a), (b), (c), (d) に単一切欠と、分岐長さが 4.5mm, 6.0mm, 12.0mm の分岐切欠の干渉縞写真を示す。干渉縞は y 方向の等変位線を現しており、その間隔は $1.02\mu\text{m}$ の変位に相当する。干渉縞は明瞭であり、モアレ干渉法により切欠周辺の変位場を測定できることを示している。

図 3(e)は、(a), (b), (c), (d) の母切欠の開口変位測定の結果を示している。横軸は切欠先端からの距離 r 、縦軸は開口変位 (COD) である。母切欠の COD が、ほぼ r に比例していることが分かる。このことは、分岐角が小さく、且つ、分岐き裂の長さが短い場合には、母切欠の開口変位がき裂先端からの距離の 1/2 条に比例することを示している。

4. 結論

- (1) モアレ干渉法を用い、分岐切欠の開口変位を測定することが出来る。
- (2) 切欠の分岐角が小さく、分岐き裂の長さが短い場合には、母切欠の開口変位はき裂先端からの距離の 1/2 条に比例する。

5. 成果の公表

日本実験力学学会へ投稿準備中

6. 研究組織

研究代表者	鈴木新一	豊橋技術科学大学 機械システム工学系
研究協力者	新川和夫	九州大学応用力学研究所 基礎力学部門 破壊力学分野
研究協力者	森田康之	九州大学応用力学研究所 基礎力学部門 破壊力学分野

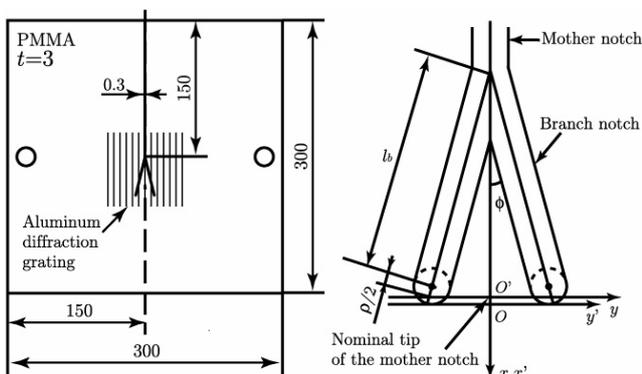


Fig.1 Specimen and bifurcated notch.

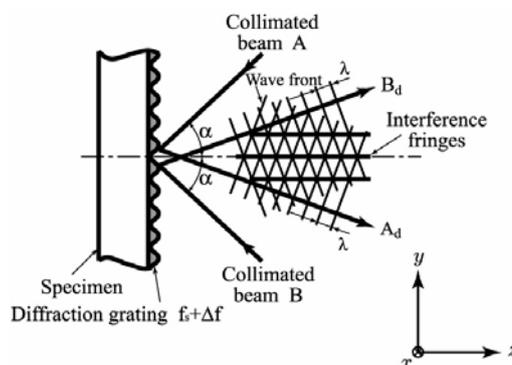


Fig. 2 Principle of moiré interferometry.

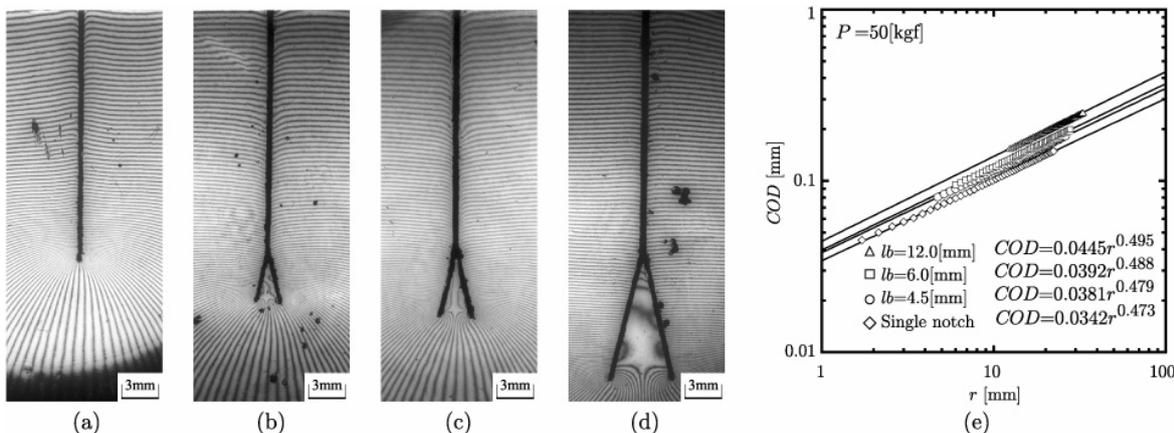


Fig. 3 Moiré interference fringes around bifurcated notes and COD measurement result.

人工関節とバイオメカニクス

研究代表者
佐賀大学医学部 佛淵 孝夫

1. はじめに

約 40 年前、英国の Charnley が低摩耗の人工股関節を開発して以来、人工関節医療は発展を遂げてきた。疾病や外傷などにより股関節や膝関節の機能が失われ、歩行や移動に困難を来した人々に対して、我が国では年間 10 万件以上の人工股関節置換術が行われている。人工関節の意義は破壊されその機能を失った関節を人工物で再建させることにある。求められる機能とは無痛性、支持性、可動性と耐久性であろう。さらに安全で正確な手術が求められることは言うまでもない。

佐賀大学医学部附属病院の人工関節置換術の実施実績は 2005 年には 750 件を数え、大学病院としては突出しており、この分野では我が国の中心的センターとなっている。この実績に支えられ、佐賀大学医学部・理工学部と九州大学応用力学研究所を中心に、より高性能で和式の生活に対応した人工関節と周辺機器とそれらの評価法を開発すべく、2003 年より「プロジェクト：人工関節」を立ち上げ、すでに 2 件の実用化と 4 件の特許申請を行ってきた。2005 年 1 月より佐賀大学医学部内に JMM (日本メディカルマテリアル) の支援により、全国初の寄附講座「人工関節学」が設置され、人工関節研究のさらなる推進と研究成果の実用化、企業化が期待されている。

現在、我々が取り組んでいる最初のテーマは「和式生活に対応した人工関節の開発」である。このテーマを実現するためには医学、工学、看護学、社会福祉学、心理学、教育学などの学際的な叡智を結集し、さらには産学官一体となった取り組みが不可欠であると考えている。

今回、九州大学応用力学研究所研究集会「人工関節とバイオメカニクス」を開催できたことは感銘深いことである。研究集会開催に奔走いただいた東藤貢助教授はじめ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. 講演プログラム

セッション1 司会 東藤 貢(九州大学応用力学研究所)

- (1) 10:30 - 10:40 「人工関節の現状と課題」
佛淵孝夫(佐賀大学医学部)
- (2) 10:40 - 11:00 「人工股関節による機能回復」
馬渡正明(佐賀大学医学部)
- (3) 11:00 - 11:20 「各種TKAシステムの大腿骨コンポーネントの形状の比較」
長嶺隆二(片井整形外科病院)
- (4) 11:20 - 11:40 「次世代型ロボット人工関節の研究」
木口量夫, 佐々木誠(佐賀大学理工学部)
- (5) 11:40 - 12:00 「人工関節の FEM 解析」
萩原世也(佐賀大学理工学部)

12:00 - 13:20 昼食休憩

セッション2 司会 佛淵孝夫(佐賀大学医学部)

特別講演 13:20 - 14:00 「下肢アライメント3次元評価システムと人工関節手術への応用」

- 古賀良生(新潟こばり病院整形外科)
- (6) 14:00 - 14:30 「人体運動機能の計測とモデル化」
持丸正明(産業技術総合研究所)

- (7) 14:30 - 15:00 「Fluoroscope を用いた人工膝関節 3 次元動態解析法」
山崎隆治, 富田哲也, 渡邊哲, 菅本一臣, 佐藤嘉伸
吉川秀樹, 田村進一(大阪大学大学院医学系研究科)

15:00 - 15:20 休憩(20分)

セッション3 司会 萩原世也(佐賀大学理工学部)

- (8) 15:20 - 15:35 「人工膝関節の開発の概要」
高野恭寿(日本メディカルマテリアル(株))
馬渡正明, 佛淵孝夫(佐賀大学医学部)
- (9) 15:35 - 16:05 「荷重 - 変位制御装置による膝関節運動の 3 次元的评价」
郷津勝久, 鈴木雅人, 末益博志(上智大学理工学部機械工学科)
須田康文, 松本秀男(慶応義塾大学医学部)
- (10) 16:05 - 16:25 「画像相関法を用いた大腿骨/骨セメント/人工股関節界面の
微視的変形挙動解析」
森田康之, 東藤 貢, 新川和夫(九州大学応用力学研究所)
馬渡正明, 佛淵孝夫(佐賀大学医学部)
- (11) 16:25 - 16:45 「動的有限要素法による人工膝関節の応力解析」
東藤 貢(九州大学応用力学研究所)
長嶺隆二(片井整形外科)

17:30 懇親会(西新)

3. 講演の概要

- (1) 「人工関節の現状と課題」佛淵孝夫
我が国における人工関節置換術の現状と問題点について, 日本を代表する整形外科医である講演者より説明があった。
- (2) 「人工股関節による機能回復」馬渡正明
人工股関節置換術(THA)の手術ビデオと, 患者の術前, 術後の歩行状態を供覧し, THA による股関節機能回復の実際が提示された。
- (3) 「各種 TKA システムの大腿骨コンポーネントの形状の比較」長嶺隆二
数種類の実際の大腿骨コンポーネントを使用し, そのシステムの通常の TKA の手技にて各コンポーネントを正常膝と同じ形状を持つ sawbone に挿入, その状態で各コンポーネントの形状の比較を行った結果について報告があった。
- (4) 「次世代型ロボット人工関節の研究」木口量夫
ロボット人工関節の基本的な概念と, その実現に必要な体内埋め込み型の小型アクチュエータの開発について報告があった。
- (5) 「人工関節の FEM 解析」萩原世也
CT 画像データから骨の有限要素モデルを作成し, 人工関節は CAD データから有限要素モデルを作成し, 有限要素解析を行った結果について報告があった。
- 特別講演「下肢アライメント 3 次元評価システムと人工関節手術への応用」古賀良生
術前の荷重状態で大腿骨と脛骨の位置関係を 3 次元的に把握し, インプラントの設置を 3 次元的に計画し, これを手術野において再現することが人工関節のナビゲーションと考え, 術前計画・術中支援法に加え術後設置位置評価等をおこなうために開発した一連のソフトウェアならびに器材について説明があった。
- (6) 「人体運動機能の計測とモデル化」持丸正明
関節中心を正確に決定する運動計測技術, 運動を比較し統計処理する技術, さらに筋骨格構造と運動機能の関係をモデル化する技術の最新動向について紹介があった。

- (7) 「Fluoroscope を用いた人工膝関節の 3 次元動態解析法」山崎隆治
X 線透視装置より得られる時系列 X 線画像を用いて、人工膝関節の位置・姿勢推定及び 3 次元動態解析法について説明があった。
- (8) 「人工膝関節の開発の現状」高野恭寿
人工膝関節のデザイン、評価法、問題点、深屈曲、および新型膝関節モデルについて説明があった。
- (9) 「荷重 - 変位制御装置による膝関節運動の三次元的評価」郷津勝久
独自の荷重 - 変位制御装置の開発により、ヒト屍体標本膝関節の三次元的運動を測定し、非接触三次元デジタイザにより同一試験体の幾何学的情報の測定を行った。同一個体に関して生体力学的研究を行う基礎データを取得した結果について報告があった。
- (10) 「デジタル画像相関法を用いた大腿骨/骨セメント/人工股関節界面の微視的変形挙動解析」森田康之
人工股関節のステム領域/骨セメント/大腿骨の界面周辺の微視的変形挙動を可視化することを目的とし、デジタル画像相関法を応用した結果について報告があった。
- (11) 「動的有限要素法による人工膝関節の応力解析」東藤 貢
実際に使用されている人工膝関節の CAD データを用いて詳細な 3 次元有限要素モデルを構築し、実使用環境化における人工膝関節の動作状態として重要と考えられる接触、回旋、屈曲を考慮した解析を行い、特に脛骨インサートの応力状態について考察した結果について報告があった。
- 各講演の詳細は研究集会資料集「人工関節とバイオメカニクス」を参考にして頂きたい。

4. あとがき

本研究集会は、応用力学研究所共同研究集会としては初めての医学と工学の両分野にまたがる学際的研究集会である。高齢化社会を迎えた我が国において特に重要なテーマの一つである「人工関節」を課題とし、医学と工学の両分野から最先端の研究者による 12 件の講演があった。参加者も講演者を含め大学、公的研究機関、病院、企業より合計 45 名の参加者があり、各講演とも活発な議論を展開して頂いた。本研究集会が異分野の研究者間の交流を通して、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。

5. 参加者

講演者	所属・職名
佛淵孝夫	佐賀大学医学部整形外科・教授
馬渡正明	佐賀大学医学部整形外科・助教授
長嶺隆二	片井整形外科病院・院長
木口量夫	理工学部機械システム工学科・教授
萩原世也	理工学部機械システム工学科・助教授
古賀良生	新潟こばり病院・副院長
持丸正明	産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター・副センター長
山崎隆治	大阪大学大学院医学系研究科・研究員
高野恭寿	日本メディカルマテリアル(株)本社開発部・係責任者
郷津勝久	上智大学理工学部機械工学科・助手
森田康之	九州大学応用力学研究所・助手
東藤 貢	九州大学応用力学研究所・助教授

参加者

伊藤 純	佐賀大学医学部
園畑素樹	佐賀大学医学部

西田圭介	佐賀大学医学部
宮崎真樹	佐賀大学医学部
井手衆哉	佐賀大学医学部
長嶺里美	佐賀大学医学部
古川晃郁	佐賀大学医学部
中村隆弘	佐賀大学医学部
小河賢司	佐賀大学医学部
肥後たかみ	佐賀大学医学部
北島 将	佐賀大学医学部
植木里紀	佐賀大学医学部
張 波	佐賀大学理工学部
佐々木誠	佐賀大学理工学部
矢田光徳	佐賀大学理工学部
松本 健	佐賀大学大学院
佐藤 浩二	佐賀大学
小木健一郎	佐賀大学
村上輝夫	九州大学大学院工学研究院
新川和夫	九州大学応用力学研究所
藤野 茂	九州大学大学院総合理工学研究院
細田奈津子	九州大学大学院
田中麻美	九州大学大学院
高永祐樹	九州大学大学院
幸重良平	九州大学大学院
山口勝太	九州大学大学院
徳永政一郎	九州大学大学院
前原克彦	日本メディカルマテリアルズ(株)
石田典之	日本メディカルマテリアルズ(株)
堀 武	日本メディカルマテリアルズ(株)
小坂智己	日本メディカルマテリアルズ(株)
久保泰之	九州風雲堂販売(株)
横山良治	九州風雲堂販売(株)

(研究集会)

非線形波動および非線形力学系の現象と数理

研究代表者 九州大学大学院数理学研究院 梶原 健司

研究集会の目的

非線形波動は非線形物理学を生み出した母体の一つであり、さまざまなスケールの物理現象において重要な鍵を担うものである。また、非線形波動やそれを生み出す非線形力学系は狭い意味の物理系だけでなく、最近では化学反応系、交通流、ネットワークフロー、生態系など広い意味での物理系において存在が確認され、さまざまな解析がなされている。さらに、ソリトン・カオスなどの基本現象の背後には豊富かつ多様な数理構造が存在し、そのような構造は幾何学や整数論などの純粋数学から数理工学まで広い範囲にわたって見られることが明らかになっている。このように、非線形波動と非線形力学系の物理と数理は、実験的研究から数理的研究まで、さまざまなレベルで密接に相互作用をしながら発展している。本研究会では、非線形波動と非線形力学系をキーワードとして、工学から数学まで、また現象論から数理的研究まで、幅広く研究発表を募り、各分野の専門家による多角的・横断的な議論を行う。このような研究発表・議論による相互作用の中から、広い意味での非線形波動および非線形力学系理論の将来につながる新しい知見を得ることを第一の目的とする。また、応用面も重視し、非線形波動系および非線形力学系の新しい社会的需要を掘り起こすことも目論む。さらに、大学院生の参加・発表を奨励し、次世代の研究者を育成する機会を提供したい。応用力学研究所は流体における非線形現象研究の中心の一つであり、非線形波動およびソリトンの研究が基礎力学部門の重点的研究対象になっている。従って、本研究会は応用力学研究所の共同利用事業にふさわしいものだと考えられる。

成果の概要

本研究集会では3日間で特別講演4件、一般講演41件(内ポスターセッション19件)の計45件の講演が行われた。本研究集会では2日目にポスターセッションを設けた。大学院生など若手研究者を中心に実験から理論までレベルの高いプレゼンテーションと活発な討論が行われ、盛況であった。ポスターセッションを設けた分、口頭発表は特別講演1時間、一般講演30分を確保できた。特別講演は物理・工学系2件、数学系2件が企画され、前者ではパターン形成および格子上の非線形局在構造の実験に関する講演が行われた。また後者では非線形波動や力学系の解析で本質的な役割を果たす超幾何関数の理論と、研究のツールである数式処理の理論と実装に関する最新の話題が提供され、参加者には好評であった。一般講演で提供された話題も物理・工学から数学まで多岐に渡った。大ざっぱに分類すると(1)非線形波動・非線形力学系の実験と理論(2)離散系・max-plus系・セルオートマトン系の理論とその交通流・生物現象への応用(3)可積分系の理論(4)離散可積分系と数理工学や幾何学・解析学・表現論などとの関わり、となる。

本研究集会への参加者は90人近くにのぼり、連日分野を越えて活発な討論と情報交換が行われた。特に大学院生や学部生の参加と発表が代表者の予想以上に多かったことを注意しておきたい。非線形波動と非線形力学系の中に新しい物理と数理的構造を見だし、そこで培われた技法が別の分野に応用され、またその分野との相互作用で新たな数理・物理が発見されていく、参加者はそのダイナミックな発展を間近に感じ、新たな研究の展望を得ることができた。これによって研究集会の目的は十分に達成できたと考える。本研究集会は話題が工学から数学まで多岐に渡り、かつ、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。非線形科学のような横断的な分野ではこのような場を持つことが大変重要であって、応用力学研究所がこの貴重な場を提供していることは大きな意味を持っている。参加者を代表して厚く感謝する次第である。

講演プログラムと概要

11月9日(水)

11:00~11:30 同心回転する渦系対とその崩壊

佐藤 壮太, 干場 英輝, 渡辺 慎介(横浜国大・工)

回転する一対の吸い込み口を底面に持つ円筒水槽の中に、安定に回転する渦系対を励起する。次に吸い込みを続けた場合と吸い込みを途中で止めた場合に、この渦系対が崩壊する過程を観察した。この観察により、崩壊の過程に違いが見られたので、この分類を行った。

11:30~12:00 強制ダフィン系の過渡カオスを非線形遅延フィードバック法で解消する試み

小柳 慎一郎, 河辺 哲次 (九州大・芸術工)

力学系の不安定周期軌道を安定化させる遅延フィードバック法における制御外力に対して, 非線形部分を導入する. ただし, この非線形部分は制御目標軌道の安定性に影響を与えないように導入する. この非線形部分の役割を数値計算によって調べる.

13:00~14:00 非線形格子中の局在励起の実験的研究 (特別講演)

佐藤 政行 (金沢大・自然科学)

1980年代の終わりごろに Sievers-Takeno により提唱された非線形格子中の局在励起 (Intrinsic Localized Mode, ILM) に関する実験は, 1990年代の終わりごろから, 固体物質などの自然格子, あるいはジョセフソン接合格子やマイクロエレクトロメカニカル (MEMS) 格子, フォトニック格子などの人工格子についてなされてきた. 私が所属していた Sievers 研でも, 反強磁性体と MEMS 格子についての実験が行われた.

反強磁性体中の局在モードは実空間では直接観測できず, 分光的手段が用いられた. MEMS 格子では直接カメラ観測可能で, 実験の速度もシミュレーションより速い. しかしながら, 試料の均一性の問題がある. シミュレーションでは均一性の問題はないが, モデルの正当性の吟味が必要である. それぞれ一長一短があるが, これらのアプローチが相補的に機能していた.

ここでは, MEMS 格子での研究を中心に ILM の生成, 観測, 格子ピニングなどの基本的な ILM の性質から, 不純物モードとの相互作用を利用したレーザーマニピュレーションまで述べる.

14:15~14:45 生体高分子は何故ヘリカルな構造をしているだろうか

武野 正三 (長崎総合科学大)

DNA や蛋白高分子はヘリカルな構造をしていることは周知の通りである. 1本のヘリカル高分子のモデル方程式は

$$\ddot{\theta}(\vec{n}) = \sum_{\vec{m}(\neq\vec{n})} \{L_1(\vec{n}, \vec{m}) \frac{\lambda}{1+\lambda} \sin[\theta(\vec{m}) - \theta(\vec{n})] + L_3(\vec{n}, \vec{m}) \frac{1}{1+\lambda} [\theta(\vec{m}) - \theta(\vec{n})]\}$$

の形をしている. このヘリカル格子は外部環境からの影響に対して robust な非線形局在モード, キンク型非線形モードを固有の非線形モードとして持っている. これらの非線形モードは生体の重要な機能である energy storage や long-range transduction に対応すると考えることが出来るかも知れない.

14:45~15:15 可積分方程式に関連した確率微分方程式の解

矢嶋 徹 (宇都宮大・工), 宇治野 秀晃 (群馬高専)

可積分方程式のうちのいくつかを取り上げ, それらをコルモゴロフの方程式として解釈することにより, 確率過程を構成する. このような確率過程の振る舞いを解析するとともに, 応用の可能性についても議論したい.

15:15~15:45 2ソリトンの有効相互作用

角島 浩, 稲葉 徹 (富山大・工), 紺野 公明 (日本大・理工)

2ソリトン衝突の場合に各々のソリトンを1個の粒子のように考えて, 2個のソリトン間に働く有効相互作用を求めることを試みる.

16:00~16:30 DKP 方程式のソリトン解の数理構造

丸野 健一 (九州大・数理学), 児玉 裕治 (Ohio State Univ.)

Jimbo-Miwa, Hirota-Ohta による DKP 方程式 (Coupled KP 方程式) の解はパフィアンでかけることが知られているが, パフィアンとそれによって生成されるソリトンの対応関係はこれまできちんと理解されていなかった. 我々は, パフィアン解にパラメータを含ませ, そのパラメータのとり方によって描かれるソリトンのパターンを分類し, DKP 方程式で起こりうる複雑なソリトン相互作用を数学的に解析することに成功したので, その詳細を報告する.

16:30~17:00 浅水波のモデル方程式の短波長極限

松野 好雅 (山口大・工)

浅水波のモデル方程式である Camassa-Holm (CH) 方程式と Degasperis-Procesi (DP) 方程式の短波長極限方程式を特異摂動法により導出し, それらの解の性質について議論する. CH, 及び DP 方程式のいずれもソリトン解を有するが, 前者, 及び後者の短波長極限方程式はカスプソリトン解, 及びループソリトン解を各々有することを示す.

17:00~17:30 Ernst 方程式再訪

増田 哲 (神戸大・自然科学)

定常軸対称重力場を記述する Ernst 方程式は, 可積分系理論の観点からもたいへん興味深い対象である. 本講演では, 「広田の双線形化法」の枠組で, Ernst 方程式についてどのような問題が残されている

かの概略を述べるとともに、反自己双対 Yang-Mills 方程式との関係を特殊解に関して論じる。

11月10日(木)

9:30 ~ 10:00 確率共鳴による微弱信号検出とその応用

石渡 信吾, 小泉 一弥 (横浜国大・工)

確率共鳴によれば、閾値応答素子の並列化によって、それらの応答の集合平均として、ノイズに埋もれた微弱信号波形を再現できる。まず、電気回路による予備実験でこれを示した。次いで温度計測において実証するため、16chの熱電対温度測定系を構成し、微弱な温度変化の測定を試みた。各chの応答特性を揃えることによって、確率共鳴による集合平均の効果を確認することができた。

10:00 ~ 11:00 真正粘菌変形体の時空パターン形成 — 振動と流動から細胞行動へ — (特別講演)

山田 裕康 (理研, 名古屋大・理)

真正粘菌変形体は多核単細胞生物である。変形体は神経系のような構造も、脳のような統合器官も持っていないが、個体として統制がとれた細胞行動を発現する。その行動は時として「知的」にも見えるほどである。このような変形体のふるまいは、代謝に基づく収縮弛緩振動と、振動によって引き起こされる原形質流動、そして、原形質流路ネットワークの生成消滅によるものと考えられている。この考えの下で提案された数理モデルを大きく三つに分類し、各々のモデルの特色を紹介する。また、数理モデルによる細胞行動の解析について、その方向性を議論する。

11:15 ~ 11:45 交通流モデルにおける update rule 依存性

金井政宏 (東京大・数理科学), 西成 活裕 (東京大・工), 時弘 哲治 (東京大・数理科学)

交通流モデルのアップデート依存性は、その重要性にも拘らず、ほとんど議論されていない。そこで、本研究では代表的な方法であるランダムとパラレルを繋ぐアップデートを考案する。それによって交通流モデルにおけるアップデートの役割を検証し、ランダムなアップデートからパラレルなアップデートに移行する際に流量の変化を見た。特に、我々が提案した確率最適速度モデルにおいては、連続であった基本図(密度-流量図)に、アップデート・ルールを変化させることにより不連続点が生じる様子を捉えることが出来た。これによって、今後の詳細な解析が期待される。

11:45 ~ 12:15 $q = 0$ でのベータ仮説と周期的箱玉系

国場 敦夫, 竹野内 晃 (東京大・総合文化)

$q = 0$ でのベータ固有値(転送行列の固有値)を計算することにより、周期的箱玉系のある特殊な状態に対して、周期を与える明示公式を提唱する。また周期的箱玉系において、ある保存量を持つ状態の数をカウントする公式についても述べる。

13:30 ~ 14:30 数式処理システム Risa/Asir の知られざる機能について (特別講演)

野呂 正行 (神戸大・理)

Risa/Asir は、(株)富士通研究所で開発、公開され、その後神戸大学に所属するメンバーを中心する OpenXM committers により開発が継続中であり、ソースコードも公開されている、フリーな数式処理システムである。

Risa/Asir として公開がスタートしてから 11 年、その前身である未公開システムから数えると 16 年が経過した。当初より、Risa/Asir は、開発チームが興味をもつアルゴリズムを実装するプラットフォームとしての役割を果たしてきた。結果として、多項式演算(基本演算、GCD、因数分解)、グレブナー基底計算、イデアルの諸演算、分散計算などに関しては、特に、高速性という点からみて、ある程度評価に耐えるものとなったと考えているが、いわゆるユーザインタフェースに関しては全く不満足(ユーザにとっても、開発側にとっても)なままである。ここで、ユーザインタフェースといっても、GUI という点では、所詮ユーザの好みによる部分が大きいため、例えば Mathematica の notebook のようなものを作ろうというつもりはない。しかし、どのような数式を受け付け、どのような処理ができるか、という点に関しては、Mathematica, Maple などに学ぶべき点は多い。そこで、本講演では、次の 2 点について、ユーザの立場にたった解説を行いたい。

1. 効率的計算のための種々のテクニック
2. 多項式に限らない、さまざまな数式の扱い方

前者に関しては、おもにグレブナー基底計算に関して、ユーザによる設定がいかに効率を左右するか、また有限体上での計算(ショートカット)がいかに有効に働くかについて解説する。得られた解が、全ての解を尽くしていることを保証することが困難な算法でも、とにかく解を求めたいという要求にマッチする算法はいろいろあり、その幾つかを紹介したい。

後者に関しては、現在実装が進んでいる、パターンマッチング、項書き換え機能について解説する。実は、私は、可積分系の研究において重要なのは前者であると勝手に思い込んでいた。しかし、その思い込みに原因となったある研究者に聞いた所、そのような計算をしているのは自分だけで、大多数の人は、合成関数の微分をさせたり、変数の置き換えをしたり、サイズは小さいが複雑な成分をもつ行列式を計算したりという使い方をしている、だから Risa/Asir のユーザが増えないのだ、ということであった。それな

らば、この際、そういう機能を実装してしまおう、となった次第である。というわけで、現時点ではごく初歩的な機能しか実現できていない。講演時までには、より高度な機能を取り揃えておく予定であり、それがタイトルの意味するところである。

14:45 ~ 15:15 2次元超離散戸田方程式の局在解の衝突

広田 良吾 (早稲田大・名誉教授)

2次元超離散戸田方程式には局在解が存在するが、この局在解の τ 関数を求め、それによって局在解の衝突を記述する厳密解を求めた。

15:15 ~ 15:45 リーマンテータ関数の超離散化とその可積分系への応用

野邊 厚 (大阪大・基礎工)

リーマンテータ関数を超離散化し、各変数について周期性をもつ区分線形関数を導出する。この超離散リーマンテータ関数はある恒等式 (リーマンのテータ公式の超離散類似) を満たすことを示し、その特殊化として加法公式を導く。さらに、この加法公式を用いて戸田型セルオートマトンの周期波解を構成する。

15:45 ~ 16:15 周期箱玉系の基本周期と可解格子模型

間田 潤 (東京大・数理科学), 時弘 哲治 (東京大・数理科学), 泉 誠 (島根大・教育)

本研究では、周期箱玉系と可解格子模型との対応関係から周期箱玉系の基本周期を導出した。具体的には、周期箱玉系の基本周期が可解格子模型の絶対零度極限での転送行列の固有値から求まることを示し、Bethe 仮説方程式の String 型の解の主係数による絶対零度極限での固有値の具体的な表式を求めた。さらに、周期箱玉系の保存量と Bethe 仮説方程式の String 型の解に関する Conjecture を得た。

16:30 ~ 18:00 ポスターセッション

(1) 開放境界条件における二種粒子 ASEP の相転移

有田 親史 (東京大・理)

様々な条件下で二種粒子の非対称単純排他過程 (ASEP) の厳密解が行列積の形で構成できることが知られていたが、ある種の開放境界条件の下で物理量 (流れと密度) を計算すると、熱力学極限で境界のパラメータによる相転移が確認できた。

(2) 一次元弾性体の非線形ダイナミクス

塚原 由久, 和田 亮太, 西成 活裕 (東京大・工)

1次元弾性体の非線形運動をソリトン理論を用いてこれまで解析してきたが、この結果を宇宙工学での重要な技術であるデザーに応用し、その非線形ダイナミクスを調べた。特に、デザーの長さが変化する場合や、デザーに電流が流れた場合の挙動などについてのシミュレーション結果を発表する。

(3) 回転液滴のダイナミクスと固有振動

榎 祐作, 西成 活裕 (東京大・工)

浮遊液滴の運動は宇宙環境利用技術において重要な役割を果たしている。今回はその液滴が回転している際の扁平度を理論的に計算し、数値計算などの結果と比較した。また液滴の自由振動の回転補正について摂動論を用いて議論した。

(4) 群集の集団運動と拡張フロアフィールドモデル

柳澤 大地, 西成 活裕 (東京大・工)

人の集団運動を表すセルオートマトンモデルとして、これまでフロアフィールドモデルを研究してきた。人の集団運動の1つである避難のフロアフィールドモデルは、人が出口に向かおうとする性質をモデル化する「静的フロアフィールド」と、パニック時、人が他人の後を追従する性質をモデル化する「動的フロアフィールド」からなる。その「動的フロアフィールド」と、同じように他人を追従する性質をモデル化する「視野モデル」を比較することにより、前者は人の動きを決定的にし人が列を成すようになるのに対し、後者は人が分散して動くようになるという結果が得られた。これらの内容を中心に発表した。

(5) 分子モーターの集団運動と衝撃波の解析

金山 侑子, 西成 活裕 (東京大・工)

分子モーターの新しい CA モデルについて、その衝撃波の形成の様子を理論および数値計算によって詳細に調べた。数値計算で ATP 濃度やモーター分子の濃度を変えたときの衝撃波の様子を確認し、その厚みは有限の値になることが分かった。また、これの結果を利用して衝撃波の位置の見積もりに関しての理論を発表する。

(6) Benney 方程式の定常進行波解の分岐特性

伊藤 裕子, 加藤 由紀, 藤村 薫 (鳥取大・工)

周期境界条件の下で Benney 方程式の解を数値的に調べた。時空間発展問題と定常問題を解くことによって非常に数多くの定常進行波解を得た。得られた解を数種類のパターンに分類し、それぞれ分岐特

性を調べた。その結果、いくつかの解のつながりがわかった。

(7) Sine-Gordon 方程式の Benjamin-Feir 型不安定性と Lamé 方程式の帯構造 II

大宮 眞弓, 大倉 裕史, 岡植 大輔 (同志社大・工)

Sine-Gordon 方程式に対する Benjamin-Feir 型不安定性を昨年に続き報告した。まず、同期波解のモジュラスが 1 より大きい場合には, Lamé 方程式のスペクトルの帯構造を考察し, 不安定帯の実軸に含まれる部分が Benjamin-Feir 不安定域に一致する事を示した。また, モジュラスが 1 の場合には, 無反射型 Schrödinger 作用素のスペクトルの構造と関連して考察し, 実軸に含まれるレゾルベント集合を 1 だけずらしたものが Benjamin-Feir 不安定域になることを示した。

(8) q -離散 Nahm 方程式の可積分性

中村 厚 (北里大・理)

Nahm 方程式の解と自己双対ゲージ配位が対応することは, インスタントン解構成法であるいわゆる ADHM 構成法により保障されている。今回は ADHM 構成法に忠実に基づき, 自己双対性を保ったまま Nahm 方程式の乗法的 (q -) 離散化を行ない, その可積分性を検証する。

(9) Lie Symmetry を用いたくりこみの方法

巖佐 正智, 野崎 一洋 (名古屋大・理)

特異摂動法としてのくりこみ群の方法と, 微分方程式のもつ対称性 (Lie symmetry) を重視した近似解の構成方法, これら二つの関係を探る研究を行っている。本発表では, 非線型常微分方程式を取り上げ, この関係について具体的に説明する。

(10) 多面体オイラー公式のマックスプラス代数への応用

岩尾 昌央 (東京大・数理科学)

区分線形系の解析に用いられるマックスプラス代数における N 変数「多項式」を, N 次元多面体と対応させ, 多面体のオイラー公式をマックスプラス代数に輸入する。さまざまな場面で劇的な効力を発揮する。

(11) ウェーブレット級数展開に基づく数値シミュレーション

山口 貴史, 近藤 弘一 (同志社大・工)

ウェーブレット級数展開に基づく数値解析を行なう。いくつかの種類のスキームの比較検討を行なう。

(12) 非線形格子ハミルトン系における最大リアプノフ数とマクロ変数の周期軌道 1 本による予言: 周期軌道依存性

後藤 振一郎 (京都大・情報)

ハミルトン系に限らず, カオスの力学系を特徴付ける量としてリアプノフ数が挙げられる。今回は特に不安定周期軌道 1 本の線形安定性解析からリアプノフ数が求まるという予想に着目する。これまでの研究においては, その予想法に対する不安定周期軌道の選び方に対する議論は殆んどなされていなかった。今回はその不安定周期軌道を用いる方法が不安定周期軌道に依存し, 予想するリアプノフ数が大きく変わる事を, ある非線形格子ハミルトン系に対して示す。また, 不安定周期軌道を用いてマクロ変数の期待値を予想できる可能性についても述べる。

(13) Extended KP 方程式の孤立波解の斜め相互作用

辻 英一, 及川 正行 (九州大・応力研)

ある二層流体中の界面の挙動を表わす Extended KP (EKP) 方程式の孤立波解の二次元的相互作用について調べた。拡張前の KP 方程式においては, 共鳴相互作用などの特徴的な二次元相互作用を表すソリトン解が存在する。また, EKP 方程式の一次元孤立波解では振幅としてとり得る最大値が解析的に求まる。進行方向の違う二つの一次元孤立波解の相互作用を数値的に調べ, 以下の事を明らかにした。

1. 拡張された非線形項の効果により, 共鳴相互作用による波動の増大は全体的に抑えられる。

2. しかし一次元孤立波解の最大値と比較すると, その最大値を超える振幅を持つ二次元定常進行波が非線形項の係数によっては存在する。

(14) 複素変数の max-plus 変換と偏微分方程式への応用

中島 圭輔, 浅野 功義, 矢嶋 徹 (宇都宮大・工)

max-plus 変換は微分方程式を超離散化する手法の 1 つである。本講演では, max-plus 変換を複素数上で考え, 複素変数の max 演算を複素変数の線形結合の max-plus 変換として定義した。複素変数の max-plus 変換が定義されることにより, 任意に与えられた微分方程式を超離散化することができる。この変換を応用し, 超離散方程式の解を求めたので, 報告する。

(15) ある 2 次元セルオートマトンについて

清田 寛之, 高橋 大輔 (早稲田大・理工)

通常の正方格子上ではなく六角格子上で独自のセルオートマトンルールを採用して得られた実験結果のパターンについて自己複製等, 他分野との関連を含め考察する予定です。

(16) Laurent 双直交多項式の持つ組合せ論的側面について

上岡 修平 (京都大・情報)

Laurent 双直交多項式の満たす双直交性に対して, 平面路である重み付き Schröder 路を用いた組合せ論的解釈を与える. その結果, 双直交関係にあらわれる量が, ある条件を満たす Schröder 路の重みの総和となっていることをみる.

(17) アファイン球面の超離散化 (へ向けて)

松浦 望 (福岡大・理)

アファイン球面はツイツェイカ方程式によって記述されるが, その差分化は 1994 年にポベンコとシーフによって与えられた. 本講演ではアファイン球面の超離散化 (の試み) について報告する.

(18) 非自励戸田系のカソラチ行列式解

向平 敦史, 梶原 健司 (九州大・数理学)

離散戸田方程式の非自励な拡張である不等間隔離散戸田方程式, R_I chain などのソリトン解について議論する.

(19) Generating functions associated with the Hankel determinant formula for solutions of the Toda equation

Nalini Joshi (Univ. of Sydney, Australia), 梶原 健司 (九州大・数理学), Marta Mazzocco (Univ. of Manchester, UK)

いくつかのパンルヴェ方程式の有理解に対する Hankel 行列式公式に対して要素の母関数が構成され, それが超幾何型特殊関数の対数微分で表わされることが報告されている. その背後の構造を調べるために generic な解に対する Hankel 行列式表示を調べたところ, 母関数は補助線形問題の解の比であることが示された. さらに考察を加えたところ, この構造は一般的な Toda 方程式に起因することがわかった.

11月11日(金)

9:30 ~ 10:00 変形された G_2 型ルート系と Baker-Akhiezer 関数

槇 俊秋 (同志社大・工)

多次元のシュレーディンガー方程式の解である Baker-Akhiezer 関数 (BA 関数) の存在と, それを特徴付ける有限ベクトル集合が成す超平面の configuration (配位) は, locus configurations として知られ, ある制限において古典的な configurations である root 系が現れる事が分かっている. また, それをある極限で含む形で, より一般的な状況において, root 系となる様な configurations も見出されている. これは non-root 系, deformed root 系と呼ばれている.

本論文では, BA 関数の決定に際し, non-root な configurations の有無を, 特別な場合で調べ検討し, その結果, 古典的に知られている G_2 型ルート系の変形である deformed G_2 -type root 系の存在が確かめられ, その具体的ベクトル表現を書き下した. 同時に, locus configurations がどのような場合に, root 系を含むのかという処でその特徴的な依存性を調べ, その context で root 系と non-root 系, deformed root 系の関係を調べた.

10:00 ~ 10:30 非スペクトル Darboux 変換の退化条件と楕円関数のある種の変換公式

大宮 眞弓 (同志社大・工)

従来得られていたスペクトル型 Darboux 変換に対する退化条件を応用して, 非スペクトル Darboux 変換の退化条件を具体的に求めた. それを 3 次 Lamé 方程式について適用する事により, 等非調和型楕円関数の興味深い変換公式が得られた. また, くり返し Darboux 変換によって KdV 方程式の楕円関数解を構成して, その時間極限の特異点を考察する事により, 楕円関数の加法公式が得られた.

10:45 ~ 11:15 Calogero–Moser 模型の超可積分な時間離散化

宇治野 秀晃 (群馬高専), Luc Vinet (Univ. Montreal, Canada), 矢嶋 徹 (宇都宮大・工)

吉田 春夫 (国立天文台)

Calogero 模型に対する時間離散化の手法を利用して, Calogero–Moser 模型の超可積分性を保つ時間離散化の手法を与える. また Nijhoff らによって与えられた Calogero–Moser 模型の可積分性を保つ時間離散化の手法との比較を行う.

11:15 ~ 11:45 高次元可積分系の周期点の性質

斎藤 革子 (横浜国大・工), 斎藤 暁

去年の応力研の研究会で周期可積分系の作る代数多様体の話しをした. 今回は, その研究を更に発展させて, 更に多くの可積分系の周期点の性質を見てみたい. 特に可積分系の周期点は, 保存量を含むある関係式が存在すると周期多様体をつくり, そうでない孤立点の集合となること, 更に, 周期点のつくる不変多様体と孤立点の集合とは同時には存在しないことを証明する.

11:45 ~ 12:15 2階可積分差分方程式から生成される3階可積分差分方程式

松木平 淳太(龍谷大・理工) 高橋 大輔(早稲田大・理工)

3階の可積分差分方程式のあるクラスが, 2階の可積分差分方程式によって, 生成されていることを示す.

13:30 ~ 14:30 私は超幾何関数(特別講演)

吉田 正章(九州大・数理学)

私は九州大学の吉田です. なのにどうして「私は超幾何関数」なのか. 助詞「は」には色々の用法がありますが, 表題で使いましたのは, 限定を表すものです. 飲み屋で「皆さん麦酒でいいですね」といわれた時「いや, 私は焼酎だ」という風に使われるものです. この研究集会に集まれた皆さんは, Painlevé だとか可積分系だとかそれに離散が付いたやつとかそれに又超が付いたやつとか, 賑やかで結構なこととお喜び申し上げますが, 30年前からずっと, 私は超幾何関数です, そういう意味です. この集会は「非線形波動云々」であります, 私は線形です. じゃあ何故ここで講演をしているのか, 私は知りません, 世話役さんに訊いて下さい. 超幾何関数には色々な一般化があり, それぞれ勝手な名前をつけていますが, 私のは元祖のそれです. そのような類を古典超越関数と言う人もいますが「古典」とは褒め言葉で御座いますから私は自分のやっているものを「古超越関数」と言っています. 本土では「隠れ切支丹」と習った禁制前からの切支丹を御当地の五島列島では「古切支丹」と呼んでいます, そんな感じです. 今から見ると古いなんて物でなく, 30年前から十分古かったです. ではそんな物について調べることが未だあるのかとお思いでしょう. 全部本に書いてあるのではないかと. あなたね, 本には分かっていることしか書いてないのですよ, 当たり前ですが. 分からないことだらけなので御座いますよ. 流行に乗ってどんどん最先端のことをおやりになる, おやりになれるのも御目出度いことですが, 古数学で遊ぶのもまた乙なもので御座います. 現代とは言わず近代数学も一切使わず前々世紀の数学しか使いません.

超幾何関数とは, 超幾何方程式と言われる線形微分方程式

$$x(1-x)u'' + \{c - (a+b+1)x\}u' - abu = 0$$

の解のことです. 今日, は, 超幾何関数の径数, より正確には指数

$$\lambda := 1 - c, \quad \mu := c - a - b, \quad \nu := a - b$$

が純虚数のときの黒写像を調べます. 一般に超幾何方程式は

$$u'' + p(x)u = 0, \quad 4p(x) := \frac{1 - \lambda^2}{x^2} + \frac{1 - \mu^2}{(1-x)^2} + \frac{1 + \nu^2 - \lambda^2 - \mu^2}{x(1-x)}$$

に射影的に同値であり, 指数が純虚数ならこの式の係数はすべて実数であること(百年以上前からよく知られていた事実)を使います.

14:45 ~ 15:15 離散ベルヌーイ多項式と離散ソボレフ不等式の最良定数

永井 敦(日本大・生産工)

グリーン関数(再生核)理論の応用として, あるヒルベルト空間における離散ソボレフ不等式の最良定数を厳密に計算する. また最良定数を与える関数が離散ベルヌーイ多項式を用いて表すことができることを示す.

15:15 ~ 15:45 なぞのウィロックス方程式に関する一注意

井ノ口 順一(宇都宮大・教育)ウィロックス氏は結合型 KP 階層の負時間発展を考察することで Tzitzeica 方程式をその特殊な場合とする 1+1 次元可積分方程式を導出した(2005). 本講演ではウィロックス氏の発見した方程式の微分幾何学的意味について報告する.

15:45 ~ 16:15 3次元空間形内の Kirchhoff 弾性棒

川久保 哲(福岡大・理)

Kirchhoff 弾性棒とはピアノ線のような1次元弾性体の数学的モデルの一つである. 本講演では, 3次元空間形 R^3, S^3, H^3 の中の Kirchhoff 弾性棒は, Jacobi の sn 関数及び楕円積分で explicit に表されることを示す.

開催の期間 平成17年11月9日 ~ 平成17年11月11日

参加者 89名

乱流研究の異分野融合と新たな創成

研究代表者・辻 義之（名古屋大学大学院工学研究科）

1 研究集会の開催目的

日常見られる身の回りの多くの流れはもとより、プラズマ、大気・海洋の流れなど多様な現象が乱流というキーワードで統一的に括られる。しかし、乱流現象を理解するためには、純粋に数学的な机上の作業から、コンピュータ中の仮想実験、実際の流体を扱う室内実験、野外観測など多様な方法論がある。いま、乱流研究の新たな展開には、異なる分野の乱流現象を通訳するメディアーターの存在のみならず、異なる方法論を担う研究者が互いの議論を通して、新たな概念を自らの方法論へフィードバックすることであろう。国際学会やワークショップを見る限り、欧米に比べて日本の研究者には、このような機会が少ないのが現状と思われる。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の融合を通じて、各分野での乱流現象に新たな知見を見出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集会として開催するのが最適と考えられる。

2 講演内容の概要

局所構造を含む宇宙プラズマ MHD 乱流：起源と粒子輸送

成行泰裕，羽田 亨

簡単な流体モデルを用いて、MHD 乱流における局所構造の起源について解析した結果を紹介する。特に、局所構造を波動間の位相相関で特徴付ける議論に重点を置く。同時に、局所構造の粒子輸送への寄与についての研究も紹介する。

べき乗則変動を作る確率過程とその応用

佐藤彰洋

定常確率密度関数がべき乗則のすそ野を持つような現象は分野を問わず、長距離相互作用やエネルギー散逸率のゆらぎ、温度ゆらぎを有する系において確認されている。本講演では、このような現象をモデル化するために、乗算と加算のふたつのノイズを有する確率過程を導入し、この型の確率過程からべき乗則の裾をもつ定常確率密度関数が実現することを示す。更に、乗算と加算のふたつのノイズを持つ確率過程で表現される動学と、そのべき乗則のすそ野を持つ定常確率密度関数に対する統計学と、情報理論との関係について考察を行なう。最後に、乗算と加算のふたつのノイズを有する確率過程のいくつかの応用例を紹介する。

くりこみ展開と異常スケーリング—速度勾配の 4 次モーメントのスケーリング—

上之和人，金田行雄

非圧縮乱流において、速度場の微分を含む(エネルギー散逸率) ν 、エンストロフィー、 $\Delta p/\rho$ のような量のスペクトルは、次元的には全く同じにもかかわらず慣性小領域で違うスケーリングをもつことが知られている。ラグランジュ的スペクトル理論の立場から、これらのスケーリングについて解析した結果を報告する。

射影演算子法の乱流に対する有効性

岡村 誠

射影演算子法では、射影演算子によって、不規則な振る舞いをするカオス運動が組織的な運動とランダムな運動にうまく分解されることを前提としている。この前提が正しいかを Kuramoto-Sivashinsky 方程式をモデル方程式として調べた。長波長モードの振る舞いに関してはこの前提がよく成り立ち、短波長モードに関してもそれほど悪くないことがわかった。

さらに、平均量などの統計量を評価するときにはマルコフ近似がよく使われるので、これの妥当性も同様に Kuramoto-Sivashinsky 方程式を使って調べた。長波長モードの場合にはマルコフ近似がよく成立するが、短波長モードの場合にはマルコフ近似は適当でないことがわかった。

乱流境界層における圧力スペクトルのスケージングについて 辻 義之

乱流中の圧力変動の計測について、一様等方にちかい噴流中心軸上、円柱後流の計測をおこない、DNSとの比較をとおり測定制度の検証をおこなった。また、高レイノルズ数乱流境界層における圧力統計量についても報告した。

一様等方乱流にたいする非アファイン粘弾性効果 堀内 潔，寺岡 恒，高木 洋平

高分子添加溶液等の粘弾性流体のDNSに現在主として用いられている構成方程式は、アファイン性を仮定したOldroyd-B方程式である。本研究では、アファイン性の仮定の検証を一様等方乱流で行い、非アファイン性が最も強い場合に最大の抵抗削減が得られることを示し、乱流構造形成過程にたいする粘弾性効果を明らかにした。

4次元乱流 中野 徹，後藤 俊幸

物理では次元を変えることにより、注目する物理現象の理解が進むことが多い。乱流の次元を大きくすると、乱流はシンプルになるかどうかを調べるために、4次元乱流のシミュレーションを行った。同時に、それらの結果を理論的に説明するために4次元乱流の統計理論を考えた。シミュレーションから得られた結論をまとめると、次の通りである。(1) 4次元乱流でのエネルギー伝達率は3次元に比べて大きい。(2) コルモゴロフ定数は4次元の方が小さい。(3) 縦速度微分のskewnessは4次元の方が大きい。(4) 4次元乱流の間欠性の程度は、考える物理量により3次元より強いものもあるし、弱いものもある。散逸率の間欠性は4次元の方が弱いものに対して、縦速度差に関する間欠性は4次元の方が強い。

壁乱流組織構造の生成過程 浅井 雅人

壁乱流構造の生成・維持に重要な役割を果たす低速ストリークの発生・発達と、その不安定性により縦渦列が生まれる過程を2つの基礎実験を通して紹介する。一つは、乱流境界層に壁面吸込みを行なったとき、吸込み領域下流の準層流境界層において残留乱流変動により壁近傍にストリーク構造が生成され、それが不安定性により崩壊する様子を調べた実験である。もう一つは、周期的な人工低速ストリークを用いたストリーク不安定性の実験であり、これまでもほとんど調べられていない分調波数モード(Subharmonic sinuous modes)に注目し、ストリーク不安定によりジグザグ上に重なり合った縦渦が生成される段階から壁乱流の特性が現れるまでを追跡している。

乱流の量子古典対応 坪田 誠

近年、低温の超流動ヘリウムが作る量子乱流と、古典乱流の対応に関心が持たれている。超流動ヘリウムは量子力学的なボース・アインシュタイン凝縮により実現する系であり、循環が量子化された量子渦によって、全ての回転流れが担われるという特徴を持つ。このような量子渦を要素として作られる量子乱流(超流動乱流)は、古典乱流よりも簡単な乱流の雛形を提供できると考えられている。ここでは、ボース凝縮の秩序変数である巨視的波動関数が従うGross-Pitaevskii方程式の数値解析を行うことにより、量子乱流のエネルギースペクトルがコルモゴロフ則を示し、古典乱流との著しい対応があることを示す。

渦輪の運動速度とエネルギー・インパルスの関係 福本 康秀

現実的な太った渦輪の運動との比較に耐えるような速度公式を導出するには、小さなパラータ「渦核半径/リング半径」について3次まで導出すればよいことが経験的に知られている。Navier-Stokes方程式を接合漸近展開法によって解くのが直接的であるが、非線形項の扱いが煩雑で、計算量が膨大である。Lambの方法においては、これを2通りの方法で計算し、片方にNavier-Stokes方程式を適用することによって、計算量を大幅に軽減が図られる。2次の速度場の大半と3次の速度場を求める手続きなしで、3次まで有効な軸対称渦輪の進行速度を導くことができる。こうして、非圧縮性流体中の高レイノルズ数渦輪の速度のSaffmanの公式の次の補正項を導出することに成功した。さらなる手続きの簡略化が可能である。実は、一方のエネルギーの表式は容易に手に入る。「体積一定」および「渦度の分布形を変えない」という拘束条件のもとで、エネルギーのインパルスに関する変分をとるだけで、同じ3次精度の進行速度公式が導けることを発見した。

Burgers-Donaldson-Sullivan の軸対称流のクラス—定常解と非定常解の爆発問題—

大木谷 耕司

地球流体力学的に応用を持つ、軸対称 Navier-Stokes 方程式のある解のクラスについて考察する。定常解についての Donaldson-Sullivan らの結果を振り返り、非定常問題を考える。このクラスと反応拡散系の藤田方程式との解の挙動を比較する。

等方乱流に埋もれた周期運動

木田重雄, 河原源太, Lennaert van Veen

乱流中には、微小攪乱に対して不安定な周期運動が無数に存在する。それらの中には、乱流の特性を表すものとしてでないものがある。ここでは、高対称性を課した定常な数値乱流における複数の周期運動を紹介し、それらの中から乱流の特性を表す(乱流に埋もれた)周期運動を特定する方法について述べる。

決定論的拡散やカオス力学系としての有向グラフにおける不安定周期軌道の役割

宮崎修次

有向グラフの確率行列表現と区分線形次元写像のフロベニウス・ペロン演算子の行列表現を対応させることで、有向グラフの構造を力学系と関連付けることができることを示す。力学量の粗視量の大偏差統計を解明するというカオス力学系の研究手法をグラフ理論に適用する試みを紹介する。簡単な有向ネットワークを例に取り、統計熱力学形式により内在するループを個別に取り出したり、ノードから発する矢印の数の揺らぎを捉えることができることを示す。また、ループ(不安定周期軌道)の周期と密接に関連した再帰時間分布やそれと二時間相関関数やパワースペクトルとの間の関係についても論じる。同様の手法を拡散現象に適用し、弾道的拡散速度の制御変数依存性に悪魔の階段状の形状が現れることを示す。その平坦部は特定の不安定周期軌道に対応付けられる。

ある大自由度カオスの、構成の容易な状態アンサンブル

川崎光宏

近年、大自由度カオス系の巨視的性質を軌道アンサンブルを用いて記述する成果が注目を集めている。軌道アンサンブルを用いる方法は緩和や応答を記述できる利点がある反面、アンサンブル構成に運動方程式の解析を必要とする難点がある。もし軌道アンサンブルでなく状態アンサンブルによる記述が可能ならば、この難点を克服し、ひいては、従来試みられた大自由度カオスの記述につきものであった非線形性と大自由度性の困難を回避することができる。この状態アンサンブルによる大自由度カオスの巨視的性質記述の第一歩として、簡単なモデルにおいて、定常状態の巨視的性質を記述するミクロ状態のアンサンブルを自然測度や時間発展に関する情報を参照すること無く容易に構成することができた。

渦輪の不安定化現象の弱線形解析

服部裕司, 福本康秀

渦輪の不安定化現象について、不安定波の振幅が有限の大きさとなった場合の非線形性の効果を調べるため、弱非線形解析を行った。曲率不安定性を対象とし、振幅方程式を導出した。具体的に係数の値を求め、モードエネルギーが有限の値で飽和する様子を明らかにした。

一様等方性乱流における速度分布の局所平衡相似性

巽友正, 吉村卓弘

Succeeding to the previous papers (Tatsumi 2004, Tatsumi et al. 2004), which dealt with the inertial and dissipative similarities of the one- and two-point velocity distributions of homogeneous isotropic turbulence using the cross-independence closure hypothesis, the local equilibrium similarity of these distributions in the inertial and viscous sub-ranges are worked out systematically. The velocity-sum and velocity-difference distributions are expressed, except for the longitudinal component of the latter, in terms of the inertial normal distributions each associated with the self-energy dissipation rates. These distributions satisfy the coincidence conditions for vanishing distance and the separation conditions for infinite distance. The longitudinal velocity-difference distribution is obtained as a slightly asymmetric and non-normal variation of the inertial normal distribution. The physical significance of the results and the scope for the future developments of the theory to the more complicated turbulent flows are discussed.

エネルギー散逸率の大スケール変動

毛利英明，高岡正憲

コルモゴロフの乱流理論では，小スケールでの統計は，動粘性係数と平均エネルギー散逸率で一意的に決まるとする．これに対しランダウは，局所的なエネルギー散逸率がエネルギー保有渦のスケールで変動し，小スケールでの統計に影響を及ぼすと考えた．私達は，風洞における格子乱流の実験により，局所的な散逸率が大きスケールで顕著な変動を示すことを見出した．その振幅は，相関長のスケールで，平均散逸率と同程度である．このエネルギー散逸率の大スケール変動の性質と，小スケールにおける統計への影響について議論した．

レーリー・ベナル対流における輸送係数の発散

柴田博史

レーリー・ベナル対流は，対流，ソフト乱流，転移領域，ハード乱流の4つの相を持つことが知られている．ソフト乱流相と転移領域相において，乱流粘性係数が発散することが見いだされた (H. Shibata, Physica A 333, 71 (2004); Physica A 345, 448 (2005))．ここでは熱輸送に関係する熱伝導率について報告する．エネルギー流れの2時間相関関数の時間積分を乱流熱伝導率とみなすと，乱流熱伝導率も対流相とハード乱流相において有限の値をとり，ソフト乱流相と転移領域相において発散する．また，乱流熱伝導率の値は対流相で小さく，ハード乱流相で非常に大きい．さらに，乱流熱伝導率の発散の強さは転移領域相で大きくなることがわかった．

動的相関の新しい展開法

藤坂博一

定常なマルコフ的確率過程およびカオス力学系における動的相関(2時間相関関数，大偏差統計特性量)の新しい展開法を提案する．たとえば，カオス力学系では滑らかな確率密度関数が存在しないために，動的相関を時間発展演算子の固有値問題の形に定式化するという方法は実際的ではない．代わりに，オリジナルなMoriの射影演算子法を，考えている力学変数より広い空間への射影へと拡張することにより近似的に用いることができる．近似の程度は，増やす変数およびその数を変えることによって調整することができる．本稿では，2時間相関関数および大偏差統計量を導出する新しい方法について述べる．

乱流輸送における流束の二重構造と流束-勾配関係

森肇

乱流輸送の研究には，レイノルズ応力の渦粘性モデルや混合距離理論など，100年以上続いてきた線形現象論があり，航空力学や気象力学など様々の分野で使われてきた．ここでは，統計物理学の観点から，それら乱流輸送の機構を解明し，流束(運動量流束，熱流束など)と勾配(流束勾配，温度勾配など)と輸送係数との三者間の関係を厳密に定式化できることを示した．

発達した乱流は，ランダムな小さい渦の集団であり，ランダムな小スケールの運動(特性時間 τ_r)と，組織的な大スケールの運動(特性時間 τ_M)とからなっている．したがって，平均流は，この組織的な大スケールの運動からなり，乱流を生成維持している．乱流の揺らぎは，ランダムな小スケールの運動からなり，乱流輸送をもたらすと同時に，揺動散逸定理を成立させている．このように，流体乱流は，二つの異なる運動の二重構造になっているのである．

この二重構造に対応して，流束 J_β は，完全に非線形でランダムな，小スケールの運動部分 π_β と線形で組織的な，大スケールの運動部分 J_β^s との和($J_\beta = \pi_\beta + J_\beta^s$)であることを，射影演算子法を使って導出した． $\tau_r \ll \tau_M$ のときには，この二重構造論から，レイノルズ応力の渦粘性モデルなどの線形現象論を導出できるのである．

ヘノン-ハイレス系の時間相関関数とパワースペクトルの構造

石崎龍二，富永広貴，黒木昌一，森信之，森肇

保存力学系のカオスの典型例としてヘノン-ハイレス系を取り上げ，カオス軌道のランダム化の過程を特徴づけるために，時間相関関数やパワースペクトルの構造と，射影演算子法により導出した非マルコフな線形確率方程式との関係について考察した．ヘノン-ハイレス系の非線形な微分方程式を射影演算子法によって変換した非マルコフな線形確率方程式が，実際の時間相関関数を非常によく再現できることを示し，非線形力の時間相関関数を使って，記憶関数やカオス誘導摩擦係数を数値的に求めた結果について報告した．

Duffing 振動子系のパワースペクトルとカオス誘導輸送係数

富永広貴，石崎龍二，黒木昌一，森肇，森信之

巨視変数の熱揺動の dynamics を定式化するために展開された射影演算子法 (H. Mori, 1965) を拡張して，カオス・乱流の random な揺らぎの dynamics を記述する線形確率発展方程式を導出する手法を典型的なカオス力学系の一つである Duffing 振動子系に適用した．

3 プログラム

6月16日(木) 印は特別講演

- 14:00-14:30 成行泰裕, 羽田 亨 (九大総理工)
局所構造を含む宇宙プラズマ MHD 乱流: 起源と粒子輸送
- 14:30-15:00 佐藤彰洋 (京大情報)
べき乗則変動を作る確率過程とその応用
- 15:20-15:50 上之和人, 金田行雄 (名大工)
くりこみ展開と異常スケーリング—速度勾配の4次モーメントのスケーリング—
- 15:50-16:20 岡村 誠 (九大応力研)
射影演算子法の乱流に対する有効性
- 16:20-16:50 辻 義之 (名大工)
乱流境界層における圧カスペクトルのスケーリングについて

6月17日(金)

- 9:00-9:30 堀内 潔, 寺岡 恒, 高木洋平 (東工大理工)
一様等方乱流にたいする非アファイン粘弾性効果
- 9:30-10:00 中野 徹 (中大理工), 後藤俊幸 (名工大理工)
4次元乱流
- 10:20-11:20 浅井 雅人 (首都大システムデザイン)
壁乱流組織構造の生成過程
- 13:00-14:00 坪田 誠 (大阪市大理)
乱流の量子古典対応
- 14:20-14:50 福本康秀 (九大数理)
渦輪の運動速度とエネルギー・インパルスの関係
- 14:50-15:20 大木谷 耕司 (京大数理研)
Burgers-Donaldson-Sullivan の軸対称流のクラス—定常解と非定常解の爆発問題—
- 15:40-16:10 木田重雄, 河原源太, Lennaert van Veen (京大工)
等方乱流に埋もれた周期運動
- 16:10-16:40 宮崎修次 (京大情報)
決定論的拡散やカオス力学系としての有向グラフにおける不安定周期軌道の役割
- 16:40-17:10 川崎光宏 (新潟大工)
ある大自由度カオスの, 構成の容易な状態アンサンブル

6月18日(土)

- 9:00-9:30 服部裕司 (九工大工), 福本康秀 (九大数理)
渦輪の不安定化現象の弱線形解析
- 9:30-10:00 巽 友正 (国際高等研), 吉村卓弘 (トヨタテクノサービス)
一様等方性乱流における速度分布の局所平衡相似性
- 10:20-10:50 毛利英明 (気象研), 高岡正憲 (同志社大工)
エネルギー散逸率の大スケール変動
- 10:50-11:20 柴田博史 (崇城大工)
レーリー・ベナール対流における輸送係数の発散
- 13:00-14:00 藤坂博一 (京大情報)
動的相関の新しい展開法
- 14:20-14:50 森肇 (九大応力研)
乱流輸送における流束の二重構造と流束-勾配関係
- 14:50-15:20 石崎龍二 (福岡県立大), 富永広貴 (佐賀大医), 黒木昌一 (福岡女子大),
森 信之 (九州共立大工), 森肇 (九大応力研)
- 15:20-15:50 富永広貴 (佐賀大医), 石崎龍二 (福岡県立大), 黒木昌一 (福岡女子大),
森肇 (九大応力研), 森 信之 (九州共立大工)

4 開催日程, 場所

開催日程 2005年6月16日(木) - 6月18日(土)
開催場所 九州大学応用力学研究所多目的研究交流室 (W601号室)
講演数 22件
参加者数 45人

第7回地球流体力学研究集会
「地球流体における波動と対流現象の力学」

研究集会代表者
東京大学 海洋研究所 新野 宏

研究集会の目的

近年の計算機技術の著しい進歩により、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、数値計算出力や衛星観測の膨大なデータを整理し統一的理解を得るのに、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集まり、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。九州大学応用力学研究所は、海洋物理、大気物理、流体力学等に関連した数多くの研究者がいる国内でも有数の研究機関であり、そこで集会を持つことは非常に有意義な事である。

成果の概要

主に大気と海洋中の波動と対流現象に焦点を当てた集会とする。特に、詳しい説明が必要な理論的研究や、室内実験による研究、惑星大気の研究など、特色ある研究発表を行う。プログラムは海洋・大気・惑星大気・室内実験などの研究テーマに分けて構成する。各発表は十分な時間を確保し討論を活発に行う。そして、特に若手研究者に発表の機会を設ける。

講演プログラムと概要

3月13日(月)

13:00-13:10 代表者挨拶

新野 宏(東京大学 海洋研究所)

13:10-13:40 月平均場に見られるPJパターンの構造と力学

小坂 洋介・中村 尚(東京大学大学院 理学系研究科)

Pacific-Japan (PJ)パターンは東アジア夏季の天候に影響する主要なテレコネクションの1つである。Nitta (1987)などでは、PJパターンは熱帯西太平洋(フィリピン付近)での積雲対流活動の変動に伴う加熱偏差に励起されたロスビー波列と考えられているが、その詳細な構造や力学は十分に理解されていない。本研究ではデータ解析を通して、月平均場に見られるPJパターンの構造を明らかにし、その形成要因を考察した。

PJパターンに伴う渦度偏差は、対流圏下層では東西に伸びた偏差の南北ダイポール構造を示し、これは先行研究と整合的であるが、鉛直方向には上層ほど北に傾いており、対流圏上層では3極構造を示した。渦度収支および気候場とのエネルギー変換を調べた結果、この構造の形成には気候場の東西非一様性が本質的に重要であることがわかった。また、様々な領域で同様の解析を行った結果、PJパターンが西太平洋域に存在する大気の力学モードである可能性が示唆された。

気候場の東西非一様性の重要性は、PJパターンがなぜ夏季の西太平洋域に見られるかを説明するだけでなく、モンスーンと亜熱帯高気圧にはさまれた他の領域でも同様のテレコネクションが起こりうることを示唆している。そのような気候場を持つ他の領域についても解析した結果、PJパターンに類似した偏差パターンが確認できた。

13:40-14:10 浅水系における非定常な渦流からの重力波放射—パラメータ走査実験—

杉本 憲彦(名古屋大学 工学研究科計算理工学専攻)、

石岡 圭一(京都大学 理学研究科地球惑星科学専攻)

f平面浅水系において、帯状強制のあるジェット(渦流)の非定常運動に伴う重力波放射をロスビー数(Ro)、フルード数(Fr)ではられる幅広いパラメータ領域での非線形数値実験により調べた。重力波フラックスの Fr 依存性では、 Ro が大きい領域で、古典的な渦からの音波放射理論で予測される Fr のべ

き則が成り立つ一方で、Roの小さい領域でこのべき則は成り立たない。また、Ro依存性では、Roの大きい領域で重力波フラックスは一定であるのに対して、Roの小さい領域で急激に減少した。その一方で、これらのRoの中間の領域では、重力波フラックスは極大値を持った。重力波ソースとその振動数スペクトルの解析により、得られた結果の定性的説明に成功した。

14:10-14:40 夏季北東アジア乾燥域における降水分布とその経年変動

岩尾 航希 (東京大学 気候システム研究センター)

近年北東アジア乾燥域では、深刻な砂漠化が懸念されている他、顕著な温暖化や、1999-2001年における3年連続のゾド(家畜の大量死)など、激しい気候変化にさらされている。この地域における1980年以降の夏季降水量の変化を、定点観測データ、CMAP月平均データを用いて調べた結果、7月降水量が1990年代末期まで、モンゴルの南部から東にかけて顕著に増加していることが分かった。また1999年から2002年にかけては夏季降水量が非常に少ない年が続いており、モンゴル全域で顕著な干魃が起きていた。この干魃は1999-2001年の大規模なゾドに強く影響したことが考えられる。

夏季北東アジア乾燥域の気候場をECMWF再解析データを用いて調べたところ、子午面循環の平均場にモンゴル南部と北部で間接循環が見られた。それに伴い緯度50N付近は、下層で収束帯、降水量も比較的多い領域となっている。夏季降水量の経年変動にはこの収束帯の南北での振動が主要な変動モードとして現れ、上記の変化にも寄与していることが分かった。当日はこれらを構成する要因について発表する。

14:50-15:20 大気のカルマン渦列の形状に及ぼす渦管の繋がり方の影響

野口 宗宏 (九州大学大学院 総合理工学府)

伊賀 啓太 (東京大学 海洋研究所)

冬季、大陸から寒気が流出する際に、孤島の風下にカルマン渦列が二列に並ぶことがある。通常、このような渦列は互い違いに並ぶが、時折、渦列が対に近い配置で並ぶことがある。このような対の渦列は、中立層が山より高い時に、両側の渦列の渦管が繋がることによって、生じるのであろうという樋口・酒井(2005)の仮説を検証するために、気象モデルを用いて数値実験を行い、再現された渦列の様子を詳細に調べた。

この渦列の渦度場は鉛直方向に波状の構造をしており、その位相は、山の風下の中心線上とそれからずれた渦の生じている領域とで逆の方向に傾いていた。この性質は波状構造が内部重力波と考えることで説明できる。対に近い渦列と互い違いの渦列は同じ山の高さで中立層の厚さの設定の中で異なる時間に現れた。これは必ずしも中立層が厚い時に対に近い渦列ができるわけではないことを示している。但し、渦度の構造を詳細に見ると、互い違いの渦列では片方の渦列が片方の渦列の渦管は他方の側の下層に潜って弱まっているのに対して、対に近くなった渦列では上空で両側の渦が繋がっており、これは、樋口・酒井(2005)の構造に関する仮説を支持するものである。

15:20-15:50 対流圏上層にみられた渦列の成因について

前島 康光・伊賀 啓太・新野 宏 (東京大学 海洋研究所)

大気中に発生する渦列に関しては、これまでも多くの観測事例が報告されてきた。しかしながら、それらの発生メカニズムに関しては、データが十分でないなどの理由でほとんど理解が得られていないのが現状である。

本研究では、2005年7月6日の水蒸気画像で確認された対流圏上層の渦列を事例に取り、RSMデータを用いて渦列の発生した環境場を解析し、さらに発生メカニズムを線形安定解析によって調べた。

水蒸気画像によると、渦列は7月6日06UTC頃に発生した。渦列発生前の6日00UTCを初期値としたRSMデータによると、北緯44度、東経143度付近の200hPa面から400hPa面にかけて、東西方向に強い水平シアゾーンが形成されていることがわかった。渦列はこの水平シアゾーンに伴って発生したと考えられる。そこで、東経143度の南北断面の流速を基本場とした線形安定解析を行った。その結果、成長率の大きな不安定モードの特徴が、水蒸気画像で観測された渦列の特徴と良く一致していた。これらの不安定モードのエネルギー解析の結果、基本場の運動エネルギーから擾乱の運動エネルギーへの変換が卓越していた。従って、上層の渦列の発生要因は順圧不安定であると考えられる。

15:50-16:20 中間規模東進波の統計解析

伊ヶ崎 英雄 (九州大学大学院 総合理工学府)

伊賀 啓太 (東京大学 海洋研究所)

中間規模東進波は、Sato et al. (1993)によって発見された中緯度対流圏界面付近で顕著に見られる波動現象である。その後の研究によって、中間規模東進波は中緯度大気で普遍的に見られる現象であ

り、準地衡系の枠組みで説明できる現象であることがわかってきた。本研究では、大気大循環モデルとしてCCSR/NIES AGCMバージョン5.4を用いて標準的な実験を行い、中間規模東進波を再現し、一方でERA40客観解析データを用いた結果と相互比較して、モデルで再現された中間規模東進波の統計的性質を調べた。本研究により、モデルで再現された中間規模東進波に関して、波の振幅がピークを取る高度が観測結果に比べてやや低いこと、波の振幅の値が観測値よりも小さいこと、波の振幅が大きい事例が発現する地域が観測結果とよく一致していること、波の位相構造が南北方向にも鉛直方向にも位相の傾きが小さく対流圏界面に捕捉されていたことなど、従来から知られている特徴とよく一致していたことなどが明らかにされた。

16:30-17:00 Charney-Hasegawa-Mima 方程式の asymptotic model の Hamilton 形式

末吉雅和・岩山隆寛(神戸大学大学院 自然科学研究科)

Charney-Hasegawa-Mima (CHM) 方程式の asymptotic model (CHM-AM) は、CHM方程式(浅水系の準地衡流渦位方程式)で現象の水平スケールが Rossby の変形半径より大きい場合に相当する。CHM-AM は海洋や木星大気(変形半径2000km程度と考えられているが、それが妥当なら)の単純なモデルである。本研究では、CHM-AM を非正準形式の Hamilton 形式で表した。CHM-AM は CHM 方程式において変形半径が0の極限をとると得られるが、CHM-AM の Hamilton 形式は、CHM 方程式の Hamilton 形式(Weinstein 1983)から直接得られないことを示す。Hamilton 形式の利点は、系の擬エネルギー、擬運動量をつくる手順が得られることである。講演では、前半で流体の Hamilton 形式の短い review を行い、後半で CHM-AM の Hamilton 形式について話す。

17:00-17:30 面上の強制2次元乱流における帯状流の東西非対称性のパラメータ依存性

村上真也・岩山隆寛(神戸大学大学院 自然科学研究科)

面上の強制2次元乱流では、東向き流れと西向き流れが南北に交互に並んだ帯状流が卓越することが知られている(Vallis and Maltrud, 1993; Danilov and Gryanik, 2004)。また、この帯状流には東向きの流れの速さが西向きの流れの速さより速く、東向きの流れの幅は西向きの流れの幅より狭いという東西非対称性が現れる。この流れに対応する帯状平均渦度の南北プロファイルは、幅の狭い急な正の渦度南北勾配と幅の広いなだらかな負の渦度南北勾配を交互に繰り返すノコギリ歯状になる(Danilov and Gryanik, 2004)。しかし、この帯状流の東西非対称性の生成メカニズム及びパラメータ依存性はまだ分かってない。そこで、帯状流の東西非対称性を帯状平均渦度の正の南北勾配と負の南北勾配の大きさの比 r で定義し、パラメータ依存性を数値計算によって調べた。渦度勾配比 r が小さいうちは r に比例して増加するが、ある値を境に r に比例して減少した。これは正の渦度勾配幅が強制の長さスケールで制限されていると考えれば理解できた。

17:30-18:00 回転球面上の浅水系乱流における赤道ジェットとその加速メカニズム

北村 祐二・石岡 圭一(京都大学大学院 理学研究科)

回転球面上の浅水系乱流において、回転の効果により赤道ジェットが現れることが Cho and Polvani (1996) によって報告された。彼らは出現する赤道ジェットは常に西向きになると主張しているが、その結果が初期値に依存しない性質かどうかはまだ確かめられていない。本研究では系統的なアンサンブル実験を行うことにより、赤道ジェットの向きと強さが初期値にどの程度依存しうるのがかを調べた。その結果、赤道ジェットの強さの分布はロスビー数に依存していた。ロスビー数が小さな場合には赤道ジェットは常に西向きで、その強度も初期値にあまり依存しないが、ロスビー数が大きくなると、確率は低いものの東向きのジェットも形成・維持されうることが分かった。さらに赤道ジェットの加速メカニズムを調べるために、波によって引き起こされる東西平均流の加速を求めた。西向き加速は主に赤道に向かうロスビー波束によってなされる一方で、基本流が存在する場合には、赤道波が南北に傾くことで基本流を強化するセンスに角運動量が輸送されうることが明らかとなった。

3月14日(火)

9:30-10:00 衛星海面高度より求めた赤道波の振動数波数スペクトル

和方 吉信(九州大学 応用力学研究所)

Matsuno(1966)は、大気や海洋の赤道域に、赤道近くに捕捉される赤道波が存在することを指摘している。従来、海洋では、直接観測による温度場データのラグ相関解析などにより、赤道波はある緯度帯に沿って西進するロスビー波や東進するケルビン波として知られていたが、Matsuno(1966)の示した捕捉波としての赤道波の理論分散曲線に、観測から求められた擾乱の波数・振動数がどの程度対応するかを議論した研究は少ない。そこで、衛星海面高度データを用い、変動成分を最小二乗法により南北モードに展開を行い、次に展開係数を波数・振動数の2次元フーリエ展開し理論分散関係との比較を

行った。第1ロスビー波は理論分散曲線より幾分低い振動数域に大きな振幅があるが、他のモードは分散曲線近くに集中し大きな振幅があることから、赤道近傍の波は赤道捕捉波の性質を有することが観測結果から示された。

10:00-10:30 局所的な混合によって生ずる海洋循環の非線形力学

三寺 史夫(北海道大学 低温科学研究所)

反時計回りの風成循環が形成されている北部とは異なり、オホーツク海南部では時計回りの循環が卓越しており、時には10数Svにも達する。ここでは、このような時計回り循環形成のメカニズムとして、千島列島沿いでの局所的な混合により駆動される熱塩循環を考える。潮流が浅い海峡(すなわち海嶺上)を越えるときに大振幅の内部波が発生・破砕し、中層に低渦位水が供給されるために循環の駆動されるのではないかと、ということである。このような状況を考察するために、海嶺がある2層モデルで、海嶺直上で下層から上層へのエントレインメント(鉛直流速)があるという単純なケースを考えた。鉛直流速が小さい場合には、海嶺上でスベルドラップ平衡による南下流、その西側でロスビー波の放射による時計回り循環、という、線形ブルームの解が得られた。一方、混合が比較的強い場合には海嶺上で強い高気圧性渦が間断なく発生し、西方に伝播して低渦位水を供給する。この場合は平均場においても密度境界面は海嶺とその西側で大きくくぼみ強い時計回りの循環が生じ、非線形性の強い解となった。また、これらの二つの解には、初期条件に依存した多重性があることが分かった。

10:30-11:00 高緯度海域における対流現象：状態方程式の非線形性に注目して

秋友 和典(京都大学大学院 理学研究科)

海水の状態方程式は強い非線形性を持つ。それから生じる性質の一つに、海水の熱膨張率が圧力(水深)とともに増加するというものがあり、サーモバリシティ(thermobaricity)と呼ばれている。この性質は水温が低いほど顕著なため、高緯度海域で発生する対流は、低・中緯度海域でのものとは大きく異なる性質を持つようになる。また、高緯度海域特有の水温、塩分の成層構造がこのような対流を生じさせるもう一つの要因である。冷却によって表層混合層はほぼ結氷点まで冷やされるため、水温は深層の方が高い(不安定成層)。一方、高緯度海域では降水量が蒸発量を上回るため、混合層の塩分は深層より低く、通常は、この塩分構造によって安定な密度成層が維持されている。このような成層構造のもとで、ひとたび不安定な状態が実現すると、沈降する低温な混合層水はサーモバリシティによって周囲の暖かい深層水よりさらに重くなり、対流はどんどん加速される。これは、表層混合層が冬季の冷却によって徐々に厚くなるという中・低緯度での状況とは大きく異なる。南極海域での観測データを用いて、このような対流が発生する可能性やその結果生じる影響について考察した。

11:10-11:40 琉球海流系の力学

中村 啓彦(鹿児島大学 水産学部)

琉球海流系は、亜熱帯循環の西岸境界流の一分枝として、琉球列島東方の陸棚斜面上にある。この海流系は、沖縄本島より北側で海底強化されており、南側で順圧的な構造をもつことが近年の観測により示された。本研究は、このような琉球海流系の形成メカニズムを、数値実験により明らかにすることである。現実的な海底海岸地形と理想化されたそれでの数値シミュレーションを行ない、各々の定常場を2層のPlanetary-Geostrophic方程式系から導かれた移流・波動伝播方程式(1階偏微分方程式)の特性曲線を用いて診断した。その結果、鉛直第1モードの地形性ロスビー波がトカラ海峡での黒潮の沖側で形成され、琉球列島東方の陸棚斜面上を南方伝播することがわかった。つまり、この波は琉球列島東岸に沿って主温度躍層を押し下げるため、それが順圧的な西岸境界流に重なると、上層の北上流は弱化され下層の北上流は強化される。海底強化が沖縄本島より北方でのみ形成される理由は、地形性ロスビー波の南方伝播が、北太平洋内部領域から西方伝播し琉球列島東方の陸棚斜面に補足される鉛直第1モードの惑星ロスビー波の伝播によって阻害されるからである。

11:40-12:10 日本海 cold-air outbreak に準 10 年周期変動をもたらす大気と縁辺海の相互作用

磯辺 篤彦(九州大学大学院 総合理工学研究院)

能登半島沖の気象庁ブイで得た1982年から2000年までの風データを、11月から3月までの5ヶ月間の寒気の吹き出し(cold-air outbreak)時期を選び解析した。寒気の吹き出し周期を含む5~15日の周期帯を選び、各年のウェーブレット振幅を5ヶ月間で平均して経年変化を調べた。結果から、80年代初頭と90年代初頭に強い寒気の吹き出しが頻繁に起こっていたことを示す、顕著な準十年周期が検出できた。ところが、これらの時期は、東アジアの冬季季節風が弱いとされる、北極振動(AO)インデックスの準十年周期変動が正偏差になる時期と良く一致している。JODCが提供する過去100年間の海面水温観

測データと、NCEP/NCAR再解析データから求めた海面気圧分布を用い、東アジア縁辺海における大気海洋相互作用が、冬季日本海の寒気の吹き出しに経年変動をもたらす可能性について検討する。

12:10-12:40 回転系における水平シア流と熱対流との相互作用

古川 祐貴・新野 宏（東京大学 海洋研究所）

回転系における水平シアと熱対流の相互作用について線形論と非線形数値実験によって調べた。

線形論では、平面クエット流の中でどのような熱対流が卓越するのかを様々なテラー数 Ta 及びレイノルズ数 Re に対して調べた。その結果、ほとんどの場合、クエット流の方向を向いたロール状対流が卓越することがわかった。 $0 < Ta < Re^{**2}$ ($Ta > Re^{**2}$) のときには慣性不安定性（安定性）の効果が加わって、臨界レイリー数は減少（増加）することが分かった。また、 $Ta > Re^{**2}$ で Ta が大きいときには、臨界モードは境界付近に捕捉されたセル状の対流となることが分かった。次に、非線形数値モデルによる時間発展計算を行なった。クエット流のもとでは、線形論的に最大成長率を持つロール状対流、ロール状対流がセル状に分かれた状態、北東-南西に傾いたロール状対流 (Yoshikawa and Akitomo, 2003) が、周期的に繰り返すことがわかった。

基本場が南北方向に \sin 型のプロファイルを持つ東西ジェットのもとでは、粘性の存在のもとでは安定な順圧固有モードが、対流からエネルギーを供給されることにより、時間的に発達し、維持されるという興味深い現象が見つかった。

13:30-14:00 無限自由度を持つ現実流体における低次元カオスの出現条件

三村 和男（東海大学 教養学部）

1963年アメリカ気象学会誌に掲載された E.N. Lorenz による「Deterministic Non periodic Flow」と題する論文によってカオス研究の歴史は始まった。たった3変数のみを持つ彼の微分方程式系は、ベナール対流のモデルから導き出されたが、低次元カオス・システム典型としてよく知られたこのローレンツ・システムは典型的ベナール対流の必ずしも正確なモデルではない。むしろ、このローレンツ・システムは閉ループ内熱対流に対してよい対応をもっている。もし、内部流がループに沿った成分のみを持つと仮定しさえすれば、その支配方程式からローレンツ・システムを導出することができる。

我々の室内実験では、現実の内部流はいつもループ管壁に垂直な速度成分を持つことが明らかである。この速度成分は内部流に様々な多様性を与える可能性がある。実際、実験パラメータは共通でも、ある日の実験ではカオス的転回が見られるのに、別の日の実験では見られないことがある。

我々は、連続体として無限自由度を持つ現実の流体において、まるで低次元システムのカオスのような振る舞いが実現する条件を探っている。そのために、室内実験・数値実験・理論的考察など様々な手法を使って、研究を続けている。この研究は、惑星スケールの流体力学とカオスの関連性の諸問題に応用可能であると考えている。

14:00-14:30 室内実験による半球規模地球対流圏の再現

松島 和宏（東海大学連合大学院 地球環境科学）

三村 和男（東海大学 教養学部）

地球の大気循環は傾圧性による不安定波動の励起と惑星ベータ効果による中立波の伝搬の相互作用によって作られると解釈できる。これまでの室内実験は単純化の為にそれぞれを分けて行われてきた。本研究はこの2つの効果を室内実験で同時に取り込む試みである。これがうまくいけば不安定波と中立波の相互作用を室内実験で見ることができる。

まず装置の作成から始まった。順圧ではないため流体層の半径方向の深さ変化とベータ効果は等価ではないが幾分の効果があることを期待し、放物面状の底を持ちかつ側面加熱・中心冷却を行える円筒型水槽を作成した。この装置に温度差をつけて回転させた所、偏西風とその蛇行を見ることができた。次に、鉛直2層の速度計測と子午面内温度計測が行える測定系の開発を行った。結果、鉛直方向の速度シアと半径方向温度差の間に温度風関係と風の回転数依存性が確認できた。実験から力学的データ解析を行うには速度や温度の時系列データが必要なため、それらが測定できる方法と、効率化の為に実験時間の短縮化を模索している。

14:30-15:00 鉛直閉ループの対流の可視化

乙部 直人（福岡大学 理学部地球圏科学科）

鉛直に設置した閉じたループ状の水槽の上半分を冷却し、下半分を加熱することで対流を生じさせる。この実験は自由度が低いと思われるが、いろいろな流れ場が出現し、どのような流れ場が生ずるかについてまだ整理されていない。

また、精密な温度設定のために装置を金属で作ることも多く、流れ場について測定した例はさほどあるわけではない。温度を数点で測定しその結果から平均流の状態を推測することも多い。

そこで、装置全体を透明な素材で作成し、対流の流れ場、および温度場を可視化して流れを直接観測した。その結果、報告されている流れすべてがみられたわけではなく、特にカオス的な反転は起こさなかったが、周期的に反転する現象が生じた。主流が振動しながら周期的に反転する現象は見つかっているようではあるが、三角関数的に反転する現象は見つかっていなかった。

その反転の様子を詳しく見てみると、主流が確かに存在すること、反転する場合には、乱流的な領域が形成されていることなどが確認された。また、乱流的な領域は浮力や重力を受けて不安定な領域にとどまっているなど、不思議な現象も確認されたので、写真やムービーを中心に紹介したい。

15:10-15:40 金星大気大循環モデルの開発とシミュレーション

池田 恒平・高橋 正明(東京大学 気候システム研究センター)

山本勝(九州大学 応用力学研究所)

金星の自転周期は243 日で、地球と比べるとはるかに遅い。しかし雲層では100m/s のスーパーローテーションとよばれる。自転の60 倍もの速さをもつ高速流が存在する。様々な研究がなされてきたがそのメカニズムはまだよくわかっていない。

これまでVenus-like AGCM による研究がある(Yamamoto and Takahashi 2003a, 2003b, 2004)が、より現実的なモデルで検証する必要がある。そこで我々は、これまでの金星GCM とは異なり放射伝達方程式を計算したモデルを開発し数値実験をおこなった。

二酸化炭素、水蒸気の赤外領域の吸収係数はMatsuda and Matsuno(1978)の値をCCSR/NIES AGCM のバンドにあわせて用いた。金星は厚い硫酸の雲層に覆われており、入射する太陽光の大部分は吸収されている。この雲層を成す硫酸エアロゾルの光学的性質はCrisp(1986, 1989)を参照した。等温静止大気から平衡状態に達するまで数万日数値積分した結果、高度70km 付近で35m/s ほどの風が得られたが、観測されているような100m/sの東風は再現できなかった。

15:40-16:10 タイタンの「対流雲」の諸問題

中島 健介(九州大学大学院 理学研究院)

土星の衛星タイタンは地球を上回る面密度の大気を持ち、メタンの凝結による雲が生じる可能性が指摘されてきた。近年の観測はメタンの雲が短時間で変動することを示しており、これは雲が対流性のものである可能性を示唆する。その一方で、大気温度構造や下層のメタン混合比は、湿潤対流の可能性を必ずしも支持しない。さらには、雲生成の前提である凝結核としてどのようなものがあるか、それらがどの程度の効率で働くかも不明である。この発表では、上の諸問題を含めてタイタンのメタン雲について概観するとともに、凝結条件として大きな過飽和度を含めた場合を含め、いくつかの数値実験の結果を議論する。

16:10-16:20 世話人からのお知らせ

(研究集会)

新しい複合材料の研究開発と評価

研究代表者
九州大学応用力学研究所
高雄 善裕

1. 研究集会の目的

応用力学研究所は複合材料強度に関する研究拠点の1つであり、各種複合材料の損傷や破壊の計測、解析、実験を行ってきた。これまで、およそ隔年おきに各種環境下での挙動と強度モデリングについて応用力学研究所・力学専門部会・共同研究集会を開催してきた。この結果、応用力学研究所は複合材料強度分野の研究ネットワークの拠点としても全国的に定着してきており、より一層アカデミックな観点から基礎力学に貢献したい。今年は昨年同様、複合材料の研究開発を取り入れたテーマを設定した。以下に各講演の概要を示す。

1. 低温硬化・真空成形炭素繊維/エポキシ平織物複合材料の室温・高温における静・疲労強度特性とその実用性評価

下河利行(JAXA)、角田義秋(JAXA)、佐伯大輔(川崎重工)、向後儀鎮(本田技研)

本研究の目的は、新開発の低コスト TRK180M/1053 炭素繊維開織平織物/低温硬化・真空成形エポキシ複合材料について、室温および110℃までの環境下における静強度と疲労強度を明らかにし、供試材料の実用性を評価することである。静試験では、平滑試験片と有孔試験片を用いて、引張および圧縮の機械的特性に及ぼす温度の影響を調べた。疲労試験は、応力比 $R = \text{最小応力} / \text{最大応力}$ と定義し、有孔試験片を用いて $R=0.1$ の引張疲労試験、 $R=10$ の圧縮疲労試験、および $R=-1$ の引張 - 圧縮疲労試験を室温および110℃環境下で実施し、S-N 関係を導いた。同時に、CCD カメラ式顕微鏡とマイクロ X 線 CT を用いて、損傷の様子を観察した。得られた試験結果により、供試材料は十分な実用性があると評価できた。

2. FRP船体スカーフ補修接合部の実働波浪荷重下での強度について

千秋貞仁、櫻井昭男(海上技術安全研究所)

現行 FRP 船の実働波浪中強度余裕確認の観点から、ミッドシップ船底キール位置における船殻用 FRP 材を対象として強度試験を行った。試験片は短冊型 MR 積層材で、補修接合形態の一例として選んだスカーフ接合継手2種類と、強度比較用の母材とした。波浪荷重は船体運動計算による船体中央縦曲げモーメントの応答関数と当所発行の実航行海域の波浪発現頻度テーブルを用いて作成した。試験荷重は計算値の20倍の荷重振幅で、縦曲げモーメントの発生確率密度による個数を順次増加・減少する順に並べて繰返し作用させた。また、母材と補修基準に準じるスカーフ接合継手材については一定荷重疲労試験も行った。以上の試験の結果から、小型FRP船体のスカーフ補修接合部の実働波浪荷重下での安全率評価を行った。

3. Zanchor-CFRP の層間破壊じん性およびはく離疲労き裂伝ば特性

中島亨成(京大・院)、北條正樹(京大・工)、田中基嗣(京大・工)、安達泰治(京大・工)、
日下貴之(立命大・理工)、福岡俊康(三菱重工業)、石橋正康(シキボウ)、
近藤俊作(コルベンシュミット)、曾利田直樹(コルベンシュミット)、柳澤平(広大)

ブリフォームに特殊な針を突き刺すことで炭素繊維を面外方向にも配向させる新技术(Zanchor)を適用した Zanchor-CFRP に対して、層間破壊力学特性を評価するためモード I およびモード II の層間破壊じん性試験およびはく離疲労き裂伝ば試験を行った。その結果、Zanchor を適用していない CFRP に対して Zanchor を適用した CFRP は、破壊じん性値が大幅に増加し、また、疲労き裂進展の下限界値も大幅に増加することを明らかにした。微視的破壊機構を検討することにより、その強化機構についても検討した。さら

に、インターリーフ・インターレイヤ等の樹脂による層間強化材との静的・疲労特性を比較することで、Zanchor の優れた強化効果を評価した。

4. ファスナー構造健全性に対する自己診断技術開発の概要

肖 毅(JAXA)

本研究では、ジョイント構造の健全性診断を簡易に実施するために、外付けの複雑・高価なセンサシステムを設置を必要とせず、既設ボルト継手自らが診断機能を持つようなスマート継手設計を提案した。この仕組みの基本は、面圧損傷の面外変形で生じたボルトの拘束抵抗の力学効果を利用することによって、面圧損傷を同定することである。今回は、技術検証のために実施した種々試験結果や検知メカニズムの考察などについて報告する。

5. 短繊維強化プラスチックの電気的機能の応用

黄木景二(愛媛大)、井上宏樹(愛媛大院)、岡部永年(愛媛大)

短繊維強化プラスチックは連続繊維強化プラスチックと比較して強度・剛性で劣るものの成形性に優れ、コストも低い。したがって高い機械的特性を要求されない民生用品では短繊維を熱可塑性樹脂と混合し、射出成形やプレス成形で作ったFRPが使用される。このような短繊維強化プラスチックには電気的特性などの機能を要求されるものもある。ここではリサイクルCFRP粉砕片とABS樹脂のコンパウンドおよびCFRP粉砕片またはバージンのCFとPES樹脂のコンパウンドを射出成形により作成し、前者については機械的特性と電磁波シールド特性を、後者についてはジュール発熱特性を調べた。

6. フェノールフォーム複合材をコアとするサンドイッチはりの成形技術及び評価

下相馬充(日大院)、荘司明子(日大)、邊 吾一(日大)

熱硬化性のレゾール型フェノール樹脂は、強化繊維への含浸を十分に行うためには粘度が高く、水を加えて粘度調整するばかりでなく、成形時に縮合水が生成される。この水分が硬化時に蒸発し、ポイドとなるという問題があり、樹脂の改質や、薄板での引抜成形条件の検討などが行われている。そこで、逆の発想から母材を発泡させたフェノールフォームとし、ガラス繊維を強化材としたフェノールフォーム複合材料(以下 PFC)の引抜成形法を確立してきた。加工性としては、木材のように切ったり、釘やネジで接合したりすることも可能な新素材である。これらをふまえて、PFC をコア材とし、フェノール GFRP あるいは CFRP を表板としたサンドイッチはりの成形する手法を開発した。

7. プリフォームを用いた射出成形法によるフェノール複合材の開発と引張特性

丹野寿一(日大院)、邊 吾一(日大)、後藤卒土民(材料プロセス研)

大量の水分を含んだレゾール型の液状フェノール樹脂は成形時に体積の 20%以上の空洞、水分子を有する。ノボラック型フェノール樹脂の加熱溶融射出成形法では水を用いないが、マトリックスと強化繊維(主にガラス繊維)と予備混合し同時に射出するため、繊維破損により長繊維の形態による強化機構は望めない。本研究では、この両者の問題点を解決すべく長繊維強化材を利用した射出成形技術を確立し、最大の特徴である難燃性を損なわずに、マトリックスの緻密化を実現させて、十分な構造強度を有するフェノールガラス繊維複合材料を成形し、その引張特性を求めた結果について報告する。

8. Outline of National Project on Advanced Materials & Process Development for Next Generation Aircraft Structures

Y. Yamaguchi R&D Institute of Metals and Composites for Future Industries

The research and development project on advanced composite materials & process development for next generation aircraft structures has performed since FY2003 as a 5-year project, sponsored by the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) in Japan. This project aims to develop innovative lightweight materials & process technologies for civil aircraft structures and consists of 3 technical areas, radiation-curing technology of polymer matrix composites (PMC) structures, structural health monitoring (SHM) technology of PMC structures, and advanced magnesium alloy technology. This paper introduces briefly the activities and typical results up to FY2004 of the project.

9. イントラハイブリッドFRPのハイブリッド効果

加藤智之, 劔持 潔, 鮑 力民(信州大学)

ガラス繊維(GF)とカーボン繊維(CF)の含有割合をいろいろに変えたイントラハイブリッド材とCFの含有率を厚さ方向で変えた傾斜イントラハイブリッド材を作製し、静的曲げ強度とクリープ試験を行い、ハイブリッド効果を明らかにした。その結果、静的曲げ試験においてはCF100%層を最外層に積層することによりCFRPに比べてCFの使用量が半分にもかかわらず見かけの曲げヤング率はほぼ等しいこと。また、クリープ荷重下においては単一強化FRPよりイントラハイブリッドFRPの方がクリープ寿命が大きいことが分かった。この結果より地球環境保全にも大きく貢献するものと考えられる。

10. 低コスト複合材構造製造技術の開発

永尾陽典(JAXA 複合材技術開発センター)、岩堀豊(同)、
中村俊哉(JAXA 航空プログラムグループ)、中道二郎(同)、石川隆司(同)

複合材構造の製造コスト削減は、航空機への大幅適用に向けて解決すべき必須な要件である。多くの複合材製造手法のなかでもRTM(樹脂含浸成形)は材料、製造コストを共に削減できる大きな可能性があると考えられている。また、複合材の層間特性の改善は構造の軽量化と共に信頼性を向上させる有効な手段となるが、層間強度を向上させる手段としてZanchorと称する技術が提案されている。またこの手法は厚板の樹脂含浸にも有効とも考えられている。そこで、RTMとZanchorを組み合わせた複合構造の製造研究と、RTMによる航空機構造の実証方法に関する研究がJAXAの国産旅客機開発に関する研究として行なわれている。ここではプログラムの概要について報告する。

11. 衝撃損傷を受けたCarbon/Epoxy 複合材料積層板の圧縮疲労破損機構について

河野泰久(九大院)、久能和夫、宇田暢秀、小野幸生、永安忠(九大工)

複合材料積層板は面外衝撃荷重を受けると内部に損傷を生じ、圧縮強度や疲労寿命が大きく低下するため、重要な設計パラメータとなる。損傷の進展メカニズムを解明し、材料の損傷許容性を評価するために、本研究では衝撃損傷を受けた炭素繊維エポキシ複合材料積層板の準静的圧縮試験及び圧縮疲労試験結果について述べる。また、衝撃損傷を円孔で模擬した解析モデルについて行った有限要素解析結果と、実験結果との比較検討を行い、破壊に至るまでの損傷進展機構について考察する。

12. PLA/PCL ポリマーブレンドの力学特性に及ぼす添加剤の影響

高山哲生(九大院)、東藤貢(九大・応力研)、新川和夫(九大・応力研)

互いに非相用である生分解性樹脂PLAとPCLのブレンドの作製において、相溶性を改善するためにLTIを添加した。異なるLTI添加量を有するPLA/PCLブレンドの力学特性を評価するとともに、破壊挙動に及ぼすLTI添加量の影響について調べた。き裂発生時のJ積分値 J_{in} と試験片の破断による平均的破壊エネルギー J_f は、どちらもLTIを1wt%添加することによって大幅に増大した。破壊のメカニズムに及ぼすLTI添加量の影響を調べるために、SEMを用いて破面を観察した。LTIの添加量が増加すると、LTI添加による反応生成物の界面活性剤的な効果で球晶PCLのサイズが小さくなり、PLAとPCLの分子束の絡み合いが促進される。その結果、空孔の形成が抑制されるとともに塑性変形が大きくなり、破壊特性が改善されることを確認した。

13. 高速変形下におけるCFRP 構造部材の力学特性評価

西脇 剛史(株式会社アシックス スポーツ工学研究所)

近年、スポーツ用具の設計に対しても繊維強化プラスチック構造物の設計精度を向上させるために、動的弾性率や動的強度といった設計因子の重要性が認められつつある。本研究では、CFRP 構造部材の引張り、圧縮、座屈、および、円筒横圧縮負荷に対する力学評価をsplit Hopkinson 棒法により行なった。負荷中に発生する供試体の振動を取り除くため、入射波にはランプ波を用いた。得られた応力-ひずみ線図より、初期ヤング率と強度のひずみ速度依存性、ならびに、off-axis 試験片に対する形状依存性についての検討を行なった。最後に、既存の破壊則の適用に関する考察を行ない、その適用の可能性についての検討を加えた。

14 . Processing and characterization of graphite nanofiber reinforced aluminum composite

J.H. Jang and K.S. Han (POSTECH)

The graphite nanofibers (GNFs) reinforced aluminum metal matrix composites were fabricated successfully through conventional powder metallurgy routes. The mixing conditions were established by microhardness tests and microscopy observations. The high density of composites could be achieved by hot isostatic pressing (HIP). As results of the mechanical tests, which are microhardness and compression tests, the optimal contents of nanofibers were determined. The physical properties of the GNF-Al composites were measured by thermal and electrical transport tests. The results of physical tests indicated that nanofibers give reasonable promise of being successful in functional nanocomposites. This preliminary research may help to propose the design and the fabrication of the functional metal matrix nanocomposites.

15 . Debonding effect on vibration control of the active constrained layer damping in the shell models

H.S. Seonghyun and H.C. Park (POSTECH)

Active constrained layer damping (ACLD) treatments have been widely studied to improve vibration control of structural behavior. The ACLD method consists of the viscoelastic damping material (VEM), the piezoelectric sensors/actuator and host structure. It is assumed that the VEM which is sandwiched between the piezoelectric actuator and a host structure is perfectly bonded onto the surface of the host structure. However, debonding may occur between the VEM and piezoelectric actuator or piezoelectric sensor/actuator and the host structure. It may affect the control efficiency or the energy dissipation of the VEM, which leads to an unstable closed loop control system. Purpose of this study is to investigate the effect of debonding between layers of the structure.

16 . Off-axis creep recovery behavior and its modeling for unidirectional CFRP laminates at high temperature

M. KAWAI (U. of Tsukuba)

Effects of loading history on the creep strain recovery behavior of unidirectional carbon/epoxy composites under stress-free conditions at high temperature are examined. To observe the creep strain recovery upon complete unloading just after a single off-axis loading of virgin specimens, creep tests are first performed for five hours on plain coupon specimens with various fiber orientations: $\theta = 10, 15, 30, 45^\circ$. Creep strain recovery responses are clearly observed in all kinds of off-axis fiber orientations tested. The creep strain recovery rate tends to vanish as the axial strain decreases. A part of the axial strain developed by the prior single loading eventually remains, which indicates that a certain amount of inelastic component has been involved by the total strain due to the prior load. Then, to elucidate the effects of loading history on the off-axis creep strain recovery behavior, the cyclic recovery tests with intermittent stressing are performed at the same test conditions. The test results reveal that the amount of the off-axis creep strain recovery of the unidirectional system is governed by the age hardening of the matrix material and it is also affected by a softening due to cyclic loading.

17 . 宇宙望遠鏡用超高寸法安定性CFRPの開発と評価

尾崎毅志 (三菱電機)

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) に代表される炭素繊維強化複合材料は、軽量で高強度・高剛性かつ低熱歪みという優れた熱機械特性を有しており、宇宙の分野では早くから人工衛星の構体やアンテナ、太陽電池パドル等に積極的に適用されてきた。近年、高熱伝導のピッチ系炭素繊維や吸湿の少ないシアネート樹脂のようなユニークな特徴を持つ新たな基材が実用化され、宇宙用としてより高いパフォーマンスを持つ複合材料が実現可能となった。ここでは、光学レベルのきわめて高い寸法安定性を要求される宇宙望遠鏡構造に対する炭素繊維強化複合材料の適用開発において、0.01ppm/Kレベルの評価精度を有する熱膨張率評価装置や長期的に安定した測定が可能な吸湿変形評価装置の開発を行った結果について報告する。

18. グリーンコンポジットの研究開発と力学評価

合田公一(山口大)

強化材に代表的な高強度天然繊維であるラミー麻繊維を、母材に生分解性樹脂をそれぞれ用い、構成素材のすべてが植物由来材料である、いわゆるグリーンコンポジット(Green Composites1))の創製を行い、さらにこの材料の高靱化について検討した。その結果、ラミー麻繊維を予めマーセル化処理することにより、グリーンコンポジットの大幅な靱性改善効果が、引張特性および衝撃特性において発現されることが判明した。また、マーセル化されたラミー麻グリーンコンポジットの衝撃エネルギー吸収能はGFRPを上回ることも確認できたので報告する。

19. CFRP 積層板の機械継手の疲労強度とその損傷進展

清家聡(九大院), 高雄善裕, 汪文学(九大, 応研)

CFRP 積層板ピンジョイントの疲労に関する過去の研究としては疲労荷重下での損傷進展とボルト締め付けの関係を調べた報告などがある程度で一般に少ない。そこで本研究では CFRP 積層板のピンジョイントにおける引張疲労破壊機構の解明を行う。具体的にはピンジョイントの静的試験と疲労試験を行い、両者の破壊断面解析から両破壊機構の関連を調べる。また疲労サイクル数と損傷進展挙動の関係を明らかにする。静的負荷では負荷点から数プライ離れた繊維キンキング、疲労では接触面の崩壊がそれぞれ起点となる違いが明らかになった。

20. 航空機構造におけるスキン-スティフナ界面の接着はく離の進展シミュレーション

棚橋洋佑(東北大・院)、岡部朋永(東北大)、関根英樹(東北大)

本研究では、スキン-スティフナ界面に生じる接着はく離進展を対象にした数値シミュレーション手法を提案する。本手法では、有限要素解析にもとづき仮想き裂進展法によってエネルギー解放率を算出し、この情報をもとに接着はく離の進展を模擬する。特に、はく離の進展に伴う形状の変化を要素自動分割にて処理しているため、任意形状の接着はく離の進展シミュレーションが可能である。本数値シミュレーション手法に基づき、スキン-ブレード型スティフナ界面に生じる接着はく離の進展シミュレーションを行い、スティフナ形状が接着はく離の進展におよぼす影響について議論する。

21. 航空機翼端部を対象とした構造ヘルスマonitoringに関する数値解析

飯笹智久(東北大・院)、岡部朋永(東北大)、関根英樹(東北大)

本研究では、埋め込みFBGセンサより得られる反射光スペクトル情報を利用した、航空機翼端部におけるスキン-ブレード型スティフナ間に生ずる接着はく離の同定手法を提案する。本手法では、まず、ペナルティ関数法におけるペナルティ係数を設計変数として利用し、接着はく離位置の同定を行い、次に、その位置情報を基に接着はく離形状の詳細な同定を行った。同定に用いられる、反射光スペクトル情報としては、ピーク波長の変化量および反射光スペクトル形状の2通りを用いている。上記の提案手法により、同定を行ったところ、十分な精度の同定結果を得ることが出来た。

22. A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads

N. Hu, Y.Zemba and H.Fukunaga (Tohoku U.)

In this paper, we have proposed a new cohesive model to stably simulate delamination propagation in composite laminates under transverse loads. In this model, we set up a pre-softening zone in front of the original softening zone. In this pre-softening zone, the initial stiffness is gradually reduced as the interface strength decreases. However, the onset displacement for starting the real softening process is not changed in this model. The energy release rate for determining the final displacement of complete decohesion is not changed too. This cohesive model is implemented in the explicit time integration scheme for evaluating the delaminations. Also, a stress-based criterion is employed for judging various in-plane damages, such as matrix cracks, fiber breakage etc. Moreover, two examples are employed to illustrate the validity of the present method. The first example is a square cross-ply GFRP plate with 3 layers under the quasi-static transverse load, and the second one is a square pseudo-isotropic CFRP laminated plate under the low-velocity impact. The experiments are carried out to verify the numerical results of the present model.

3.まとめ

複合材料に関する集会は今回で9回目であり、大学、国立研究所、企業から22件の講演発表があり、活発な討論が行われた。韓国 POSTECH から2件の発表もあった。各研究の詳細は平成18年1月発行の応用力学研究所研究集会講演論文集17ME - S5「新しい複合材料の研究開発と評価」をご覧ください。平成18年度は平成19年1月初旬に、強度及び破壊のモデリングという視点の研究集会を開催したいと考えている。

研究集会「水波と浮体の相互干渉に関する力学」

研究代表者
大阪大学大学院工学研究科 高木 健

1. 研究目的

船舶や海洋構造物周りのいわゆる自由表面流体力学では水波と浮体の相互干渉を知る事が重要である。この問題に対するアプローチとして大別すると、数理解析、数値解析、実験解析の3者が考えられる。近年、数値計算技術の発達に伴い数値解析手法によるアプローチが飛躍的に発展している。特に若手の研究者は大規模な数値計算を実施して目覚ましい成果を挙げている。しかし本来水波と浮体の干渉問題では数理解析によるアプローチが上手くいく場合が多いことが知られており、従来の研究では数理解析によって、多くの成果が得られている。実験解析はこれらの2つのアプローチに対して相補的に行われ、この分野の健全な発展のためにはこの3者が調和して発展することが望まれている。

本研究集会は、数理解析や実験解析に豊富な経験と知識を持つ研究者と大規模数値計算を精力的にこなす若手研究者が集い、アットホームな雰囲気の中で本音の議論を行い、今後の研究にシナジー効果をもたらすことを目的とする。具体的には、最近の研究成果の Review、進行中の研究の情報交換などを通して、今後の研究進展の方向や課題などに関して緊密な討議を行う。

応用力学研究所の船舶海洋工学グループは、従来から水波の非線形問題、水波と浮体の相互作用を得意分野として研究を行っており、過去においても、「船体運動理論研究会」という少人数での研究会を主催していた。これを発展的に引き継いだ研究グループとして、申請代表者は 13,14 年度に応用力学研究所共同研究(研究集会)「自由表面流体力学に関する数理解析」を 15,16 年度に「浮体の流体力学に関する数理解析」を主催した。これらの研究集会ではテーマを数理解析に絞って一定の成果を得た。

昨年度の研究集会の参加者から本年度も同様のテーマでの研究集会開催を望む声が大であったので、本年度も引き続き応用力学研究所で本研究集会を開催することを企画した。本年度の研究集会では、海外から 3 名の参加者があり、国際的な拡がりを持つこともできた。また、(社)日本船舶海洋工学会西部支部の協賛を受け、研究集会参加者募集における、メール等での宣伝に便宜をはかってもらった。

2. 開催日時, 場所

開催日時：平成 17 年 10 月 14 日(金) 13:00 ~ 18:00
10 月 15 日(土) 9:00 ~ 12:30

開催場所：九州大学応用力学研究所西館 6 階
共同利用セミナー室(606 号室)

3. 研究集会の内容

この研究集会では大まかに分けて下に示す 3 つのテーマをコアテーマとし、参加者による従来研究成果の Review、現在直面している問題点の提示、新規研究成果の発表をおこなった。

- 超大型浮体式海洋構造物の流力弾性問題(弾性膜に覆われた自由表面流れ, 超多数浮体の相互干渉)
- 船舶や海洋構造物と波浪との干渉問題(界面物体の造波と波動の伝播)
- 浮体の水面衝撃問題(水, 空気, 弾性物体の相互干渉)

以下には具体的に行われた講演の概要を示す。

1. Time-Dependent Linear Wave Scattering for a Circular Shallow Plate

Michael MEYLAN (Auckland University, New Zealand)

The time-dependent linear wave problem can in theory be solved by an expansion in eigenfunctions. The eigenfunctions in turn are nothing more than the standard single frequency solutions for which extensive methods of solution have been developed. However, implementing the solutions numerically is complicated and for this reason it is natural to concentrate

on the simplest situations. In this talk, I considered the problem of a circular elastic plate floating on shallow water. For this problem the single frequency solution is very straight-forward to compute and can be reduced to solving a four dimensional matrix system. The time-dependent solution is then found by expanding the solution in terms of the single frequency solutions. To calculate the coefficients in the expansion we require a special inner product which in turns is derived from an energy argument. Formally this means that the operator is now self-adjoint and allows us to use Hilbert space theory to write down an expansion. Once the expressions for the time-dependent problem have been written down the numerical calculation of the time-dependent motion is not computationally challenging. We presented some example calculations which showed the effect of an incident plane wave on circular elastic plates of various properties.

2. Wave Drift Force in a Two-Layer Fluid of Finite Depth

柏木 正(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

Based on the momentum and energy conservation principles, a compact calculation formula is analytically derived for the wave drift force on a 2-D body floating in a two-layer fluid of finite depth. In a two-layer fluid, two different wave modes (the surface-wave mode with longer wavelength and the internal-wave mode with shorter wavelength) exist not only in the incident wave but also in the body-scattered wave, and these wave characteristics are properly incorporated in the obtained formula. It is noted that, unlike the single-layer case, the wave drift force can be negative in the incident wave of surface-wave mode, if the transmitted wave with internal-wave mode is large. Numerical computations are implemented for a Lewis-form body by means of the boundary integral-equation method with Green's function for the two-layer fluid problem. The effects of density ratio, interface position, and body motions on the wave drift force are studied, and some important features are found for two-layer fluids.

3. Hydrodynamic forces on a two-dimensional multi-hull structure in waves

高木 健(大阪大学大学院工学研究科)

The diffraction and the radiation problem of the two dimensional multi-hull structure is investigated. To obtain this result the scattering matrix theory is applied. The scattering matrix theory is widely used to analyze the wave interaction problem in various scientific fields. The research is focused on the zeros of the wave exciting force and the near resonance, which occurs both in the diffraction problem and the radiation problem. At the zeros of the wave exciting force, the wave exciting force for the overall structure is zero while each demi-hull gets the wave excitation. At the near resonance frequency, the amplitude of traveling wave between adjacent demi-hulls becomes very large and the demi-hulls get very large wave force. A number of simple equations for representing the hydrodynamic properties of the multi-hull structure at the zeros and the near resonance frequency are obtained. The numerical examples show that these simple equations well explain the hydrodynamic forces as well as the wave system among the spaces between the demi-hulls.

4. A Strip Method for a Ship Obliquely Moving in Waves

Faizul Amri Adnan(広島大学大学院工学研究科学生)

Lateral drift occurs due to the effects of wind forces and/or wave drifting forces in ships sailing in actual seas. It is important therefore to investigate the influence of lateral drift on seakeeping performance to attain a rational design for ships. The velocity potential is expanded in asymptotic series in power of lateral speed parameter τ , defined by $\tau = v_0/g$ where ω refers to the frequency of wave encounter, V_0 denotes the lateral velocity assumed to be sufficiently small, and g the acceleration gravity. By combining this technique with the strip method, two sets of motion equations of all hydrodynamic force coefficients for ship seakeeping are derived. The first set is for ships without lateral drift which is completely similar to the equations in the New Strip Method, and the second set is for additional motions induced by lateral drift. It is found that all ship motion modes except surge are coupled when the ship drifts laterally in waves.

5. Numerical Simulation of Violent Sloshing by CIP Method with Experimental Validation

Kishev Zdravko(九州大学大学院総合理工学府大学院生)

Evaluation of sloshing loads is a key point in the design of ship liquid cargo tanks since when the tank is excited at

near-resonance frequencies, violent motions of the liquid can occur. This implies large impact pressures and resulting additional forces on the structure, which could possibly lead to structural damage or ship capsizing. In this paper a new CFD simulation approach is used to challenge the sloshing problem. The method can treat simultaneously liquid, gas and solid phases. It is essentially a variation of the CIP method with a recently developed CIP-CSL3 scheme for capturing sharply the gas-liquid interface. Results by the original CIP method are also presented. Computations for pressure time histories and free-surface profiles in a 2-D rectangular tank are compared to experimental results. Several frequencies and several filling heights are investigated.

6. Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic tanks

Yonghwan Kim (Seoul National University, Korea)

Sloshing flows in two- and three-dimensional prismatic tanks are considered in the present paper. A finite difference method is applied for simulating violent sloshing flows and impact occurrence. The computation focuses on the global flow and assumes a single-valued free surface profile. For the simulation of impact occurrence near sloping boundaries, the concept of a buffer zone, previously used for impact simulation on the tank ceiling, is extended to sloping boundaries near the tank ceiling. For validation of the present numerical method, a comparison is made between the computational results for two-dimensional tanks and available experimental data, for which favorable agreement is shown. It is observed that the application of a buffer zone and a time-averaging scheme mitigates the sensitivity to grid resolution and time segment. Impact pressures on sloping boundaries and the tank ceiling for three-dimensional tanks are then compared with the results for two-dimensional tanks, which show higher peak pressures for the case of three-dimensional tanks.

7. CFD Simulation of 3-D Water-Entry

胡 長洪(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

In this research, we study the dynamics of three-dimensional water entry by means of CFD simulation. Our research interest is the cavity dynamics associated with a complicated 3-D body when penetrating into a free surface. Such water entry problem can be found in some ocean engineering applications, such as accidental dropping of an object from the deck of a platform. In the case, we need to know if such accidentally dropping body can hit the important device installed on the seabed. Our CFD method to challenge this 3D water entry is a CIP based Cartesian Grid Method.

In this presentation, the numerical method is briefly introduced at first. Then an experiment for validation of the numerical code, which is about a cylinder dropped from air with different angles between the cylinder axis and the still free surface, is described. The dropping cylinder event can be divided into 3 phases. The first is the free-fall phase that describes the cylinder moving in air. The second is the water-entry phase that represents the cylinder penetrating the free surface. The third is the submerged phase that means the cylinder fully submerged in the water. The water-entry phase is most complicated hydrodynamic process, which is the target of this research. In this phase, the air cavity formed behind the cylinder and its dynamics are most important phenomena to be predicted. Numerical simulations on the water entry phase for the experimental problem are carried out. Comparison on variation of the air cavity and motion of the cylinder between the computation and the experiment are made.

8. A CFD Simulation of Dam Breaking by CCUP Combined with Multigrid Method

西 佳樹(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

In order to achieve favorable seakeeping performance, physical phenomena that involve strong impacts due to water clashes with a ship need to be clarified as a multiphase (liquid, gas, and solid) flow field. From this viewpoint, this study concerns a CFD method in which the CIP (Constrained Interpolation Profile) scheme is adapted for calculating advections of momentum, and density, and for capturing a fine structure of free surface. One of focuses of the present work is a solving procedure of a linear system (a simultaneous equation in numerous dimensions). The present work utilizes the multigrid method (MG) as a fast solver, and as a preconditioner in a Krylov subspace method, for solving a linear system derived from a finite-differentiation of a pressure Poisson's equation. This is because computing accurate pressure field is indispensable for estimating hydrodynamic forces acting on a ship, and because a robust solver is necessary especially for solving a

pressure Poisson's equation in a multiphase flow field that contains various values of fluid density (The density of water is about 1'000 times larger than that of air). The developed CFD method is applied to a free surface problem that involves strong water impacts. The result obtained reveals that numerical calculations using the present method can fairly well reproduce free surface variations, and time histories of the measured pressure. The analyzing of iterative operations demonstrates that the MG is able to contribute the improvement of the robustness. Namely, the developed linear system solver is able to converge solutions well even just before, and just after an impact phenomenon.

9. Computation of Free-Surface Flows and Fluid-Object Interactions with the CIP Method Based on Adaptive Meshless Soroban Grids

滝沢研二(海上技術安全研究所耐航・復原性能研究グループ)

近年、船舶においても大波高中での CFD の必要性が出てきており、自由海面を含む流体中での流体構剛体連成問題に対する需要が高まってきている。CIP(Constrained Interpolation Profile/Cubic Interpolated Propagation)法ではこのような問題に対して直行格子を用いたアプローチを行ってきた。近年複雑形状や複雑海面を効率よく捉えるためにソロバン格子という手法が開発された。この手法は格子間隔を狭くすることで解像度を上げることができる手法の一つである。しかし通常格子間隔を狭くした場合、それに伴い時間刻みが制限される。そこで格子間隔に時間刻みが制限されないように、移流項には semi-Lagrangian 法、拡散項にはクランク・ニコルソンを採用した。クランク・ニコルソンは陰解法で CIP の微分値を利用しない場合、ソロバン格子では一部に線形補間を利用しなければいけなくなる。ところがここに線形補間を使うだけで解全体が悪くなることがわかった。そこで本手法では一回の繰り返しにおける前の微分値を利用した preconditioner を使って解を収束させる手法を提案した。これにより、時間刻みの大きなままで CIP を利用し時間刻みを細かくした陽解法と同程度の精度で計算することができた。また圧力項の陰解法にも同様の手法を採用しソロバン格子全体を CIP 補間のみで構成することができた。また繰り返し数は3回程度で十分であることがわかった。

10. A Simulation of Tidal Current and Ecosystem in Ago bay and its Consideration

正田信治(大阪大学大学院工学研究科学生)

我が国の内湾は特徴ある閉鎖性海域ゆえの静穏から古くから海上交易や漁場として多くの恩恵をもたらし、人々にとって身近な存在であった。英虞湾も代表的な閉鎖性内湾のひとつだが、近年では外海との海水交換があまりされないために貧酸素水塊や赤潮の発生を引き起こしている。このような背景から本研究では、3 次元数値シミュレーションモデルから海水流動・生態系特性について調べた。そして現況特性を把握した上で改善方法として海水流動の観点から位相差を考慮した海水交換の活性、生態系の観点から上下層海水の入れ替えによる貧酸素水塊の減少の評価を行い、水環境改善に関する方策を挙げている。

11. Experiment of Motions of a 2D Floating Body with Shipping Water

末吉 誠(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

従来型のポテンシャル理論による運動推定計算では挙動の把握に困難が伴う甲板水の打込みを伴う 2 次元の浮体運動について数値計算と実験結果の比較を行った。数値計算には粒子法(MPS 法)を用い造波機運動のみを与えることで過渡状態から反射波などの影響も全て取り入れた時間領域計算を行い、その浮体運動計算に対する可用性について検討を行った。その結果、場合によっては実験・計算結果に定性的な一致をみたものの、現状では定量的な推定、特に漂流力の推定や打込み水挙動について不十分な計算結果となり、より高解像度な計算や流体力の各成分に関する詳細検討などによる確認作業の必要性が認識された。

以上の講演における討議以外にも懇親会や休憩時間に活発な討議が行われ、少人数(本年度は従来より多少参加人数が増えたが)による集中的、且つ本音での議論を十分に行うことができ、本研究集会の当初の目的を十分に果たすことができた。