

レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

目的

プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには、乱流の物理機構を理解することが重要である。その計測は様々な手法があるが、本研究ではレーザー光の波面の乱れからプラズマ乱流の情報を引き出す手法を提案し、実証することを目的とする。本手法は非接触で、かつ干渉や変調などの作用を用いずに、直接的に乱流を計測できる特徴がある。

実験方法

大型望遠鏡では、大気揺らぎによって天体からの光の波面が乱され、解像度が向上しない問題がある。これに対し、すばる望遠鏡では波面形状を計測し、乱れを可変形鏡で補正する補償光学により、解像度の大幅な改善に成功している。プラズマにレーザー光を入射した場合、乱流揺動に対応するのが望遠鏡での大気揺らぎであり、レーザー光の波面を測定することで、乱流揺動の情報が得られると考えられる。この波面計測による電子密度揺動計測は、平成 27 年度より本格的に PANTA にて計測を開始した。平成 27 年度は、市販のシャックハルトマン波面センサーを使用してプラズマ揺動の計測を試みたが、有意な波面の変化は観測できなかった。これは密度揺動がごく微小である上、波面センサーを構成するシリコン受光素子の感度特性から使用できる近赤外光では、プラズマによる位相変化が小さいことが原因であると考えられた。波面センサーには撮像素子の画素数、撮像素子の前に配置したマイクロレンズアレイのアレイ数・焦点距離などのフリーパラメータがあり、観測対象物によってそれらが最適化される必要がある。現在のところ、波面の微小変化計測を目的として生産された波面センサーはなく、使用した市販の波面センサーではハルトマンスポットの解像度が不十分であったと判断した。

開発・実験結果

平成 28 年度はプラズマ乱流揺動の検出に適した波面センサーを自作し、そして、昨年度に引き続き、PANTA にて乱流揺動による波面変化が自作波面センサーで計測可能か検証を行った。通常の波面センサーは、レンズアレイが撮像素子上に集光スポット（「ハルトマンスポット」）を形成し、そのスポット位置の変化から波面形状を評価する。プラズマ計測の場合、電子密度の乱流揺動による波面の変化は微小であり、ハルトマンスポットの位置の変位量は極めて小さい。そこで、揺動周期より露光時間を十分長くとした場合、重心位置を中心にスポットが微小変動し、それが露光時間内で積算されることによって、撮像されるハルトマンスポット幅が広がると予測される。従って、波面センサーはハルトマンスポットの位置変化ではなく、スポット形状の精密計測ができることを主眼とした。そのため、昨年度の波面センサーと比較し、画素数の大きい CMOS を利用し、レンズアレイのレンズ数が小さいものを使うことで、1 スポット当りの画素数が 1 桁程度多くなるようにした。製作した波面センサーを図 1 (a) に示す。また、微小なハルトマンスポット幅から波面変動を捉える場合、機械振動でスポット位置が変動するとプラズマによるスポット位置変化に対してノイズになり、データ解析が難しくなる。また、昨年度の光学台は小さく、光学系を改良する際に支障が生じていたため、平成 28 年度は光学架台を製作し直し、梁による補強や振動減衰シートの使用などを併用し、光学架台の対策を講じた。PANTA に設置した光学系を図 1 (b) (c) に示す。

以上の波面センサー、光学系を用い、PANTA にてスポットがどのように変化するかを調べた。波面変動は微小であるので、複数枚のハルトマンスポット画像を重ね合わせ、計測誤差を除去することとした。昨年度の計測では、波面センサーのトリガー系が十分に整備できず、プラズマあり、無しのデータ数を十分に取ることが出来なかったため、今年度は PANTA のプラズマ生成時のトリガーを取り込めるようにし、統計データ数

を増やした。一つのプラズマ条件につき、100 フレームのデータを取得して解析を行った。プラズマがある場合、ない場合でハルトマンスポットを 100 フレームずつ撮像し、それぞれで積算平均した後にその差分を取った像がハルトマンスポットの広がりとなる。図 2 (a) に計測結果を示す。上記の計測誤差となる要因が、ハルトマンスポットをどの程度広げるかを評価するため、プラズマがない場合のデータを時間的に前後二つに分け、それぞれの積算平均の差分を取ったものを「確かさの下限」として定義し、図 2 (b) に示す。プラズマありの場合のハルトマンスポットの広がり、確かさの下限よりも有意な広がりを持っていることが確認され、プラズマ中の乱流揺動による微小波面変化を測定出来ていると考えられる。スポット幅の広がりがプラズマ揺動によるものであることを確認するため、PANTA のガス圧を増大させ、揺動が大きくなる条件での計測を行った。その条件ではスポット幅がより広がることを確認でき、揺動による波面広がりが測定できていることを支持する結果が得られた。

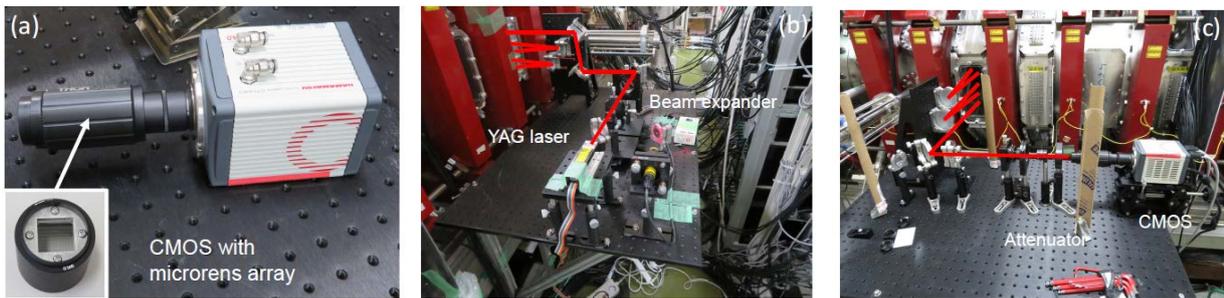


図 1 (a) 九州大学応用化学研究所の PANTA 装置。(b) PANTA 装置設置した Nd:YAG レーザーとビーム径調整用ビームエキスパンダを含む伝送光学系。半導体レーザーは光軸調整用。(c) 受光光学系。

(a) プラズマあり

(b) プラズマなし

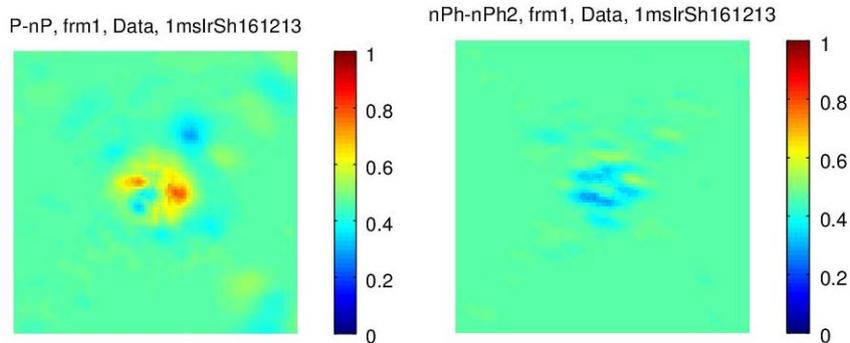


図 2 (a) ハルトマンスポットとプラズマ有り/無しでのハルトマンスポット分布。(b) プラズマ有り/無しでの各ハルトマンスポットの y (垂直) 方向の 2 次のモーメント。

今後の予定

今後、計測分解能を高めるためには、振動の更なる抑制、光学系を完全に囲って空気の流れを極力少なくすることなどの光学架台の改造が挙げられる。また、望遠鏡では光量もサイズも小さな太陽系外惑星を観察する際に、明るい恒星からの光を消去するため、フォトニック結晶光渦マスクによるゼロ次成分の除去が提案されている。波面センサーを用いたプラズマ乱流揺動計測にも、同様の光渦マスクを用いることで、ゼロ次成分を除去し、高次の波面乱れ成分だけを測定することで、撮像素子のビット数を有効に利用できるかと期待される。今後、プラズマ実験に適用し、計測精度改善の有無を検証する。

研究組織

研究代表者：秋山毅志（核融合研）

研究協力者：居田克巳（核融合研）、稲垣滋（応力研）

イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメソスケール構造の解析手法の開発

核融合科学研究所 へリカル研究部 大舘暁

目的

プラズマの揺動の情報を含んだ可視光の放射イメージの解析からプラズマの揺動の性質を調べるのが本共同研究の目的であり、PANTA 装置のプラズマからの可視光の放射を高速度カメラで計測したデータを解析対象とする。

はじめに

直線型のプラズマ閉じ込め装置 PANTA で観測される乱流揺動の周波数スペクトルには、多数の小さなピークが見られる。ドリフト波の分散関係から予想される周波数と波数を持つ波と他の波との相互作用からこのような複雑な構造を持つスペクトルが生み出されると考えられている[1]。特にドリフト波と、イオン反磁性方向に回転する $m=-1$ の波との相互作用は重要である。2016 年度はこの相互作用に的を絞って可視の 2 次元揺動のダイナミックな挙動の解析をめざした。

実験結果

図 1 に 64 ピンプローブアレイによってイオン飽和電流を測定しているチャンネルの波数・周波数スペクトルを示す。 $m=1$, $f = 2.3\text{kHz}$ のピークがおそらくもっとも不安定なモードであるが、 $m=2$, $m=3$ に見られる多数の小規模なピークは波の非線形結合で生み出されたものと考えられる。参考文献[2]では同様のプラズマに対して、図 1(b)に示すような結合の組み合わせが提案されている。

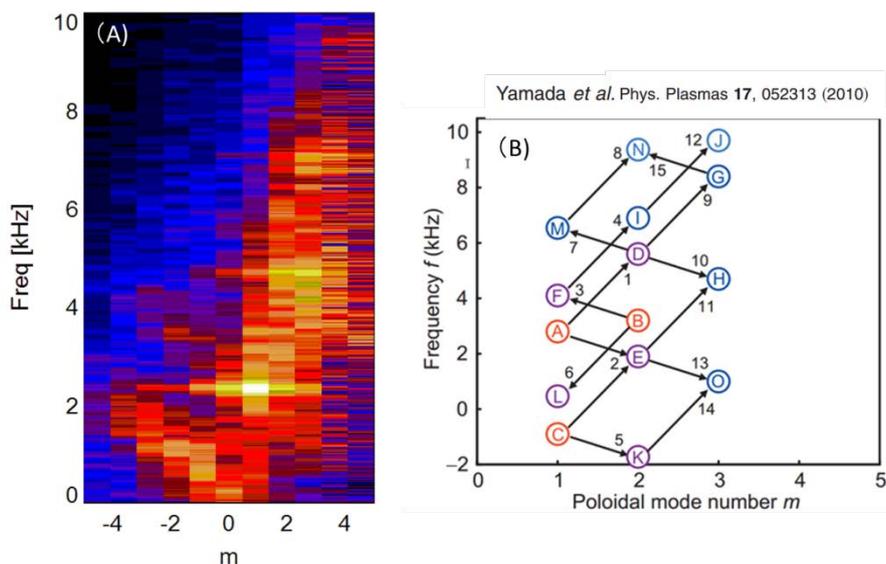


図 1 周波数・波数スペクトルと(A) とモード間の結合のダイアグラム (B)

この中から、今回のデータセットの中で実際にピークが見えている (D) + (C) → (H)、(A) + (C) → (E) の関係の解析を行った(図2)。通常のバイスペクトル解析を行うと時間平均された相関を検出することができるが、それでは2次元データの挙動との比較が難しくなると考え、空間方向の積分を先に行う以下の解析手法を適用した。

静電プローブデータの揺動成分 $x(\theta_i, t)$ に対して各データ計測時間に対して、 $a_j = \sum x(\theta_i, t) * \sin(m_j \times \theta)$, $b_j = \sum x(\theta_i, t) * \cos(m_j \times \theta)$ という空間的なフーリエ分解を行う。 $Z_i = a_i + ib_i = Z(t) * e^{i\omega t}$ と複素振幅表示をおこなうことで、あるモードの振幅と進行方向を同時に表すことができる。波数・周波数スペクトルで見出されたピークの周波数を含む、比較的広い幅の周波数フィルターをデータに適用しその状態で上記のデータ処理を行うことで、モードの周波数、位相が時間的に変化している時に、複数の波の相互位相がどうなるかを解析することができる。図3にD,C,Hの3つの波のうち、D、Cの波の強度を掛け合わせたものと、Hの波の強度、3波の間の位相差の情報を表示した。3つの波の位相が、そろっている時にはHの振幅が大きいことから、非線形相関によって、Hのピークが生成性されている可能性を示唆する。注目すべきは位相差の情報であり、位相差が0に近いあたりから、位相が急速にずれることが繰り返して観測されている。これは非線形結合が時間的に定常に起きているわけではなくて、結合がある時間帯と、そうでない時間帯を繰り返していることを意味している。

この相関がある時間帯から位相がずれる時にどのような現象が起きるかを2次元イメージングデータを使って調べた。図4に $t=0.062s$ から $0.063s$ にかけての2次元揺動の振る舞いをしめす。

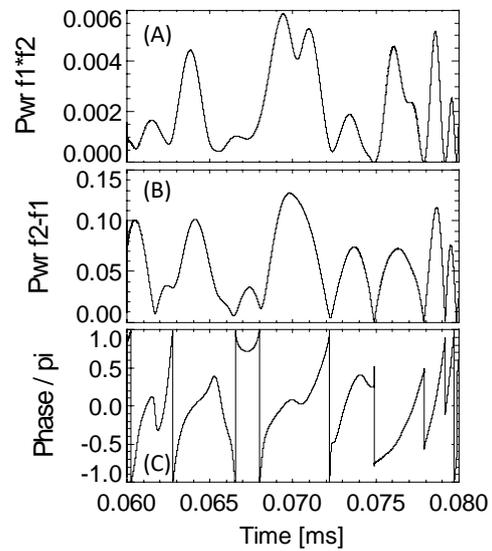
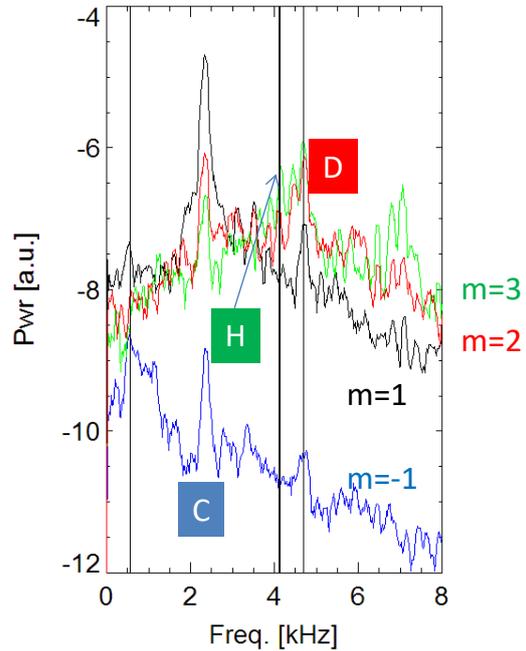


図3 CxDの振幅、Hの振幅、C,D,Dの位相差

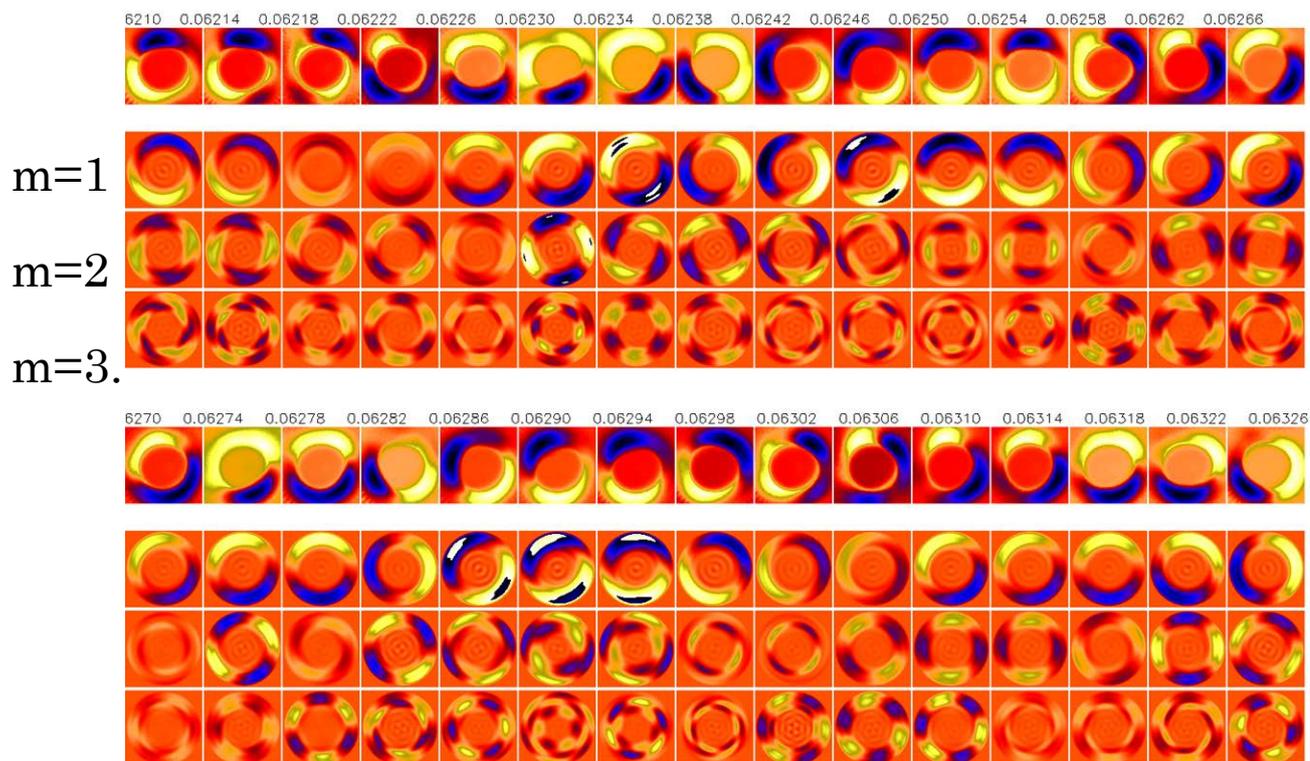


図4 位相がずれる時間帯での高速度カメラで測定した2次元揺動の振る舞い。

左から右へ時間が進んでいる。各段は $m=1, 2, 3$ とモード分解した結果となる。0.0628s 付近ではプラズマのコア部までモード構造が広がる。また、定常的に回転していた各モードが回転を止めて、再回転を始めるなどの複雑な現象が生じているが、現象の複雑さから現象の理解には至っていない。今後、多数観測されている位相スリップ時のイベントを多数集めて解析を行い、スリップから相関が失われる現象が本質的にはどんな物理現象が何であるかを解明したいと考えている。

[1] T. Yamada, et. al., Phys. Rev. Lett., **105**, 225002 (2010) .

複雑ネットワークの手法を用いたプラズマ乱流時系列データの新しい解析手法の開発

サブテーマ代表者：高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 谷澤俊弘

1 研究目的

超高温のプラズマを安定して閉じ込めるためにはプラズマ中に形成されるドリフト波乱流の物理的性質を詳細に理解することが必要不可欠である。乱流は、プラズマ流体の圧力・密度・温度・電位等の物理諸量の時系列データ中における一見したところランダムな振動として観測される。近年、本研究課題代表者（谷澤俊弘）および研究協力者（中村知道・兵庫県立大学）によって、時系列データで表現されるダイナミクスを複雑ネットワークの手法を用いて視覚化し直観的に理解する新しい手法が開発された。本研究は、この手法を磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波乱流の大容量時系列データの解析に応用し、そこから物理的情報を抽出する全く新しい手法を開発することを目的とする。

2 現在までの研究結果

本研究は 2012 年に谷澤と中村によって得られた時系列データのネットワーク化手法 [1] を円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の観測およびシミュレーションから得られる時系列データに適用するものである。この手法では、時刻 t における時系列データ $\mathbf{x}(t)$ をその時刻以前のいくつかのデータ $\mathbf{x}(t-1)$, $\mathbf{x}(t-2)$, ... とランダムノイズ $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ を用いて

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1\mathbf{x}(t-l_1) + \mathbf{a}_2\mathbf{x}(t-l_2) + \dots + \mathbf{a}_w\mathbf{x}(t-l_w) + \boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (1)$$

と線形モデル化する。ここで、パラメータ $\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_w$ は実際に観測された時系列データと線形モデルによって生成されるデータ間の誤差の二乗平均を最小化し、さらにモデルの最適化基準として情報量基準を合わせて用いることにより、いくつかの時間遅れ項 $\mathbf{x}(t-l_1), \mathbf{x}(t-l_2), \dots, \mathbf{x}(t-l_w)$ から最適な部分集合を選び出すものとして決められる。この手法は **Reduced Auto-Regressive Model (RAR)** と呼ばれている。RAR モデルは時系列データが持つ周期をその時間遅れ項の中に必ず含むことがわかっている。

図 1 は、今回解析した直線円筒型プラズマ内のドリフト波乱流の軸方向に直交する断面における全 64 チャンネルの測定値の一例である。この全 64 チャンネルの測定値を上述の方法で RAR モデル化すると、得られた時間遅れは図 2 のようになる。ここで、1 の時間遅れは 10[μ s] に対応しており、1~7 程度の時間遅れ項は、測定値に含まれるランダムネスを反映したものと考えてよい。したがって、非自明な時間遅れは下の表にまとめた通りとなり、周波数に直して、0.897[kHz], 0.962[kHz], 2.00[kHz], 3.22[kHz] に対応する周期が特徴的に現れていることが抽出できる。

lag	period [μ s]	frequency [kHz]
31	310	3.22
50	500	2.00
104	1040	0.962
111.5	1115	0.897

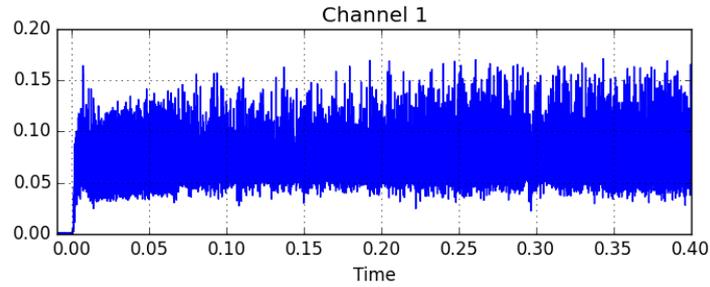


図 1 直線円筒型プラズマ内のドリフト波乱流の軸方向に直交する断面における全 64 チャンネルの測定値のうち第一チャンネルの測定結果。

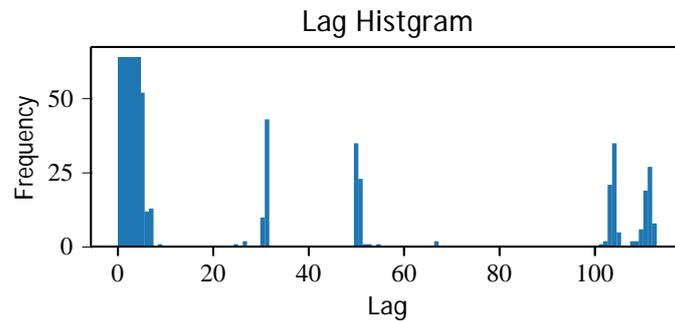


図 2 全 64 チャンネルの測定値を RAR モデル化し、得られた時間遅れのヒストグラム。

3 今後の研究の方向について

現在, RARモデルの時間遅れから得られる「周期」が離散フーリエ解析のパワースペクトル等から得られる「特徴的な周波数」とどのような関係にあるのかを解析中である。さらに各チャンネル間の関係性やプラズマ乱流の非局所的相関関係を明らかにするために、多次元時系列解析およびネットワーク可視化等に関する手法も新たに開発していく予定である。

4 研究成果発表

- 谷澤俊弘・中村知道, プラズマ・核融合学会誌小特集「核融合プラズマ研究におけるデータマイニングの活用」・ネットワーク可視化を用いた新しい時系列解析法, Vol. 92, 352–356 (2016).

参考文献

- [1] Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: “Networks with time structure from time series,” Physica A, Vol. 391, pp.4704-4710(2012).

医療用 CT における画像再構成手法のプラズマ乱流計測への応用

帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科 荒川弘之

・背景と研究目標

九州大学応用力学研究所における直線磁化プラズマ発生装置 PANTA では、近年コンピュータ断層撮影(CT)技術を応用し、多チャンネル光ファイバーを用いたプラズマ乱流揺動計測の開発が進められている。開発においては、光検出器による線積分されたプラズマの発光情報からプラズマ乱流揺動の情報を画像再構成手法により再構築する必要がある。一方で、CT 技術は当初医療分野において開発され、長年の実績により、その画質やノイズの評価の手法が多く開発されている。しかし、医療分野における CT 画像再構成手法やその評価の膨大な成果・知識量に対して、プラズマ乱流揺動計測への最適な手法の取り入れができていないのが現状である。この為、医療分野で現在導入されている、または導入が検討されている画像再構成手法をプラズマ乱流計測に応用を行うための基礎的な検討を行う。

以下の2つのアプローチにより、研究を行った。

(a)医療用 X 線 CT および画質評価用のファントムをコンピュータ上に構築し、基礎的な物理特性と画像のノイズ、ノイズレベル低減の為の画像再構成手法の選択を行なう。

(b)医療用 X 線 CT で近年研究されている”圧縮センシング”を用いたプラズマ乱流計測への適用について検討を行った。

以下、アプローチ(a)、(b)に分けて成果を報告する。

アプローチ(a)

・方法

本研究に用いる X 線のモンテカルロシミュレーションコード PHITS が X 線 CT のエネルギー領域において物理過程を正しく計算できるかどうかの確認を行った。材質が水、空気、ポリエチレン、アクリル、骨の厚さ 10 cm の板をそれぞれ計算機上に作成した。10~120keV の X 線をそれぞれの板へ入射させる計算を繰り返し行い、減弱係数及び統計的ゆらぎを、既知のデータと比較した。次に、X 線 CT の線源、検出器、ACR CT ファントムを計算機上にモデル化し、計算を行った。線源はファンビームとし、管電圧 120kV のエネルギースペクトルを模擬した。検出器数は 1 列、256ch とした。模擬計算から、サイノグラムを作成し、Shepp-Logan フィルタを用いたフィルタ補正逆投影法(FBP 法)で、再構成を行った。模擬計算は、X 線入射数を変えて複数回行った。

・結論

減弱係数は低エネルギー部分において、若干の違い(最大 20%程度)がみられたが、すべての材質において既知のデータとよく一致した。統計的な分布は、二項分布によく一致した。低エネルギー部分は画像再構成における寄与が少ないため、PHITS は、X 線 CT のエネルギー領域において、物理過程を正しく計算できると判断した。FBP 法により ACR CT ファントムの CT 値を求めた結果が、既知のデータとよく一致することを確認した。更に、X 線入射数を増加させることで、再構成されたファントム画像のノイズレベルが低くなることを確認した。

アプローチ(b)

・検討と結果

医療用 X 線 CT で近年活発に研究されている”圧縮センシング”を用いたプラズマ乱流計測の CT への適用について検討を行った。圧縮センシングは、医療用 CT において、通常数百の角度からの対象への投影が必要なところ、1/10 以下の投影角度から、対象内部の情報を高精度に再構成できる手法である。本研究対象となっている、直線磁化プラズマ発生装置でのプラズマ乱流計測においては、高時間分解能(1 μ sec)かつ高精度(5mm 程度)が必要とされる。このため、医療用 X 線 CT のように検出器を動かすことはできず、固定された計測器を用いる必要がある。また、設置位置の制約から、計測点は少ない形で高精度なプラズマ内部の再構成を行う必要がある。以上を考慮し、圧縮センシングをプラズマ CT へ適用することで、既存の手法よりも 2 倍程度の高精度化の可能性が見込まれることが分かった。

圧縮センシングを適用するにあたって、現状のプラズマ CT の計測体系の改良を検討した。現状はプラズマからの光を計測器を平行に並べて計測しているが、プラズマ周辺部における集光の効率が悪い。このため、扇状の形に計測器を並べて集光することが、より効率化が可能であると考えられる。

今後は、圧縮センシングによる再構成プログラムの制作を行い、プラズマの模擬データにより、計測体系(検出器間隔や集光角度)の最適化を進める。

成果報告：

(1) 第 72 回日本放射線技術学会総会学術大会(平成 28 年 4 月 17 日、パシフィコ横浜会議センター)にて発表を行い、**Premium Award** を受賞した(約 500 演題の中から学術的に最も優れた 1 演題のみが受賞)。(演題番号: 10183、題名「Monte Carlo Simulation of X-ray CT and Image Reconstruction by using PHITS」)

マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

1. 目的

乱流プラズマは太陽をはじめとした宇宙プラズマにおいても普遍的に観測されているが、核融合プラズマ研究においても種々の乱流物理現象の理解は最重要研究課題の一つである。特に非平衡な状態、現象が時間的に変化しているような状況における乱流の時空間構造を調べることは、この物理現象を理解する上で非常に重要である。しかしながら、高温プラズマ実験においては、その計測手段・状況がこれまで非常に限られていた。そこで我々は、マイクロ波を用いた新しい非接触な計測手法の開発を行い、乱流の高精度な時空間構造を観測することを目指している。これまでに周波数コムを用いたドップラー反射法を開発し、応用力学研究所の PANTA 装置や核融合研の大型ヘリカル装置 LHD などに適用し乱流構造に関する大規模なデータを得られるようになってきた。今回、より空間分解能を高くする計測手法を検討したので、以下に報告する。

2. 周波数掃引型反射計による乱流計測への適用についての概念

マイクロ波を用いた電子密度分布計測法として、周波数掃引型反射計という手法がある。これは、プラズマへ入射したマイクロ波が対応する反射層でカットオフされて戻ってくるまでの時間を位相変化量として測定し、反射層の位置を得るというものである。この時、位相変化の直読化のために、入射周波数を線形に掃引する。これは、周波数掃引速度 $\Delta f/\Delta t$ が位相変化に比例する関係を利用するためである。歴史的に、この掃引速度を速くすることで密度分布の再構成の精度を向上させる努力が続けられてきており、マイクロ波技術の進歩に伴い現在では $\Delta t = 1\mu\text{s}$

での掃引が可能になっている。

この高速掃引を利用すれば、 $1\mu\text{s}$

毎に同じ周波数のマイクロ波

をプラズマ中に入射してプローブ光として用いることが可能となる。

この測定法の概念を図1に示す。

周波数掃引を(a)のように繰り返している時に、

同じ周波数（緑点あるいは赤点）

が出現した時の、信号をサンプリング抽出して行けば、

周波数毎の反射層の揺らぎの時間変化、

すなわち時空間構造を求めることが可能となる。

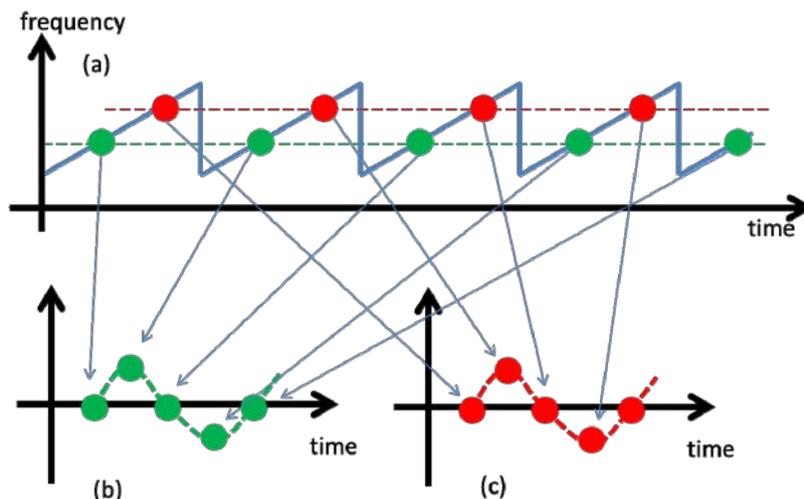


図1：周波数掃引システムによる揺動計測の概念図。それぞれの周波数成分発振時の信号をサンプリングすることで、周波数毎の位相変動信号を抽出する。

3. 高速掃引型反射計信号から模擬した乱流揺動信号を抽出できるかをシミュレーション調査

高速掃引型反射計の信号に計算機上で乱流成分(図2上に示すような乱流スペクトルを持つノイズ)を模擬して加え、これを入射周波数毎によるサンプリング処理で再現できるかどうかを調べた。掃引時間は $1\mu\text{s}$ とし、この繰り返し数を変えて、その分解能を調査した。図2(下)には、繰り返し 512 回分で求めた揺動信号成分の周波数スペクトルを示す。図のように元の乱流信号を再現できていることが分かる。一方、時間分解能を高めるため、この繰り返し数を減らすと、時間一周波数の関係から図3に示すように、元の乱流スペクトル波形を再現することは困難である。今回のように 500kHz 程度までの乱流信号を求めることを考えると、 $100\text{--}500\mu\text{s}$ 程度の時間分解能での時空間計測が可能であると考えられる。

今後、この計測をプラズマ実験で検証することを計画しているが、この測定には、速いサンプリングレートでのデータ収集 ($\Delta f/\Delta t$ に依存するが $>100\text{MHz}$ 以上)が必要であり、またプラズマによる乱流の時間変化すなわち時空間構造を求めるためには、大規模データの収集処理が必須となる。

4. 論文と学会発表

1. T.Tokuzawa, "Turbulence in edge and core transport barriers: new experimental results and modeling", Nuclear Fusion, Vol. 57, No.2, pp.025001 (2017).

また、次の学会にて発表を行った。

1. T. Tokuzawa, et al. "Observation of oscillation of poloidal rotation velocity in LHD, 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), Kaohsiung, Taiwan, June 27 – July 1, 2016.
2. T. Tokuzawa, et al., "Magnetic island formation in locked-like mode in helical plasmas 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan 17-22 October 2016
3. 徳沢季彦 "マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発", RIAM フォーラム 2016, 九州大学筑紫地区共通管理棟 3F 大会議室, 2016年6月2日.

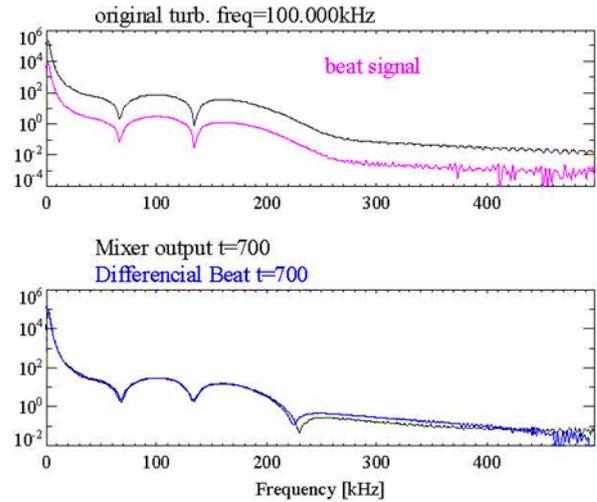


図2：高速掃引型反射計信号から乱流スペクトルを抽出した例。上図が模擬した乱流スペクトル信号(黒線)で下図が抽出した計測信号から求めた周波数スペクトル。周波数掃引繰り返し数：512 回の場合

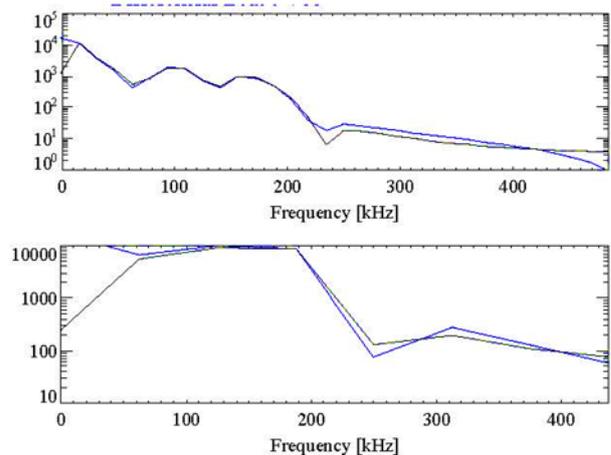


図3：異なる周波数掃引繰り返し数(上：64回、下：16回)の場合の信号から抽出した周波数スペクトル

プラズマ流れ場構造観測に関する統合的研究

核融合科学研究所 へリカル研究部 居田克巳

目的

本研究はプラズマ流れ場構造に関する計測手法の開発が目的である。高温プラズマ中のイオンの流れ場の速度はイオンの熱速度より小さく、そのマッハ数は1以下である。イオンの速度空間の分布がシフトしたマックスウエル・ボルツマン分布をしている時には、イオンの流れ場の速度はその1次のモーメントで定義される。しかしながら、プラズマが小崩壊現象を起こす場合にはイオン分布関数に歪みが生じる為に、1次のモーメントで定義されたイオンの流れ場の速度を研究するだけでは不十分となる。ここでは、イオン分布関数に歪みが生じたときに、イオン分布関数のマックスウエル・ボルツマンからのずれを検出する方法を開発する。本手法の更なる高度化のため、多くの装置のプラズマ実験に適用する。更に、開いた磁力線構造でのプラズマ流れ場構造の理解のため応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験も併せて行う。

プラズマの小崩壊現象

今年度は、核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置 LHD において、イオン分布関数を計測する為の高速荷電交換分光を用いて、小崩壊現象に伴うマックスウエル・ボルツマンからのずれを観測した。図1はプラズマが小崩壊現象を起こした時の異なるトロイダル角において磁気プローブで計測したポロイダル磁場変動、電子サイクロトロン放射で計測した電子温度、その時間変化から求めたプラズマの変位量、RFプローブで計測したイオンサイクロトロン放射強度の時間変化である。

プラズマの小崩壊現象は、トロイダル方向に局在化したポロイダル磁場変動と、プラズマの2cmにもおおよぶ外側への変位によって特徴つけられるタング変形がトリガーとなり、イオンの速度空間の変化により引き起こされた不安定性によるイオンサイクロトロン放射強度の急激な上昇とプラズマの急激な電子の温度低下として観測される。

イオン分布関数の歪み

イオン分布関数を計測する為に、高速の荷電交換分光で炭素イオンのトロイダル方向の速度空間分布を計測した。図2はタング変形前後のトロイダル方向のイオンの速度分布関数、ガウスフィット曲線と測定値、を使って求めた速度分布関数上のへこ

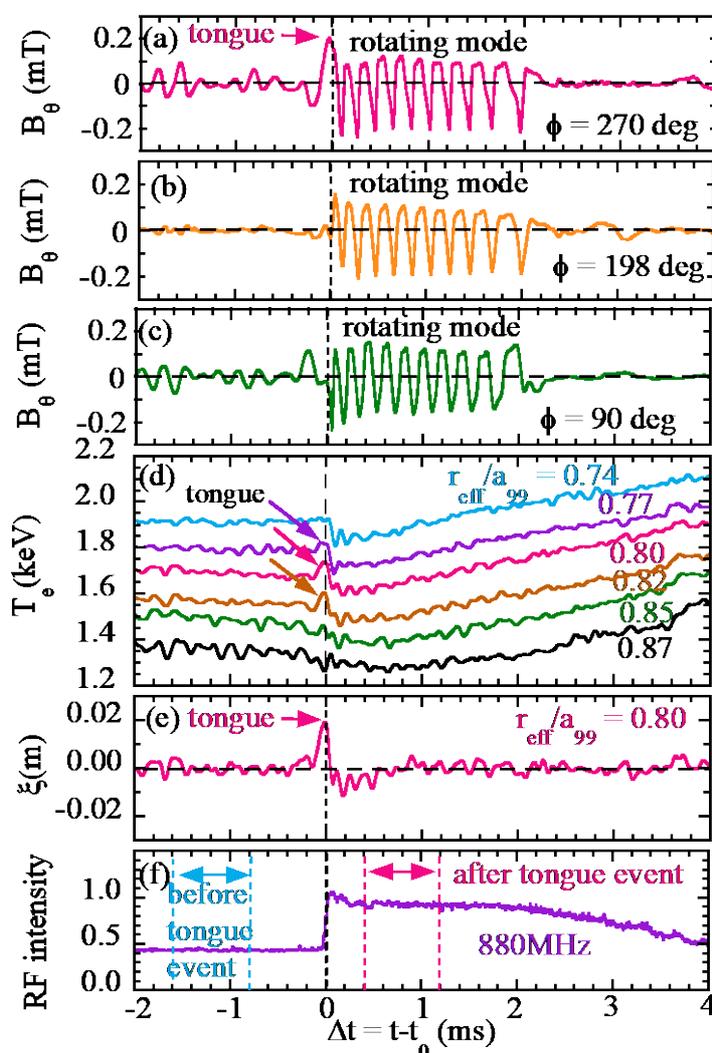


図1 プラズマが小崩壊現象を起こした時の (a)(b)(c)異なるトロイダル角でのポロイダル磁場変動、(d)電子温度、(e)プラズマの変位量、(f)RFプローブで計測したイオンサイクロトロン放射強度の時間変化

み (dent) とふくらみ (swell) の時間変化と、へこみとふくらみの時空間変化である。ここでは、イオンの速度分布関数の時間変化を詳細に解析する為に、RF プローブで計測したイオンサイクロトロン放射強度の立ち上がりを参照時間として「条件付き平均法」を適用した。タング変形前のイオンの速度空間分布はマックスウエル・ボルツマン分布をしているが、タング変形後にマックスウエル・ボルツマン分布からのずれが観測された。このずれは、等価電流と同じ方向($V>0$)に移動しているイオン密度の減少と、逆方向($V<0$)に移動しているイオン密度の増加を示している。へこみとふくらみは規格化平均小半径 0.7 付近で発生して、その後プラズマの周辺部 (規格化平均小半径 1.0) に伝播し、3-4ms 後には消滅する。

補足粒子が等価電流と同じ方向に運動するときには内側 (磁気軸側) に少しシフトするのに対し、等価電流と逆方向に運動するときには外側に少しシフトする。従って、観測されたへこみ (dent) とふくらみ (swell) は熱速度から熱速度の 2 倍程度のエピソードの補足粒子の勾配の急激な減少が原因と考えられる。このへこみとふくらみはイオン・イオン衝突時間のタイムスケールでマックスウエル・ボルツマン分布へと緩和する為にタング変形にトリガーされたプラズマ小崩壊の後に過渡的に観測される。

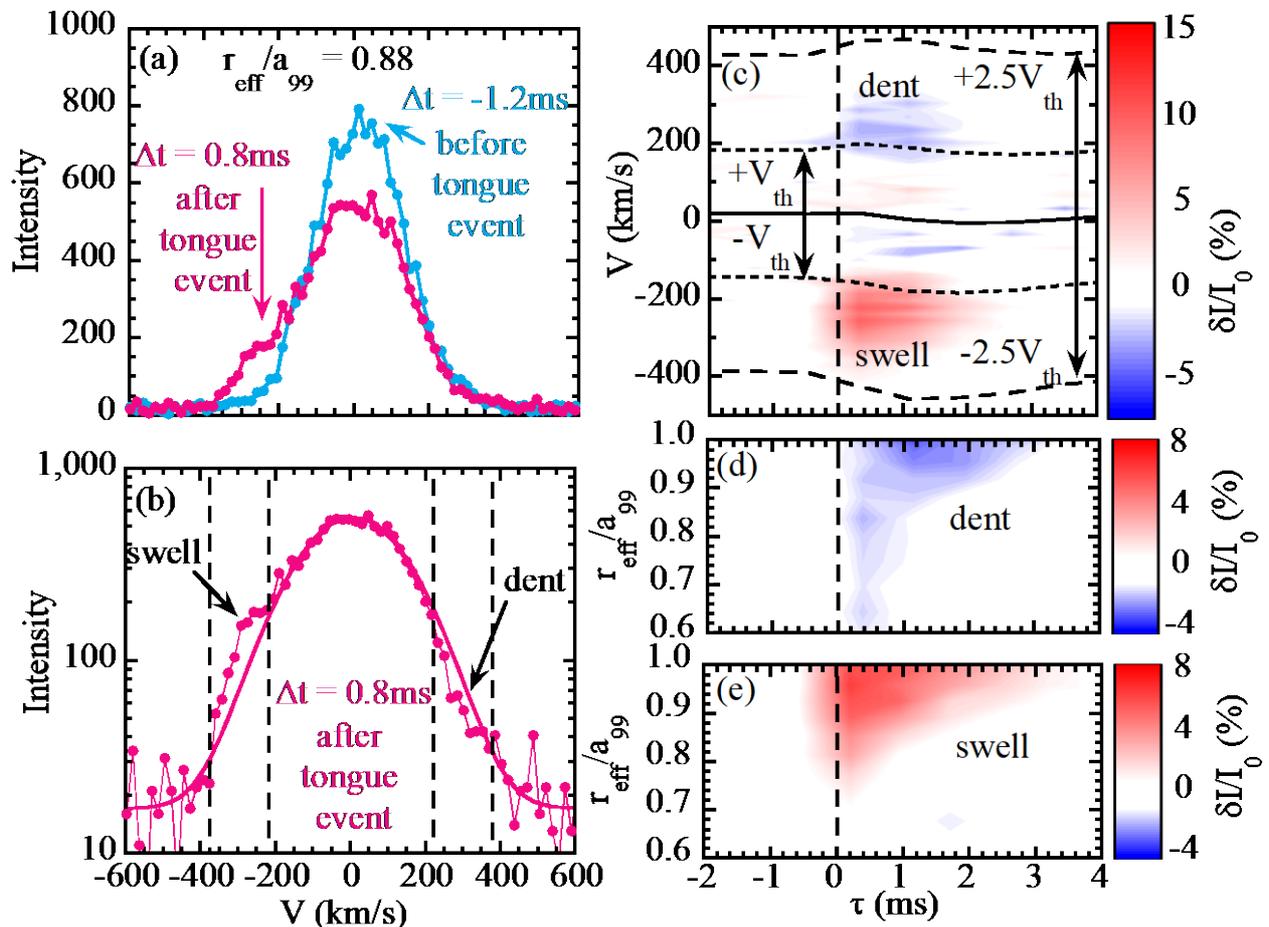


図 2 (a)タング変形前後のトロイダル方向のイオンの速度分布関数、(b)ガウスフィット曲線と測定値、速度分布関数上の(c)へこみ (dent) とふくらみ (swell) の時間変化、(d)へこみと(e)ふくらみの時空間変化

成果の評価

流れ場計測に重要なイオン分布関数の計測において、プラズマ小崩壊現象に伴ってイオン分布関数に歪みが現れる事が明らかにした点で、大きな成果と考えられる。これらの成果をまとめた論文が Scientific Reports 6 (2016) 36217 に掲載された*。論文発表に合わせて、核融合科学研究所で共同プレスリリースを行った**。本成果は国内の新聞のみならず、海外のインターネットメディアにも取り上げられるなど、国際的にも高い評価を受けた。本研究で使われた「条件付き平均法」は LHD

において九州大学と共同で開発されたものであるが、トロイダル磁場閉じ込め装置にその手法が応用され、イオン分布関数に歪みの発見に結びついたのは意義深い。

*参考論文

<http://www.nature.com/articles/srep36217>

**プレスリリース

<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/59>

研究組織

居田克巳	核融合科学研究所	(59歳、男性)
小林達也	核融合科学研究所	(30歳、男性)
稲垣滋	九州大学応用力学研究所	(48歳、男性)

デジタル相関 ECE 計測の開発とプラズマ実験への適用

核融合科学研究所 土屋 隼人

1. 要旨

開発中のデジタル相関 ECE 計測を LHD 実験に応用するべく、高速デジタイザーのシーケンシャルモードの開発とデジタル相関 ECE 計測の特性を検証した。開発中の同計測はデータ量が大きく、また LHD で使われているデジタイザーと異なるため、データ収集系の独自開発が必要であった。また、同計測手法は実験の後に測定パラメータを変更できるという利点があるが、パラメータ設定の自由度が高いために、解析結果の見え方が大きく変わることを示唆した。

2. 序論

あらゆる実験研究分野において、高空間分解能かつ高時間分解能で現象を観測することで、現象を正しく理解し、新たな発見をもたらす。プラズマ研究においても同様に、乱流のようなスケールが小さく現象の時間スケールも小さい現象を正確に観測する計測器が望まれている。LHD のような大型のプラズマ実験装置では、磁場強度と電子温度領域の関係から、電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測が利用できる。そこで、ラジオメーターを用いた ECE 計測を発展させたデジタルコリレーション ECE(DCECE)を提案している[1]。昨年度までに、応用力学研究所との協力により本計測を大型ヘリカル装置(LHD)に導入し実データの取得を試験的に行ってきており、今年度は、高速デジタイザーを LHD に導入した。LHD 実験は3分周期のプラズマ放電が行われており、本計測の稼働率を上げるために、シーケンシャルモードを備えた自動収集システムを開発し運用を開始することができた。

3. デジタルコリレーション ECE 原理

近代ではムーアの法則(半導体の集積密度は1.5~2年で倍増する)として知られているように保存できるデータ量が飛躍的に伸びてきましたが、データのサンプリング速度も伸びてきました。ADC (Analog Digital Converter) を有するデータ収集装置の高性能化により、ギガヘルツもしくは数十ギガヘルツの帯域をもつ機器も開発されてきた。つまり、LHD などの大型磁場閉じ込め装置のプラズマから放射される ECE の

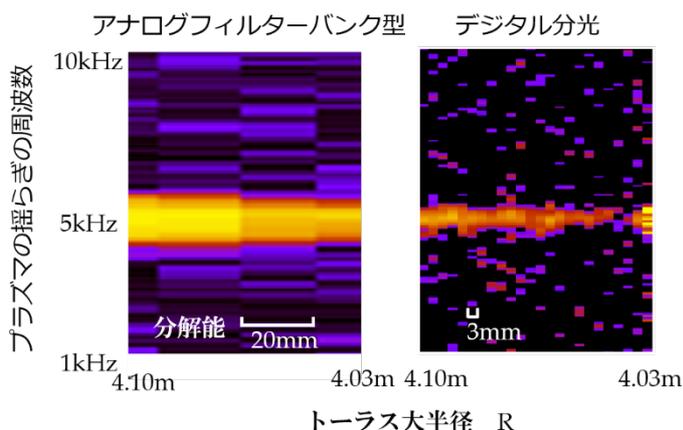


図1. フィルターバンク型とデジタル相関 ECE の分解能の比較

周波数帯は 50GHz 以上であるが、ヘテロダイン検波を行った中間周波数帯 (IF : intermediate frequency) は通常ギガヘルツ帯であるので、直接 IF をデジタル化し、IF 波形を保存することが可能になった。これにより、離散化された IF 波形をフーリエ変換することで、IF の分光スペクトルを得ることができる (デジタル分光)。分光スペクトルの時間変化を高速で追うことで、スペクトルパワーに比例する電子温度の揺動を測定することができる。しかしこのままでは離散化ノイズなどが多いので、相関 ECE の原理を適応し、有意なプラズマ揺動の観測につなげる。

この計測の最大の利点は従来のアナログバンドパスフィルターをつかったフィルターバンク型ラジオメーターよりトーラス小半径方向の空間分解能が高いことであり、かつ分解能は可変であることである。図 1 にフィルターバンク型と本計測の分解能の比較を示す。フィルターバンク型では分解能が 20 mm で固定であるが、本計測手法では一例として 3mm を示した。

4. ECE 実データ取得とパラメータ比較

大型ヘリカル装置 (LHD) において、高速デジタル化 (LabMaster 10-36Zi, teledyne lecroy 社製, データ長 512Mbyte) を用い ECE の IF 波形を取得した。図 2 に本手法で得られた電子揺動分布を示す。図のカラー軸は隣接する地点とのコヒーレンスを示し、縦軸の IF 周波数はプラズマ中のトーラス小半径方向に対応する。1-4GHz を 12 分割 ($N_{ch}=12$) から 48 分割した場合において図の丸印の部分に局所的な有意な揺動が発見された。しかし、解像度を上げるとバックグラウンドレベルと同程度になり検出できなくなる。このようにパラメータの選択が重要であり、揺動レベルと現象のスケールに応じて適切な解像度やサンプリング周波数を設定する必要がある。

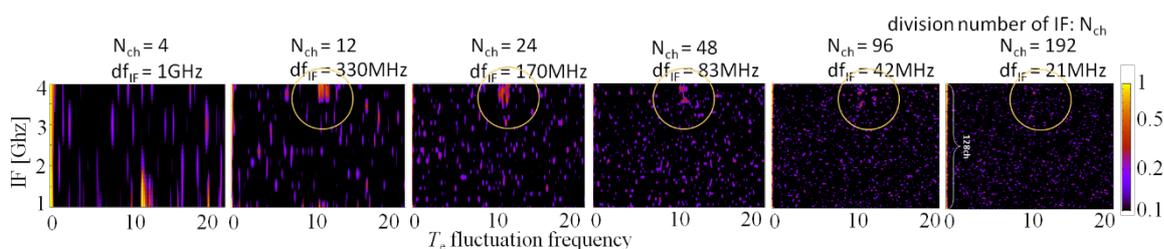


図 2. デジタル相関 ECE の分解能パラメータの違いによるコヒーレンス分布の比較

参考文献

*1. Hayato TSUCHIYA, Sigeru INAGAKI^{1,2)}, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA and Yoshio NAGAYAMA, Plasma and Fusion Research Volume 9, 3402021 (2014)

発表論文

1. H. Tsuchiya, S. Inagaki, T. Tokuzawa, N. Tamura, Y. Nagayama

“Validation of the Digital Correlation ECE measurement technique using low frequency fluctuation in LHD”

Plasma and Fusion Research 11, 2402072 (2016).

振幅変調反応性高周波放電中のナノ粒子量のエンベロープ解析

古閑一憲、白谷正治、稲垣滋

半導体集積回路製造においてトランジスタを作製する前工程の 70%以上を占めるまでに成長したプラズマプロセスは今、「3次元スケーリング」に対応する新展開が求められている。中でもプラズマプロセスにおけるゆらぎの抑制は、作製デバイスのプロセス寸法精度を決定する最重要課題の一つである。筆者らは、プロセスプラズマ中ナノ粒子をナノ界面のモデルとして用い、プラズマとナノ界面の相互作用ゆらぎについて研究している。現在までに以下の結果を得ている。

- 1) 高周波放電 CVD プラズマ中で形成されるナノ粒子に関して、放電電圧の振幅変調がサイズ・サイズ分散の減少をもたらす [1]。
- 2) 結果 1)において、ナノ粒子とラジカルのカップリングが重要な役割を果たしている[2]。
- 3) 振幅変調放電におけるナノ粒子量のゆらぎにプラズマ乱流解析を適用し、ラジカルとナノ粒子の非線形結合を示唆する結果を得た。
- 4) プラズマ乱流解析で用いられているエンベロープ解析を適用してプラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎの抽出に成功した。

ここでは、エンベロープ解析を用いてプラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎの時空間構造を調べた結果を報告する。

実験には、図 1 に示す容量結合型プラズマ CVD 装置を用いた[1]。反応容器中心に直径 60mm($r = -30 \sim +30$ mm)の 2 枚の電極を 20mm($z = 0 \sim 20$ mm)の間隔で設置した。Ar と DMOS($\text{Si}(\text{CH}_3)_2(\text{OCH}_3)_2$)を、それぞれガス流量 40sccm、2sccm で容器内に導入し、圧力を 166.3Pa とした。周波数 60MHz、電圧 120V の高周波電圧を電極間に印加し、プラズマを生成した。このとき、放電電圧に変調周波数 100Hz、変調度 30%の正弦波で振幅変調を加え、プラズマ密度に意図的に摂動を与えることにより、プラズマ密度の揺動がナノ粒子成長に与える影響について調べた。気相中ナノ粒子量の時空間変化は 2 次元レーザー散乱法で計測した。シート状 YAG レーザー光(厚さ 16mm、幅 1mm、入射パワー 2.0W、波長 532nm)を、接地電極と放電電極間(電極間距離 20mm)に平行に入射し、ナノ粒子からの 90 度レーリ散乱光を、干渉フィルタを装着した高速度カメラ(1000fps)で撮影した[3, 4]。

レーザー散乱光(LLS)強度にエンベロープ解析を適用して、ナノ粒子とプラズマの相互作用ゆらぎを抽出した。LLS 強度に 94 -106Hz でバンドパスフィルタをかけることで、LLS 強度ゆらぎの 100Hz 成分を抜き出し、100Hz 振幅のエンベロープを得た。100Hz エンベロープは、プラズマポテンシャル振動によるナノ粒子密度揺動に対応するものと考えられ、100Hz エンベロー

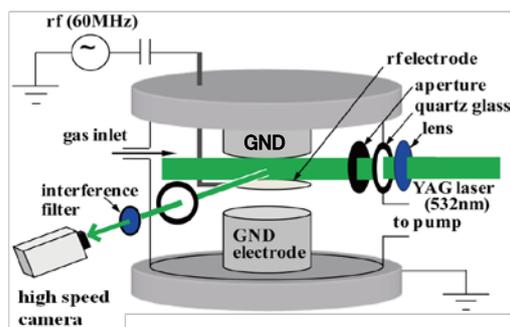


図 1. 実験装置図。

プの振動成分は、プラズマポテンシャルとナノ粒子の相互作用ゆらぎを示唆している[5, 6]。

図 2(a)、(b)、(c)にそれぞれ放電開始 3、3.25、5 秒後におけるプラズマポテンシャルとナノ粒子の相互作用ゆらぎの電極間全体の空間分布を示す。図 2(a)では、電極中心($|r| \leq 5 \text{ mm}$)付近の放電電極近傍($z = 3 \sim 6 \text{ mm}$)において、強い相互作用ゆらぎが発生している。同時に電極の周縁部($|r| \sim 25 \text{ mm}$)において電極間で強いゆらぎが発生している。図 2(b)では、電極中心付近に発生している強い相互作用ゆらぎが図 2(a)より電極上部へ少し形を変えながら伝搬している。また、図 2(a)で $|r| \sim 25 \text{ mm}$ 付近でほとんど左右均一な強さであった相互作用ゆらぎが、 $r = 25 \text{ mm}$ 付近のみで強い相互作用ゆらぎとなっている。これは、 $r \geq 25 \text{ mm}$ で発生したゆらぎが $r = 25 \text{ mm}$ で垂直に発生しているゆらぎに衝突しているためである。図 2(c)では、図 2(a)、(b)と比較して空間全体で均一に相互作用ゆらぎが存在している。この時間帯では、相互作用ゆらぎの伝搬はほとんど見られず、局所的に相互作用ゆらぎが発生している。これらの結果は、筆者らがこれまでに明らかにした電極間の $r = 0 \text{ mm}$ で発生していた相互作用

ゆらぎの発生・伝搬の結果と一致している。今後は、電極間全体における相互作用ゆらぎの発生・伝搬の時空間構造の解明へと繋げたい。応用の観点からは、電極周辺部だけでなく電極中央部近傍にも強い揺らぎが存在する点がプロセスの均一性との関連で興味深い。

参考文献

- [1] K. Kamataki, et al., J. Instrum. 7 (2012) C04017.
- [2] M. Shiratani, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 010201.
- [3] M. Shiratani, et al., Faraday Discussions., **137** (2008) 127.
- [4] S. Nunomura, et al., J. Appl. Phys., **99** (2006) 083202.
- [5] T. Yamada, et al., Nature Phys. **4** (2008) 721.
- [6] T. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 063009.

学会発表：国際会議 4 件、国内会議 3 件

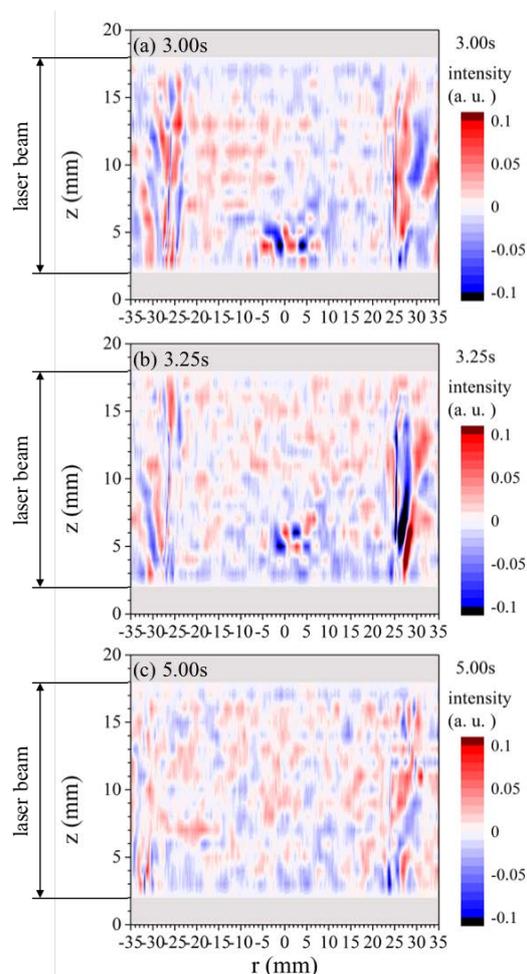


図 2. プラズマポテンシャルとナノ粒子の相互作用ゆらぎの空間構造。それぞれ放電開始後、(a) 3.00s, (b) 3.25s, (c) 5.00s。

極限プラズマ科学研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2:極限プラズマ科学の新研究手法の開発」における個別課題の成果の統合を議論する。

目的と背景

現在、極限プラズマは新機能性物質創生、半導体プロセス、医療応用、核融合等、様々な分野で発展しており、それらを包括する学術基盤の形成は近未来の技術革新にとって非常に重要である。極限プラズマ科学はプラズマの非平衡性、極限的な性質の理解を通し、様々な産業に応用する為の基盤を与える。本研究では、研究集会を開催し、特定研究 2 のサブテーマリーダーが一堂に会して、それぞれの領域で発展してきたプラズマ科学の中から共通な機構や課題を抽出するための議論を行う場を提供する事を目的とする。プラズマ科学の多方面からの研究者が一堂に会して議論し、個別のアプローチを統合することで、極限プラズマの研究手法そのものに新展がもたらされることが期待できる。本研究で取り組む課題はプラズマ乱流に限らず、医療やナノ粒子生成等多くの先端科学における共通の課題であり、応用力学研究所の共同研究として遂行し先導する事が必要である。

研究集会の開催

2017年2月23-24日に応用力学研究所 2F 会議室において研究集会を開催した。研究会のプログラムを添付する。

予算の執行

予算は研究集会参加の旅費に執行した。

研究集会のまとめ

基礎プラズマにおける乱流計測データの同時多点計測技術の進展、トロイダルプラズマにおける乱流輸送解析法の開発、プラズマ乱流計測で開発した手法の医療用 CT で開発された圧縮センシング技術のプラズマ乱流計測への適用、プロセスプラズマに時空間における不均一性の高精度計測に加え、ソーシャルネットワーク科学に用いられるビックデータ解析手法に関してその成果を発表し情報交換及び討論を行った。以下に主な成果を記す。

トロイダルプラズマにおける長年の問題であったプラズマの局所的変形からフルート状の巨視的振動へと緩和するプロセスが初めて観測された。圧力の高いプラズマではプラズマの一部が局所的に変形し、それがプラズマ全体へと広がって行きやがて中立安定となる事が理論的に予測されていたが、これまでプラズマの局所的変形を観測した事はなかった。LHD ではイオンサイクロトロン輻射と磁気プローブ信号との関連に着目する事で巨視的振動と局所変形の弁別に成功した。また、これらの信号をトリガーとする事でイオン速度分布関数の歪みの時間発展を観測する事に成功した。

PANTA における乱流構造の理解が進展し、乱流の相図の再検討を行った。これまで Streamer 相、孤立波相、弱非線形相と分かれていた領域の境界を非線形結合度により定量的に決定する事が提案された。今回の相図はプラズマの運転条件をパラメータとした 2 次元図であり、乱流の物理量への変換、多次元化について議論がなされた。

レーザーによる精密計測に関して多くの議論がなされた。トリプルグレーティング分光器を用いてトムソン散乱により PANTA プラズマの温度、密度の径方向勾配が得られた。空間分解能 1mm 程度での温度、密度の評価が可能になり、半径 3cm 程度の位置で密度勾配が急激に現れる事、プラズマの条件によってその勾配の位置がシフトする事が明らかになった。また、天文分野で用いられている波面センサーをプラズマに適用し、密度揺動を検出する試みが行われた。レーザーの波長が最適ではないもののプラズマ中の密度揺らぎによる波面の揺らぎ、正確にはハルトマンスポットの変動、の検出に成功した。今後の展開として 2 波長化やレーザー光渦等の導入による感度向上が議論された。

本特定研究で発展してきた研究手法は PANTA のみならず、LHD のような大型高温プラズマにも適用が開始されている。周波数コムを用いた超精密計測がルーチンの稼働を開始した。更にデジタル相関 ECE も稼働し始めており大量にデータを取得する事が一つの研究手法として定着しつつある。

ソーシャルネットワーク科学の手法が紹介された。ネットワーク科学ではある地点あるいはある時刻の変数の値を得るのに有限な周辺、及び有限な過去の変数の値を用いる、というものであり、方程式から予測するというアプローチとは大きく異なっている。ソーシャルネットワークでは情報の伝搬の様相が、情報が真か偽かで変わる事が指摘されている。例えばデマが広がるにはある条件があり、デマの流行は一種の相転移状態と考えられる事が紹介され、プラズマ乱流との異同が議論された。ネットワーク科学、数理情報学、イメージングは非常に親和性が高い。これらの協同によりこれまで見えなかった現象が観測できる事が期待される。新たなプラズマ研究法としての期待が高まった。

直線ヘリコンプラズマにおける径方向構造のトムソン散乱計測 Thomson scattering measurements of radial structures in a linear helicon plasma

富田健太郎（九大総理工）、内野喜一郎（九大総理工）、稲垣滋（九大応力研）

要旨

直線ヘリコンプラズマ装置 PANTA に対してレーザートムソン散乱計測を行い、プラズマの電子密度・温度の径方向分布を明らかにした。プラズマ生成時の磁場強度およびガス圧 (Ar) はそれぞれ 600, 900, 1500 Gauss, 1, 3, 5 mTorr とした。計測用レーザーには Nd:YAG レーザー第2高調波 (波長532 nm) を、検出器には信号増強型 CCD カメラを用いた。微弱なトムソン散乱信号を検出するため、レーザー500 ショット分の信号積算を行うと同時に、迷光除去のために差分散型三回折格子分光器を用いた。計測はプラズマ中心 ($r=0$) および $r=20, 30, 40, 50$ mm の5点で行った。磁場やガス圧にかかわらず、 $r=30$ mm 付近で急激な電子密度勾配が確認された。プラズマ中心での電子密度・電子温度範囲は、それぞれ $(1.3\text{-}2.6) \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, $1.2\text{-}2.4$ eV であった。また、プラズマ周辺部 ($r=40$ mm) における電子密度・電子温度範囲はそれぞれ $(2\text{-}3) \times 10^{18} \text{m}^{-3}$, $0.4\text{-}1.5$ eV であった。今後の時間分解計測のための予備実験として、レーザー1 ショットでの計測を行った。現行のシステムであっても 10^{19}m^{-3} 以上の電子密度領域であれば、単発でのトムソン散乱計測が可能であることを確認した。

序論

プラズマの応用研究は、核融合を目指した磁場閉じ込めや半導体プロセス、高出力光源や農業・バイオ応用など、広範に渡っている。ヘリコンプラズマは比較的容易に生成する事が可能であり、磁化プラズマ乱流やプロセスプラズマの基礎過程の研究に利用されてきた。応用力学研究所の直線プラズマ乱流装置 PANTA においてヘリコンプラズマ中に乱流を励起し、乱流が輸送に与える影響を観察している。PANTA ではプラズマの計測にはプローブ法や分光法が用いられてきたが、乱流駆動輸送のより定量的な評価を行うためにはプラズマの温度と密度の径方向分布を高精度に計測し、勾配と流束を評価する事が必須である。トムソン散乱計測はプラズマに与える擾乱が小さく、かつ高精度に温度と密度が計測可能である。本研究では PANTA プラズマの電子密度・電子温度の径方向構造を高精度に観測する事を目指し、トムソン散乱計測の適用を試みた。

すでに行われているプローブ計測の結果から、予想される電子密度・電子温度の範囲はそれぞれ 10^{19}m^{-3} 、数 eV と予想された。このようなプラズマに対しては、0.1 J クラスの小規模な可視光レーザーをプローブとした、比較的簡易なシステムでトムソン散乱計測が可能

であると予想された。前年度は PANTA プラズマに初めて可視プローブを用いたトムソン散乱計測システムを構築し、プラズマ中心位置における電子密度・電子温度計測の実証を行った（文献、まだ投稿中）。本年度はこの結果をさらに進展させ、プラズマの径方向計測、並びに時間分解計測に向けた、1ショット計測の実証を行った。

実験方法（トムソン散乱）

トムソン散乱計測は、核融合を目的とした磁場閉じ込めプラズマや、低圧半導体プロセスプラズマ、さらには高気圧中で生成される大気圧非平衡プラズマなど、様々な電子密度・電子温度領域にあるプラズマに対して、すでに適用されている。PANTA プラズマで予想される電子密度・電子温度からのトムソン散乱信号は微弱であることが予想される。また、数 eV 程度の電子温度であるため、可視波長（波長 532 nm を想定）プローブの場合、トムソン散乱スペクトル広がり、レーザー波長を中心に、2, 3 nm 程度であると予想される。このとき、計測レーザーの一部がチャンバー窓表面などで乱反射し、迷光として分光器内に侵入して微弱なトムソン散乱スペクトルを覆い隠す恐れがある。まず、微弱な散乱信号に対しては、多くのレーザーショットからの散乱信号を、検出器側で積算計測することで対処した。また、迷光の除去に関しては、高い迷光除去性能が確認されている差分散型三回折格子分光器（以下トリプル分光器と呼ぶ）を構築・使用することで対処した。

実験装置

トムソン散乱計測に向けて、次のような実験装置を構築した。全体の装置配置を図 1 に示す。

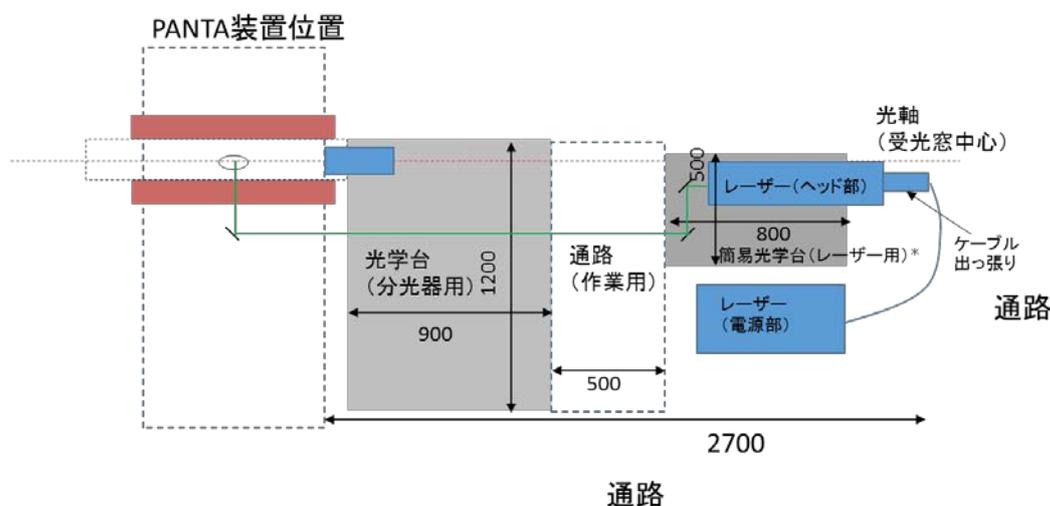


図 1. PANTA 用可視トムソン散乱計測システムの配置図（図中スケールはすべて mm）

計測に必要な主な装置は、レーザー（Qスイッチ Nd:YAG レーザー）、分光器である。分光器は市販の光学実験用台の上に、各種光学部品を組み込んで自作した。分光器内の概要を図2に示す。図2には併せて、散乱光の受光光学系の概略を示した。1st レンズはできる限り大きな受光立体角が望ましいが、チャンバー外に配置せざるを得ないことや、保有するレンズ種類の制限から、焦点距離 400 mm で、有効直径 46 mm のアクロマートレンズを使用した。このレンズで一度平行光にした散乱光の一部を、 $f = 220$ mm のレンズで入口スリットに集光し、分光器内に導いた。分光器内の回折格子は、トムソン散乱で使用する偏向方向に高い回折効率を持つ、サインカーブ形状の反射型回折格子（刻線本数 2400 本/mm）を用いた。スリット幅、焦点距離、回折格子条件などで決まる波長分解能は、0.2 nm程度であった。検出器には ICCD カメラ（米国 Princeton Instruments 社製 PIMAX）を用いた。使用したプローブレーザーは移動が容易な小型のレーザー（米国 Continuum 社製 Surelite）を用いた。今回使用した第2高調波（波長532 nm）の出力は130 mJ程度であり、レーザーの繰り返し周波数は10 Hzであった。

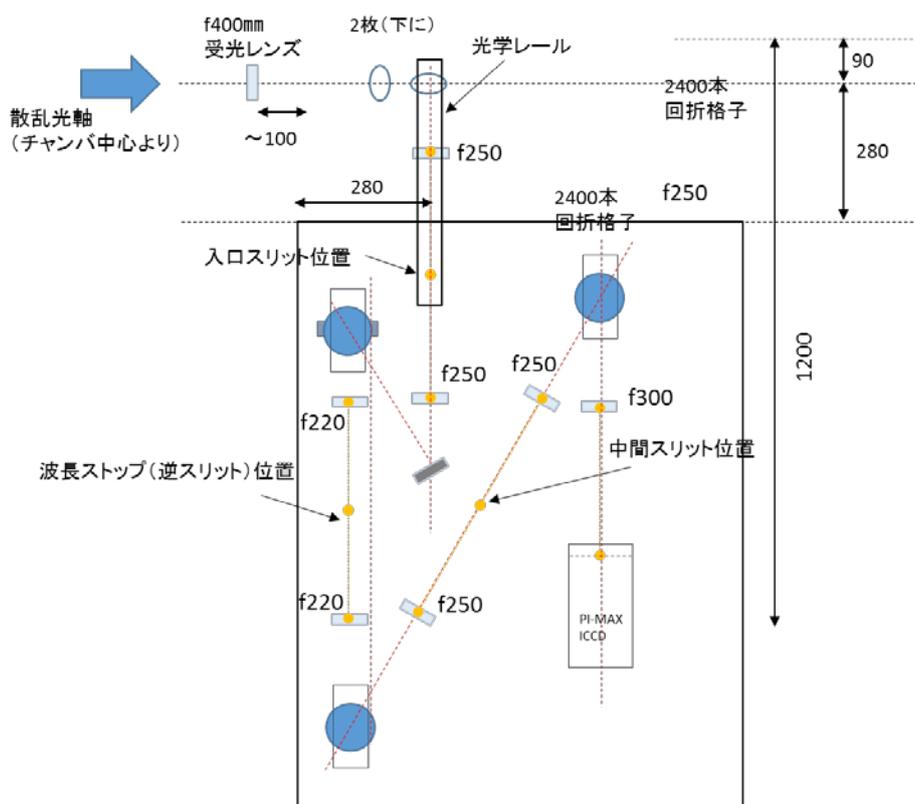


図2. トムソン散乱用トリプル分光器の概要図（図中スケールは mm）

図3に計測システム導入後の装置周辺の写真を示す。計測時、分光器やレーザー光軸は、背景光を除去するために完全に遮光した。図4には自作したトリプル分光器の写真を示す。

分光器および受光系の光軸調整は、PANTA チャンバー側面の反対側の窓から、波長532 nmの半導体レーザーを入射し、行った。



図 3. トムソン散乱システム導入後の PANTA 装置周辺写真。プローブレザーのレーザーヘッドは写真下。レーザーは暗箱を通り、PANTA 装置した側に設置されたミラーおよび集光レンズを通り、チャンバー中心軸上で集光され、その後チャンバー上側のビームダンプに導かれる。トムソン散乱光の一部は、PANTA チャンバー横の窓からレンズで受光され、分光器内に導かれた。

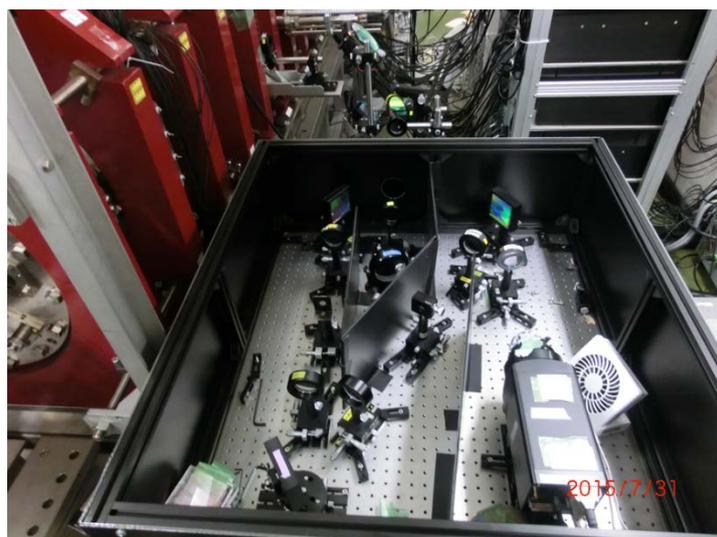


図 4. 自作したトリプル分光器の内部写真。

レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

目的

プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには、乱流の物理機構を理解することが重要である。その計測は様々な手法があるが、本研究ではレーザー光の波面の乱れからプラズマ乱流の情報を引き出す手法を提案し、実証することを目的とする。本手法は非接触で、かつ干渉や変調などの作用を用いずに、直接的に乱流を計測できる特徴がある。

実験方法

大型望遠鏡では、大気揺らぎによって天体からの光の波面が乱され、解像度が向上しない問題がある。これに対し、すばる望遠鏡では波面形状を計測し、乱れを可変形鏡で補正する補償光学により、解像度の大幅な改善に成功している。プラズマにレーザー光を入射した場合、乱流揺動に対応するのが望遠鏡での大気揺らぎであり、レーザー光の波面を測定することで、乱流揺動の情報が得られると考えられる。この波面計測による電子密度揺動計測は、平成 27 年度より本格的に PANTA にて計測を開始した。平成 27 年度は、市販のシャックハルトマン波面センサーを使用してプラズマ揺動の計測を試みたが、有意な波面の変化は観測できなかった。これは密度揺動がごく微小である上、波面センサーを構成するシリコン受光素子の感度特性から使用できる近赤外光では、プラズマによる位相変化が小さいことが原因であると考えられた。波面センサーには撮像素子の画素数、撮像素子の前に配置したマイクロレンズアレイのアレイ数・焦点距離などのフリーパラメータがあり、観測対象物によってそれらが最適化される必要がある。現在のところ、波面の微小変化計測を目的として生産された波面センサーはなく、使用した市販の波面センサーではハルトマンスポットの解像度が不十分であったと判断した。

開発・実験結果

平成 28 年度はプラズマ乱流揺動の検出に適した波面センサーを自作し、そして、昨年度に引き続き、PANTA にて乱流揺動による波面変化が自作波面センサーで計測可能か検証を行った。通常の波面センサーは、レンズアレイが撮像素子上に集光スポット（「ハルトマンスポット」）を形成し、そのスポット位置の変化から波面形状を評価する。プラズマ計測の場合、電子密度の乱流揺動による波面の変化は微小であり、ハルトマンスポットの位置の変位量は極めて小さい。そこで、揺動周期より露光時間を十分長くとった場合、重心位置を中心にスポットが微小変動し、それが露光時間内で積算されることによって、撮像されるハルトマンスポット幅が広がると予測される。従って、波面センサーはハルトマンスポットの位置変化ではなく、スポット形状の精密計測ができることを主眼とした。そのため、昨年度の波面センサーと比較し、画素数の大きい CMOS を利用し、レンズアレイのレンズ数が小さいものを使うことで、1 スポット当りの画素数が 1 桁程度多くなるようにした。製作した波面センサーを図 1 (a) に示す。また、微小なハルトマンスポット幅から波面変動を捉える場合、機械振動でスポット位置が変動するとプラズマによるスポット位置変化に対してノイズになり、データ解析が難しくなる。また、昨年度の光学台は小さく、光学系を改良する際に支障が生じていたため、平成 28 年度は光学架台を製作し直し、梁による補強や振動減衰シートの使用などを併用し、光学架台の対策を講じた。PANTA に設置した光学系を図 1 (b) (c) に示す。

以上の波面センサー、光学系を用い、PANTA にてスポットがどのように変化するかを調べた。波面変動は微小であるので、複数枚のハルトマンスポット画像を重ね合わせ、計測誤差を除去することとした。昨年度の計測では、波面センサーのトリガー系が十分に整備できず、プラズマあり、無しのデータ数を十分に取ることが出来なかったため、今年度は PANTA のプラズマ生成時のトリガーを取り込めるようにし、統計データ数

を増やした。一つのプラズマ条件につき、100 フレームのデータを取得して解析を行った。プラズマがある場合、ない場合でハルトマンスポットを 100 フレームずつ撮像し、それぞれで積算平均した後にその差分を取った像がハルトマンスポットの広がりとなる。図 2 (a) に計測結果を示す。上記の計測誤差となる要因が、ハルトマンスポットをどの程度広げるかを評価するため、プラズマがない場合のデータを時間的に前後二つに分け、それぞれの積算平均の差分を取ったものを「確かさの下限」として定義し、図 2 (b) に示す。プラズマありの場合のハルトマンスポットの広がり、確かさの下限よりも有意な広がりを持っていることが確認され、プラズマ中の乱流揺動による微小波面変化を測定出来ていると考えられる。スポット幅の広がりがプラズマ揺動によるものであることを確認するため、PANTA のガス圧を増大させ、揺動が大きくなる条件での計測を行った。その条件ではスポット幅がより広がることを確認でき、揺動による波面広がりが測定できていることを支持する結果が得られた。

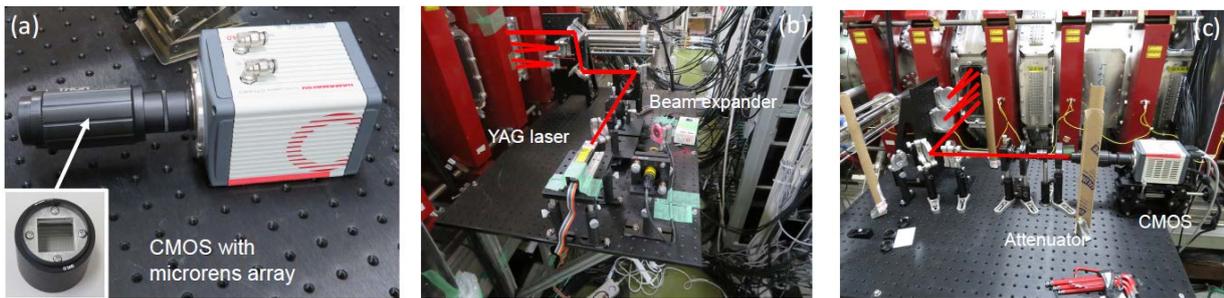


図 1 (a) 九州大学応用化学研究所の PANTA 装置。(b) PANTA 装置設置した Nd:YAG レーザーとビーム径調整用ビームエキスパンダを含む伝送光学系。半導体レーザーは光軸調整用。(c) 受光光学系。

(a) プラズマあり

(b) プラズマなし

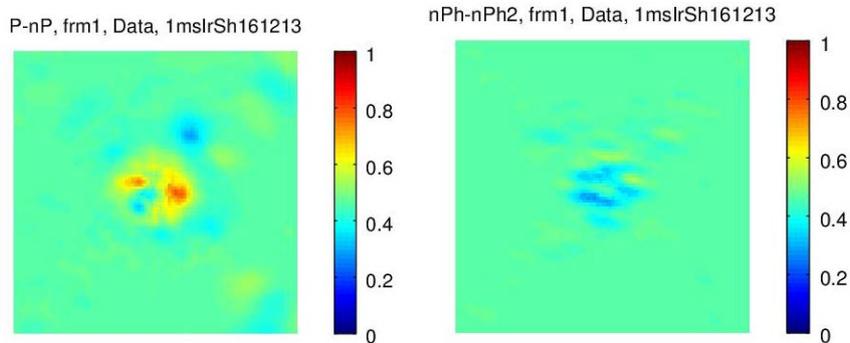


図 2 (a) ハルトマンスポットとプラズマ有り/無しでのハルトマンスポット分布。(b) プラズマ有り/無しでの各ハルトマンスポットの y (垂直) 方向の 2 次のモーメント。

今後の予定

今後、計測分解能を高めるためには、振動の更なる抑制、光学系を完全に囲って空気の流れを極力少なくすることなどの光学架台の改造が挙げられる。また、望遠鏡では光量もサイズも小さな太陽系外惑星を観察する際に、明るい恒星からの光を消去するため、フォトニック結晶光渦マスクによるゼロ次成分の除去が提案されている。波面センサーを用いたプラズマ乱流揺動計測にも、同様の光渦マスクを用いることで、ゼロ次成分を除去し、高次の波面乱れ成分だけを測定することで、撮像素子のビット数を有効に利用できるかと期待される。今後、プラズマ実験に適用し、計測精度改善の有無を検証する。

研究組織

研究代表者：秋山毅志（核融合研）

研究協力者：居田克巳（核融合研）、稲垣滋（応力研）

イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメソスケール構造の解析手法の開発

核融合科学研究所 へリカル研究部 大舘暁

目的

プラズマの揺動の情報を含んだ可視光の放射イメージの解析からプラズマの揺動の性質を調べるのが本共同研究の目的であり、PANTA 装置のプラズマからの可視光の放射を高速度カメラで計測したデータを解析対象とする。

はじめに

直線型のプラズマ閉じ込め装置 PANTA で観測される乱流揺動の周波数スペクトルには、多数の小さなピークが見られる。ドリフト波の分散関係から予想される周波数と波数を持つ波と他の波との相互作用からこのような複雑な構造を持つスペクトルが生み出されると考えられている[1]。特にドリフト波と、イオン反磁性方向に回転する $m=-1$ の波との相互作用は重要である。2016 年度はこの相互作用に的を絞って可視の 2 次元揺動のダイナミックな挙動の解析をめざした。

実験結果

図 1 に 64 ピンプローブアレイによってイオン飽和電流を測定しているチャンネルの波数・周波数スペクトルを示す。 $m=1$, $f = 2.3\text{kHz}$ のピークがおそらくもっとも不安定なモードであるが、 $m=2$, $m=3$ に見られる多数の小規模なピークは波の非線形結合で生み出されたものと考えられる。参考文献[2]では同様のプラズマに対して、図 1(b)に示すような結合の組み合わせが提案されている。

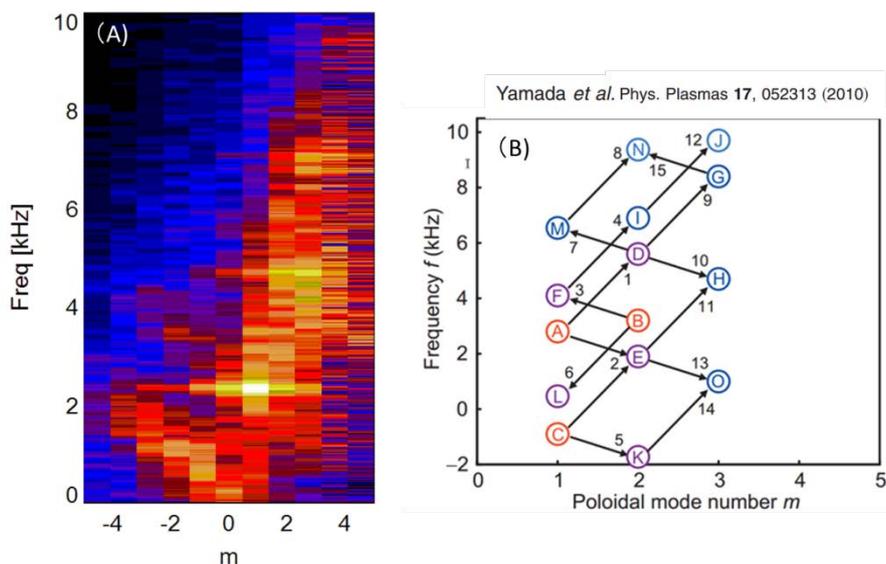


図 1 周波数・波数スペクトルと(A) とモード間の結合のダイアグラム (B)

この中から、今回のデータセットの中で実際にピークが見えている (D) + (C) → (H)、(A) + (C) → (E) の関係の解析を行った(図2)。通常のバイスペクトル解析を行うと時間平均された相関を検出することができるが、それでは2次元データの挙動との比較が難しくなると考え、空間方向の積分を先に行う以下の解析手法を適用した。

静電プローブデータの揺動成分 $x(\theta_i, t)$ に対して各データ計測時間に対して、 $a_j = \sum x(\theta_i, t) * \sin(m_j \times \theta)$, $b_j = \sum x(\theta_i, t) * \cos(m_j \times \theta)$ という空間的なフーリエ分解を行う。 $Z_i = a_i + ib_i = Z(t) * e^{i\omega t}$ と複素振幅表示をおこなうことで、あるモードの振幅と進行方向を同時に表すことができる。波数・周波数スペクトルで見出されたピークの周波数を含む、比較的広い幅の周波数フィルターをデータに適用しその状態で上記のデータ処理を行うことで、モードの周波数、位相が時間的に変化している時に、複数の波の相互位相がどうなるかを解析することができる。図3にD,C,Hの3つの波のうち、D、Cの波の強度を掛け合わせたものと、Hの波の強度、3波の間の位相差の情報を表示した。3つの波の位相が、そろっている時にはHの振幅が大きいことから、非線形相関によって、Hのピークが生成性されている可能性を示唆する。注目すべきは位相差の情報であり、位相差が0に近いあたりから、位相が急速にずれることが繰り返して観測されている。これは非線形結合が時間的に定常に起きているわけではなくて、結合がある時間帯と、そうでない時間帯を繰り返していることを意味している。

この相関がある時間帯から位相がずれる時にどのような現象が起きるかを2次元イメージングデータを使って調べた。図4に $t=0.062s$ から $0.063s$ にかけての2次元揺動の振る舞いをしめす。

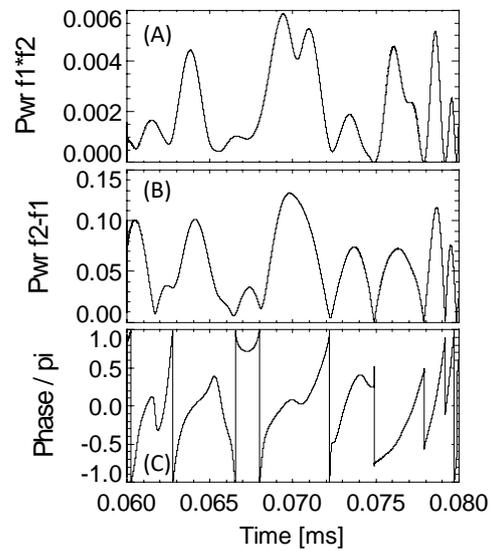
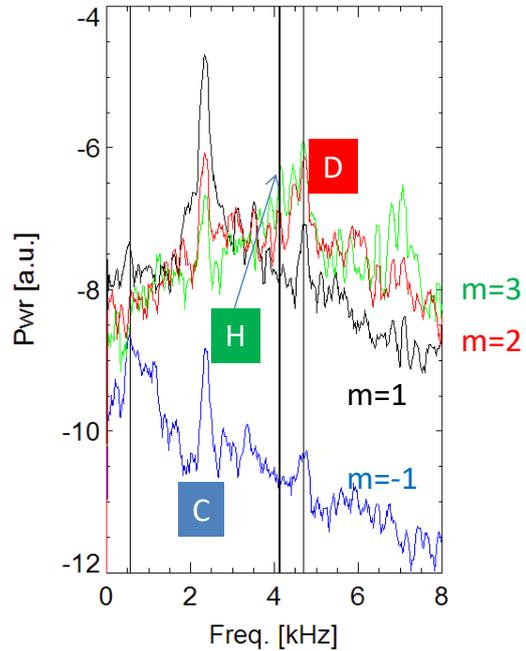


図3 CxDの振幅、Hの振幅、C,D,Dの位相差

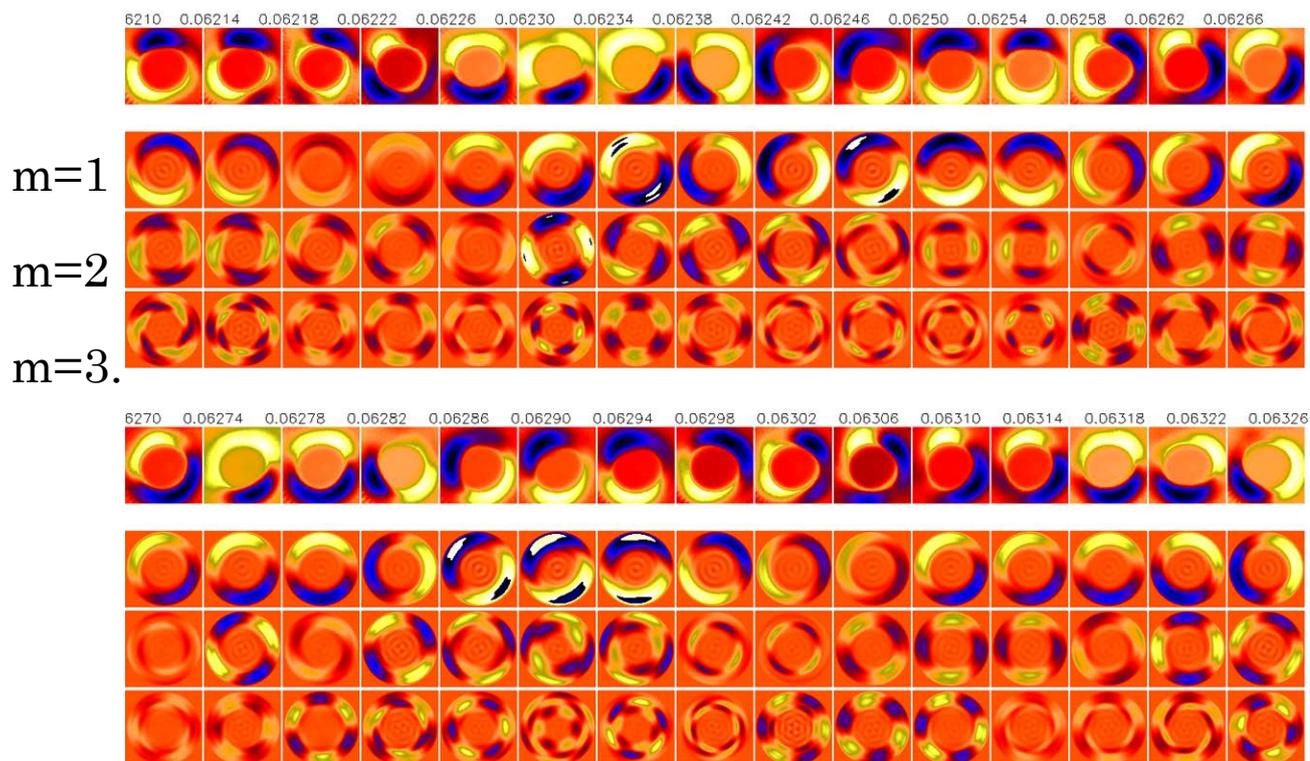


図4 位相がずれる時間帯での高速度カメラで測定した2次元揺動の振る舞い。

左から右へ時間が進んでいる。各段は $m=1, 2, 3$ とモード分解した結果となる。0.0628s 付近ではプラズマのコア部までモード構造が広がる。また、定常的に回転していた各モードが回転を止めて、再回転を始めるなどの複雑な現象が生じているが、現象の複雑さから現象の理解には至っていない。今後、多数観測されている位相スリップ時のイベントを多数集めて解析を行い、スリップから相関が失われる現象が本質的にはどんな物理現象が何であるかを解明したいと考えている。

[1] T. Yamada, et. al., Phys. Rev. Lett., **105**, 225002 (2010) .

複雑ネットワークの手法を用いたプラズマ乱流時系列データの新しい解析手法の開発

サブテーマ代表者：高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 谷澤俊弘

1 研究目的

超高温のプラズマを安定して閉じ込めるためにはプラズマ中に形成されるドリフト波乱流の物理的性質を詳細に理解することが必要不可欠である。乱流は、プラズマ流体の圧力・密度・温度・電位等の物理諸量の時系列データ中における一見したところランダムな振動として観測される。近年、本研究課題代表者（谷澤俊弘）および研究協力者（中村知道・兵庫県立大学）によって、時系列データで表現されるダイナミクスを複雑ネットワークの手法を用いて視覚化し直観的に理解する新しい手法が開発された。本研究は、この手法を磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波乱流の大容量時系列データの解析に応用し、そこから物理的情報を抽出する全く新しい手法を開発することを目的とする。

2 現在までの研究結果

本研究は 2012 年に谷澤と中村によって得られた時系列データのネットワーク化手法 [1] を円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の観測およびシミュレーションから得られる時系列データに適用するものである。この手法では、時刻 t における時系列データ $\mathbf{x}(t)$ をその時刻以前のいくつかのデータ $\mathbf{x}(t-1)$, $\mathbf{x}(t-2)$, ... とランダムノイズ $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ を用いて

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1\mathbf{x}(t-l_1) + \mathbf{a}_2\mathbf{x}(t-l_2) + \dots + \mathbf{a}_w\mathbf{x}(t-l_w) + \boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (1)$$

と線形モデル化する。ここで、パラメータ $\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_w$ は実際に観測された時系列データと線形モデルによって生成されるデータ間の誤差の二乗平均を最小化し、さらにモデルの最適化基準として情報量基準を合わせて用いることにより、いくつかの時間遅れ項 $\mathbf{x}(t-l_1), \mathbf{x}(t-l_2), \dots, \mathbf{x}(t-l_w)$ から最適な部分集合を選び出すものとして決められる。この手法は **Reduced Auto-Regressive Model (RAR)** と呼ばれている。RAR モデルは時系列データが持つ周期をその時間遅れ項の中に必ず含むことがわかっている。

図 1 は、今回解析した直線円筒型プラズマ内のドリフト波乱流の軸方向に直交する断面における全 64 チャンネルの測定値の一例である。この全 64 チャンネルの測定値を上述の方法で RAR モデル化すると、得られた時間遅れは図 2 のようになる。ここで、1 の時間遅れは 10[μ s] に対応しており、1~7 程度の時間遅れ項は、測定値に含まれるランダムネスを反映したものと考えてよい。したがって、非自明な時間遅れは下の表にまとめた通りとなり、周波数に直して、0.897[kHz], 0.962[kHz], 2.00[kHz], 3.22[kHz] に対応する周期が特徴的に現れていることが抽出できる。

lag	period [μ s]	frequency [kHz]
31	310	3.22
50	500	2.00
104	1040	0.962
111.5	1115	0.897

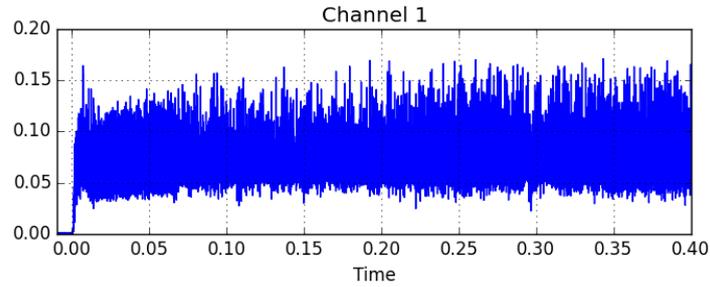


図 1 直線円筒型プラズマ内のドリフト波乱流の軸方向に直交する断面における全 64 チャンネルの測定値のうち第一チャンネルの測定結果。

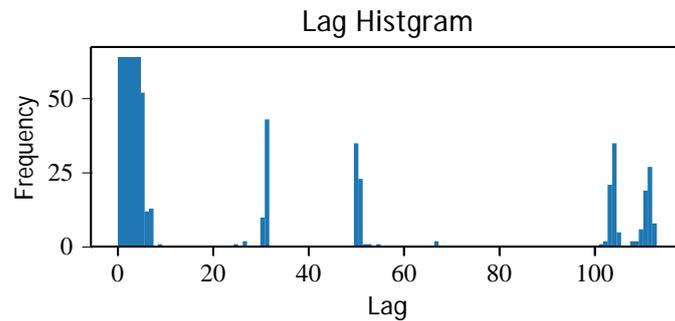


図 2 全 64 チャンネルの測定値を RAR モデル化し、得られた時間遅れのヒストグラム。

3 今後の研究の方向について

現在, RARモデルの時間遅れから得られる「周期」が離散フーリエ解析のパワースペクトル等から得られる「特徴的な周波数」とどのような関係にあるのかを解析中である。さらに各チャンネル間の関係性やプラズマ乱流の非局所的相関関係を明らかにするために、多次元時系列解析およびネットワーク可視化等に関する手法も新たに開発していく予定である。

4 研究成果発表

- 谷澤俊弘・中村知道, プラズマ・核融合学会誌小特集「核融合プラズマ研究におけるデータマイニングの活用」・ネットワーク可視化を用いた新しい時系列解析法, Vol. 92, 352–356 (2016).

参考文献

- [1] Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: “Networks with time structure from time series,” Physica A, Vol. 391, pp.4704-4710(2012).

医療用 CT における画像再構成手法のプラズマ乱流計測への応用

帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科 荒川弘之

・背景と研究目標

九州大学応用力学研究所における直線磁化プラズマ発生装置 PANTA では、近年コンピュータ断層撮影(CT)技術に応用し、多チャンネル光ファイバーを用いたプラズマ乱流揺動計測の開発が進められている。開発においては、光検出器による線積分されたプラズマの発光情報からプラズマ乱流揺動の情報を画像再構成手法により再構築する必要がある。一方で、CT 技術は当初医療分野において開発され、長年の実績により、その画質やノイズの評価の手法が多く開発されている。しかし、医療分野における CT 画像再構成手法やその評価の膨大な成果・知識量に対して、プラズマ乱流揺動計測への最適な手法の取り入れができていないのが現状である。この為、医療分野で現在導入されている、または導入が検討されている画像再構成手法をプラズマ乱流計測に応用を行うための基礎的な検討を行う。

以下の2つのアプローチにより、研究を行った。

(a)医療用 X 線 CT および画質評価用のファントムをコンピュータ上に構築し、基礎的な物理特性と画像のノイズ、ノイズレベル低減の為の画像再構成手法の選択を行なう。

(b)医療用 X 線 CT で近年研究されている”圧縮センシング”を用いたプラズマ乱流計測への適用について検討を行った。

以下、アプローチ(a)、(b)に分けて成果を報告する。

アプローチ(a)

・方法

本研究に用いる X 線のモンテカルロシミュレーションコード PHITS が X 線 CT のエネルギー領域において物理過程を正しく計算できるかどうかの確認を行った。材質が水、空気、ポリエチレン、アクリル、骨の厚さ 10 cm の板をそれぞれ計算機上に作成した。10~120keV の X 線をそれぞれの板へ入射させる計算を繰り返し行い、減弱係数及び統計的ゆらぎを、既知のデータと比較した。次に、X 線 CT の線源、検出器、ACR CT ファントムを計算機上にモデル化し、計算を行った。線源はファンビームとし、管電圧 120kV のエネルギースペクトルを模擬した。検出器数は 1 列、256ch とした。模擬計算から、サイノグラムを作成し、Shepp-Logan フィルタを用いたフィルタ補正逆投影法(FBP 法)で、再構成を行った。模擬計算は、X 線入射数を変えて複数回行った。

・結論

減弱係数は低エネルギー部分において、若干の違い(最大 20%程度)がみられたが、すべての材質において既知のデータとよく一致した。統計的な分布は、二項分布によく一致した。低エネルギー部分は画像再構成における寄与が少ないため、PHITS は、X 線 CT のエネルギー領域において、物理過程を正しく計算できると判断した。FBP 法により ACR CT ファントムの CT 値を求めた結果が、既知のデータとよく一致することを確認した。更に、X 線入射数を増加させることで、再構成されたファントム画像のノイズレベルが低くなることを確認した。

アプローチ(b)

・検討と結果

医療用 X 線 CT で近年活発に研究されている”圧縮センシング”を用いたプラズマ乱流計測の CT への適用について検討を行った。圧縮センシングは、医療用 CT において、通常数百の角度からの対象への投影が必要なところ、1/10 以下の投影角度から、対象内部の情報を高精度に再構成できる手法である。本研究対象となっている、直線磁化プラズマ発生装置でのプラズマ乱流計測においては、高時間分解能(1 μ sec)かつ高精度(5mm 程度)が必要とされる。このため、医療用 X 線 CT のように検出器を動かすことはできず、固定された計測器を用いる必要がある。また、設置位置の制約から、計測点は少ない形で高精度なプラズマ内部の再構成を行う必要がある。以上を考慮し、圧縮センシングをプラズマ CT へ適用することで、既存の手法よりも 2 倍程度の高精度化の可能性が見込まれることが分かった。

圧縮センシングを適用するにあたって、現状のプラズマ CT の計測体系の改良を検討した。現状はプラズマからの光を計測器を平行に並べて計測しているが、プラズマ周辺部における集光の効率が悪い。このため、扇状の形に計測器を並べて集光することが、より効率化が可能であると考えられる。

今後は、圧縮センシングによる再構成プログラムの制作を行い、プラズマの模擬データにより、計測体系(検出器間隔や集光角度)の最適化を進める。

成果報告：

(1) 第 72 回日本放射線技術学会総会学術大会(平成 28 年 4 月 17 日、パシフィコ横浜会議センター)にて発表を行い、**Premium Award** を受賞した(約 500 演題の中から学術的に最も優れた 1 演題のみが受賞)。(演題番号: 10183、題名「Monte Carlo Simulation of X-ray CT and Image Reconstruction by using PHITS」)

マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

1. 目的

乱流プラズマは太陽をはじめとした宇宙プラズマにおいても普遍的に観測されているが、核融合プラズマ研究においても種々の乱流物理現象の理解は最重要研究課題の一つである。特に非平衡な状態、現象が時間的に変化しているような状況における乱流の時空間構造を調べることは、この物理現象を理解する上で非常に重要である。しかしながら、高温プラズマ実験においては、その計測手段・状況がこれまで非常に限られていた。そこで我々は、マイクロ波を用いた新しい非接触な計測手法の開発を行い、乱流の高精度な時空間構造を観測することを目指している。これまでに周波数コムを用いたドップラー反射法を開発し、応用力学研究所の PANTA 装置や核融合研の大型ヘリカル装置 LHD などに適用し乱流構造に関する大規模なデータを得られるようになってきた。今回、より空間分解能を高くする計測手法を検討したので、以下に報告する。

2. 周波数掃引型反射計による乱流計測への適用についての概念

マイクロ波を用いた電子密度分布計測法として、周波数掃引型反射計という手法がある。これは、プラズマへ入射したマイクロ波が対応する反射層でカットオフされて戻ってくるまでの時間を位相変化量として測定し、反射層の位置を得るというものである。この時、位相変化の直読化のために、入射周波数を線形に掃引する。これは、周波数掃引速度 $\Delta f/\Delta t$ が位相変化に比例する関係を利用するためである。歴史的に、この掃引速度を速くすることで密度分布の再構成の精度を向上させる努力が続けられてきており、マイクロ波技術の進歩に伴い現在では $\Delta t = 1\mu\text{s}$

での掃引が可能になっている。

この高速掃引を利用すれば、 $1\mu\text{s}$

毎に同じ周波数のマイクロ波

をプラズマ中に入射してプローブ光として用いることが可能となる。

この測定法の概念を図1に示す。

周波数掃引を(a)のように繰り返している時に、

同じ周波数（緑点あるいは赤点）

が出現した時の、信号をサンプリング抽出して行けば、

周波数毎の反射層の揺らぎの時間変化、

すなわち時空間構造を求めることが可能となる。

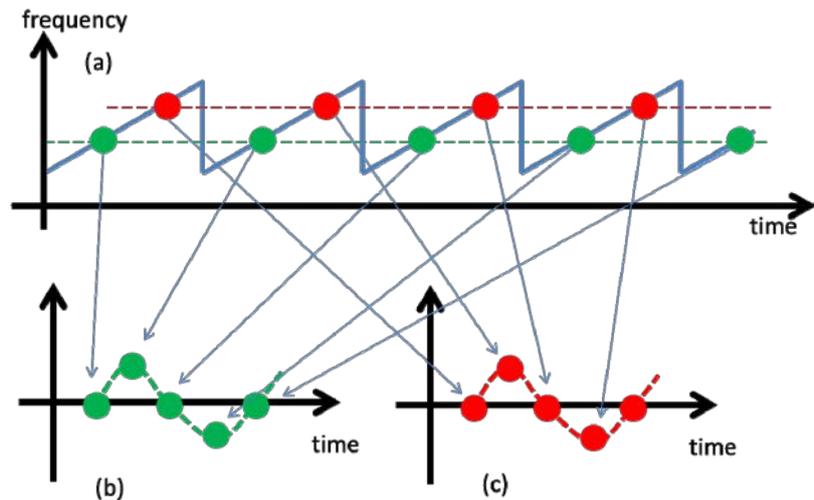


図1：周波数掃引システムによる揺動計測の概念図。それぞれの周波数成分発振時の信号をサンプリングすることで、周波数毎の位相変動信号を抽出する。

3. 高速掃引型反射計信号から模擬した乱流揺動信号を抽出できるかをシミュレーション調査

高速掃引型反射計の信号に計算機上で乱流成分(図2上に示すような乱流スペクトルを持つノイズ)を模擬して加え、これを入射周波数毎によるサンプリング処理で再現できるかどうかを調べた。掃引時間は $1\mu\text{s}$ とし、この繰り返し数を変えて、その分解能を調査した。図2(下)には、繰り返し512回分で求めた揺動信号成分の周波数スペクトルを示す。図のように元の乱流信号を再現できていることが分かる。一方、時間分解能を高めるため、この繰り返し数を減らすと、時間一周波数の関係から図3に示すように、元の乱流スペクトル波形を再現することは困難である。今回のように 500kHz 程度までの乱流信号を求めることを考えると、 $100\text{--}500\mu\text{s}$ 程度の時間分解能での時空間計測が可能であると考えられる。

今後、この計測をプラズマ実験で検証することを計画しているが、この測定には、速いサンプリングレートでのデータ収集 ($\Delta f/\Delta t$ に依存するが $>100\text{MHz}$ 以上) が必要であり、またプラズマによる乱流の時間変化すなわち時空間構造を求めるためには、大規模データの収集処理が必須となる。

4. 論文と学会発表

1. T.Tokuzawa, "Turbulence in edge and core transport barriers: new experimental results and modeling", Nuclear Fusion, Vol. 57, No.2, pp.025001 (2017).

また、次の学会にて発表を行った。

1. T. Tokuzawa, et al. "Observation of oscillation of poloidal rotation velocity in LHD, 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), Kaohsiung, Taiwan, June 27 – July 1, 2016.
2. T. Tokuzawa, et al., "Magnetic island formation in locked-like mode in helical plasmas 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan 17-22 October 2016
3. 徳沢季彦 "マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発", RIAM フォーラム 2016, 九州大学筑紫地区共通管理棟 3F 大会議室, 2016年6月2日.

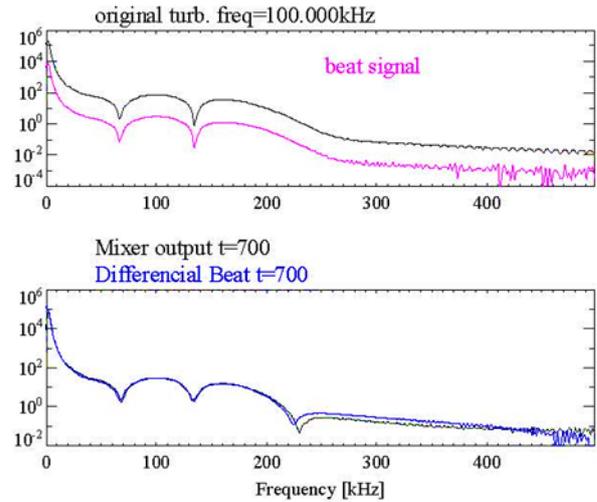


図2：高速掃引型反射計信号から乱流スペクトルを抽出した例。上図が模擬した乱流スペクトル信号(黒線)で下図が抽出した計測信号から求めた周波数スペクトル。周波数掃引繰り返し数：512回の場合

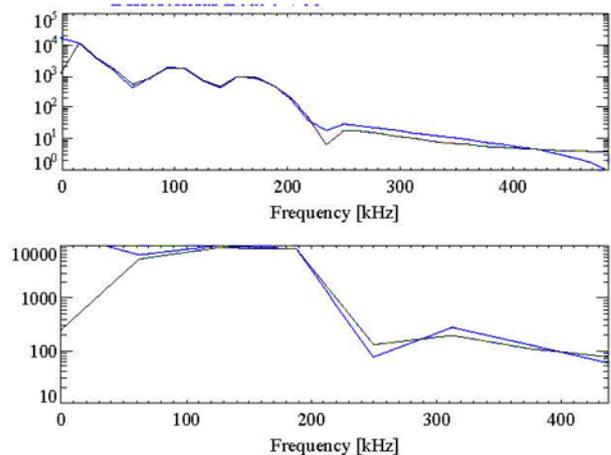


図3：異なる周波数掃引繰り返し数(上：64回、下：16回)の場合の信号から抽出した周波数スペクトル

プラズマ流れ場構造観測に関する統合的研究

核融合科学研究所 へリカル研究部 居田克巳

目的

本研究はプラズマ流れ場構造に関する計測手法の開発が目的である。高温プラズマ中のイオンの流れ場の速度はイオンの熱速度より小さく、そのマッハ数は1以下である。イオンの速度空間の分布がシフトしたマックスウエル・ボルツマン分布をしている時には、イオンの流れ場の速度はその1次のモーメントで定義される。しかしながら、プラズマが小崩壊現象を起こす場合にはイオン分布関数に歪みが生じる為に、1次のモーメントで定義されたイオンの流れ場の速度を研究するだけでは不十分となる。ここでは、イオン分布関数に歪みが生じたときに、イオン分布関数のマックスウエル・ボルツマンからのずれを検出する方法を開発する。本手法の更なる高度化のため、多くの装置のプラズマ実験に適用する。更に、開いた磁力線構造でのプラズマ流れ場構造の理解のため応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験も併せて行う。

プラズマの小崩壊現象

今年度は、核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置 LHD において、イオン分布関数を計測する為の高速荷電交換分光を用いて、小崩壊現象に伴うマックスウエル・ボルツマンからのずれを観測した。図1はプラズマが小崩壊現象を起こした時の異なるトロイダル角において磁気プローブで計測したポロイダル磁場変動、電子サイクロトロン放射で計測した電子温度、その時間変化から求めたプラズマの変位量、RFプローブで計測したイオンサイクロトロン放射強度の時間変化である。

プラズマの小崩壊現象は、トロイダル方向に局在化したポロイダル磁場変動と、プラズマの2cmにもおおよぶ外側への変位によって特徴つけられるタング変形がトリガーとなり、イオンの速度空間の変化により引き起こされた不安定性によるイオンサイクロトロン放射強度の急激な上昇とプラズマの急激な電子の温度低下として観測される。

イオン分布関数の歪み

イオン分布関数を計測する為に、高速の荷電交換分光で炭素イオンのトロイダル方向の速度空間分布を計測した。図2はタング変形前後のトロイダル方向のイオンの速度分布関数、ガウスフィット曲線と測定値、を使って求めた速度分布関数上のへこ

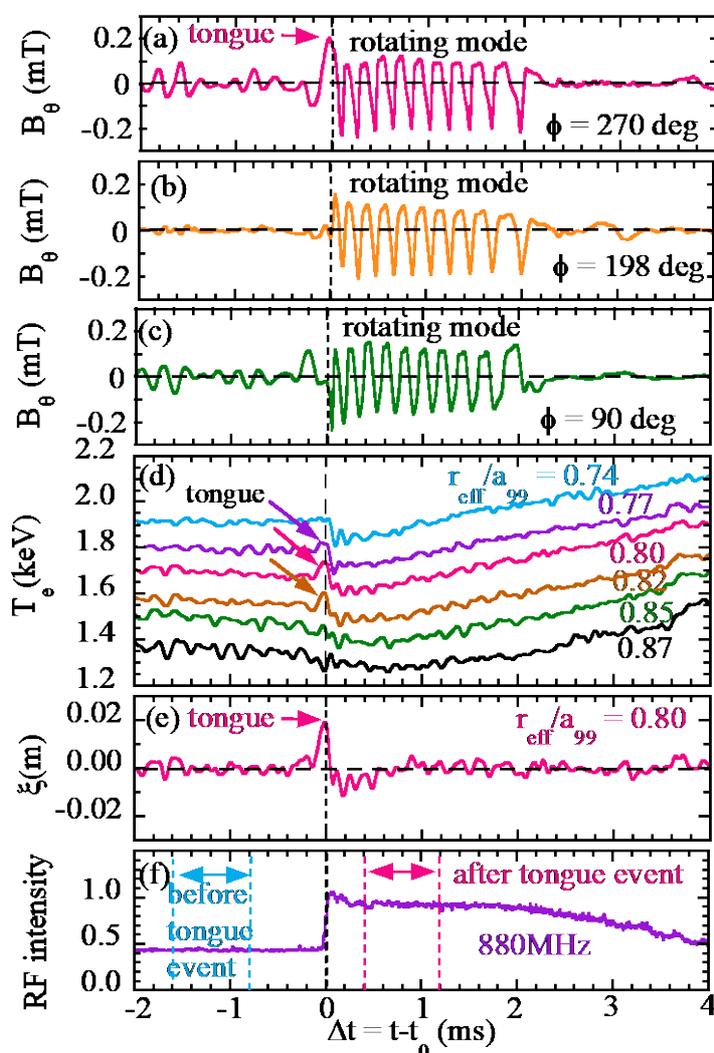


図1 プラズマが小崩壊現象を起こした時の (a)(b)(c)異なるトロイダル角でのポロイダル磁場変動、(d)電子温度、(e)プラズマの変位量、(f)RFプローブで計測したイオンサイクロトロン放射強度の時間変化

み (dent) とふくらみ (swell) の時間変化と、へこみとふくらみの時空間変化である。ここでは、イオンの速度分布関数の時間変化を詳細に解析する為に、RF プロブで計測したイオンサイクロトロン放射強度の立ち上がりを参照時間として「条件付き平均法」を適用した。タング変形前のイオンの速度空間分布はマックスウエル・ボルツマン分布をしているが、タング変形後にマックスウエル・ボルツマン分布からのずれが観測された。このずれは、等価電流と同じ方向($V>0$)に移動しているイオン密度の減少と、逆方向($V<0$)に移動しているイオン密度の増加を示している。へこみとふくらみは規格化平均小半径 0.7 付近で発生して、その後プラズマの周辺部 (規格化平均小半径 1.0) に伝播し、3-4ms 後には消滅する。

補足粒子が等価電流と同じ方向に運動するときには内側 (磁気軸側) に少しシフトするのに対し、等価電流と逆方向に運動するときには外側に少しシフトする。従って、観測されたへこみ (dent) とふくらみ (swell) は熱速度から熱速度の 2 倍程度のエピサーマルの補足粒子の勾配の急激な減少が原因と考えられる。このへこみとふくらみはイオン・イオン衝突時間のタイムスケールでマックスウエル・ボルツマン分布へと緩和する為にタング変形にトリガーされたプラズマ小崩壊の後に過渡的に観測される。

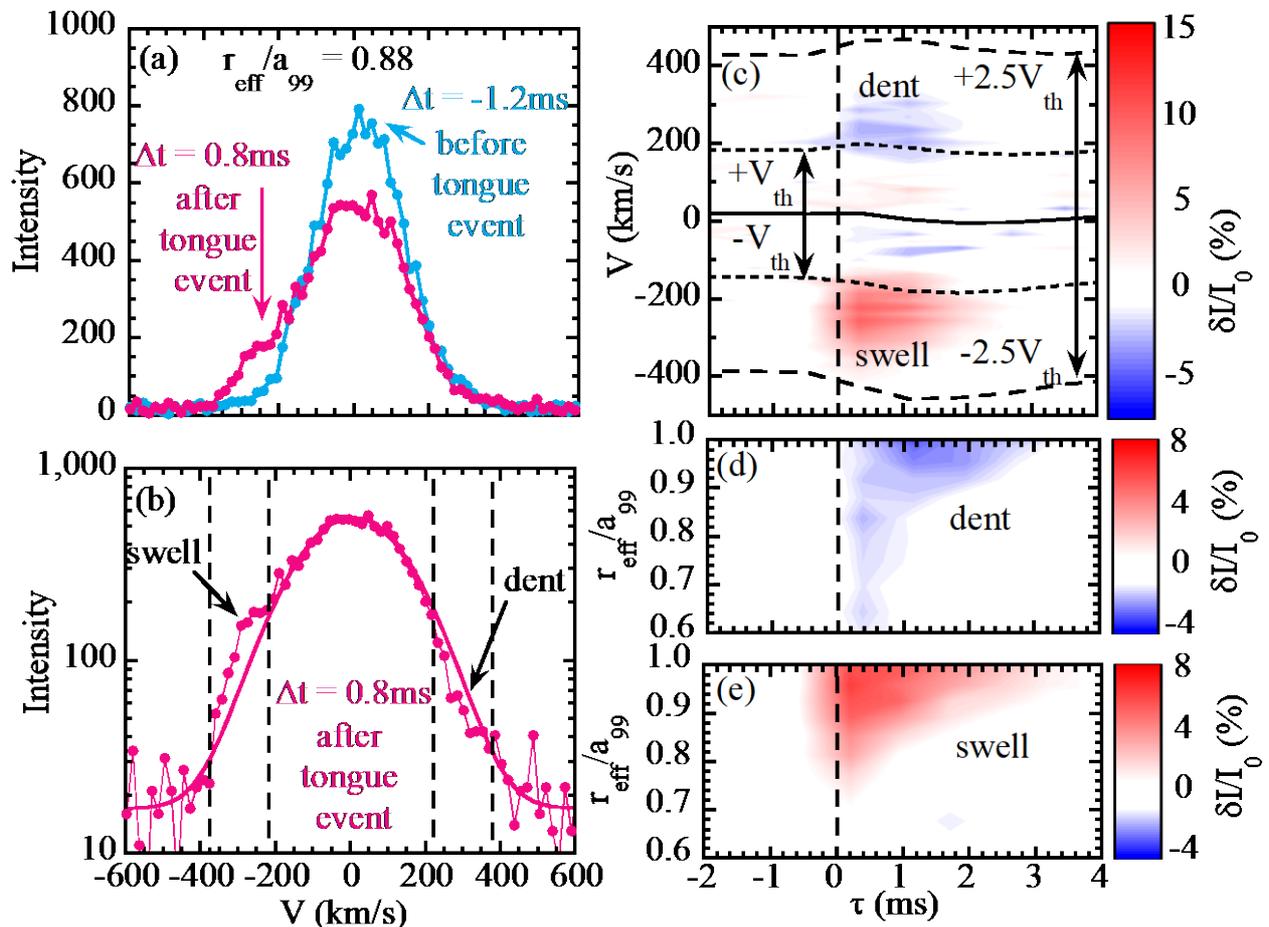


図 2 (a)タング変形前後のトロイダル方向のイオンの速度分布関数、(b)ガウスフィット曲線と測定値、速度分布関数上の(c)へこみ (dent) とふくらみ (swell) の時間変化、(d)へこみと(e)ふくらみの時空間変化

成果の評価

流れ場計測に重要なイオン分布関数の計測において、プラズマ小崩壊現象に伴ってイオン分布関数に歪みが現れる事が明らかにした点で、大きな成果と考えられる。これらの成果をまとめた論文が Scientific Reports 6 (2016) 36217 に掲載された*。論文発表に合わせて、核融合科学研究所で共同プレスリリースを行った**。本成果は国内の新聞のみならず、海外のインターネットメディアにも取り上げられるなど、国際的にも高い評価を受けた。本研究で使われた「条件付き平均法」は LHD

において九州大学と共同で開発されたものであるが、トロイダル磁場閉じ込め装置にその手法が応用され、イオン分布関数に歪みの発見に結びついたのは意義深い。

*参考論文

<http://www.nature.com/articles/srep36217>

**プレスリリース

<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/59>

研究組織

居田克巳	核融合科学研究所	(59歳、男性)
小林達也	核融合科学研究所	(30歳、男性)
稲垣滋	九州大学応用力学研究所	(48歳、男性)

デジタル相関 ECE 計測の開発とプラズマ実験への適用

核融合科学研究所 土屋 隼人

1. 要旨

開発中のデジタル相関 ECE 計測を LHD 実験に応用するべく、高速デジタイザーのシーケンシャルモードの開発とデジタル相関 ECE 計測の特性を検証した。開発中の同計測はデータ量が大きく、また LHD で使われているデジタイザーと異なるため、データ収集系の独自開発が必要であった。また、同計測手法は実験の後に測定パラメータを変更できるという利点があるが、パラメータ設定の自由度が高いために、解析結果の見え方が大きく変わることを示唆した。

2. 序論

あらゆる実験研究分野において、高空間分解能かつ高時間分解能で現象を観測することで、現象を正しく理解し、新たな発見をもたらす。プラズマ研究においても同様に、乱流のようなスケールが小さく現象の時間スケールも小さい現象を正確に観測する計測器が望まれている。LHD のような大型のプラズマ実験装置では、磁場強度と電子温度領域の関係から、電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測が利用できる。そこで、ラジオメーターを用いた ECE 計測を発展させたデジタルコリレーション ECE(DCECE)を提案している[1]。昨年度までに、応用力学研究所との協力により本計測を大型ヘリカル装置(LHD)に導入し実データの取得を試験的に行っており、今年度は、高速デジタイザーを LHD に導入した。LHD 実験は3分周期のプラズマ放電が行われており、本計測の稼働率を上げるために、シーケンシャルモードを備えた自動収集システムを開発し運用を開始することができた。

3. デジタルコリレーション ECE 原理

近代ではムーアの法則(半導体の集積密度は1.5~2年で倍増する)として知られているように保存できるデータ量が飛躍的に伸びてきましたが、データのサンプリング速度も伸びてきました。ADC (Analog Digital Converter) を有するデータ収集装置の高性能化により、ギガヘルツもしくは数十ギガヘルツの帯域をもつ機器も開発されてきた。つまり、LHD などの大型磁場閉じ込め装置のプラズマから放射される ECE の

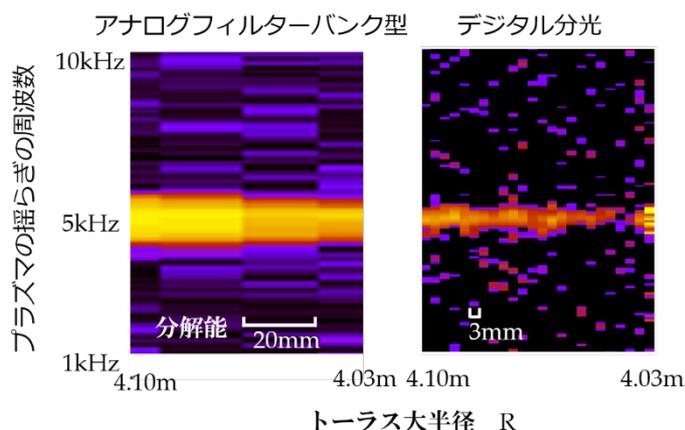


図1. フィルターバンク型とデジタル相関 ECE の分解能の比較

周波数帯は 50GHz 以上であるが、ヘテロダイン検波を行った中間周波数帯（IF：intermediate frequency）は通常ギガヘルツ帯であるので、直接 IF をデジタル化し、IF 波形を保存することが可能になった。これにより、離散化された IF 波形をフーリエ変換することで、IF の分光スペクトルを得ることができる（デジタル分光）。分光スペクトルの時間変化を高速で追うことで、スペクトルパワーに比例する電子温度の揺動を測定することができる。しかしこのままでは離散化ノイズなどが多いので、相関 ECE の原理を適応し、有意なプラズマ揺動の観測につなげる。

この計測の最大の利点は従来のアナログバンドパスフィルターをつかったフィルターバンク型ラジオメーターよりトーラス小半径方向の空間分解能が高いことであり、かつ分解能は可変であることである。図 1 にフィルターバンク型と本計測の分解能の比較を示す。フィルターバンク型では分解能が 20 mm で固定であるが、本計測手法では一例として 3mm を示した。

4. ECE 実データ取得とパラメータ比較

大型ヘリカル装置（LHD）において、高速デジタル化（LabMaster 10-36Zi, teledyne lecroy 社製, データ長 512Mbyte）を用い ECE の IF 波形を取得した。図 2 に本手法で得られた電子揺動分布を示す。図のカラー軸は隣接する地点とのコヒーレンスを示し、縦軸の IF 周波数はプラズマ中のトーラス小半径方向に対応する。1-4GHz を 12 分割 ($N_{ch}=12$) から 48 分割した場合において図の丸印の部分に局所的な有意な揺動が発見された。しかし、解像度を上げるとバックグラウンドレベルと同程度になり検出できなくなる。このようにパラメータの選択が重要であり、揺動レベルと現象のスケールに応じて適切な解像度やサンプリング周波数を設定する必要がある。

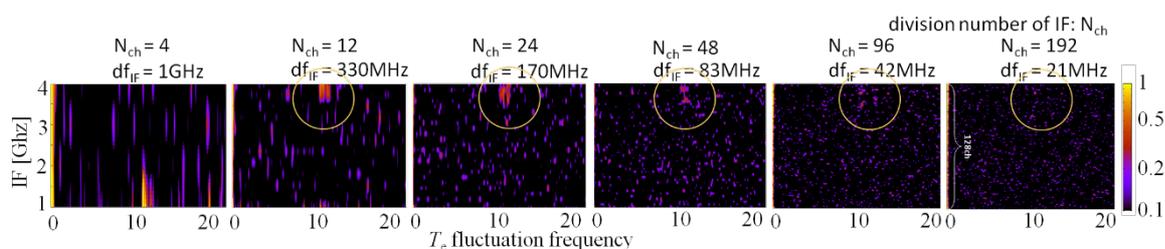


図 2. デジタル相関 ECE の分解能パラメータの違いによるコヒーレンス分布の比較

参考文献

*1. Hayato TSUCHIYA, Sigeru INAGAKI^{1,2)}, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA and Yoshio NAGAYAMA, Plasma and Fusion Research Volume 9, 3402021 (2014)

発表論文

1. H. Tsuchiya, S. Inagaki, T. Tokuzawa, N. Tamura, Y. Nagayama

“Validation of the Digital Correlation ECE measurement technique using low frequency fluctuation in LHD”

Plasma and Fusion Research 11, 2402072 (2016).

振幅変調反応性高周波放電中のナノ粒子量のエンベロープ解析

古閑一憲、白谷正治、稲垣滋

半導体集積回路製造においてトランジスタを作製する前工程の 70%以上を占めるまでに成長したプラズマプロセスは今、「3次元スケーリング」に対応する新展開が求められている。中でもプラズマプロセスにおけるゆらぎの抑制は、作製デバイスのプロセス寸法精度を決定する最重要課題の一つである。筆者らは、プロセスプラズマ中ナノ粒子をナノ界面のモデルとして用い、プラズマとナノ界面の相互作用ゆらぎについて研究している。現在までに以下の結果を得ている。

- 1) 高周波放電 CVD プラズマ中で形成されるナノ粒子に関して、放電電圧の振幅変調がサイズ・サイズ分散の減少をもたらす [1]。
- 2) 結果 1)において、ナノ粒子とラジカルのカップリングが重要な役割を果たしている[2]。
- 3) 振幅変調放電におけるナノ粒子量のゆらぎにプラズマ乱流解析を適用し、ラジカルとナノ粒子の非線形結合を示唆する結果を得た。
- 4) プラズマ乱流解析で用いられているエンベロープ解析を適用してプラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎの抽出に成功した。

ここでは、エンベロープ解析を用いてプラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎの時空間構造を調べた結果を報告する。

実験には、図 1 に示す容量結合型プラズマ CVD 装置を用いた[1]。反応容器中心に直径 60mm($r = -30 \sim +30$ mm)の 2 枚の電極を 20mm($z = 0 \sim 20$ mm)の間隔で設置した。Ar と DMOS($\text{Si}(\text{CH}_3)_2(\text{OCH}_3)_2$)を、それぞれガス流量 40sccm、2sccm で容器内に導入し、圧力を 166.3Pa とした。周波数 60MHz、電圧 120V の高周波電圧を電極間に印加し、プラズマを生成した。このとき、放電電圧に変調周波数 100Hz、変調度 30%の正弦波で振幅変調を加え、プラズマ密度に意図的に摂動を与えることにより、プラズマ密度の揺動がナノ粒子成長に与える影響について調べた。気相中ナノ粒子量の時空間変化は 2 次元レーザー散乱法で計測した。シート状 YAG レーザー光(厚さ 16mm、幅 1mm、入射パワー 2.0W、波長 532nm)を、接地電極と放電電極間(電極間距離 20mm)に平行に入射し、ナノ粒子からの 90 度レーリ散乱光を、干渉フィルタを装着した高速度カメラ(1000fps)で撮影した[3, 4]。

レーザー散乱光(LLS)強度にエンベロープ解析を適用して、ナノ粒子とプラズマの相互作用ゆらぎを抽出した。LLS 強度に 94 -106Hz でバンドパスフィルタをかけることで、LLS 強度ゆらぎの 100Hz 成分を抜き出し、100Hz 振幅のエンベロープを得た。100Hz エンベロープは、プラズマポテンシャル振動によるナノ粒子密度揺動に対応するものと考えられ、100Hz エンベロー

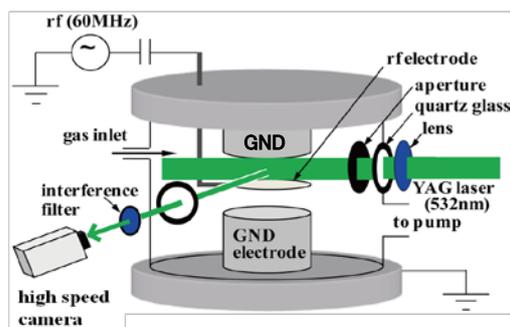


図 1. 実験装置図。

プの振動成分は、プラズマポテンシャルとナノ粒子の相互作用ゆらぎを示唆している[5, 6]。

図 2(a)、(b)、(c)にそれぞれ放電開始 3、3.25、5 秒後におけるプラズマポテンシャルとナノ粒子の相互作用ゆらぎの電極間全体の空間分布を示す。図 2(a)では、電極中心($|r| \leq 5 \text{ mm}$)付近の放電電極近傍($z = 3 \sim 6 \text{ mm}$)において、強い相互作用ゆらぎが発生している。同時に電極の周縁部($|r| \sim 25 \text{ mm}$)において電極間で強いゆらぎが発生している。図 2(b)では、電極中心付近に発生している強い相互作用ゆらぎが図 2(a)より電極上部へ少し形を変えながら伝搬している。また、図 2(a)で $|r| \sim 25 \text{ mm}$ 付近でほとんど左右均一な強さであった相互作用ゆらぎが、 $r = 25 \text{ mm}$ 付近のみで強い相互作用ゆらぎとなっている。これは、 $r \geq 25 \text{ mm}$ で発生したゆらぎが $r = 25 \text{ mm}$ で垂直に発生しているゆらぎに衝突しているためである。図 2(c)では、図 2(a)、(b)と比較して空間全体で均一に相互作用ゆらぎが存在している。この時間帯では、相互作用ゆらぎの伝搬はほとんど見られず、局所的に相互作用ゆらぎが発生している。これらの結果は、筆者らがこれまでに明らかにした電極間の $r = 0 \text{ mm}$ で発生していた相互作用

ゆらぎの発生・伝搬の結果と一致している。今後は、電極間全体における相互作用ゆらぎの発生・伝搬の時空間構造の解明へと繋げたい。応用の観点からは、電極周辺部だけでなく電極中央部近傍にも強い揺らぎが存在する点がプロセスの均一性との関連で興味深い。

参考文献

- [1] K. Kamataki, et al., J. Instrum. 7 (2012) C04017.
- [2] M. Shiratani, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 010201.
- [3] M. Shiratani, et al., Faraday Discussions., **137** (2008) 127.
- [4] S. Nunomura, et al., J. Appl. Phys., **99** (2006) 083202.
- [5] T. Yamada, et al., Nature Phys. **4** (2008) 721.
- [6] T. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion **55** (2015) 063009.

学会発表：国際会議 4 件、国内会議 3 件

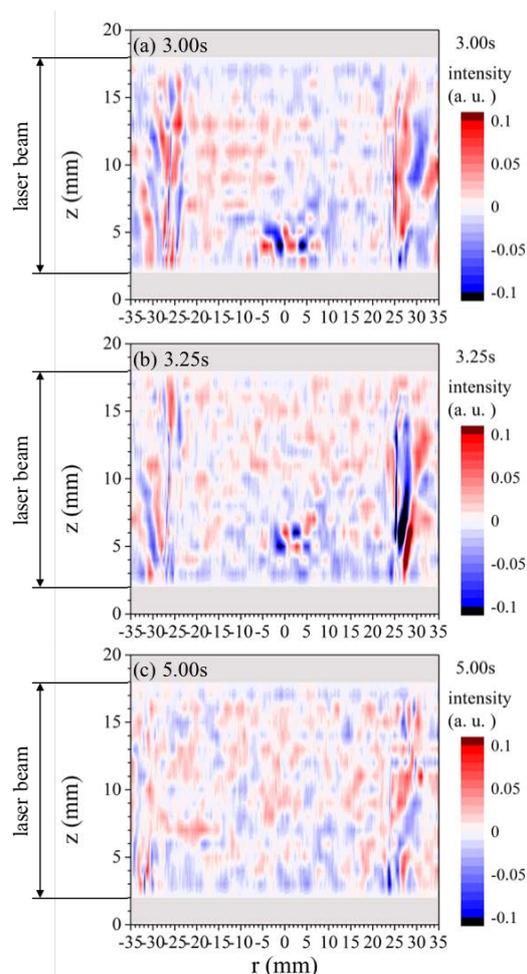


図 2. プラズマポテンシャルとナノ粒子の相互作用ゆらぎの空間構造。それぞれ放電開始後、(a) 3.00s, (b) 3.25s, (c) 5.00s。

極限プラズマ科学研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2:極限プラズマ科学の新研究手法の開発」における個別課題の成果の統合を議論する。

目的と背景

現在、極限プラズマは新機能性物質創生、半導体プロセス、医療応用、核融合等、様々な分野で発展しており、それらを包括する学術基盤の形成は近未来の技術革新にとって非常に重要である。極限プラズマ科学はプラズマの非平衡性、極限的な性質の理解を通し、様々な産業に応用する為の基盤を与える。本研究では、研究集会を開催し、特定研究 2 のサブテーマリーダーが一堂に会して、それぞれの領域で発展してきたプラズマ科学の中から共通な機構や課題を抽出するための議論を行う場を提供する事を目的とする。プラズマ科学の多方面からの研究者が一堂に会して議論し、個別のアプローチを統合することで、極限プラズマの研究手法そのものに新展がもたらされることが期待できる。本研究で取り組む課題はプラズマ乱流に限らず、医療やナノ粒子生成等多くの先端科学における共通の課題であり、応用力学研究所の共同研究として遂行し先導する事が必要である。

研究集会の開催

2017年2月23-24日に応用力学研究所 2F 会議室において研究集会を開催した。研究会のプログラムを添付する。

予算の執行

予算は研究集会参加の旅費に執行した。

研究集会のまとめ

基礎プラズマにおける乱流計測データの同時多点計測技術の進展、トロイダルプラズマにおける乱流輸送解析法の開発、プラズマ乱流計測で開発した手法の医療用 CT で開発された圧縮センシング技術のプラズマ乱流計測への適用、プロセスプラズマに時空間における不均一性の高精度計測に加え、ソーシャルネットワーク科学に用いられるビックデータ解析手法に関してその成果を発表し情報交換及び討論を行った。以下に主な成果を記す。

トロイダルプラズマにおける長年の問題であったプラズマの局所的変形からフルート状の巨視的振動へと緩和するプロセスが初めて観測された。圧力の高いプラズマではプラズマの一部が局所的に変形し、それがプラズマ全体へと広がって行きやがて中立安定となる事が理論的に予測されていたが、これまでプラズマの局所的変形を観測した事はなかった。LHD ではイオンサイクロトロン輻射と磁気プローブ信号との関連に着目する事で巨視的振動と局所変形の弁別に成功した。また、これらの信号をトリガーとする事でイオン速度分布関数の歪みの時間発展を観測する事に成功した。

PANTA における乱流構造の理解が進展し、乱流の相図の再検討を行った。これまで Streamer 相、孤立波相、弱非線形相と分かれていた領域の境界を非線形結合度により定量的に決定する事が提案された。今回の相図はプラズマの運転条件をパラメータとした2次元図であり、乱流の物理量への変換、多次元化について議論がなされた。

レーザーによる精密計測に関して多くの議論がなされた。トリプルグレーティング分光器を用いてトムソン散乱により PANTA プラズマの温度、密度の径方向勾配が得られた。空間分解能 1mm 程度での温度、密度の評価が可能になり、半径 3cm 程度の位置で密度勾配が急激に現れる事、プラズマの条件によってその勾配の位置がシフトする事が明らかになった。また、天文分野で用いられている波面センサーをプラズマに適用し、密度揺動を検出する試みが行われた。レーザーの波長が最適ではないもののプラズマ中の密度揺らぎによる波面の揺らぎ、正確にはハルトマンスポットの変動、の検出に成功した。今後の展開として2波長化やレーザー光渦等の導入による感度向上が議論された。

本特定研究で発展してきた研究手法は PANTA のみならず、LHD のような大型高温プラズマにも適用が開始されている。周波数コムを用いた超精密計測がルーチンの稼働を開始した。更にデジタル相関 ECE も稼働し始めており大量にデータを取得する事が一つの研究手法として定着しつつある。

ソーシャルネットワーク科学の手法が紹介された。ネットワーク科学ではある地点あるいはある時刻の変数の値を得るのに有限な周辺、及び有限な過去の変数の値を用いる、というものであり、方程式から予測するというアプローチとは大きく異なっている。ソーシャルネットワークでは情報の伝搬の様相が、情報が真か偽かで変わる事が指摘されている。例えばデマが広がるにはある条件があり、デマの流行は一種の相転移状態と考えられる事が紹介され、プラズマ乱流との異同が議論された。ネットワーク科学、数理情報学、イメージングは非常に親和性が高い。これらの協同によりこれまで見えなかった現象が観測できる事が期待される。新たなプラズマ研究法としての期待が高まった。

直線ヘリコンプラズマにおける径方向構造のトムソン散乱計測 Thomson scattering measurements of radial structures in a linear helicon plasma

富田健太郎（九大総理工）、内野喜一郎（九大総理工）、稲垣滋（九大応力研）

要旨

直線ヘリコンプラズマ装置 PANTA に対してレーザートムソン散乱計測を行い、プラズマの電子密度・温度の径方向分布を明らかにした。プラズマ生成時の磁場強度およびガス圧 (Ar) はそれぞれ 600, 900, 1500 Gauss, 1, 3, 5 mTorr とした。計測用レーザーには Nd:YAG レーザー第2高調波 (波長532 nm) を、検出器には信号増強型 CCD カメラを用いた。微弱なトムソン散乱信号を検出するため、レーザー500 ショット分の信号積算を行うと同時に、迷光除去のために差分散型三回折格子分光器を用いた。計測はプラズマ中心 ($r=0$) および $r=20, 30, 40, 50$ mm の5点で行った。磁場やガス圧にかかわらず、 $r=30$ mm 付近で急激な電子密度勾配が確認された。プラズマ中心での電子密度・電子温度範囲は、それぞれ $(1.3-2.6) \times 10^{19} m^{-3}, 1.2-2.4$ eV であった。また、プラズマ周辺部 ($r=40$ mm) における電子密度・電子温度範囲はそれぞれ $(2-3) \times 10^{18} m^{-3}, 0.4-1.5$ eV であった。今後の時間分解計測のための予備実験として、レーザー1 ショットでの計測を行った。現行のシステムであっても $10^{19} m^{-3}$ 以上の電子密度領域であれば、単発でのトムソン散乱計測が可能であることを確認した。

序論

プラズマの応用研究は、核融合を目指した磁場閉じ込めや半導体プロセス、高出力光源や農業・バイオ応用など、広範に渡っている。ヘリコンプラズマは比較的容易に生成する事が可能であり、磁化プラズマ乱流やプロセスプラズマの基礎過程の研究に利用されてきた。応用力学研究所の直線プラズマ乱流装置 PANTA においてヘリコンプラズマ中に乱流を励起し、乱流が輸送に与える影響を観察している。PANTA ではプラズマの計測にはプローブ法や分光法が用いられてきたが、乱流駆動輸送のより定量的な評価を行うためにはプラズマの温度と密度の径方向分布を高精度に計測し、勾配と流束を評価する事が必須である。トムソン散乱計測はプラズマに与える擾乱が小さく、かつ高精度に温度と密度が計測可能である。本研究では PANTA プラズマの電子密度・電子温度の径方向構造を高精度に観測する事を目指し、トムソン散乱計測の適用を試みた。

すでに行われているプローブ計測の結果から、予想される電子密度・電子温度の範囲はそれぞれ $10^{19} m^{-3}$ 、数 eV と予想された。このようなプラズマに対しては、0.1 J クラスの小規模な可視光レーザーをプローブとした、比較的簡易なシステムでトムソン散乱計測が可能

であると予想された。前年度は PANTA プラズマに初めて可視プローブを用いたトムソン散乱計測システムを構築し、プラズマ中心位置における電子密度・電子温度計測の実証を行った（文献、まだ投稿中）。本年度はこの結果をさらに進展させ、プラズマの径方向計測、並びに時間分解計測に向けた、1ショット計測の実証を行った。

実験方法（トムソン散乱）

トムソン散乱計測は、核融合を目的とした磁場閉じ込めプラズマや、低圧半導体プロセスプラズマ、さらには高気圧中で生成される大気圧非平衡プラズマなど、様々な電子密度・電子温度領域にあるプラズマに対して、すでに適用されている。PANTA プラズマで予想される電子密度・電子温度からのトムソン散乱信号は微弱であることが予想される。また、数 eV 程度の電子温度であるため、可視波長（波長 532 nm を想定）プローブの場合、トムソン散乱スペクトル広がり、レーザー波長を中心に、2, 3 nm 程度であると予想される。このとき、計測レーザーの一部がチャンバー窓表面などで乱反射し、迷光として分光器内に侵入して微弱なトムソン散乱スペクトルを覆い隠す恐れがある。まず、微弱な散乱信号に対しては、多くのレーザーショットからの散乱信号を、検出器側で積算計測することで対処した。また、迷光の除去に関しては、高い迷光除去性能が確認されている差分散型三回折格子分光器（以下トリプル分光器と呼ぶ）を構築・使用することで対処した。

実験装置

トムソン散乱計測に向けて、次のような実験装置を構築した。全体の装置配置を図 1 に示す。

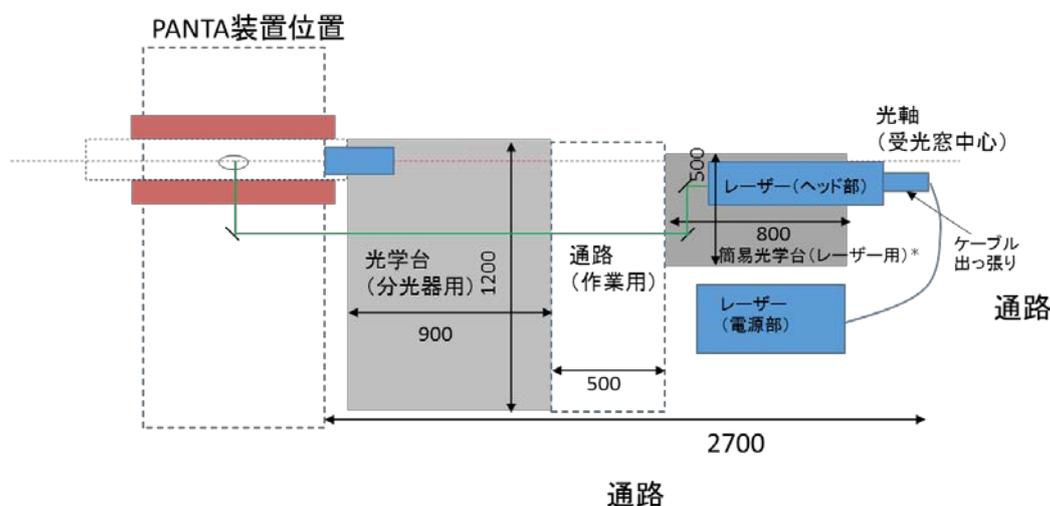


図 1. PANTA 用可視トムソン散乱計測システムの配置図（図中スケールはすべて mm）

計測に必要な主な装置は、レーザー（Q スイッチ Nd:YAG レーザー）、分光器である。分光器は市販の光学実験用台の上に、各種光学部品を組み込んで自作した。分光器内の概要を図 2 に示す。図 2 には併せて、散乱光の受光光学系の概略を示した。1st レンズはできる限り大きな受光立体角が望ましいが、チャンバー外に配置せざるを得ないことや、保有するレンズ種類の制限から、焦点距離 400 mm で、有効直径 46 mm のアクロマートレンズを使用した。このレンズで一度平行光にした散乱光の一部を、 $f = 220$ mm のレンズで入口スリットに集光し、分光器内に導いた。分光器内の回折格子は、トムソン散乱で使用する偏向方向に高い回折効率を持つ、サインカーブ形状の反射型回折格子（刻線本数 2400 本/mm）を用いた。スリット幅、焦点距離、回折格子条件などで決まる波長分解能は、0.2 nm 程度であった。検出器には ICCD カメラ（米国 Princeton Instruments 社製 PIMAX）を用いた。使用したプローブレーザーは移動が容易な小型のレーザー（米国 Continuum 社製 Surelite）を用いた。今回使用した第 2 高調波（波長 532 nm）の出力は 130 mJ 程度であり、レーザーの繰り返し周波数は 10 Hz であった。

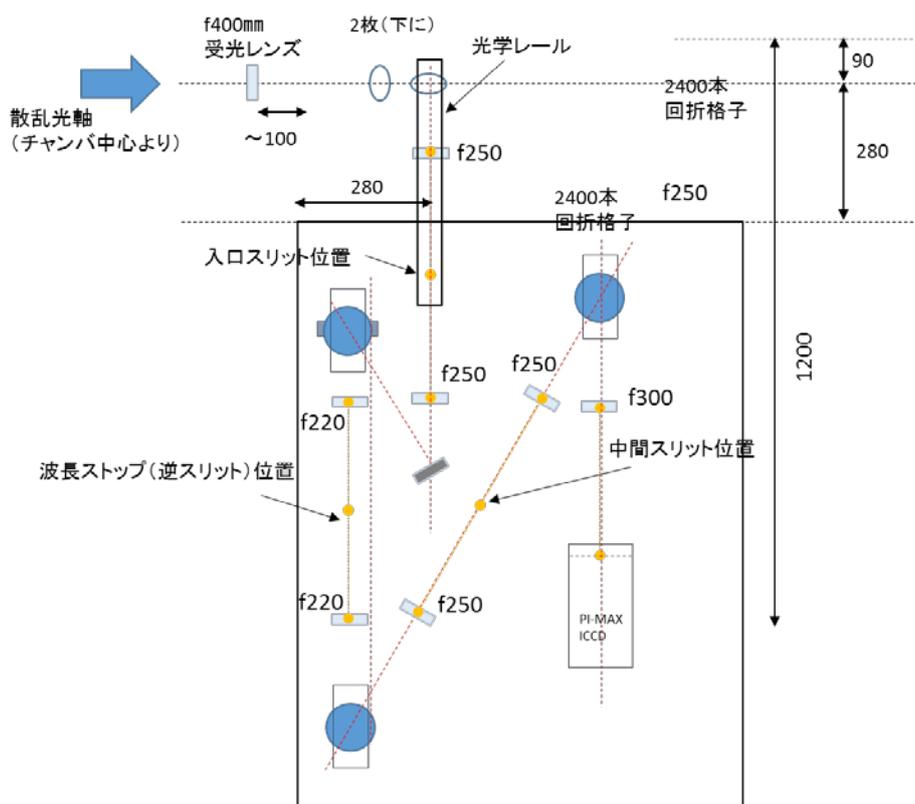


図 2. トムソン散乱用トリプル分光器の概要図（図中スケールは mm）

図 3 に計測システム導入後の装置周辺の写真を示す。計測時、分光器やレーザー光軸は、背景光を除去するために完全に遮光した。図 4 には自作したトリプル分光器の写真を示す。

分光器および受光系の光軸調整は、PANTA チャンバー側面の反対側の窓から、波長532 nmの半導体レーザーを入射し、行った。



図 3. トムソン散乱システム導入後の PANTA 装置周辺写真。プローブレザーのレーザーヘッドは写真下。レーザーは暗箱を通り、PANTA 装置した側に設置されたミラーおよび集光レンズを通り、チャンバー中心軸上で集光され、その後チャンバー上側のビームダンプに導かれる。トムソン散乱光の一部は、PANTA チャンバー横の窓からレンズで受光され、分光器内に導かれた。

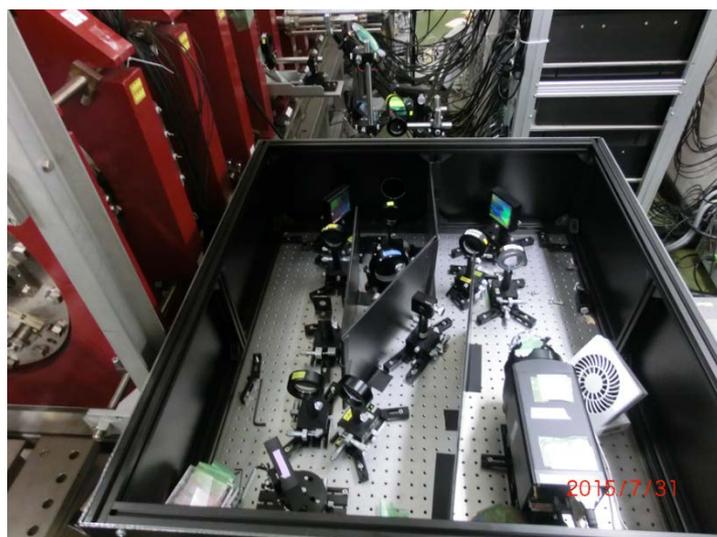


図 4. 自作したトリプル分光器の内部写真。

実験結果と考察

レーラー散乱およびラマン散乱より、構築したシステムが正常に動作したことを確認したのち、トムソン散乱計測を行った。計測内容は以下のとおりである。

- ・ プラズマ生成時のガス圧は Ar 1, 3, 5 mTorr, 磁場強度 600, 900, 1500 Gauss とした。
- ・ レーザーの積算回数は、各プラズマ条件で1000 shot × 3セットとした。
- ・ 計測中心の±3 mm幅の散乱信号を、空間積分して解析した。
- ・ プラズマとレーザーの時間同期は取らず、10 Hzで計測した。
- ・ プラズマの Duty 比が1:1ということで、得られたトムソン散乱信号強度を 2 倍にして、電子密度を求めた。

得られたトムソン散乱スペクトルの例を、図 5 に示す。

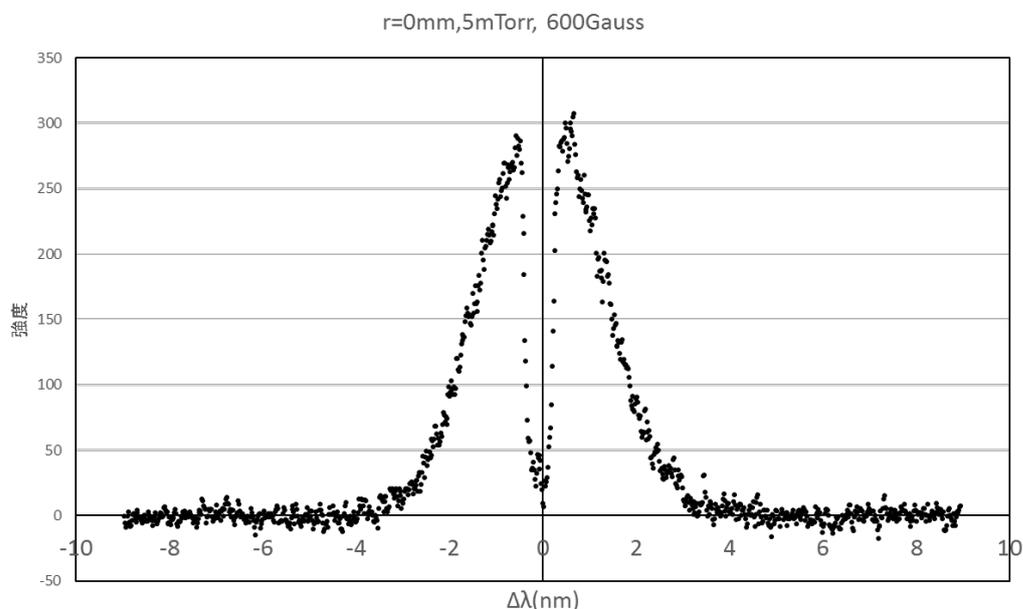


図 5. トムソン散乱スペクトル例

中心 (プローブレーザー) 波長±0.3 nm程度は、迷光除去のためにトリプル分光器内に設置された逆スリットによりカットされている。一方で今回の計測は非協同散乱領域であり、スペクトル形状は電子の速度分布を反映している。そこで、速度分布がマクスウェル分布だと仮定してフィッティングを行い、電子密度・電子温度を決定した。図 5 のスペクトルにフィッティング曲線を付与した結果を図 6 に示す。

実験結果と考察

レーラー散乱およびラマン散乱より、構築したシステムが正常に動作したことを確認したのち、トムソン散乱計測を行った。計測内容は以下のとおりである。

- ・ プラズマ生成時のガス圧は Ar 1, 3, 5 mTorr, 磁場強度 600, 900, 1500 Gauss とした。
- ・ レーザーの積算回数は、各プラズマ条件で1000 shot × 3セットとした。
- ・ 計測中心の±3 mm幅の散乱信号を、空間積分して解析した。
- ・ プラズマとレーザーの時間同期は取らず、10 Hzで計測した。
- ・ プラズマの Duty 比が1:1ということで、得られたトムソン散乱信号強度を2倍にして、電子密度を求めた。

得られたトムソン散乱スペクトルの例を、図5に示す。

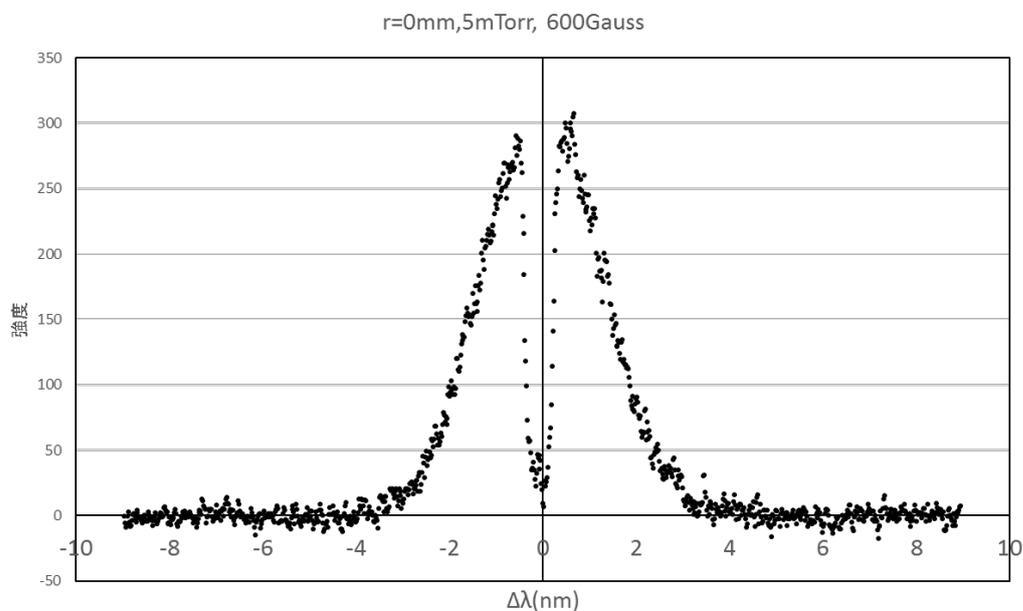


図5. トムソン散乱スペクトル例

中心 (プローブレーザー) 波長±0.3 nm程度は、迷光除去のためにトリプル分光器内に設置された逆スリットによりカットされている。一方で今回の計測は非協同散乱領域であり、スペクトル形状は電子の速度分布を反映している。そこで、速度分布がマクスウェル分布だと仮定してフィッティングを行い、電子密度・電子温度を決定した。図5のスペクトルにフィッティング曲線を付与した結果を図6に示す。

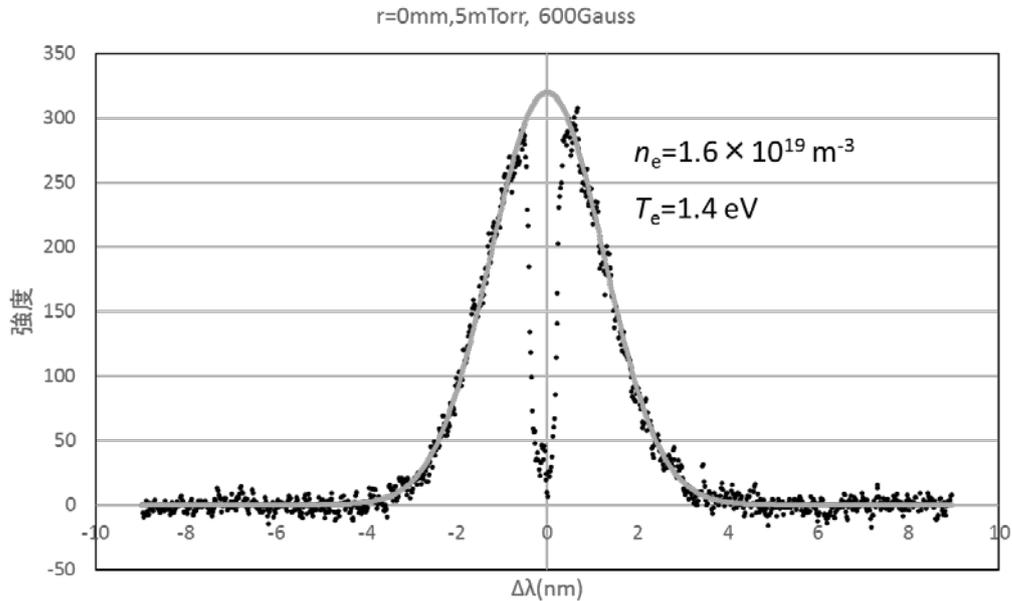


図 6. トムソン散乱スペクトルとそのフィッティング曲線

散乱光強度の絶対値較正は窒素ガスからのレーリー散乱信号を用いて行った。図 7, 8 には、それぞれ電子密度・温度の径方向分布を示す。図 9 には、得られた密度・温度から、電子による圧力分布を示す。プラズマ生成条件によって密度・温度に差異があるものの、 $r=30\text{ mm}$ 近辺における密度の急激な減少と、それに伴う電子圧力の低下は、すべてのプラズマ生成条件に共通していることが分かる。今回の解析では空間分解能を 6 mm (計測中心から $\pm 3\text{ mm}$) と落としているため、 $r=30\text{ mm}$ 近辺の密度勾配に、プラズマ生成条件による差異は見られないが、より空間分解能を向上させたデータ解析では、差が表れるかもしれない。それを示唆するデータを図 10 に示す。例えば $r=20\text{ mm}$ の計測では、 $r=15\text{--}25\text{ mm}$ のデータを一度に計測している。その結果、 $r=30\text{ mm}$ の生データでは、密度の急激な勾配が観測されている。図 10 で示したのは $1\text{ mTorr}, 1500\text{ Gauss}$ と $5\text{ mTorr}, 600\text{ Gauss}$ の 2 条件だが、前者のほうがより密度勾配が強く、さらに密度の減少位置が、プラズマ中心に近いように思われる。空間分解能の向上は S/N の低下とトレードオフであるので、現実には 0.5 mm 以上の空間分解は困難である。今後、ラマン散乱の空間分布との比較により、 0.5 mm 程度の空間分解での解析を進める予定である。

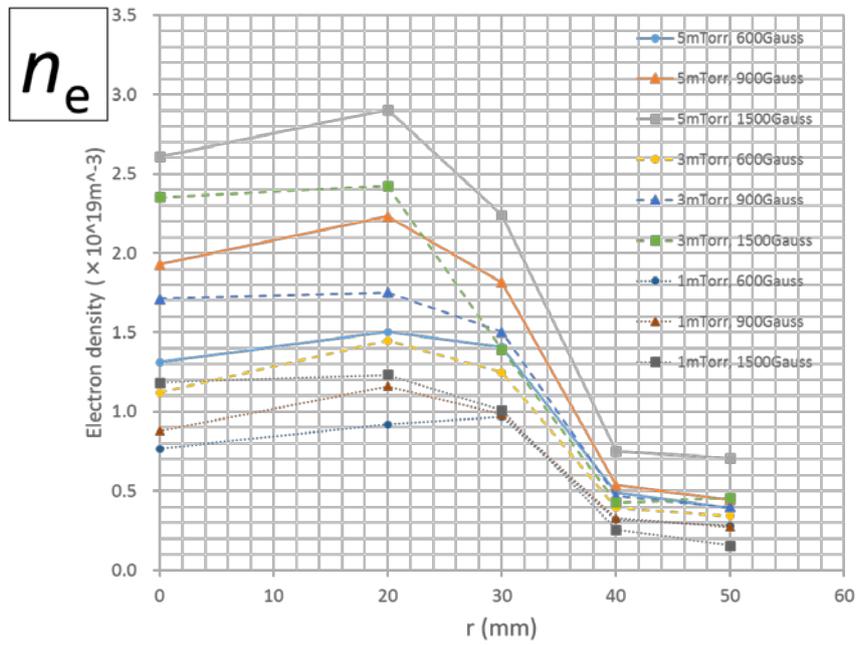


図 7. 電子密度の径方向分布

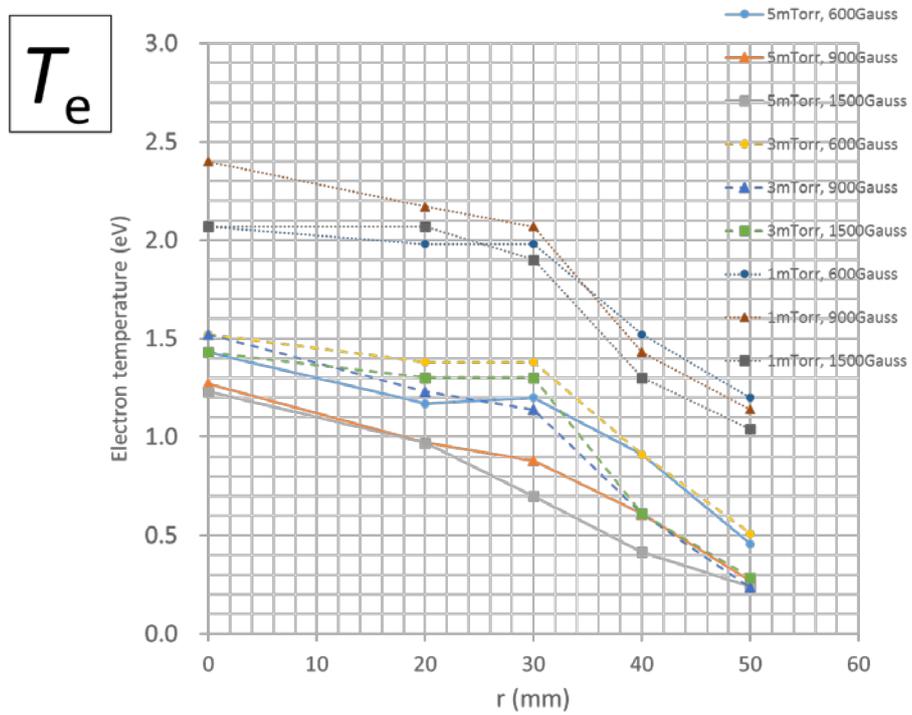


図 8. 電子温度の径方向分布

Electron pressure

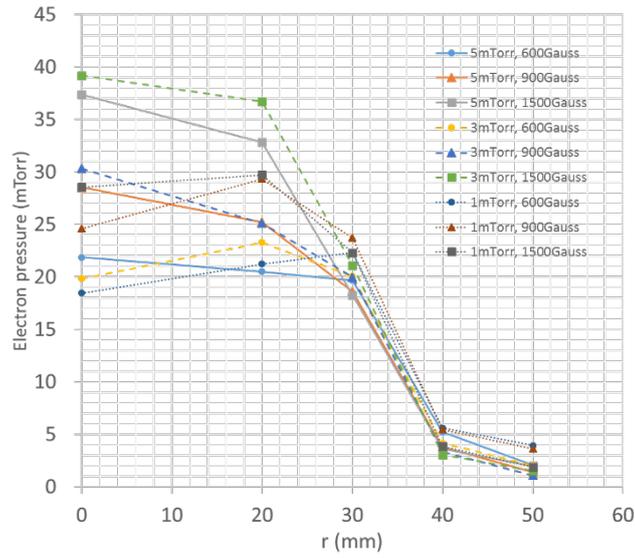


図 9. 電子圧力の径方向分布

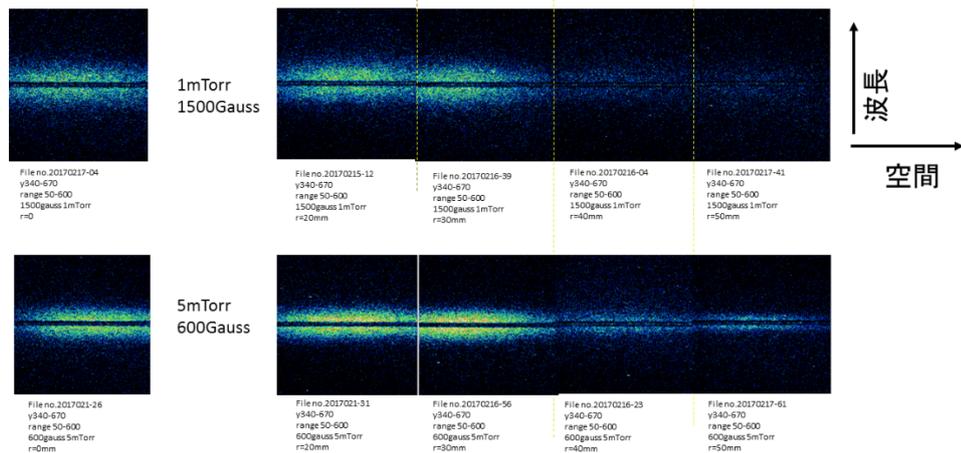
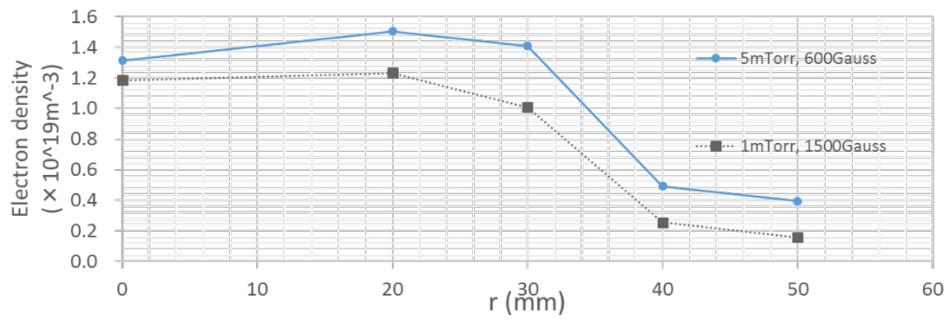


図 10. トムソン散乱計測結果の解析前データ

最後に、1ショット計測の結果を図 11 に示す。

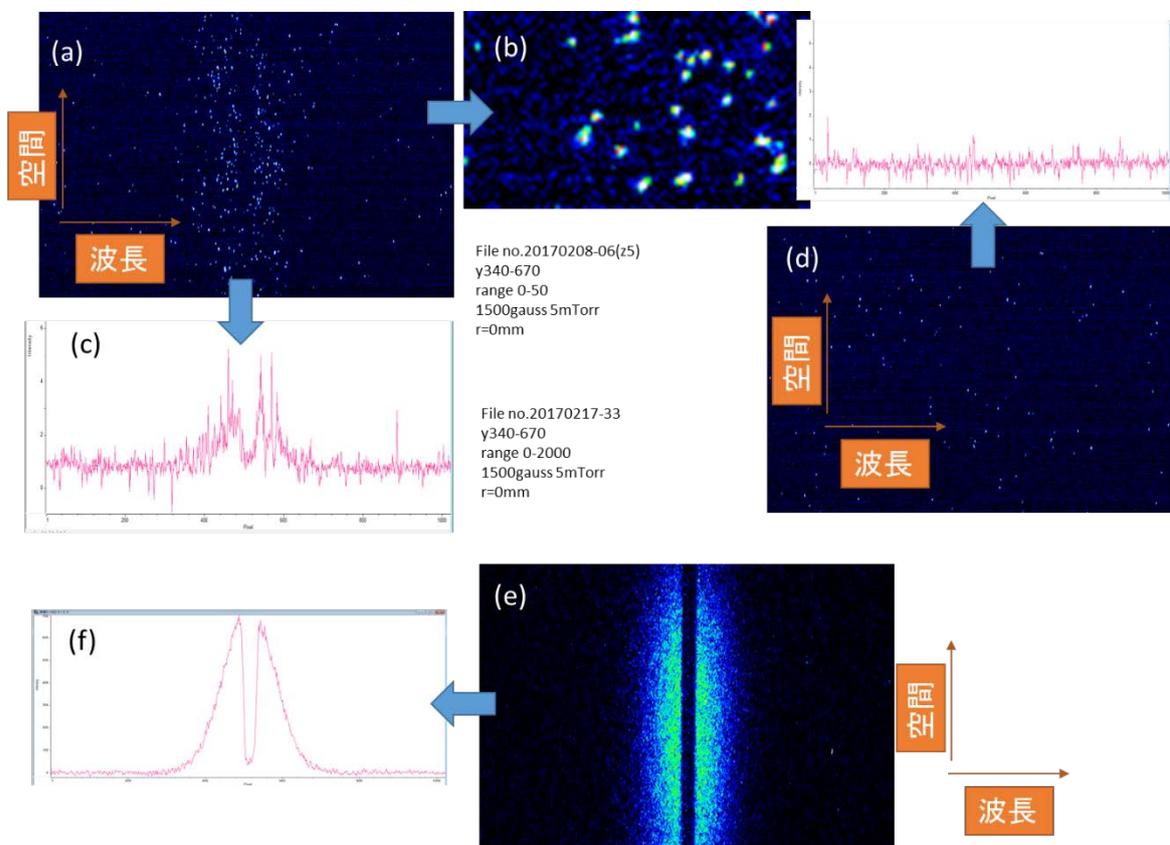


図 11. レーザー1ショットでのトムソン散乱計測結果。

図 11 (a)は1ショットでの ICCD カメラデータである。(b)はその一部を拡大したものだが、光子計数レベルの微弱光観測であることが分かる。それでも空間積算すると、(c)に示すように、明確なスペクトルが得られる。時間同期をとっていないので、2回に1回は、(d)のように背景ノイズ（主に、遮光の不十分さによるノイズであり、読み取りノイズはさらにずっと下の信号強度である）のみの計測となる。この背景ノイズとトムソン散乱計測の結果は、明確にことなることが分かる。(e)、(f)は比較・参考のために掲載した、同条件における500ショット積算の場合のデータである。

まとめと今後の展望

本共同研究の成果を以下に示す。

- PANTA 装置における高精度な電子密度・電子温度の計測手法として、トムソン散乱計測を実施した。
- レーラー散乱やラマン散乱計測を通じ、システム全体の較正が容易に行える環境を整

備した。これにより、高い信頼性のもとでトムソン散乱計測を実施可能とした。

- ・ ガス圧力や印加磁場強度を変化させ、異なるプラズマ生成条件でトムソン散乱計測を行った。その結果、圧力や磁場強度により明確に異なるトムソン散乱スペクトルが観測された。
- ・ プラズマ中心に加え、計 5 か所の半径方向分布計測を行い、密度・温度の径方向分布を得た。特に密度は、 $r=30\text{mm}$ 近辺で高い密度勾配があることを確認した。
- ・ 時間分解計測に向けて、レーザー1ショット計測でも明確なトムソン散乱信号が観測されることを確認した。

今後の課題は、レーザー・カメラとプラズマに印加する高周波電圧の時間同期制御を行い、各電圧位相における電子密度・電子温度の空間分布を明らかにすることである。現在、そのための時間同期システムの構築を行っているところである。1ショットであっても、読み出しノイズに十分に打ち勝てる、明確なトムソン散乱信号が、0.1 Jクラスの小型レーザーで獲得できることが分かった。検出下限向上には、受光立体角のさらなる向上や、レーザーエネルギーの増強で対応可能であり、 10^{18}m^{-3} までの1ショット計測が、システムの改善で視野に入る。径方向の密度分布はさらに分解能を上げた解析が必要であり、それも進めていく。

論文および学会発表

(投稿中) Kentaro TOMITA, Yuta SATO, Nima BOLOUKI, Tatsuro SHIRAIISHI, Kiichiro UCHINO, Yudai MIWA, Tatsuya KOBAYASHI and Shigeru INAGAKI, Measurements of Electron Density and Electron Temperature Using Laser Thomson Scattering in PANTA, Plasma and Fusion Research: Regular Article

直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析

九州大学 基幹教育院 山田 琢磨

1. 目的

プラズマ乱流中のドリフト波（ミクロスケール構造）が非線形結合することで発生するストリーマーやゾーナルフロー（メゾスケール構造）は径方向輸送に大きな影響を与えるため、その発生機構が近年トロイダルプラズマだけでなく直線プラズマなどでも広く研究されている。直線プラズマは低温で近接性に優れるため、乱流やメゾスケール構造の基礎的解析を行うには有利である。九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 LMD-U では、メゾスケール構造の一種であるストリーマーと、その構造形成に重要な役割を果たす媒介波が世界で初めて発見された。計測は周方向に 64 チャンネルの電極が等間隔に配置されたプローブアレーと径方向駆動プローブによって行われ、相関解析により直線プラズマの 2 次元円断面内において詳細な構造が明らかとなった。これにより、ストリーマー構造は周方向に自己収束し、径方向に伸びた構造を持つことが分かり、媒介波は径方向に節を持つ構造であることが分かった。ところがストリーマー構造・媒介波・ストリーマーを形作る搬送波の軸方向構造と三者の関係については詳しい解析は行われていなかった。そこで本研究では軸方向に並んだプローブを用い、相関解析をすることでストリーマー構造・媒介波・搬送波の軸方向構造について解析を行った。解析は周方向計測の強みを活かし、モード分解した状態でも行われた。

2. 実験方法

直線プラズマ実験装置 LMD-U を用いてストリーマー実験を行い、多数の静電プローブでイオン飽和電流（電子密度揺動）を計測することで、ストリーマー構造とその発生に重要な役割を果たす媒介波、またストリーマーを形作る搬送波（ドリフト波）についての 3 次元的空間構造を明らかにした。LMD-U は軸方向の長さが $z = 3740$ mm、内径 $r = 450$ mm の直線装置である。ソース部に付けられた内径 95 mm のガラス管に RF アンテナで 3 kW/7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生することで真空容器内部に直径が約 100 mm の直線プラズマが発生する。軸方向に 0.09 T の磁場を発生させ、内部に封入したアルゴンの圧力を 1.5 mTorr に調整することで、ドリフト波乱流が非線形結合を通してストリーマー構造を形成する。このとき中心部の密度は 10^{19} m^{-3} 程度、電子温度は 3 ± 0.5 eV のおおよそ平坦な分布である。

軸方向 $z = 1885$ mm の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブが設置されている。このプローブは精度よく周方向に電極が等間隔に設置されているため、半径 $r = 40$ mm の位置での詳細で精度の良い乱流の 2 次元フーリエスペクトルを観測し、プラズマ内に発生する揺動の周方向モード数を特定することができる。また、軸方向 $z = 1625$ mm と 1375 mm の位置には径方向駆動プローブがそれぞれ設置されており、今回は軸空間構造を解析するためにこれらのプローブを $r = 40$ mm の位置に固定した。ストリーマーの搬送波となるドリフト波や、構造形成に関わる媒介波は個々がある周方向モード数と周波数を持つ単一の揺動であり、これらの構造解析には相互相関解析を用いた。2 つの揺動のクロススペクトルの位相情報はこれらの位相差を表すので、ある参照波を基準として用いれば揺動の位相構造が特定できる。ストリーマー自体は搬送波が周方向に自己収束した構造体であり、その包絡線は媒介波と位相関係を保持する。つまり搬送波が形作る包絡線構造は媒介波と同じ周方向モード数と周波数を持つことになる。そのため、ストリーマーの位相構造を特定するためには、媒介波を参照波として、媒介波と 2 つの搬送波のバイスペクトル解析を行えばよい。この場合、バイフェーズが搬送波の包絡線（ストリーマー構造）と媒介波の間の位相差を表す。

また、周方向プローブを用いている点を活かすことで、搬送波（ドリフト波）を周方向モード数に分解して観測し、より詳しい情報を得ることができる。 $z = 1625$ mm の位置で周方向 64 チャンネルプローブによ

って計測した時系列データを周方向モード数で分解すれば、 $z = 1625 \text{ mm}, 1375 \text{ mm}$ の位置での測定がシングルプローブ計測であったとしても、各揺動の位相差は周方向モード数ごとに分解されたものが求まることになる。

3. 実験結果

LMD-U にストリーマーが発生している状態（磁場 0.09 T 、圧力 1.5 mTorr ）で $z = 1885 \text{ mm}, r = 40 \text{ mm}$ の周方向 64 チャンネルプローブと、 $z = 1625/1375 \text{ mm}, r = 40 \text{ mm}$ 、周方向角度 0 の合計 3 つのプローブを用い、ストリーマーの包絡線構造、媒介波、搬送波の軸方向位相構造を観測した。媒介波は周方向モード数 $m_1 = 1, f_1 = -1.2 \text{ kHz}$ で、径方向 $r = 30 \text{ mm}$ に節構造を持つ波であった。ストリーマーの包絡線の位相構造を求めるために、周方向 64 チャンネルプローブで媒介波を測定して参照波とし、 $z = 1885/1625/1375 \text{ mm}, r = 40 \text{ mm}$ 、周方向角度 0 の位置で搬送波を測定した。結果として、媒介波とストリーマーの包絡線構造はともに位相差が軸方向にほぼ 0 で一定という結果になり、軸方向モード数 n がともに $n = 0$ であることが示された。

一方、搬送波にドリフト波の中から代表として振幅が強く媒介波との結合が強い $m_2 = 2, f_2 = 7.8 \text{ kHz}$ の波と $m_3 = 3, f_3 = 6.6 \text{ kHz}$ の波を選んだ。媒介波と合わせた 3 つの波は、非線形結合のための 3 波結合条件 $m_1 + m_2 = m_3, f_1 + f_2 = f_3$ を満たす。この 2 つの揺動についても相互相関解析により軸方向構造を求めると、結果は軸方向モード数がともに $n = -1$ と求まった。ここで負のモード数は、装置のエンド側からソース側へ向かう伝播方向を示す。これらの結果は、媒介波と搬送波が軸方向モード数についての 3 波結合条件 ($n: 0 - 1 = -1$) を満たすことから、妥当と言える。また、周方向モード数に分解して相関解析を行い、モード数ごとに n を評価すると、揺動レベルが高く媒介波と強く結合している周方向モード数・周波数領域では広く $n = -1$ であることが分かった (図1)

以上のことから、ストリーマーの包絡線構造と媒介波は軸方向モード数 $n = 0$ を持つのに対し、搬送波は広い周方向モード数・周波数領域で軸方向モード数 $n = -1$ を持つことが明らかになった。

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けた。

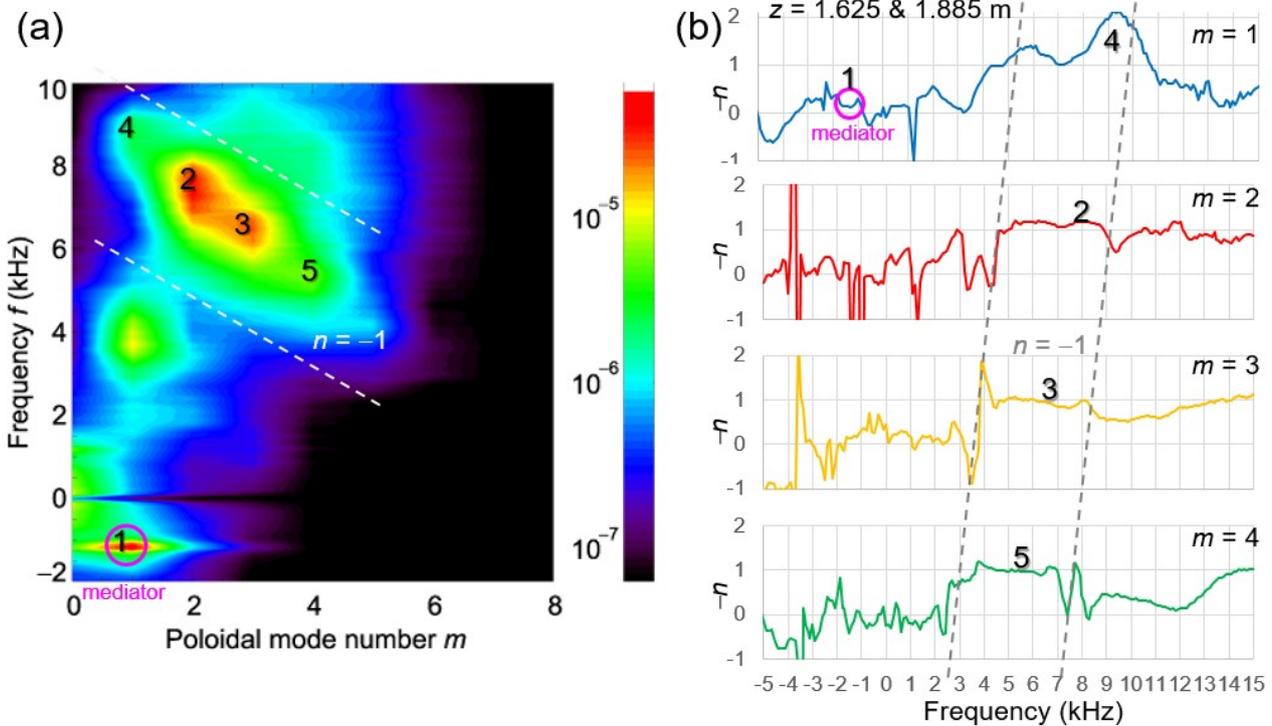


図 1. (a)周方向モード数・周波数スペクトル。(b)各周方向モード数における搬送波の軸方向モード数。

バイスペクトル解析による電子温度勾配モードと低周波揺動の 非線形結合過渡応答特性解明

東北大学 大学院工学研究科 金子 俊郎

1. 目的

電子温度空間勾配 (ETG) を自在に制御できる新たな装置を開発し、核融合プラズマ閉じ込め装置での異常輸送の新たな要因として注目を集めている「電子温度勾配不安定性 (ETG モード) 駆動乱流」の発生メカニズムとそれに伴う輸送現象を解明することを目的とする。特に、電子密度勾配、空間電位勾配等を重畳することによって励起される低周波揺動との非線形相互作用によって、ETG モードのエネルギーが移送されるメカニズムを明らかにすることを旨とする。本研究では、MHz 領域の高周波揺動と kHz 領域の低周波揺動との非線形相互作用を調べるために、大容量のデータを取得する必要があるとともに、その解析手法もバイスペクトル解析をはじめとして多岐にわたるため、応用力学研究所との共同研究として遂行する。

2. 実験方法

本実験は東北大学 Qr-Upgrade 装置を用いて行う。アルゴン (Ar) を作動ガスとした電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 放電によって磁気ミラー領域 (共鳴磁場強度 2.14 kG) で高電子温度 (3-4 eV) のプラズマを生成し、グリッドを通して実験領域に流入させる。一方、装置右端に配置したタンゲステン電極を 2000°C 以上に加熱することによって低温の熱電子 (約 0.2 eV) を生成し、半径方向位置に対応してこれらの重畳割合を制御することによって、径方向の電子温度勾配を形成する。電子温度のみの空間勾配を制御し、周波数が数 kHz から数 MHz の範囲で、電子温度勾配が存在する領域と存在しない領域で、発生する不安定揺動 (ETG モード) の違いがあるかどうか注目する。また、電子密度勾配および空間電位勾配を変化させることでドリフト波 (DW) モードを観測し、さらに径方向電場 E_r による $E \times B$ シアの形成と、それらの ETG モードとの非線形相互作用を調べる。このとき、取得した大容量のデータを応用力学研究所に持ち込み、バイスペクトル解析を行う。

3. 実験結果及び考察

上記の装置を用いて ETG を過渡的に形成したところ、ETG 強度の増大に伴い約 550 kHz の高周波揺動 (ETG モード) がまず成長し、その飽和とともに約 5 kHz の低周波揺動 (ドリフト波 (DW) モード) が成長することが分かった。本年度は、 E_r を能動的に形成することによって、揺動励起・抑制因子の一つでもあるフロー強度成分 $-E_r E_r''$ を制御し、各揺動強度と非線形結合度の時間発展計測を行い、マルチスケールエネルギー移送に及ぼす $-E_r E_r''$ 効果について調べた。図 1 に、空間電位 ϕ_s と E_r 、また $-E_r E_r''$ の半径方向分布を示す。ETG 領域 ($r = -1.2 \sim -1.8$ cm) において、(a) E_r が内向きに形成される場合 ($E_r = -0.6$ V/cm) に比べて、(b) E_r が外向きに形成される場合 ($E_r = 1.0$ V/cm) は、 $-E_r E_r''$ が正に強く形成されること (揺動抑制効果) が分かった。図 2 に E_r が (a) 内向き ($-E_r E_r'' \sim 0$ V²/cm⁴) と (b) 外向き ($-E_r E_r'' > 0$ V²/cm⁴) の条件において、ETG を過渡的に変化させた時 ($t_g = 0$ ms, 立上り時間 < 20 μ s, $r = -1.5$ cm) の ETG モードと DW モードの揺動強度及び (c) 平均バイコヒーレンス強度の時間変化を示す。ETG 形成 ($\nabla T_e \sim 1.0$ eV/cm, $t_g < 40$ μ s) とほぼ同時

に、ETG モードが成長を開始し、その後 $-E_r E_r''$ が未形成の場合において、非線形結合度の増加 ($t_g < 1$ ms) とともに DW モードが $t_g \approx 0.3$ ms 付近から成長することが観測された。それに対して、正の $-E_r E_r''$ が形成されている場合、非線形結合度は増加せず、DW モードのみが抑制されていることが分かった。以上の結果から、 $-E_r E_r''$ を変化させることによって、低周波揺動 (DW モード) に抑制効果が作用するとともに、高周波揺動 (ETG モード) との非線形結合も制御可能であることが示唆された。

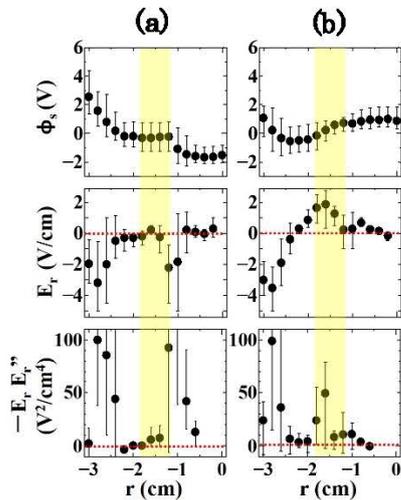


図 1: 空間電位 ϕ_s , 径方向電場 E_r , フロー強度成分 $-E_r E_r''$ の半径方向分布. 黄色領域は ETG 領域を示している. (a) E_r 内向き (-0.6 V/cm), (b) E_r 外向き (1.0 V/cm).

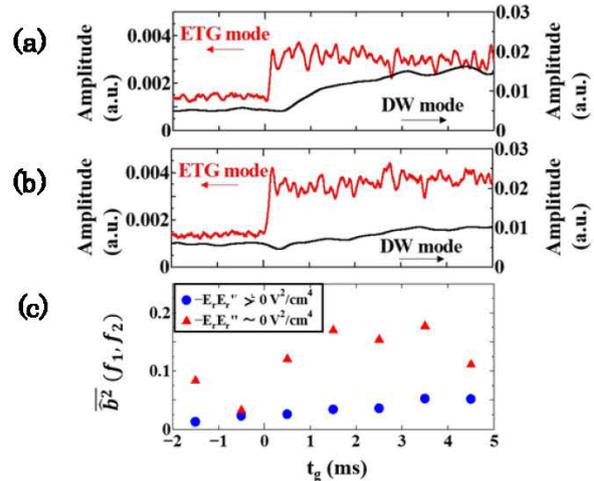


図 2: (a) $-E_r E_r'' \sim 0$ V²/cm⁴, (b) $-E_r E_r'' > 0$ V²/cm⁴ における ETG モードと DW モードの揺動強度及び (c) 平均バイコヒーレンス強度の時間変化.

4. 研究組織

金子 俊郎, 酒井 優, 児玉 佳季, 畠山 力三 (東北大学), 稲垣 滋, 伊藤 早苗 (九州大学), 伊藤 公孝, 小林 達哉 (核融合研)

5. 研究成果報告

- 1) C. Moon, T. Kaneko, K. Itoh, K. Ida, T. Kobayashi, S. Inagaki, S.-I. Itoh and R. Hatakeyama, Effects of radial electric field on suppression of electron-temperature-gradient mode through multiscale nonlinear interactions, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 58, No. 10, pp. 105007-1-6, 2016.
- 2) 児玉佳季, 酒井優, 金子俊郎, “Temporal Evolution of Plasma Spatial Profiles Interacting with Electron Temperature Gradient Mode”, 平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会, 東北工業大学 (宮城県仙台市), 2016 年 8 月 30~31 日.
- 3) 酒井優, 稲垣滋, 小林達哉, 伊藤公孝, 金子俊郎, “バイフェーズ解析による電子温度勾配モードとドリフト波モード間の因果関係解明”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (石川県金沢市), 2016 年 9 月 13~16 日.
- 4) 児玉佳季, 酒井優, 金子俊郎, “電子温度勾配モード励起に伴うプラズマ空間分布の時間発展”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学 (石川県金沢市), 2016 年 9 月 13~16 日.
- 5) 酒井優, 稲垣滋, 小林達哉, 伊藤公孝, 金子俊郎, “径方向電場印加時における電子温度勾配モードとドリフト波モード間のバイスペクトル時間分解解析”, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 東北大学 (宮城県仙台市), 2016 年 11 月 29 日~12 月 2 日.
- 6) 児玉佳季, 酒井優, 金子俊郎, “電子温度勾配モード励起に伴うプラズマ空間分布変化の時間分解解析”, プラズマ・核融合学会第 33 回年会, 東北大学 (宮城県仙台市), 2016 年 11 月 29 日~12 月 2 日.

直線プラズマ装置 PANTA における音速分子ビーム入射軌道の観測

核融合科学研究所 小林達哉

研究目的

直線プラズマ装置 PANTA では磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波不安定性の非線形乱流構造の選択則を明らかにするため、実験パラメータを変えた放電を行い、様々な非線形乱流構造を再現する実験が行われている。変化させるパラメータは主に閉じ込め磁場強度と中性ガス圧の2つである。中性ガス圧を変化させると、イオン-中性粒子衝突周波数と電子密度勾配が同時に変化してしまう。これらの量はそれぞれドリフト波の線形減衰率と線形成長率を変化させる。このためこれまでのパラメータスキャン実験では非線形乱流構造発展の際に、線形不安定性が及ぼす影響の切り分けが困難であった。新たなコントロールノブを導入し、イオン-中性粒子衝突周波数を変化させずにプロファイルをコントロールする方法（若しくはその逆）の開発が望まれている。

直線プラズマ装置 PANTA には、主に計測ビームとして SMBI (Super Molecular Beam Injection, 超音速分子ビーム入射) 装置が導入されている。SMBI の入射パターン（入射圧力及び入射時間）を適切にコントロールし、密度プロファイルをコントロールすることを本研究の目的とする。本年度はこれまで行われた磁場-中性ガス圧パラメータスキャン実験のデータを解析し、現状の実験フレームワーク下での非線形乱流構造選択則をまとめた。

研究結果

直線装置 PANTA では、磁場が低い場合に単一线形ドリフト波が観測され、磁場を上げるとドリフト波が非線形化する。中性ガス圧が低い際にはストリーマと呼ばれる、Azimuthal 方向に局在化し、半径方向に伸びた非線形構造が、中性ガス圧が高い際には孤立波と呼ばれる、鋸歯状の波形をした大振幅の非線形波形がそれぞれ観測される。両者はそれぞれ時空間発展及び周波数・波数スペクトルに異なる特徴を持つ。この特徴を利用して各放電に於けるストリーマ・孤立波の強度を定義して2次元パラメータ空間での選択則を求めた。

ストリーマは電子反磁性方向に伝播するドリフト波が、イオン反磁性方向に伝播する媒介波によってモジュレーションを受けることで形成される。2次元 FFT-逆 FFT 及びヒ

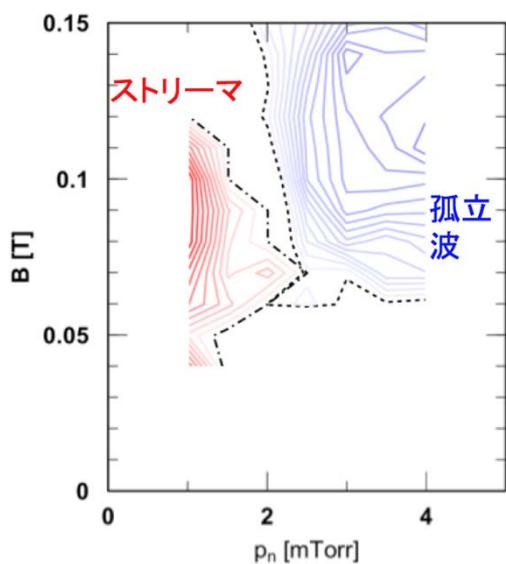


図 1： 非線形波形選択則

ルベルト変換を用いて、電子反磁性に伝播する波の振幅と、イオン反磁性方向に進む波の波形を抽出し、両者のコヒーレンスをとったものと、イオン反磁性方向に進む波の強度の積をストリーマの強度と定義した。

一方孤立波は、鋸歯状波形であるため、周波数-Azimuthal スペクトルでピークが一直線に並ぶことがその特徴である。スペクトル上で中心周波数・波数の、揺動強度での重み付け平均を行い、孤立波強度を定量化した。図 1 はそれぞれの強度に適切な閾値を与え、非線形波形の存在パラメータ領域を図示したものである。低ガス圧領域でストリーマが、高ガス圧領域で孤立波がそれぞれ存在することが示されている。

研究組織

稲垣滋（九大応力研）、佐々木真（九大応力研）

統合輸送コードに導入するための電磁的ジャイロ運動論解析を用いた 輸送係数のモデリング

核融合科学研究所 登田慎一郎

核融合装置において、乱流輸送はプラズマ閉じ込めのために解決すべき重要な課題である。なぜなら、乱流輸送は、トロイダルプラズマにおいて、大量の粒子、熱損失をもたらすからである。プラズマ微視的不安定性による乱流輸送改善による最適化が期待される。トロイダルプラズマにおいて、乱流輸送に関して多くのジャイロ運動論シミュレーションがされている。トカマク、ヘリカルプラズマにおけるジャイロ運動論シミュレーションによる結果は実験結果と比較研究がされている。ヘリカル系プラズマは長時間放電の定常状態を保持するのに優れているのはよく知られていることである。ヘリカルプラズマのジャイロ運動論シミュレーションはヘリカルリップル構造を解析に反映させるために、多数のメッシュ点が必要である。

ジャイロ運動論的方程式を解く GKV-X コード [1] は、ヘリカルプラズマでの乱流輸送を研究するのに、大型ヘリカル装置 (LHD) におけるイオン温度勾配 (ITG) モードを調べるために使用されている。電子運動に断熱近似を用いたジャイロ運動論シミュレーションが LHD における高イオン温度モード (#88343) についてされている。輸送シミュレーションのために、GKV-X コードを使って、イオン熱拡散係数の簡約化モデルが提唱されている。簡約化モデルは、ITG モードの線形成長率と帯状流崩壊時間の関数である。TASK3D のような動的な輸送コードで各時間ステップごとに線形計算を行うことは、高コストである。なぜなら、電場や磁場を正確に評価するために、ヘリカルプラズマの輸送解析は径方向に高解像度が必要だからである。低コストで、ヘリカルプラズマにおいて、ジャイロ運動論シミュレーションから得られた ITG モードの乱流拡散係数の簡約化モデルを、輸送コードにどのように適用するかを示している [2]。ポロイダル波数空間を積分した線形成長率と帯状流崩壊時間を簡約化モデルに代入すると、簡約化モデル自体の値を再現する。ITG モードによるイオン熱フラックスは実験結果と良い一致を示している。断熱電子を用いた輸送シミュレーションによるイオン温度分布は実験結果と矛盾しない。しかしながら、運動論的電子を用いたジャイロ運動論シミュレーションは LHD 実験結果よりも大きなイオン熱フラックスを示す。運動論的電子効果は、ITG モードの線形成長率の値を大きくする。ジャイロ運動論的シミュレーションによるイオン熱拡散係数の結果を実験結果と比較するには、運動論的電子の効果を取り入れるべきである。運動論的電子の効果調べるために、イオンに加えて電子についてもジャイロ運動論的方程式を解析し、イオン熱拡散係数の簡約化モデルを構築する必要がある。ポロイダル波数領域は、ITG モードが不安定化する $0.1 \leq \tilde{k}_y \leq 0.5$ にとる。

LHD における高イオン温度モード #88343 で時刻 $t = 2.233\text{s}$ での密度、電子とイオン温度分布を使用する。計算機コストと広いプラズマパラメータ領域で、非線形 GKV-X シミュレーションを行うために、フーリエモードを少数とる。 x と y 方向の全フーリエモードは 16 と 16 である。 \tilde{k}_x と \tilde{k}_y 方向の全フーリエモードは 9 と 6 である。 $\rho (= r/a) = 0.46$ と $\rho = 0.80$ の間の 10 径方向の点で非線形 GKV-X シミュレーションを行う。運動論的電子を用いたジャイロ運動論シミュレーションの結果として、 $\rho = 0.65$ での全イオンフラックスの時間発展を調べる。時刻 t は R/v_{ti} で規格化される。非線形飽和を、イオンエネルギーフラックスで見ることができる。時間間隔 $50 < t < 100$ でイオンエネルギーフラックスの平均値 0.12 MW/m^2 を得る。文献 [3] では、時間間隔 $50 < t < 80$ でイオンエネルギーフラックスの平均値は 0.13 MW/m^2 である。この時フーリエモード数は \tilde{k}_x と \tilde{k}_y 方向に 256 と 43 である。フーリエモード数が \tilde{k}_x と \tilde{k}_y 方向にわずか 8 と 6 でも、本研究では、イオンエネルギーフラックスは近い値を得ることができた。全イオンエネルギーフラックス Q_i に対する電磁成分 Q_i^{em} の時間発展についても研究した。ベータ値は 0.3% であるので、時間間隔 $50 < t < 100$ で $|Q_i^{em}|/Q_i$ の平均値は 0.33% で、低い値である。電子エネルギーフラックスでも飽和は見られ、時間間隔 $50 < t < 100$ での平均値は 0.070 MW/m^2 である。文献 [3] では、時間間隔 $50 < t < 80$ で電子エネルギーフラックスの平均値は 0.058 MW/m^2 である。しかしながら、調べているプラズマは低ベータプラズマにもかかわらず、全電子エネルギーフラックス

Q_e に対する電磁成分 Q_e^{em} の、時間間隔 $50 < t < 100$ における平均値は 30% になってしまう。もし、フーリエモードをより多数取れば、電磁成分の割合は減少する [3]。したがって、本研究ではイオン熱拡散係数についてのみ、輸送モデルを構築することにする。乱流ポテンシャル揺動の 2 乗 $\mathcal{T} \left(= \sum_{k_x, k_y \neq 0} \left\langle \left| \tilde{\phi}_{k_x, k_y} \right|^2 \right\rangle / 2 \right)$ と帯状流ポテンシャル揺動の 2 乗 $\mathcal{Z} \left(= \sum_{k_x} \left\langle \left| \tilde{\phi}_{k_x, k_y=0} \right|^2 \right\rangle \right) / 2$ の時間発展を調べた。ここでも \mathcal{T} と \mathcal{Z} の時間発展において、非線形飽和を見ることが出来る。LHD における高イオン温度モードでの時刻 $t = 2.233\text{s}$ での密度、温度分布や磁場配位についての実験結果に基づいて、電子、イオン温度勾配 R/L_{T_e} と R/L_{T_i} 、密度勾配 R/L_n や安全係数 q が径方向に変化する。断熱電子と運動論電子を用いた非線形ジャイロ運動論解析によるイオン熱拡散係数 $\bar{\chi}_i$ の径方向分布を比較した。ここで、 $\bar{\chi}_i$ は非線形飽和状態の時間間隔 $50 < t < 100$ での平均値を表す。運動論的電子を用いた解析による $\bar{\chi}_i$ の値は、断熱電子を用いた解析の値と比べて 2 ~ 3 倍大きい。規格化した電子とイオン温度勾配の大きさを、径方向の点 $\rho = 0.46, \rho = 0.50, \rho = 0.54, \rho = 0.58, \rho = 0.62, \rho = 0.65, \rho = 0.68, \rho = 0.72, \rho = 0.76$ と $\rho = 0.80$ で、実験値から 0.8 倍から 1.2 倍に変化させる。Figure 1 で、 \mathcal{T} と \mathcal{Z} のモデル関数と輸送係数 $\bar{\chi}_i / \chi_i^{GB}$ の比較を行った。イオン熱拡散係数のフィッティング関数は、以下の通りである。

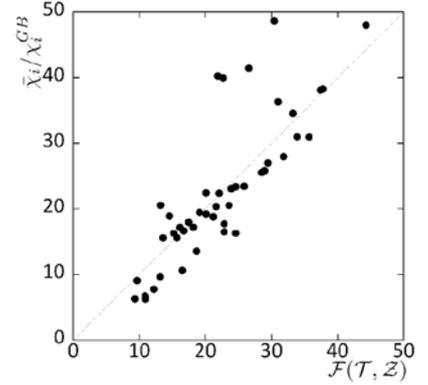


Figure 1: 非線形解析による $\bar{\chi}_i / \chi_i^{GB}$ の値とモデル関数 \mathcal{F} の値の比較

$$\frac{\bar{\chi}_i}{\chi_i^{GB}} = \mathcal{F}(\bar{\mathcal{T}}, \bar{\mathcal{Z}}) \equiv \frac{C_1 \bar{\mathcal{T}}^\alpha}{C_2 + \bar{\mathcal{Z}}^{1/2} / \bar{\mathcal{T}}} \quad (1)$$

ここで、係数は $\alpha = 0.24, C_1 = 0.11$ と $C_2 = 1.8 \times 10^{-3}$ であり、 χ_i^{GB} はジャイロボーム因子である。 \mathcal{F} による $\bar{\chi}_i / \chi_i^{GB}$ を近似する相関誤差は 0.31 である。ここで、相関誤差は $\left[(\bar{\chi}_i / \chi_i^{GB}) / \mathcal{F} - 1 \right]$ の 2 乗平均平方根である。したがって、イオン熱拡散係数はモデル関数 (1) でよく再現することができる。

- [1] T. -H. Watanabe and H. Sugama, *Nucl. Fusion* **46** 24 (2006)
- [2] S. Toda et al., *Journal of Physics: Conference Series* **561** 012020 (2014)
- [3] A. Ishizawa et al., *Nucl. Fusion* **55** 043024 (2015)

学会発表リスト

Construction of reduced transport model by gyro-kinetic simulation with kinetic electrons in helical plasmas,

S. Toda, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe and H. Sugama
58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, TP10.00015

ヘリカルプラズマにおける電磁的ジャイロ運動論解析による簡約化輸送モデル構築、
登田慎一郎、仲田資季、沼波政倫、石澤明宏、渡邊智彦、洲鎌英雄
第 11 回核融合エネルギー連合講演会 15P079

ヘリカルプラズマにおける運動論的電子を用いたジャイロ運動論解析による簡約化輸送モデル構築
登田慎一郎、仲田資季、沼波政倫、石澤明宏、渡邊智彦、洲鎌英雄
第 33 回 プラズマ・核融合学会 年会 29aP41

QUEST におけるオーミックと RF 加熱を用いたプラズマ電流立ち上げ実験

Plasma current ramp-up experiments using the Ohmic and RF heating in QUEST

御手洗 修 東海大学(熊本) 2016年9月まで

有限責任事業組合 先進核融合・物理教育研究所(熊本)

1. 研究目的

今まで、QUEST 装置において RF でブレークダウンさせ、オーミックコイルを用いてプラズマ電流を立ち上げ実験を行ってきた。QUEST のようなスフェリカルトカマク (ST) においては、プラズマ断面積が大きいので、高アスペクト比のトカマクに比して安全係数が大きくとれるので、大きなプラズマ電流を流すことが可能である。しかしながら、オーミックコイルの磁束が小さく、装置上大きなプラズマ電流を得ることは困難である。ここに ST プラズマ電流立ち上げの大きな問題がある。

現在、世界の ST において RF のみを用いてプラズマ電流を立ち上げる実験が行われている。しかし、これらの実験の多くでは、プラズマの上下安定性を確保するためにダイバータコイル電流はプラズマ電流と逆向きに設定している。ST で炉を作る場合、ダイバータコイル電流はプラズマ電流と同方向でなければ、必要なプラズマ断面積を確保できない。

申請者の今までの QUEST 共同研究では、オーミックコイル、プラズマ電流と同方向のダイバータコイルを用いてプラズマ電流を立ち上げる実験を行ってきた。今までに得られた実験結果では、磁束の小さい QUEST においては、得られたプラズマ電流 I_p の大きさはプラズマ中心位置 R に反比例した関係 ($I_p \propto 1/R$) が得られている。そのためにダイバータ放電ではプラズマを外側に生成する必要があるために、プラズマ電流は 50~60 kA 程度に限られている。

もし RF 加熱パワーを電流立ち上げ時に重畳できれば、プラズマ位置はさらに外に移動するので、その分垂直磁場を大きく印加できプラズマ電流を増加させることができる。本共同研究では立ち上げフェーズに 28 GHz の RF を重畳し、加熱することによって垂直磁場効果によるプラズマ電流の増大ができることを実験的に示すことであったが、実験を行う機会がなかったので理論解析を行った。その結果について報告する。

2. 計算結果

0 次元の密度、温度分布を用いて、粒子バランス、パワーバランス方程式とプラズマ電流回路方程式を連立させて解く。

[1] RPパワーを印加しない場合のプラズマ電流立ち上げ:

Fig.1 に示すようなプラズマ電流 50 kA が得られた外側ダイバータの実験結果 #23253 [1] について解析し、これに RF パワーを印加してその効果を調べる。

この実験で得られたコイルパラメータを用いてプラズマ電流を数値計算した結果を Fig. 2 に示す。このとき $R=0.68\text{m}$, $a=0.4\text{m}$, $B_t=0.25\text{T}$, 閉じ込め増倍度 $IPB98y2$ 則の $0.8\sim 1.15$ 倍, 内部インダクタンス $\alpha_i=0.5$, $Z_{\text{eff}}=2$ と仮定した。(注: コイル電流の極性は正負反対になっている。)

Fig. 2 に示すようにプラズマ電流波形は Fig. 1 と同様である。プラズマ電流が約 50 kA に達するが、そのときのループ電圧は実験値と同様に 0.9V 程度である。実験ではプラズマ位置は内側から外側に移動しているが、計算でその変化を取り入れるので一定値としている。ここではプラズマ中心を $R=0.68\text{m}$ とし PF17, PF35-1, PF35-2 コイル電流に実験値を用いて、平衡に必要な垂直磁場を作る

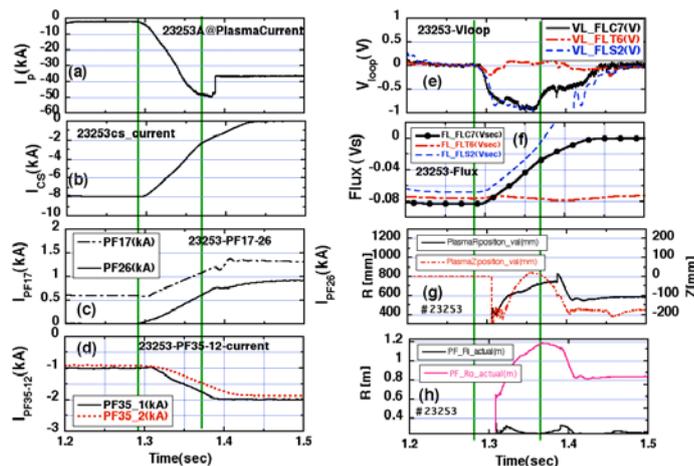


Fig. 1 Temporal evolution of plasma parameters in #23253 with outer divertor Ohmic discharge. (a) The plasma current I_p , (b) CS current I_{CS} , (c) PF26 and PF17 vertical field coil currents, (d) divertor coil current I_{PF35-1} and I_{PF35-2} (e) loop voltages, (f) various fluxes, (g) plasma position of the center, (h) plasma inner and outer edge.

PF26 コイル電流を

$$I_{PF26} = \{B_{VE} - (B_{20PF17} I_{PF17} + B_{20PF351} I_{PF351} + B_{20PF352} I_{PF352})\} / B_{20PF26}$$

で計算し、これを実際に印加したコイル電流と比較し、同じ程度の値が出るまで繰り返して計算した。図に示すように計算した値 (Fig. 2-(c) のIPF26VT(赤の点線) は実際の PF26 コイル電流 (c の黒破線) に近くなっている、実験結果をよく再現できていると考えられる。プラズマの中心密度を $n=1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ に設定すれば、温度は $T(0)=300 \text{eV}$ になる。

ここでは実験と同様に、逆電流を減らすために PF35-1, 2コイルの初期電流値を1kAにしているが、これを0 にすれば、プラズマ電流は 2/3 程度に減少する。これは実験での傾向と一致している。

また、注目すべきはプラズマの密度を例えば $n=3 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ に設定するとプラズマ電流値は約半分になる。これは実験中にガスパフ量を増やした場合、プラズマ電流が減少した結果と符合している。

[2] RP パワーを印加した場合のプラズマ電流立ち上げ :

密度、閉じ込め増倍度、オーミックコイル電流 I_{CS} , PF17 コイル電流を同じにして、50kW の加熱パワーを印加する。

プラズマ電流が増大する分だけダイバータコイル電流を増やす必要がある。その結果、平衡位置から計算した PF26 コイル電流 (Fig. 3(c) の赤点線) に近づけるために、設定 PF26 コイル電流 (Fig. 3(c) の黒破線) を増やした。その結果を Fig. 3 に示す。プラズマ電流は 70~80kA 程度まで増大する。ループ電圧が Fig. 2 とほとんど同じであるのは、ダイバータコイル電流を増大させた分だけ PF26 コイル電流がわずかに増大し、差し引き0になっているからだと思われる。また電流駆動効率は $2 \times 10^{17} [\text{Am}^{-2}\text{W}^{-1}]$ と低く設定しているので駆動電流は非常に小さい。

温度は加熱パワーを印加した場合が高いので、ここでのプラズマ電流増大はRF 加熱パワーによるプラズマ抵抗の減少の結果だと思われる。

垂直磁場の効果を検証するにはさらに大きな加熱パワーを印加した場合についての解析が必要になるとと思われる。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

[1] O. Mitarai, K. Nakamura, M. Hasegawa, et al., "Comparative studies of inner and outer divertor discharges and a fueling study in QUEST" Fusion Engineering and Design 109-111 (2016) 1365-1370

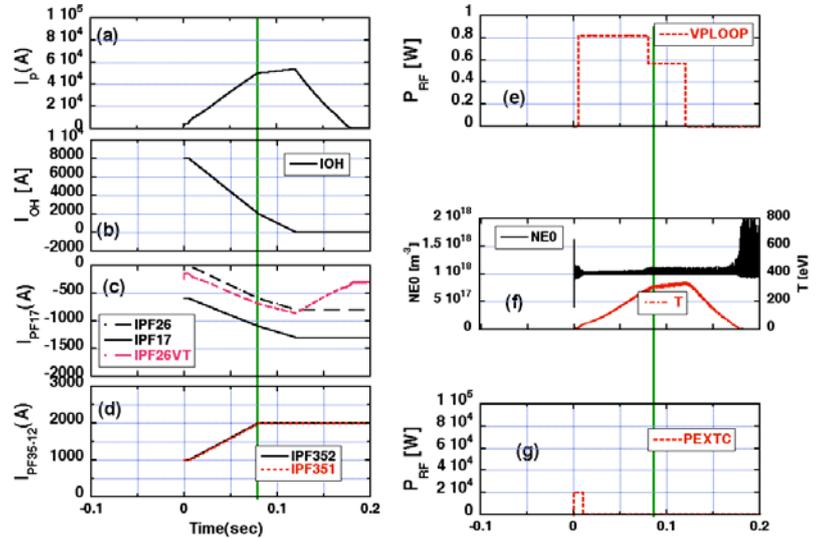


Fig. 2 Calculated parameters using the poloidal coil current in #23253. (a)-(e) The same as in Fig. 1 except for (f) plasma density and temperature and (g) RF power

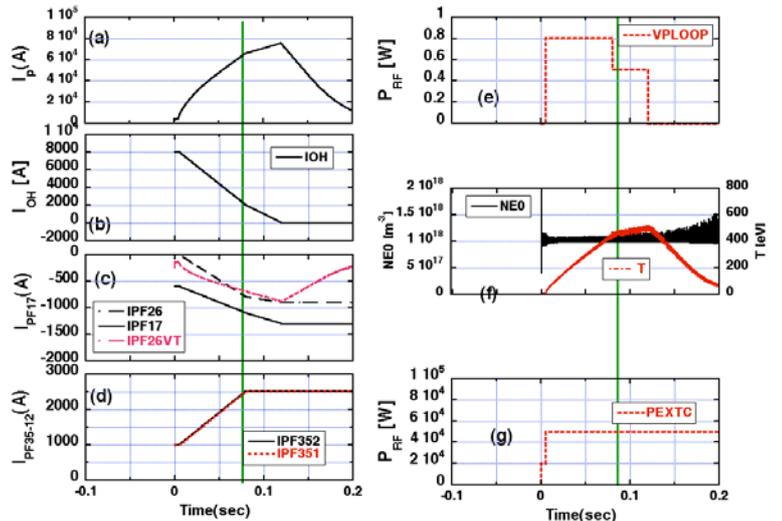


Fig.3 RF power of 50kW is applied. F35-1, PF35-2, PF26 coil currents are increased. (a) to (g) are the same as in Fig. 2.

プラズマ乱流と磁場平行流れ場の相互作用に関する研究

九州大学 応用力学研究所・高等研究院 小菅佑輔

目的

磁化不均一プラズマ乱流のダイナミクスを理解するために、磁場方向流れ場の重要性が指摘されている。磁場方向流れ場が重要となる例として、乱流が駆動するトロイダルプラズマ中の自発回転や、地球磁場のカusp領域のイオン流の電子等方性の問題がある。平行流れ場が乱流を駆動する場合には、軸方向の対称性が破れている事が理論的に指摘されているが、これらの例では直接計測によって理論の検証を行う事が難しい。その一方で、応用力学研究所が有する直線プラズマ乱流実験装置 PANTA では、実装されているプローブ群による乱流揺動、乱流駆動束、プロファイルの直接計測が可能である。また NLD による数値診断を加える事で、研究を加速的に進める事も可能となる。そこで、本研究では、平行流れと乱流との相互作用をキーワードに、周方向と軸方向の2次元計測データを用いた乱流揺動場の可視化をおこなうことで、磁場方向の対称性の破れを検証する事を目的とする。併せて、平行流れ場を加える形に NLD を拡張すること、平行運動量輸送に時間遅れ効果を取り込む事、および平行流れ場が駆動する乱流と垂流れ場が駆動する乱流との違いを理論的に明らかにすることも目的とする。

主たる成果

NLDコードを平行流れ場を含む形に拡張することができた[1]。非線形シミュレーションを行うことで、密度駆動型のドリフト波や平行流れ駆動のダンジェロモードの共存・競合する様子を再現することができている。特に、従来の NLD で再現されていたドリフト波乱流に加え、平行速度ソースを導入することができ、平均流の駆動を取り扱うことができるようになった。速度場が急峻化した場合に、速度勾配を緩和させる効果(図1)や、規格化された平行速度揺動が規格密度揺動

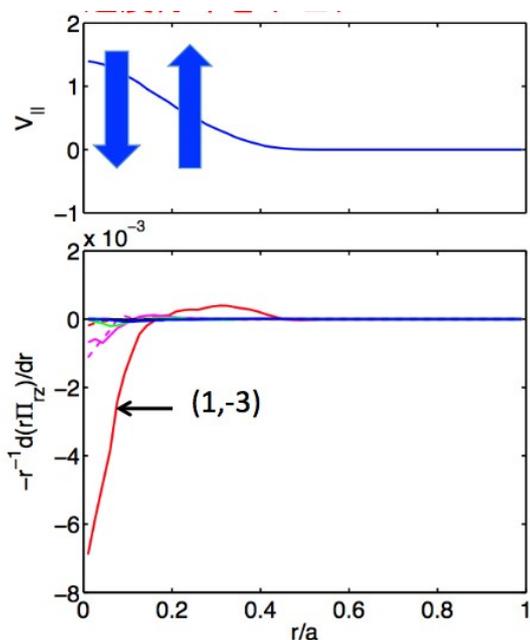


図1：速度勾配の緩和

と同程度の大きさを持つことなど、ダンジェロモードが有する特徴を再現することができている。

実験結果としては、プローブ計測により異なる半径位置と周波数領域にドリフト波とダンジェロモードが存在する様子が観測されている[2, 3]。イオン音波で規格化した速度揺動と、平均値で規格化した密度揺動の比を半径方向スキャンにより評価した。ここでは、PANTA の内側、高周波数領域においてダンジェロモードの特徴を有するモードが観測されている。

基礎研究結果を踏まえ、トカマクプラズマの周辺 (SoL) 領域への応用についての検討を進めた[4]。これらの成果が得られたことで、非線形効果を含めた研究[5]など、今後更なる展開をするための礎を築くことができた。

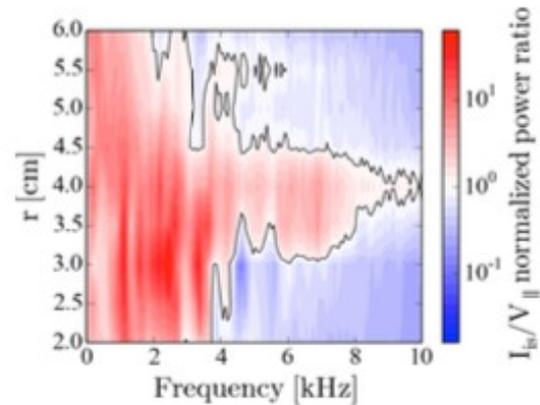


図2：ドリフト波とダンジェロモードの共存。赤い領域がドリフト波、青い領域がダンジェロモードの特徴を有する。

参考資料

1. 佐々木真、糟谷直宏、登田慎一郎、小菅佑輔、小林達哉、荒川弘之、山田琢磨、稲垣滋、矢木雅敏、伊藤公孝、伊藤早苗「直線磁化プラズマ乱流シミュレーションによるドリフト波と軸方向流れ駆動不安定性の競合」日本物理学会2016年秋季大会 15pKA11 2016. 9. 13-17 金沢大学'
2. T. Kobayashi, S. Inagaki, Y. Kosuga, M. Sasaki, Y. Nagashima, T. Yamada, H. Arakawa, N. Kasuya, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, and K. Itoh: 'Structure formation in parallel ion flow and density profiles by cross-ferroic turbulent transport in linear magnetized plasma' Phys. Plasmas **23** 102311 (2016)
3. N. Dupertuis, S. Inagaki, Y. Nagashima, Y. Kosuga, F. Kin, T. Kobayashi, N. Kasuya, M. Sasaki, A. Fujisawa, M.Q. Tran, S.-I. Itoh and K. Itoh: 'Coexistence of drift waves and D'Angelo modes at different position and frequency in linear plasma device' Plasma Fusion Res. **12** 1201008 (2017)
4. Y. Kosuga, S.-I. Itoh and K. Itoh: 'Turbulence dynamics with the coupling of density gradient and parallel velocity gradient in the edge plasmas' Contrib. Plasma Phys. **56** 511 (2016)
5. 小菅佑輔、伊藤早苗、伊藤公孝、「磁場方向流れ場駆動乱流の波数スペクトル時間発展」日本物理学会2016年秋季大会 14aKA9 2016. 9. 13-17 金沢大学

金属間化合物における空孔型欠陥と水素原子の相互作用に関する研究

研究代表者 大阪府立大学工学研究科 堀史説

【研究の背景】

核融合炉などの特殊な環境下で用いられる材料中の不純物水素原子と格子欠陥との相互作用は重要な課題である。すなわち空孔型欠陥中の水素挙動と材料特性には相関が高いにもかかわらず、材料中の水素挙動に関してあまり詳細に解明されていない。特に、実用材として用いられる金属は様々な合金であり、それらは基本となる空孔型の欠陥だけでも複雑な種類が存在し得るが、実験的にそれらを分離することはこれまでほとんど不可能であった。また、材料中の水素の状態評価も他の元素に比べて評価が難しく、微量検出や欠陥との結合捕獲状態などの評価は限られた手法で特定のものに限られて来た。陽電子消滅法は原子レベルでの空孔の検出に優れており、近年では陽電子消滅時の対消滅相手となる電子の密度分布を簡便に詳細な評価が可能になってきた。そこで、化合物合金中の空孔型欠陥の特定と水素原子の捕獲による電子状態の変化についての検討を行っている。一方、核融合炉のプラズマ対向材料の候補として考えられているタングステン合金などでは水素同位体の貯留が大きな問題になっている。これはタングステン中に照射によって空孔型欠陥が導入され、そこに多量の水素が捕獲されることが予想されるからである。このような水素との強い相互作用は同じ結晶系である一部の金属間化合物でも起こる事が知られている。中でもタングステンと同じ体心立方格子 (bcc) 型の B2 型規則構造を有する Fe-Al 合金は水素吸収しやすい合金として知られており、水素脆性などの問題を抱えた合金である。このような bcc 型合金では特定の空孔型欠陥による大量の水素捕獲が理論計算でも示唆されており、空孔と水素との詳細な相互作用の解明が課題としてあげられる。そのため、我々はこれまでの第一原理計算において、B2 構造の Fe-Al 合金中の空孔種の違いによる水素捕獲構造安定性の結果から空孔中の水素の状態が空孔によって異なる事を示唆するデータを示して来た。また、前年度には異なる電子エネルギーで照射することにより導入される欠陥を制御できることを示した。今年度はこの合金中への水素チャージなどにより実際に水素を吸蔵させた試料の陽電子消滅測定を行い、これまで行って来た陽電子消滅計算のシミュレーションに電子運動量計算まで加えた結果と比較検討した。

【電子線照射試料中の水素】

陽電子消滅運動量計算:陽電子の計算方法は、モデル結晶中の原子に各々Herman-Skillmanが求めた Fe と Al および H 原子の電子密度分布を用いて陽電子の感じるポテンシャルを決定し、コーン-シャム方程式から数値緩和法を用いた数値計算によって陽電子の波動関数を求めた。求めた陽電子は導関数から陽電子寿命値と対消滅 γ 線運動量密度分布を求めた。

実験方法: アーク溶解によって精製した Fe-48at.%Al、Fe-50at.%Al の 6 mm 径のボタン材合金を 10 mm×10 mm×1 mm の板状に切り出し、表面を鏡面研磨したものを使用した。この板材に内部の欠陥を取り除くことを目的として、 3×10^{-4} Pa の真空中で 600°C、120 時間の焼鈍を行った。空孔の導入の方法として京都大学原子炉実験所及び量子化学技術研究開発機構(QST)-高崎量子応用研究所においてそれぞれ 8 MeV と 2 MeV の電子線照射を行った。照射温度はいずれも 35~40°Cで、照射量はいずれも 1×10^{18} e/cm² である。一方、照射試料に電解水素チャージによる水素の導入を行った。また比較のために、未照射材に対しても同様の水素チャージを行った。一方、欠陥の導入と水素の同時注入を行うために QST-高崎研究所において真空中での 1.5 MeV の水素イ

オン照射を行った。照射温度は室温で、照射量は 1×10^{16} ions/cm² である。

実験結果：図1に各試料の XRD の結果を示す。いずれの試料においても B2 以外の構造を示す回折ピークは出現しておらず、照射による構造相転移などは起こっていない事がわかる。さらに水素を注入しても同様に構造に影響するものではないことがわかる。一方、図2および3に2および8 MeV で電子線照射した試料に水素注入した場合の陽電子 CDB スペクトルの変化を示す。前年度までの結果からこれらの2つのエネルギー電子照射では導入された欠陥の比率が異なる事がわかっている。

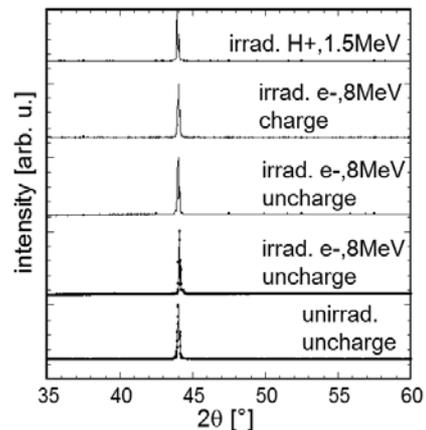


図1 照射前後および水素注入した Fe-Al 試料での X 線回折結果

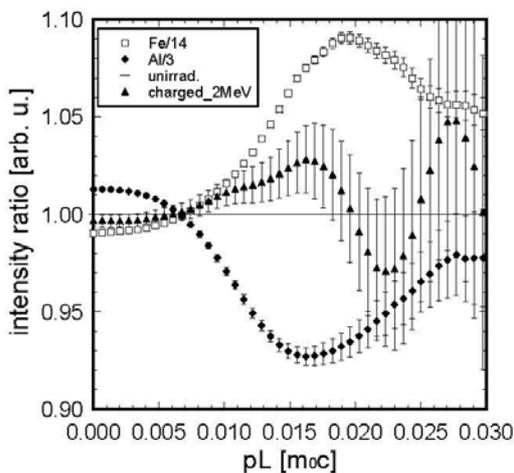


図2 2MeV電子線照射したFe-Al合金への水素注入による陽電子CDBスペクトルの変化

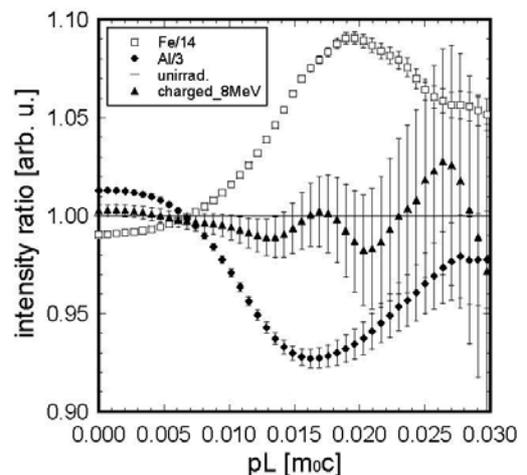


図3 8MeV電子線照射したFe-Al合金への水素注入による陽電子CDBスペクトルの変化

図にはいずれも水素を注入した場合におよそ 0.017m0c 付近にピークが出現している。このピークの由来について検討するために、図4に計算機シミュレーションで求めた各空孔に水素を配置した場合の電子の運動量分布曲線を示す。この図から水素を空孔内に配置した場合にいずれの空孔においても 0.017m0c 付近が僅かに増加していることがわかる。すなわち図2、3の水素注入後のスペクトル変化は照射で導入された空孔内部に水素原子が捕獲されたことを示している。異なる欠陥（鉄空孔 VFe とアルミ空孔 VA1）いずれに対しても水素が起こっており、この結果は第一原理計算で示された各空孔中への水素捕獲状態の安定性と良く対応している。本 CDB 運動量計算では水素1個のみしか実施できなかったため、これらの実験結果は水素捕獲が単一か複数個なのか現時点で判断できていない。この点は今後の検討課題である。

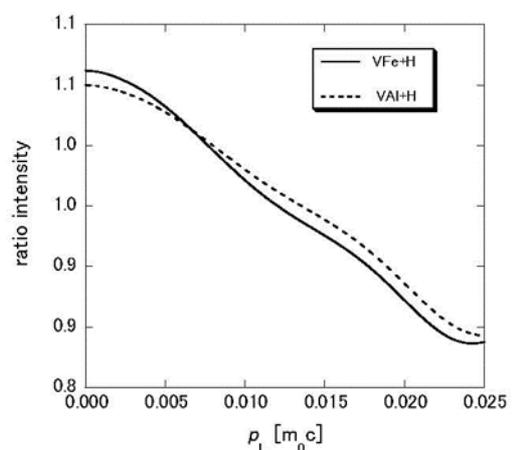


図4 水素捕獲した各空孔での陽電子消滅電子運動量のシミュレーション結果

LHD ヘリウム長時間放電に曝露されたタングステン表面の構造解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 時谷 政行

【目的】

近年、実験室における基礎研究から、タングステンに He を照射した際に極めて複雑なナノ繊維状構造を持つ表面損傷組織(W-fuzz)が形成されることが知られている[1]。照射条件はいずれも試料温度 1000-2000K, 照射量 $\sim 1 \times 10^{25} \text{m}^{-2}$ 以上, 入射イオンエネルギー 20eV 以上の条件で発現する。タングステン表面がこのような構造に変化した場合, 熱伝導率の低下, ダストの発生など様々な望まれない影響を引き起こす恐れがある。大型の実機装置において W-fuzz 構造が実験室と同じように形成され得るかを確かめることは, 将来のダイバータ設計を検討するにおいて不可欠である。しかしながら, これまで実機プラズマ照射によりタングステン表面に W-fuzz が形成されることが確認された例はほとんど無い。その理由として, ヘリウムプラズマを安定して長時間維持することができる実機装置が少ないことが考えられる。数十分以上の安定したヘリウム放電時のダイバータプラズマにタングステンを連続して照射することができなければ, 基礎実験での形成環境を模擬することは困難である。このような観点において, 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では, 水素マイノリティ ICH+ECH 加熱方式を用いたヘリウムプラズマの長時間放電の研究が継続して行われており, 2013 年度の実験においては平均で 1.2MW の加熱入力で $T_{i,e} \sim 2 \text{keV}$, $n_e \sim 1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマを 47 分間にわたって維持することに成功している。この安定したヘリウム放電をプラットフォームとすれば, ヘリウムのダイバータプラズマへのタングステンの長時間曝露が可能となる。実機において本研究では, LHD に既設の試料駆動装置を用いて, タングステンバルク試料を ICH+ECH 加熱時のヘリウム長時間放電のダイバータプラズマに連続的に照射することで, W-fuzz 構造が形成されるかどうかの確認, および, 形成された場合にはその微細構造特性を調べることを目的とした。

【実験方法】

LHD に既設の試料駆動装置を用いて, タングステンバルク試料をLHD ダイバータプラズマ位置に挿入した。図 1 にその模式図を示す。試料駆動装置は差動排気式となっているため, LHD の真空を破ることなく照射用の試料を出し入れすることができる。ダイバータプラズマのストライクポイントが $80 \text{mm} \times 30 \text{mm} \times 1.5 \text{mm}$ の試料のちょうど中央付近に位置するように試料駆動装置の上下動位置を調整した。照射中の試料の全体像は上方約 5.1m の監視ポートに設置した可視カメラによりモニターされ, タングステン表面の温度は同じく 5.1m の監視ポートに設置した IR カメラによりモニターされた。照射時の典型的なプラズマパラメータ, 照射条件および照射中の試料温度を表 1 に示す。ヘリウムプラズマの照射は平均的に数百秒程度の時間で連続して 22shot 実施された。取り出したあとの試料を $20 \text{mm} \times 20 \text{mm}$ 程度の大きさにスローカッターを用いて切断し, 表面分析を行った。用いた分析機器は電解放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM), 原子間力顕微鏡(AFM)である。AFM は九州大学応用力学研究所の機器であり, 今年度共同研究の主な利用機器である。

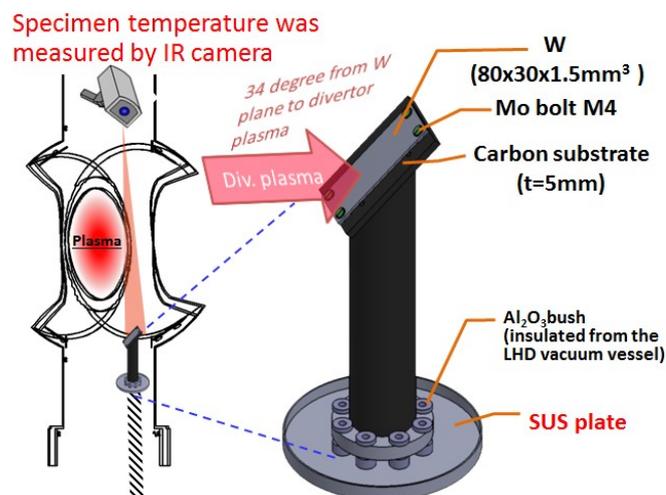


図 1. LHD 既設の試料駆動装置を用いたダイバータプラズマへのタングステン試料照射実験の模式図

Input power	1.2MW~3.0MW
Total exposure time	10190s (22 discharges)
Gas	He
Surface temperature	1900K-2300K ($\epsilon \sim 0.3$)
Incident He energy	$\sim 100 \text{eV}$
He flux at strike point	$\sim 5 \times 10^{21} \text{He/m}^2 \text{s}$
He fluence at strike point	$\sim 5 \times 10^{25} \text{He/m}^2$

表 1. タングステン試料照射時の典型的なプラズマパラメータ, 照射条件および照射中の試料温度

【結果および考察】

図 2 に、ストライクポイント近傍のFE-SEM 像を示す。42mm, 47mm という表記は試料上の座標を意味しており、80mm の試料上のほぼ中央付近に対応する。構造状態から判断してW-fuzz 構造の初期状態が形成されていると考えられる。照射量やエネルギーが明白ないわゆる制御された条件における実機のヘリウムダイバータプラズマ照射においてW-fuzz 構造の初期状態が確認されたのは世界でも初めての結果である。W-fuzz 構造の形状を定量的に調

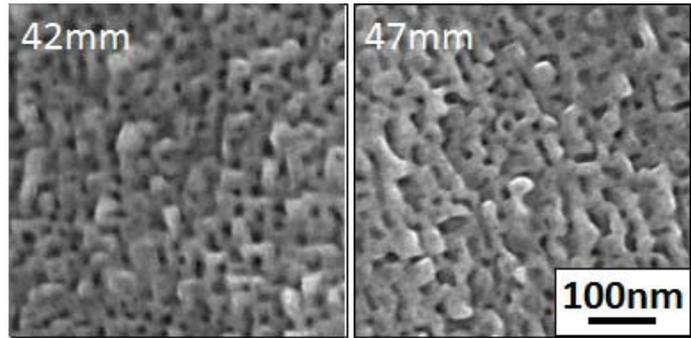


図 2. ダイバータストライクポイント近傍の典型的な表面構造

べるために、九州大学応用力学研究所の AFM 装置で表面観察を実施した結果を図 3 に示す。図3の場所は図2の 47mm の位置に対応している。W-fuzz の繊維状突起の直径は約 20~30nm 程度であることがわかる。また、図2と図3の結果を総合的に見て、W-fuzz 層の厚さは 100nm 前後ではないかと推察される。ストライクポイントのヘリウム照射量は $\sim 5 \times 10^{25} \text{He/m}^2$ であるが、同じ照射量での実験室実験の結果と比較すると成長量が低いことになる。この理由は、LHD 実験の場合、22shot のプラズマ照射を繰り返し実施し、合計の照射量となるため、温度上昇と冷却が繰り返され、実験室実験のように連続した照射と比較して成長速度が遅くなったのではないかと考えられる。透過型電子顕微鏡(TEM)による分析結果も用いて比較検討を行っていきたい。

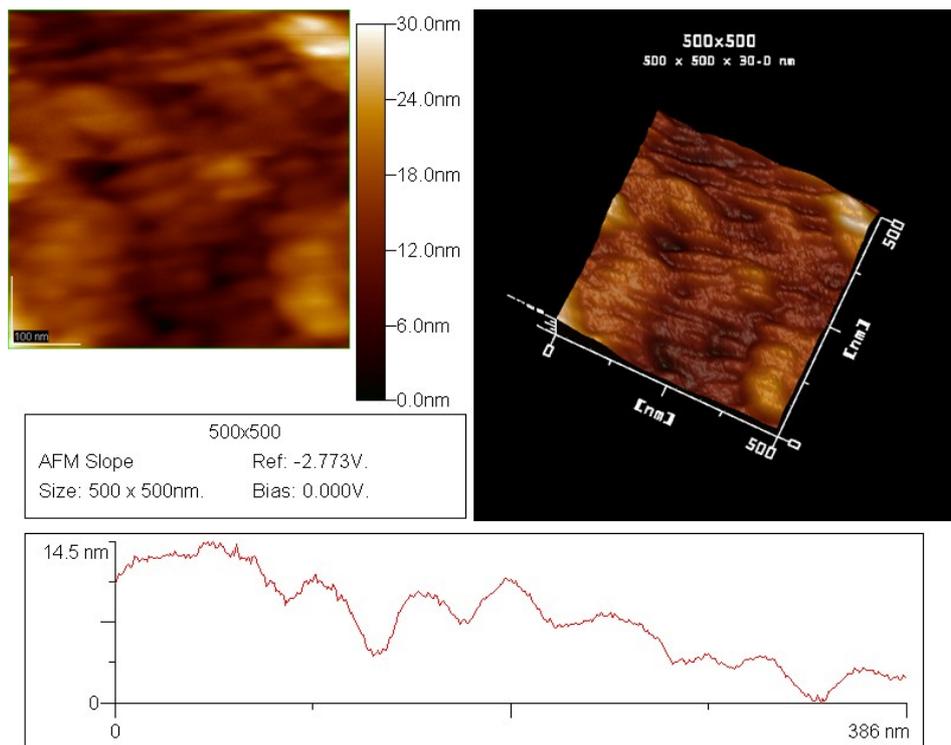


図 3. AFM で得られた表面構造画像と定量的な断面凹凸情報

参考文献

[1] S. Kajita et al., Nucl. Fusion 49 (2009) 095005

【成果報告】

M. Tokitani et al., "Initial growth phase of W-fuzz formation in ultra-long pulse helium discharge in LHD" 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, May 30-June 3, 2016, Urbaniana University, Rome, Italia

ジャイロ流体モデルによる直線装置 PANTA における ITG モードのシミュレーション研究

量子科学技術研究開発機構 矢木雅敏

目的

九大応力研付属の直線装置PANTAではイオン温度勾配モード(ITGモード)の励起実験が検討されている。このため、理論・シミュレーションの観点から ITG モードが線形的に不安定になるパラメータ領域を調べ、実験にフィードバックすることを研究目的とする。ジャイロ流体モデルを用いたシミュレーションコードを開発し、これを用いたシミュレーション研究を推進する。

研究成果

磁場閉じ込めプラズマにおける異常輸送の原因の1つにイオン温度勾配による微視的不安定性 (ITG 不安定性) が挙げられる。ITG不安定性の励起条件や、それらモード間の非線形結合の研究は、直線型磁化プラズマを用いた基礎実験において行われており [1]、直線装置 PANTA においても、イオン温度計測が進められ流体モデルを用いた ITG 不安定性の解析が行われている [2]。ITG 不安定性はイオンの温度勾配 $L_T = -d(\ln T)/dr$ と密度勾配 $L_n = -d(\ln n)/dr$ の比 $\eta_i = L_n/L_T$ が閾値を超えることにより励起されるがイオン温度が数 [ev] と低くても $k_\perp \rho_s \sim 1$ のモードが不安定となり得ることが確認されている [2]。そのため、有限ラーマ半径 (FLR) 効果を含めた、より詳細な解析が求められる。これまでに、ジャイロ運動論方程式のモーメントをとることにより導出されるジャイロ流体方程式を用いた局所解析を行い、研究成果として ITG 不安定性の線形成長率のパラメータ依存性を得ている [3]。今回は、より詳細なプラズマ中での輸送現象の理解を図るために、ジャイロ流体モデルにおいて、モード構造が得られる大域固有関数解析を行った。開発したコードの動作確認のために試験的な計算を行い、局所解析の結果を再現した。さらに FLR 効果を含めた ITG 不安定性の特徴を調べた。参考文献 [4] の (1)-(10) 式を線形化して解くことで、線形成長率を評価する。

$$\lambda n + ik_z u_\parallel + ik_\theta \Psi + \eta_{i\perp} \Psi_1 = 0 \quad (1)$$

$$\lambda u_\parallel + ik_z (T_\parallel + n + \Psi) = 0, \quad (2)$$

$$\lambda T_\perp + ik_z q_\perp + \Psi_1 + \eta_{i\perp} ik_\theta \Psi + \eta_{i\perp} \Psi_2 = \frac{1}{3} v_{ii} (T_\parallel - T_\perp), \quad (3)$$

$$\lambda T_\parallel + ik_z (2u_\parallel + q_\parallel) + \eta_{i\parallel} ik_\theta \Psi = -\frac{2}{3} v_{ii} (T_\parallel - T_\perp), \quad (4)$$

$$(1 + \frac{b}{2})n - \frac{b}{2}T_\perp - ((1 + \frac{b}{2})^2 - 1)(1 + \frac{b}{2})\Psi = \tau(1 + \frac{b}{2})^3\Psi, \quad (5)$$

$$\Psi_1 = (\frac{ib}{2k_\theta} - \frac{ibk_\theta}{2} \frac{1}{1+b/2})\Psi, \quad (6)$$

$$\Psi_2 = (-\frac{ibk_\theta}{(1+b/2)^2} + \frac{ib}{k_\theta} \frac{1}{1+b/2} - \frac{ib}{4k_\theta^3})\Psi. \quad (7)$$

ここで v_{ii} はイオン同士の衝突周波数, τ はイオン温度 T_i と電子温度 T_e の比 $\tau = T_i/T_e$ 、 $b = k_r^2 + k_\theta^2$ である。 λ を固有値として解くことで、線形成長率と周波数を求める (局所解析) 同様に (1)-(10) 式を r, θ, z 方向で以下のようにフーリエベッセル展開する:

$$\phi(r, \theta, z) = \sum_{m=-M}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \phi_{mkl} J_m(\lambda_{mk} r) e^{im\theta} \cos\left(\frac{\pi}{2}(2l-1)z\right), \quad (8)$$

$$u(r, \theta, z) = \sum_{m=-M}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L u_{mkl} J_m(\lambda_{mk} r) e^{im\theta} \sin\left(\frac{\pi}{2}(2l-1)z\right). \quad (9)$$

ここで $0 \leq r \leq 1$ であり、 $J_m(r)$ はベッセル関数、 $r = \lambda_{mk}$ は $J_m(\lambda_{mk}) = 0$ となる点を表している。スペクトル展開した行列式を、固有値法と初期値法の 2 つの方法で解く。固有値法では行列の固有値 ω を求め、 $\text{Re}(\omega)$ の最大値を得ることにより、線形成長率を求める。初期値法では予測子修正子法により各係数の時間発展を解くことにより線形成長率と周波数を求める。比較のため衝突と FLR 効果を見直し、 $v_{ii} = 0$ 、 $b = 0$ としたモデルの計算を行った。ここで $q_{\perp} = q_{\parallel} = 0$ とした。解析には PANTA 装置実験を想定して以下のパラメータを用いる：装置長 $l = 4.0$ [m]、プラズマ半径 $a = 7.0$ [cm]、 $n = 1.0 \times 10^{19}$ [m⁻³]、 $B = 0.1$ [T]、イオンラーマ半径 $\rho_s = 1.1$ [cm]。また、線形局所解析での測定位置 $r = 3.5$ [cm] とする。

図 1 に方位角方向モード数 $m = 2$ の場合の局所解析および大域固有関数解析による線形成長率および

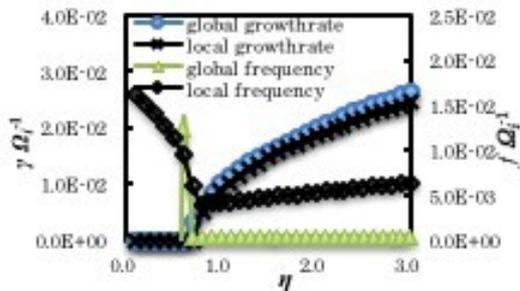


図 1 $m = 2$ モードの最大線形成長率および周波数の η 依存性

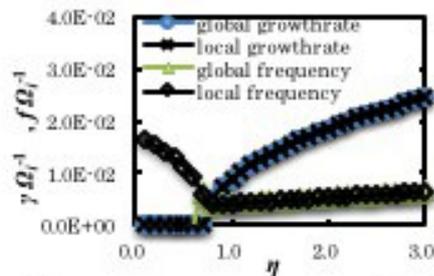


図 2 $m = 2$ モードの最大線形成長率および周波数の η 依存性

周波数の η 依存性を示す。図 1 より、線形成長率においては閾値がおおよそ 0.8 でほぼ同じ値でありその変化も同様な形を取っているが、周波数においては局所解析での値が局所解析での値よりおおよそ 10 倍小さい値となっている。これは k_{θ} が半径 r に依存することによる。そこで大域解析において k_{θ} の値を $r = 3.5$ [cm] の局所的な値に固定して計算した (図 2)。図 2 より、成長率、周波数共にほぼ同じ値となっている。このように開発したコードによる計算結果の妥当性を確認することができた。

参考文献

- [1] A.K.Sen, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **66**, 429 (1991)
- [2] Y Miwa, *et al.*, Plasma Fusion Res. **8**, 2403133 (2013)
- [3] G. Hattori, *et al.*, Plasma Fusion Res. **10**, 3401060 (2015)
- [4] 応用力学研究所共同利用研究平成 27 年度成果報告 27FP-37

研究組織

矢木雅敏(量研機構)、糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(九大応力研)、稲垣滋(九大応力研)、糟谷和賀子(応用流れ研究所)

タングステン中の二原子空孔の安定性に関する研究

日本原子力研究開発機構 山口正剛

【研究の背景】

タングステンは高い融点、高い熱伝導度、低い水素溶解度といった特徴を持つ金属で、しかも機械的強度に優れ誘導放射化も少ない。そのため核融合炉のプラズマ対向材料として有望である。その非常に低い水素溶解度を考えれば結晶格子内に水素が入り込むことはない。しかし、空孔型欠陥や不純物の周辺には相当量の水素が捕獲され残留することが実験的にも示されている。特に、放射性同位体の三重水素の貯蔵量やその除去方法が問題になっている。そこで、空孔や不純物に捕獲される水素および水素同位体の量、結合エネルギーや乖離温度に関する研究が行われている。

ところで、最近 Ventelon ら[1]によってタングステン空孔に関して重要な発見があった。通常金属は単原子空孔よりも、二原子空孔の方が内表面積を小さくなるため安定である。しかし、タングステン空孔に関してはその一般則が成立せず、単原子空孔のままの方が安定であることが密度汎関数法に基づいた第一原理計算から示唆された。これはあくまでも、水素の無い状態での計算である。そこで、本研究では核融合炉を意識し水素が作用した場合の二原子空孔の安定性を研究する。比較のために他の BCC 金属空孔に作用する水素の影響、特に鉄とタングステン空孔を比較した結果を報告する。

【計算方法】

第一原理計算には汎用コードである VASP を使った。周期的境界条件の影響を緩和するために比較的大きな計算セルを用いた。BCC 格子で $6 \times 6 \times 6$ 、原子数では 432 個の構成された計算セルを使った。平面波の cut-off エネルギーは 350eV とした。水素を捕獲した空孔水素複合体の結合エネルギーを

$$E_B = E[VH_m] + E[VH_n] - E[V_2H_{m+n}]$$

のように定義した。ここで V は金属結晶中の単空孔、H は水素、 m と n は単空孔に捕獲された水素の個数を表す。関数 E はそのようなセルの凝集エネルギーである。符号が正の時は引力を表す。

【計算結果】

BCC 金属中の二原子空孔は図 1 のように二通りの配置がある。Fe、Nb、Ta は(a)の $\langle 100 \rangle$ 方向配置、V、Cr、W は図 1 (b) の $\langle 111 \rangle$ 方向の配置が安定であり、本研究の結果は Ventelon の計算とも一致する。

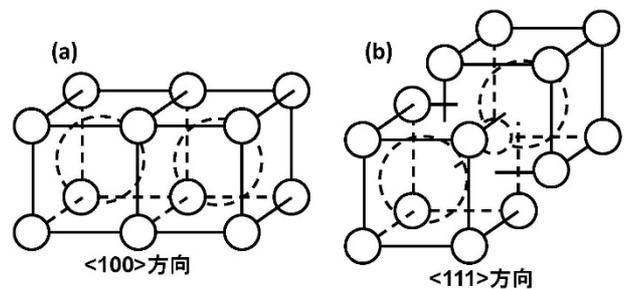


図 1: 二原子空孔の配置

鉄の二原子空孔に水素が捕獲されると図 1 のように空孔の配置にも変化が起きる。鉄の場合、水素なしと水素 1 個までは空孔は<100>方向配置が安定であるが、2 個以上捕獲されると<111>方向配置が安定になる。一方で、タングステンの二原子空孔は<111>方向配置が常に安定である。

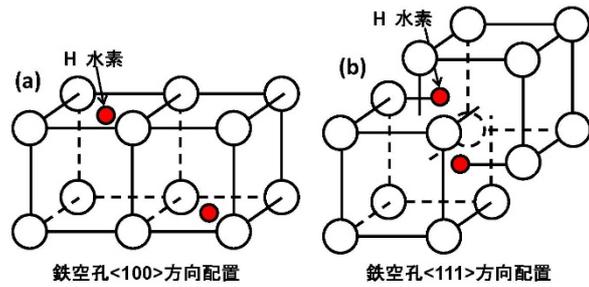


図 2:水素がある時の鉄二原子空孔の安定性。<111>方向配置(b)の方が安定になる。

図 3 は 4 種類の BCC 金属中の空孔、および空孔水素複合体の結合エネルギーを

示す。タングステン以外の金属では空孔が結合し二原子空孔を形成した方が安定である。タングステンだけは二原子空孔は不安定であるということは先行研究[1]と一致する。しかし、空孔水素複合体になると結合した方が安定である。図 4 はタングステン空孔に水素が 0、1、2、3、6 個捕獲した空孔水素複合体同士の結合エネルギーである。空孔中に水素が 1 個以上存在すれば結合することで安定化する。

【議論】

核融合炉の炉壁材料研究ではタングステン中の空孔が拡散し成長してポイドなど大きな照射組織を形成する過程は重要なテーマである。本研究の結果を使うと、タングステン中の二原子空孔は不安定であるから生成しない、少なくとも単空孔同士は結合しない。逆に水素が作用すると結合が促進されるというモデルが提案できる。今後は陽電子消滅など実験的な手法も使いながら検証をすることも必要になる。

[1] L. Ventelon *et al.* J. Nucl. Mat. 425 (2012) 16-21.

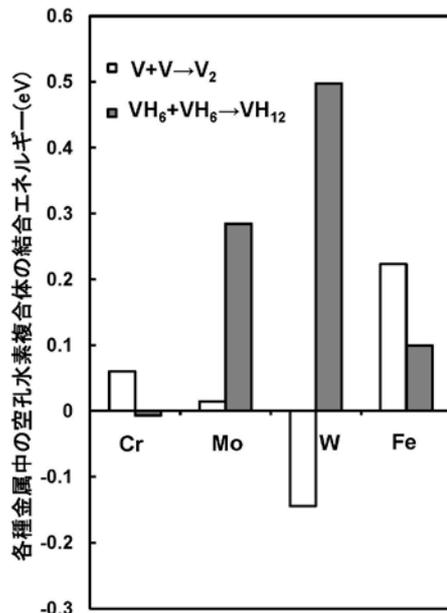


図 3:BCC 金属中の空孔 V および空孔水素複合体 VH₆ の結合エネルギー。

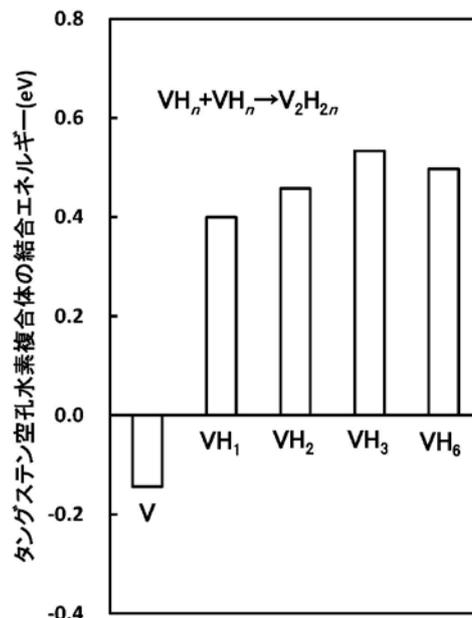


図 4:タングステン中の空孔水素複合体の結合エネルギー。

収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 安永和史

1. 緒言

Zr を母相としその性質（機械的特性、耐酸化性、耐食性）の改善を目的として様々な元素（Fe、Cr、Ni、Sn）が添加された Zr 合金が開発されており、その一種であるジルカロイ 2 は沸騰水型の軽水炉（BWR）の燃料被覆管材料として用いられている。ジルカロイ 2 は高燃焼度において脆化することが知られており、照射欠陥や析出物と水素吸収との関連が指摘されている。そこで、重イオン照射後に水素を注入する模擬実験により欠陥形成と脆化との関連を明らかにする調査を計画している。昨年度は、重イオン照射前のジルカロイ 2 焼鈍材の微細組織について調査し、焼鈍材は転位がほとんど存在せず析出物のみが分布した状態であり、析出物には $Zr_2(Fe, Ni)$ 、 $Zr(Fe, Cr)_2$ 及び組成不明の微小析出物の 3 種類が存在することを明らかにした。本年度は、重イオン照射されたジルカロイ 2 の微細組織、特に析出物の構成元素の重イオン照射による変化（析出物の重イオン照射下での相安定性）について調査した結果を報告する。

2. 実験方法

試料はジルカロイ 2 で、その成分元素の分析値を表 1 に示す。焼鈍したジルカロイ 2 試料は、九州大学応用力学研究所に設置されたタンデム型加速器を用いて重イオンを照射した。重イオンの照射条件は、イオンエネルギー及びイオン種は 3.2 MeV の Ni イオン、試料温度は 400°C、ピーク照射量は 30 dpa である。重イオン照射された試料は、集束イオンビーム（Focused Ion Beam; FIB）装置（FB-2100、HITACHI）を用いて薄膜化し断面 TEM 観察用に加工した。試料の微細組織の観察には TEM(JEM-3000F、JEOL)を用いた。加速電圧は 300 kV である。STEM（Scanning Transmission Electron Microscopy）及び STEM-EDS（Energy Dispersive Spectroscopy）による元素分析を行った。

3. 結果および考察

図 1 は重イオン照射されたジルカロイ 2 試料を FIB を用いて薄膜化した断面微細組織を示す STEM-BF 像である。左上に試料表面が存在しており、2 本の白い点線は試料表面に近い方から重イオン照射による損傷が最大の深さ（約 1750 nm）及びそれ以上では重イオンによる弾き出しが誘起されない深さ（約 2600 nm）をそれぞれ示している。枠で囲まれた領域は STEM-EDS により元素分析を行った領域である。領域 1 は、重イオン照射によるダメージピーク及び弾き出しが誘起されない深部の断面組織をともに含んでいる。

図 2 左は、図 1 中の領域 1 の STEM-EDS マッピング像であり、Fe は緑、Cr は赤、Ni は青で表示し STEM-BF 像に重ね合わせたものである。図 2 右は重ね合わせ像中に記号を付した析出物の元素分析結果であり、両端に母相を含み析出物を横切るようにして元素プロファイルを得た。縦軸は元素の特性 X 線のカウント数、横軸は距離(μm)である。水色の粒径約 350 nm の析出物（A1）及び粒径約 120 nm の析出物（A2）は、Zr-Ni-Fe 系の析出物で、Fe と Ni の濃度がほぼ同一であることから $Zr_2(Fe, Ni)$ と考えられるものである。A1 は A2 と比較して Fe の濃度が若干低いことは、弾き出しによる Fe の減少を示唆している。一方、赤色及び黄色の粒径 50~210 nm の析出物は、Zr-Cr-Fe 系の析出物である。B1 から B3 の析出物の色は赤から黄色に変化している。この現象は、重イオン照射による弾き出しの影響を受けて $Zr(Fe, Cr)_2$ から Fe が減少する程度が試料表面からの深さにより異なることにより生じたと考えられる。すなわち、試料表面からダメージピーク近傍では顕著に Fe の減少がみられ、ダメージピークよりも深部では B3 の元素プロファイルに示されるように Fe の減少は観察されず Fe と Cr の強度がほぼ等しい。以上の結果から Zr-Ni-Fe 系及び Zr-Cr-Fe 系の析出物ともに重イオン照射による弾き出しが誘起される領域において Fe が減少することが明らかとなった。現時点では同程度のサイズでの比較はできていないが、重イオン照射による Zr-Cr-Fe 系の析出物からの Fe の減少の程度が高く、照射下での析出物の相安定性が Zr-Ni-Fe 系と Zr-Cr-Fe 系で異なる可能性が示唆される。

4. まとめ

重イオン照射後のジルカロイ 2 試料に存在する析出物の組成分析を STEM-EDS により行い、試料表面からの深さ依存性を調査した。その結果、焼鈍材で確認された $Zr_2(Fe, Ni)$ 及び $Zr(Fe, Cr)_2$ の成分組成をもつ析出物から Fe が減少した析出物への変化が観察された。この現象は重イオン照射による弾き出し損傷の誘起される領域で顕著に観察され、析出物への照射効果であることが明確に確認された。析出物からの Fe の減少の程度は、 $Zr_2(Fe, Ni)$ よりも $Zr(Fe, Cr)_2$ の方が顕著で $Zr(Fe, Cr)_2$ 析出物中の Fe はほぼ完全に消失していた。これらの結果は重イオン照射下での析出物の相安定性は $Zr_2(Fe, Ni)$ の方が $Zr(Fe, Cr)_2$ よりも高いことを示唆していると考えられる。

研究組織

研究代表者：安永和史（公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター主任研究員）

研究世話人：渡辺英雄（九州大学応用力学研究所准教授）

研究協力者：牟田口嵩史（九州大学応用力学研究所技術職員）

研究協力者：島袋瞬（九州大学応用力学研究所技術職員）

表 1 ジルカロイ 2 の成分元素の分析値

	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
wt.%	1.38	0.15	0.09	0.05	Bal.

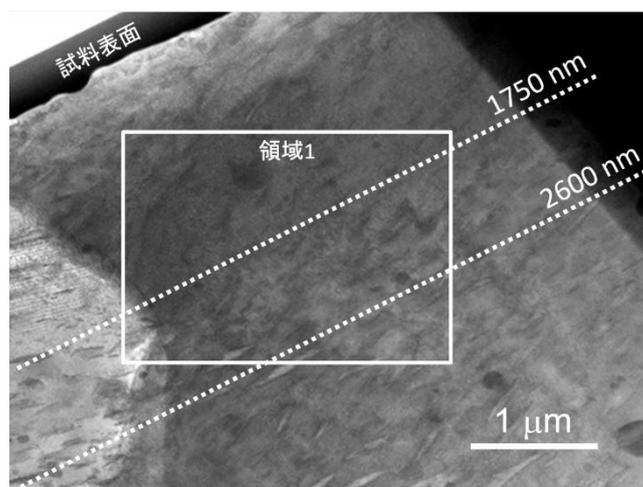


図 1 重イオン照射されたジルカロイ 2 の断面微細組織。枠内は STEM-EDS により元素分析をした領域

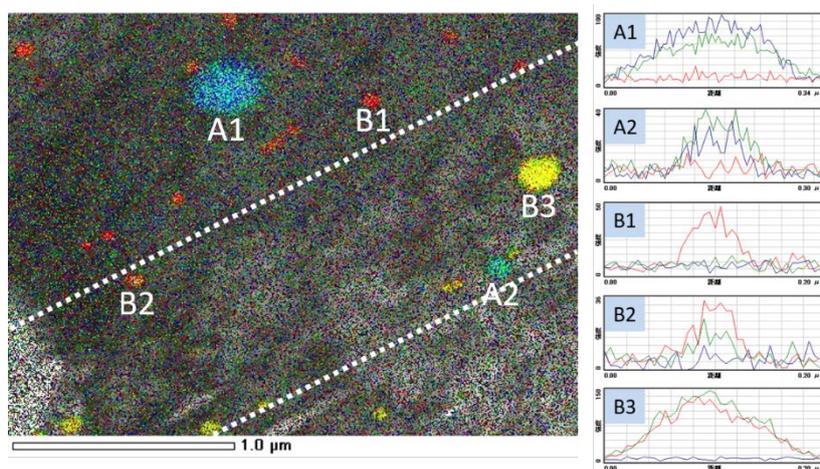


図 2 領域 1 における Fe(緑)、Cr(赤)、Ni(青)の面分布を示す STEM-EDS マッピング及び析出物の元素プロファイル

プラズマ乱流における非線形時系列データの統計解析 Statistical analysis of nonlinear time series in plasma turbulence

富山大学・人間発達科学部 成行 泰裕

研究目的：

プラズマ乱流の性質を理解する場合、その乱流を形成している擾乱間の非線形相互作用の解明が重要になる。一方で、プラズマ中には速度分布に起因する微視的不安定性や熱的ノイズなどが存在するため、コヒーレントな波動間相互作用が卓越するとは限らない。また、線形の分散関係がほぼ満たされている弱乱流と非線形性が卓越する発達した乱流とはスペクトルのべき指数等性質そのものが異なることも知られている。

本研究課題では、前年度までのモデル方程式を用いた統計解析の話を前に進め、統計解析法の改良およびその手法の数値計算データや観測データへの適用を目指す。

研究方法：

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

研究成果：

前年度まではサロゲートデータ法と構造関数で定量化した位相相関指数と射影演算子法を用いて構築した物理モデルを組み合わせるカオスを示す時系列の議論を行った。本年度は少し視点を変え、機械学習法を用いて統計モデルを作成し、より多角的に非線形性の評価を行うための手法の開発に取り組んだ。

本年度は、九州大学応用力学研究所の PANTA 実験装置で生成されたプラズマ乱流(静電ポテンシャル)の時系列データに対し、ランダムフォレスト[1]を用いて特定のプローブで観測されたデータに対する回帰モデルを作成した。具体的には、32本配置されている PANTA のプローブの中のある一つのプローブの観測データを目的変数、他のプローブ(6本)が観測したデータを説明変数として、統計ソフト R(3.1.3)[2]の randomForest パッケージ[3]を用いて計算を行った。8本のプローブは目的のプローブの両側に4本ずつとり、間隔無し、1本間隔、2本間隔の3通りで回帰モデルの作成を行った。解析は時系列が統計的定常状態になっている時間帯のデータを用いて行った。回帰モデルの作成には各時系列で1万点のデータ点を用いた。

Fig.1 はそれぞれ間隔無し、1本間隔、2本間隔の場合における回帰モデルを用いた予測結果である。ここでは、学習に用いた時間帯とは別の時間帯のデータを検証用に用いている。検証用データの点数は学習用データと同じく1万点である。Fig.1 上図が示すように、学習データのプローブ間隔が無い場合は、目的プローブのデータを回帰モデルにより精度

良く再現できていることが分かる(相関係数は 0.99)。また、1 本間隔(中図)、2 本間隔(下図)になるにつれて、精度は悪くなっている(相関係数はそれぞれ 0.95, 0.81)。ただし、1 本間隔・2 本間隔データから見た場合は目的プローブのデータは粗視化スケールの現象であるにもかかわらず、それがある程度の精度で再現されていることに注意されたい。また、randomForest パッケージ[3]で計算される学習データの重要度は、間隔無しと 1 本間隔の場合は目的プローブ最寄りのデータの重要度が最も高いが、2 本間隔の場合はそうではなくなっている。このことは、周方向の構造に起因するものであると考えられる。今後は、検証法の改良、時系列中の位相相関(非線形性)と予測精度の関係、異なる場所のプローブを用いた場合の解析を進め、物理現象との関連をより詳細に議論していく。

引用文献: [1] L. Breiman, *Machine Learning*, 45, 5–32 (2001); 平井有三, はじめてのパターン認識, 森北出版(2012). [2] R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. [3] A. Liaw and M. Wiener (2002). Classification and Regression by randomForest. *R News* 2(3), 18–22.

公表状況：なし(2016年2月末時点)

***以下の論文が受理済みである**

Yasuhiro Nariyuki, Makoto Sasaki, Naohiro Kasuya, Tohru Hada, and Masatoshi Yagi, Phase coherence among the Fourier modes and the non-Gaussian characteristics in Alfvén chaos system, accepted to *Prog. Theor. Exp. Phys.*

研究組織：

成行泰裕 (富大・人間発達)、佐々木真 (九大・応力研)、羽田亨 (九大・総理工)

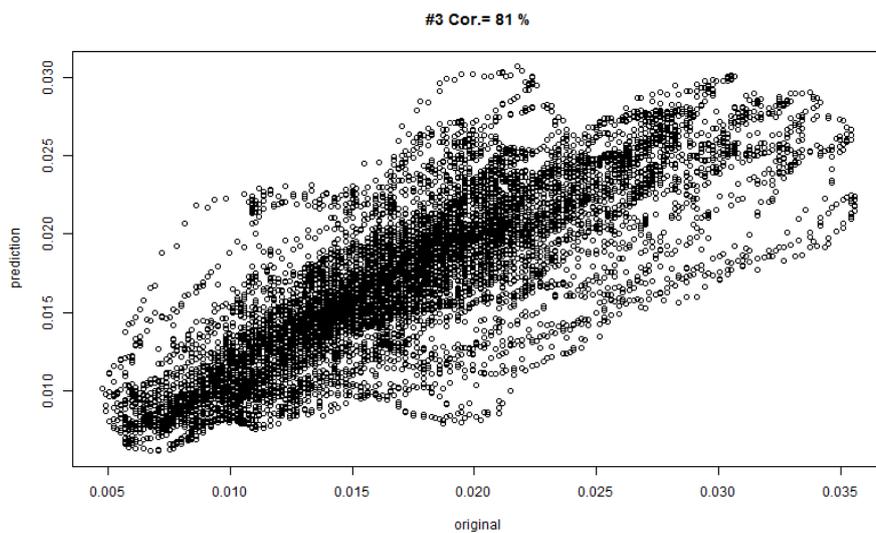
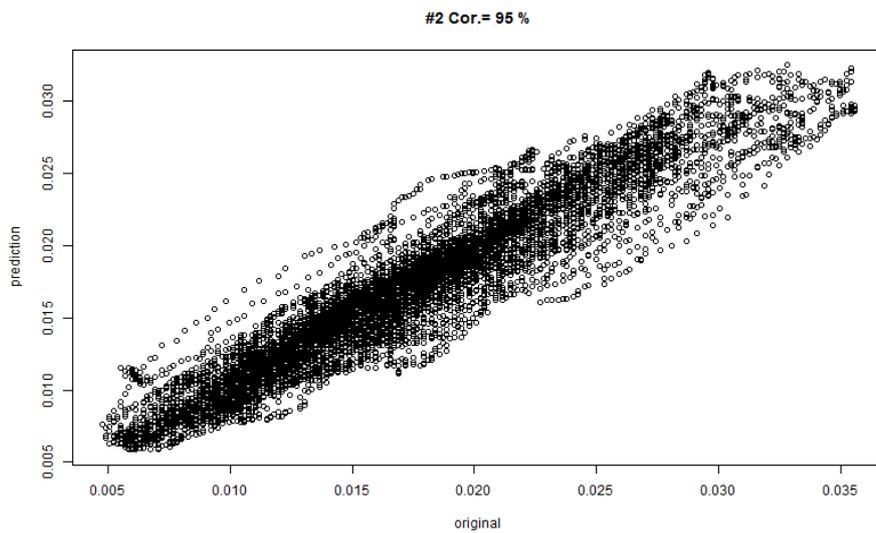
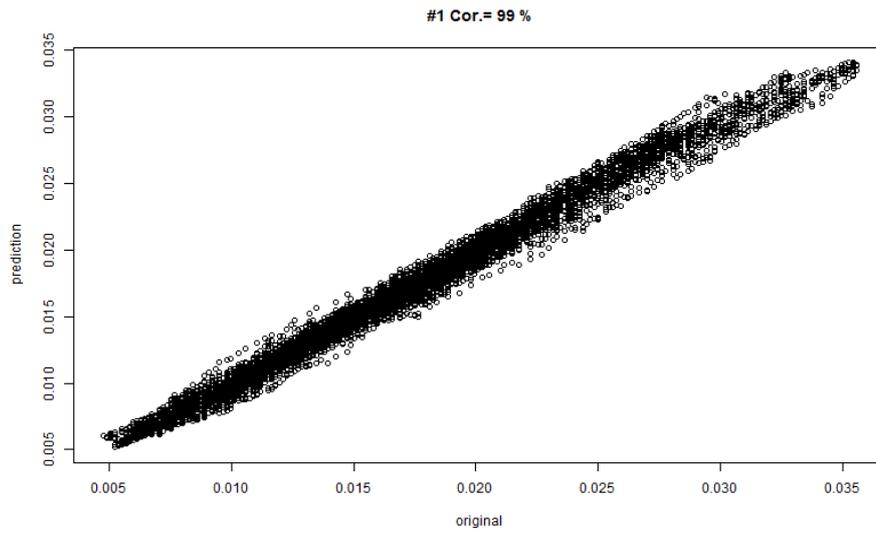


Fig.1 観測データ(横軸)と予測データ(縦軸)の散布図。プローブの間隔がそれぞれ間隔無し(上図)、1本間隔(中図)、2本間隔(下図)を表している。

プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究

京都大学大学院工学研究科 高木郁二

要旨

QUEST の運転中にプラズマ対向壁上に成長した堆積層中の水素の動的リテンションを測定した。堆積層の温度が高いほどリテンションは少なく、この結果は水素の溶解と捕捉、表面からの再結合を考慮したモデルで定量的に説明することができた。

1. 序論

プラズマに対向した固体表面における水素リテンション（保持量）は、プラズマの長時間維持に大きな影響を及ぼし得る因子である。リテンションは入射水素数と放出水素数を定量的に把握すれば予測できるが、後者の量を決定する再結合定数は理論的な取扱が難しいため、実際に用いられている材料での値を評価する必要がある。

本研究は、QUEST のプラズマ対向壁に成長した堆積層を試料とし、小型のプラズマ装置と加速器分析を組み合わせたその場観察法で再結合定数や動的リテンションを調べた。

2. 方法

試験片は QUEST の運転中に堆積層が成長した 316 ステンレス鋼であり、ステンレス鋼と堆積層の厚みはそれぞれ、0.1mm と 30nm である。この試験片を 12x12mm² に分割した試料 (DS-14-B-01~B-04) を実験に用いた。

リテンションを測定した実験装置の概要を図 1 に示す。試料を真空槽に取り付け、堆積層のある側を重水素プラズマに曝し続ける。この状態で 45 度方向から ³He イオンビームを試料に照射し、D (³He, p)⁴He による核反応を利用して、試料中の重

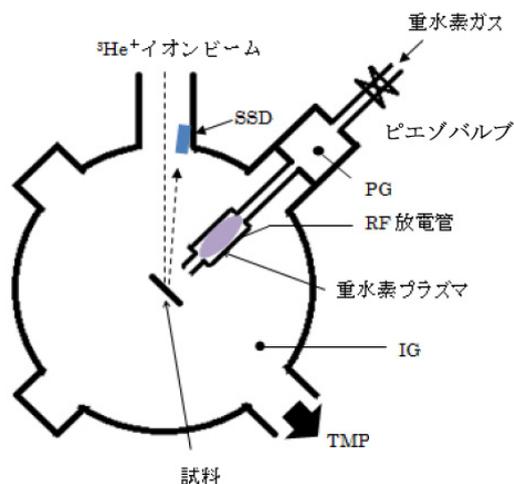


図 1 実験装置の概念図

水素濃度の深さ方向分布を測定した。1回の測定に必要な時間は 15 分程度である。プラズマを停止した後も測定を続けた。4つの試料は、それぞれ温度を変えて測定した。プラズマは RF による弱電離であり、水素粒子の典型的なエネルギーは 1eV 程度である。

3. 結果

堆積層中の重水素を明瞭に観察することができた。一例を図 2 に示す。横軸は表面からの深さ、縦軸は重水素濃度である。重水素が負の方向に広がっているのは、システムの分解能

が無限小でないためであり、実際には正の方向にしか存在しない。システムの分解能は半値幅で 100nm 程度であり、これは堆積層の厚み (30nm) よりも大きい。従って、図 2 の表面におけるピークは、堆積層中の重水素の面密度を表しているだけで、その横方向の拡がりからは情報は得られない。以降は、ピークの面密度で重水素の量を表すものとする。

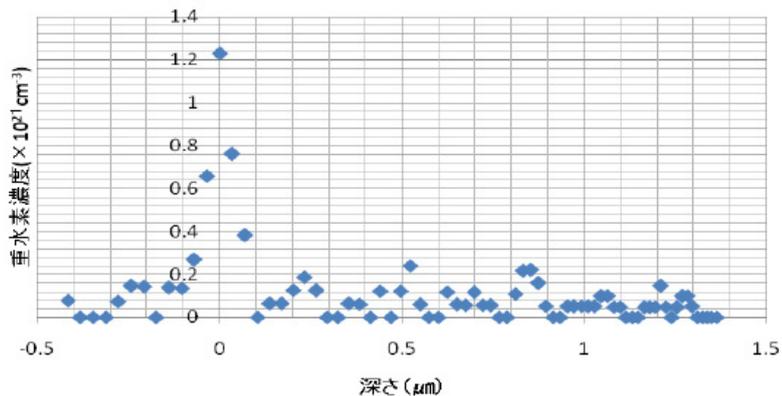


図 2 重水素深さ方向分布の一例 (DS-14-B-03, 1800min)

試料 DS-14-B-02 に室温でプラズマを曝したときの重水素面密度の時間変化を図 3 に示す。面密度は速

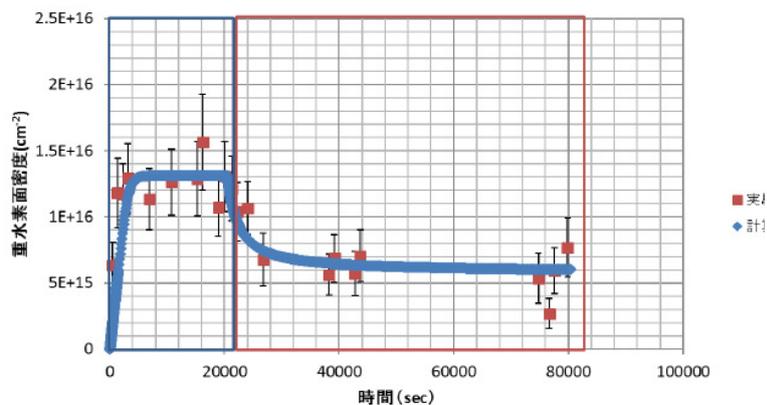


図 3 プラズマ曝露 (左枠) とプラズマ停止 (右枠) 中の重水素面密度の時間変化 (DS-14-B-02, 300K)

やかに上昇して一定値 $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ に達した。次にプラズマを停止すると面密度は速やかに減少したが、ゼロにはならず、 $0.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ が残った。この残量は重水素が捕捉サイトに捕捉されている量に相当し、プラズマ曝露中の量と停止後の残量との差 $0.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ が動的リテンションであると考えられる。

堆積層の厚みは 30nm なので、面密度 $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ から平均濃度を換算すると $4.3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ を得る。堆積層の主成分は炭素であるので、その原子密度は黒鉛の値と同じであると仮定すると、重水素/炭素原子数比は 4% である。黒鉛に水素イオンを注入した際の原子数比は最大で 40% 程度であるので、堆積層にはまだ水素を保持する容量が充分にあった可能性が高い。

4. 考察

図 3 に示した面密度の時間変化を記述するモデルを検討する。まず、重水素は溶解しているか捕捉されているかのどちらかであり、両者は常に平衡状態にあるものとする。次に、溶解している水素の濃度の二乗に比例して表面から水素が分子となって放出されると考える。また、プラズマ領域から入射した水素は、一定の確率で堆積層中に侵入するが、速やかに堆

積層中に拡がるものとする。以上の条件から、次の式が導かれる。

$$K = \frac{(C_{t0} - C_t)C_s}{C_{s0}C_t} \quad (1)$$

$$L \frac{dC}{dt} = Fa \left(1 - \frac{C}{C_{s0} + C_{t0}} \right) - 2k_R C_s^2 \quad (2)$$

ここに、 K , L , F , a , k_R はそれぞれ、溶解-捕捉間の平衡定数、堆積層厚み、重水素原子の入射束、重水素原子の侵入確率および再結合定数であり、 C_s , C_t と C_{s0} , C_{t0} はそれぞれ、溶解している重水素と捕捉された重水素の濃度、溶解サイトと捕捉サイトの密度である。また、 $C = C_s + C_t$ である。

式(1), (2)を以下のような手順で図3に示したデータに適用した。まず、 C_t はプラズマを停止してから充分時間が経過したときの面密度から得た。プラズマを曝して定常になったときの面密度は C であるので、 C_s は $C - C_t$ から得られる。 C_{s0} は一義的に求められないので、黒鉛の原子密度の40%とした。 C_{t0} は K の値がアレニウス図上で直線に並ぶように選んだ。 k_R はプラズマを停止した直後の面密度の時間変化を再現するように選んだ。最後に a は式(2)の定常状態、つまり左辺を0とした式から求めた。以上の結果、図3の曲線で示すように、モデル式は実験値を再現することができ、このときの a , C_{t0} , k_R はそれぞれ、0.004、 $2 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ および $3 \times 10^{-31} \text{cm}^4 \text{s}^{-1}$ であった。

図3から分かるように、300Kでは動的リテンションは全リテンションの半分以上を占めており、水素は短時間の間にかなりの量が放出される。放出の速度を決定づける再結合定数を今回求めることができたが、値の妥当性について今後検討しなければならないし、他の条件で成長した堆積層についても同様の手法で調べ、放出現象全体を把握していく必要がある。

論文・学会発表リスト

学会発表

K. Hanada, N. Yoshida, T. Honda, Z. Wang, A. Kuzmin, I. Takagi, et al., "Investigation of the role of deposition layer in hydrogen recycling property on QUEST", PSI2016, FEC-26(IAEA) EX/P4-49, 2016/5/30-6/3, Roma.

花田和明、中村一男、出射 浩、長谷川 真、関子秀樹、吉田直亮、Kuzmin Arseniy、他、「QUESTにおけるプラズマ長時間維持研究の進展」、第11回核融合エネルギー連合講演会、2016/7/14-7/15、九州大学伊都キャンパス。

花田和明、中村一男、出射浩、長谷川真、関子秀樹、吉田直亮、Kuzmin Arseniy、他、「QUEST高温壁における一時間を超える長時間放電の粒子バランス解析」、プラズマ核融合学会第33回年会、2016/11/29-12/2、東北大学青葉山キャンパス。

QUEST 装置周辺プラズマに対する粒子リサイクリングと衝突輻射モデルの構築

慶應義塾大学大学院理工学研究科 畑山明聖 岡本浩輔、阿部和広、矢本昌平
九州大学・応用力学研究所 花田和明

1. 研究背景・目的

将来の核融合炉におけるプラズマ対向材料は、トリチウムの長時間吸蔵による装置の早期放射化を防ぐという観点から、金属材の使用が見込まれている^[1]。しかしながら、特に長時間運転の際に、金属材が持つ短時間粒子吸蔵特性（動的リテンション^[2]）による炉内への粒子再放出が、炉心プラズマ密度の制御を妨げてしまうことが問題となっている^[3]。本研究では、動的リテンションによる壁からの粒子放出機構を理解し、粒子放出がプラズマ密度に与える影響を理解することを目的として、まず壁に吸蔵された水素原子と炉内粒子に対する0次元モデルを構築し、九州大学応用力学研究所実験装置QUEST^[4]を想定した系において妥当性の検証を行った。また、より詳細な解析を行うため、2次元中性粒子輸送モデルを作成し初期計算を行った。今後、本モデルと研究室にて開発済みの2次元プラズマ流体モデル^[5]とを統合することにより、動的リテンションが炉心プラズマ密度に与える影響を評価することが可能となると考えられる。

2. 0次元壁粒子密度計算モデル

プラズマ対向壁と炉内を想定した2つの領域で0次元的に粒子バランスの式の数値解析を行った。式(1)に、プラズマ対向壁内の粒子バランスの式を、式(2)に粒子種 j の密度 n_j に関する方程式を示す。

$$\frac{dn_{H_{wall}}}{dt} = \frac{\Gamma_{in}}{d} - \frac{2k}{d} n_{H_{wall}}^2 \quad (1)$$

$$\frac{dn_j}{dt} = \sum R_{gain} n_k n_l - \sum R_{loss} n_m n_j - \left(\frac{n_j}{\tau_j}\right) + S_j \quad (2)$$

式(1)において、 $n_{H_{wall}}$ は壁における単位体積あたりのH原子数、 Γ_{in} は炉内から壁への粒子束、 k は放出率に関わる係数、 d は粒子が吸蔵される壁（再堆積層）の厚さとした。ここで、右辺第一項目で表される壁への粒子寄与は、式(2)の右辺第三項の輸送損失項と、荷電交換反応によって生成した高速のH原子を考慮している。また、壁からの粒子放出率は、再結合による熱脱離が支配的であると仮定した^[4]。式(2)において、 R_{gain} 、 R_{loss} は粒子種 j の生成、消滅の反応レート係数であり、 τ_j は輸送による j の損失時間、 S_j は注入や排気、壁からの寄与などによる j の増減レートを表している。炉内に存在する粒子種は $j = e^-, H^+, H^0, H^-, H, H_2$ を考慮し、H原子に関しては、QUEST実験との比較を行うため、H α 線発光強度計算に必要である電子状態 $n = 5$ まで考慮した解析を、衝突輻射モデルを用いて行った。また、 τ_j, k は実験と合うように定めた。解析においてはQUEST装置を想定して電子温度を10 eVとし、実験^[4]と同様の条件で燃料粒子を系内に与えた。

3. 結果・考察

Figure 1 は、壁吸蔵粒子数の時間発展を表し、炉内への粒

子放出率 k の値を2つの場合によって解析することで、壁吸蔵粒子数の k 依存性を示している。 k の値が大きい場合は、飽和までの時間が短く、時刻 t の値が小さいときには壁吸蔵粒子数の様子に差は見られないことがわかる。また、Fig. 2 には実験によって得られた壁吸蔵粒子数の壁温度依存性を示す。これらより、本モデルにおけるパラメータ k と、実験における壁温度の対応が確認できる。しかしながら、本解析では粒子輸送や、壁粒子密度 $n_{H_{wall}}$ 、再堆積層の厚み d の空間分布などが考慮されないことが課題である。

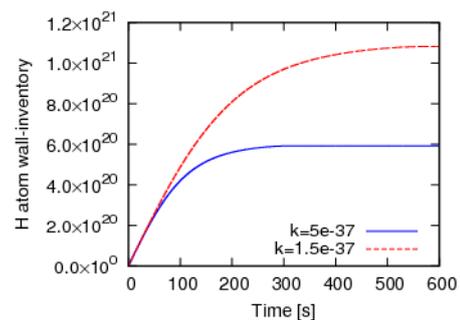


Fig. 1 k dependence of H atom wall-inventory

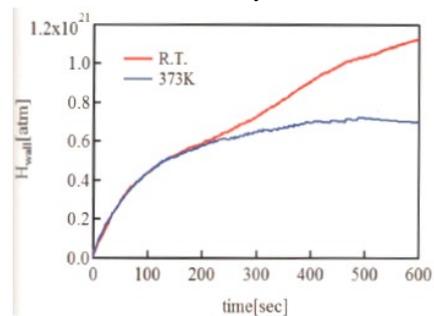


Fig. 2 Wall temperature dependence of H atom wall-inventory^[4].

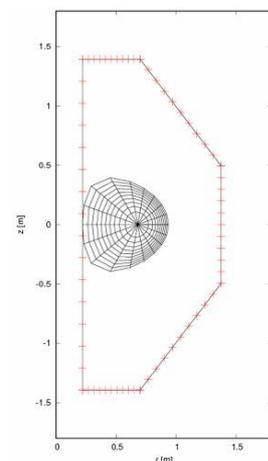


Fig. 3 Simulation model and numerical mesh for the neutral transport simulation.

Table 1 Reactions taken into account.

H ₂ 解離	$e + H_2 \rightarrow e + H + H$
H ₂ 電離	$e + H_2 \rightarrow e + H_2^+ + e$
H ₂ 解離性電離	$e + H_2 \rightarrow e + H^+ + H + e$
H 電離	$H + e \rightarrow e + H^+ + e$

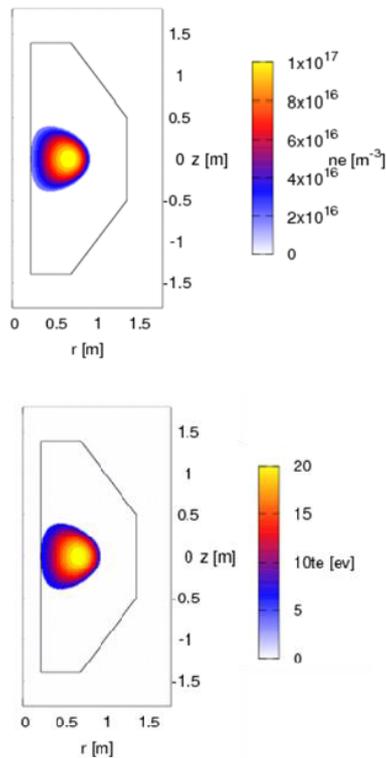


Fig. 4 Assumed background plasma condition in a limiter configuration.

4. 2次元中性粒子輸送モデル

先に述べた0次元壁粒子密度計算モデルの課題より、2次元中性粒子輸送モデルを作成し、初期計算を行った。本モデルは、QUEST装置内のHやH₂の軌道を解析し、衝突をモンテカルロ的に扱うモデルである。シミュレーションはQUEST装置を想定したFig.3に示す系で行った。壁面に示した点から時間ステップ $dt = 10^{-7}$ sごとにH₂テスト粒子を注入し、定常とみなせる状態($t = 3$ ms)まで反復した。なお、背景電子の密度、温度の分布はFigure 3のように与え、考慮した反応を表1に示した。また、入射分子の速度は温度0.01 eVのMaxwell分布から抽出し、壁に入射した粒子は簡単のため消滅するとした。

5. 結果・考察

Figure 5はそれぞれ、 $t = 3$ msにおけるH₂とHのテスト粒子数分布を表している。Figure 5左図より、壁から放出されたH₂が、最外殻磁気面に達すると速やかに反応し、解離していることが確認できる。また、Fig. 5右図より、最外殻磁気面付近で生成したH原子がプラズマ内部でイオン化したり、壁方向に拡散してゆく様子が確かめられる。装置内側壁付近におけるHの数が少ないのは、発生したHが速やかに壁へ入射し、消滅しているためであると考えられる。

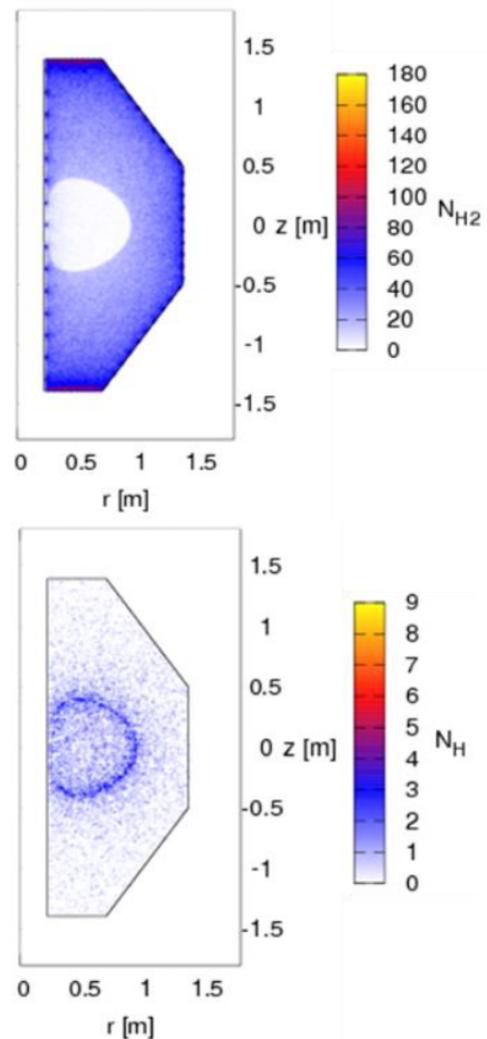


Fig. 5 The distribution of H₂ (top) and H (bottom) Monte Carlo test particles in the quasi steady state.

6. 結論と今後の方針

動的リテンションをシンプルに表現した0次元密度計算モデルを用いて壁吸蔵粒子数を解析し、QUEST実験における壁温度に対応する粒子放出係数 k を調査し、定性的な傾向を再現した。しかし、レート方程式における輸送損失時間 τ_j の値はパラメータとして与えた。従って、さらなる詳細な実験との比較を進めるため、2次元中性粒子輸送モデルを構築し、初期計算を行った。これにより、装置内や壁の空間的な分布を考慮できるようになり、今後プラズマ流体モデル^[5]と統合することによって、プラズマ密度に与える影響の解析が可能となる。また、レート方程式において考慮した荷電交換などの反応種を2次元解析に用いること、さらに開発済みの衝突輻射モデル(下記本研究に関する成果参考)を適用することで、QUEST実験との比較を行う予定である。

参考文献

- [1] S.Brezinsek, *et al*, Nucl. Fusion, 53(2013)083023.
- [2] M.Sakamoto, J. Plasma Fusion Res. Vol. 84, No. 12 (2008).
- [3] E.Tsitron, Journal of Nuclear Materials 363-365 (2007).
- [4] 本田拓巳, 九州大学大学院修士論文(2014).
- [5] 古田哲郎, 慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士論文(2013).

本研究に関する成果

1. 国内講演会発表

- ① 岡本浩輔, 矢本昌平, 畑山明聖, 花田和明, 「プラズマ・壁相互作用を考慮した核融合プラズマ粒子バランスの解析」 第 11 回核融合エネルギー連合講演会 九州大学伊都キャンパス・椎木講堂, 2016 年 7 月 14 日—7 月 15 日.
- ② 阿部和広, 宮本賢治, 柴田崇統, 畑山明聖, 「熱パルスに対するデタッチメントプラズマの動的応答解析」 第 32 回プラズマ・核融合学会 年会, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂, 2015 年 11 月 24 日—11 月 27 日.
- ③ 阿部和広, 植田翔子, 武智さゆり, 畑山明聖, 「非接触プラズマを対象とした運動論的なプラズマ—中性粒子相互作用モデリング」 第 33 回プラズマ・核融合学会 年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016 年 11 月 29 日—12 月 2 日.

Fe-Mn および Fe-Ni モデル合金における照射硬化促進機構の解明

京都大学エネルギー理工学研究所 藪内 聖皓、木村 晃彦

1. 目的

鉄鋼材料における Mn および Ni は、オーステナイト形成元素としての役割が良く知られている。核融合炉の構造材料として使用が期待されている鉄鋼材料においては、低放射化対応として、Ni を Mn に置き換えて合金設計されている。一方、Fe-Mn 合金は、他の 2 元系鉄基合金に比べ、照射硬化量が極めて大きく、照射脆化が促進される傾向を示すため、Mn 添加が及ぼす照射硬化への影響については国際的に高い関心もたれている。

Mn による照射硬化促進の機構としては、Mn が空孔あるいは格子間原子と結合し、それが核となって、Mn 析出物を形成することが考えられるが、その詳細は不明である。我々は、ナノサイズの Mn 析出物が格子間原子型の転位ループ上に析出すると仮定し、イオン照射した Fe-Mn 合金を透過電子顕微鏡により観察してきたが、Mn 析出物のサイズが 1 nm と極めて小さいため、Mn 析出物と転位ループの相対位置関係についてはいまだ確認されていない。

そこで本研究では、九大応力研に導入された高分解能分析電子顕微鏡（管理区域内設置）を用い、原子炉照射した Fe-Mn 合金の微細組織観察をおこない、格子間型転位ループとナノサイズの Mn 析出物の相対位置関係を明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の概要

1) 経過

圧力容器鋼の照射影響評価のための基礎研究として、鉄基モデル合金における照射脆化挙動に及ぼす中性子照射の影響を高照射量（高経年対応）まで調査した結果、Fe-Mn 合金では、高照射領域においてのみ、照射硬化量が顕著に増大することが判った。高経年化に伴う照射脆化の促進が懸念されることから、この現象を「Mn 影響」と名付け、その発現機構に関する研究を実施している。この Mn 影響は、鉄格子の中に均一に固溶している Mn 原子と照射によって形成された Vacancy (V: 空孔) や Interstitial

(I: 格子間原子) との強い相互作用に起因すると考えられるが、その詳細は明らかではない。特に、V-Mn 相互作用と I-Mn 相互作用のどちらが重要になるかについては、照射脆化予測に大きな影響を及ぼすことから、早期の解決が望まれている。

2) 照射実験

イオン照射 (290°C、1dpa) により、Fe-1Mn および Fe-1Ni 合金は、顕著な照射硬化を示し (図 1)、透過型電子顕微鏡による微細組織観察から、いずれも黒点状の微細な照射損傷組織が形成されていることが判明している。これらの損傷組織を TEM 内で焼鈍しながら直接観察すると、500°C まではほとんど変化しないが、550°C になるとそのサイズが大きくなることを既に報告している。純鉄に比べると、粗大化開始の温度が高

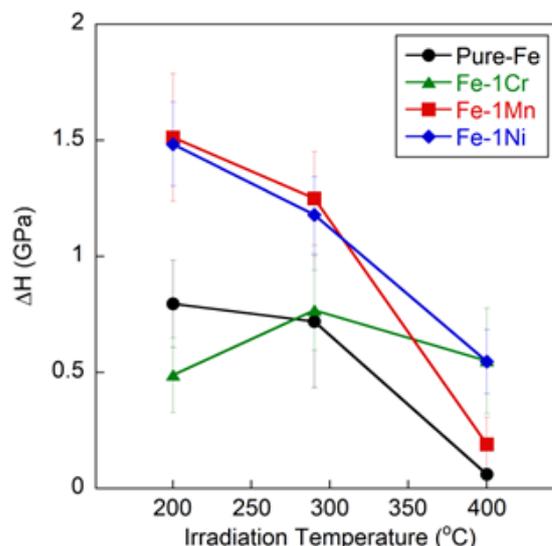


図 1 Fe 合金におけるイオン照射硬化の照射温度依存性

温側にシフトしており、Fe-1Mn 合金では、格子間原子の易動度が純鉄に比べ低下していると考えられる。なお、平成 28 年度は新規導入の TEM の性能評価ならびに今後の中性子照射試料の観察に向けて RI 輸送に関する手続等の確認を行うとともに、「Mn 影響」メカニズムについて検討した。

3. 「Mn 影響」のメカニズム

Fe-Mn 合金と Fe の照射損傷組織を比較すると、Fe-Mn 合金において転位ループの微細化が顕著に生じていることが判明している。転位ループは、格子間型であることが判明しており、微細化の理由としては、格子間原子あるいは微細な転位ループの移動度が Mn 原子による捕獲効果により、低下していることがあげられる。すなわち、ここでは Mn 原子と Fe 格子間原子あるいは微細な格子間型転位ループとの相互作用により、それらの移動が Mn 原子により、抑制されたために、核生成サイト数が増加し、成長が遅れたと考えることが可能である。この様子を Fe-Mn 合金と純鉄と比較してモデル化して示すと図 2 のようになる。

一方、最近の高分解能分析電顕による TEM 観察によれば、イオン照射した Fe-Mn 合金において、板状の Mn 集合体の形成が認められている。Mn 原子の集合には、Mn-V 対や Mn-I ダンベルなどの移動が必要になる。また、Mn 原子単独の効果の他にも、酸素原子の関わりを示唆するデータも存在する。今後は、不純物酸素量の影響についても調査する。

4. まとめ

今後 JMTR や BR-2 炉を用いた中性子照射実験により、Mn 添加効果を低合金鋼の中性子照射影響評価に取り込んでいくための基礎的知見が得られると期待される。平成 29 年度は平成 28 年度に PIE が可能になった合金試料を九州大学に搬送し、高分解能 TEM を用いて観察する。

5. 成果発表

東北大学大洗センターでの照射試料の分別が遅れたため、平成 28 年度に当該実験を実施することができなかった。今年度は特になし。

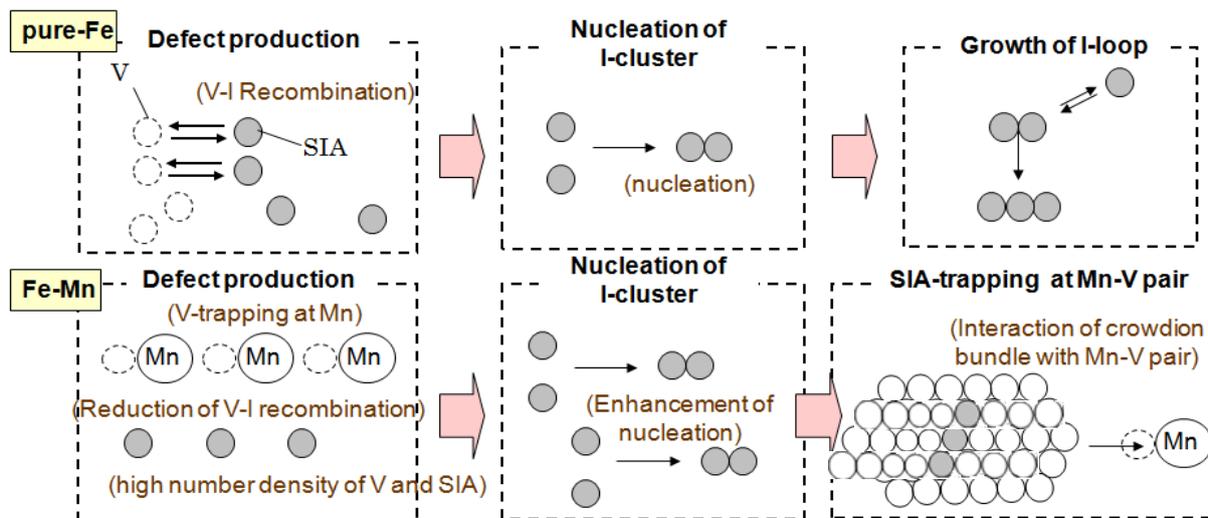


図 2 純鉄と Fe-Mn 合金における格子間原子型転位ループの数密度の相違メカニズム。

タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響

京都大学原子炉実験所
九州大学応用力学研究所徐 虬
徳永和俊

1. 目的

タングステンは融点が高い、スパッタ率が低い、水素蓄積が少ない利点があるため、プラズマ対向材料として注目されている。一方、低温脆化、再結晶脆化及び照射脆化がタングステンの使用の問題点となっている。これら脆化に関する問題を解決するために、われわれは放電プラズマ焼結する方法を用いて、超微細結晶粒を有するタングステン合金を開発した。開発した合金の力学特性、熱特性を評価すると共に、第一壁材料として低エネルギー水素・ヘリウムとの相互作用の研究も必要である。応用力学研究所には整備されている電子ビーム熱負荷実験装置と材料実験用試料搬送装置があるので、目的とする研究を進めるうえで最適である。本研究では、開発した炭化タンタルを添加したタングステン合金に対して、電子ビーム熱負荷装置を用い、繰り返し熱応力による材料表面の損傷を調べた。

2. 実験方法

1.0、2.0 と 4.0wt% の TaC 粒子（粒子サイズ約 50nm、純度 99.9%）を加えたシュウ酸水溶液にパラタングステン酸アンモニウム $(\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (APT) 溶解した。170°C のメチルシリコーン油浴中に上記の溶液を攪拌しながら蒸発させ、W/TaC の前駆体を得た。粉碎した前駆体を高純度水素を流した管状炉内に 5°C/分の速度で 800°C まで加熱した。また、200、500 及び 800°C でそれぞれ 30、60 及び 60 分に保持した。加熱した粉末 W/TaC を昇温速度と同じ速度で室温まで冷却した。その後、W/TaC 粉末を直径 50mm のグラファイトダイスに詰め、圧力をかけながら高温で固める。この方法で TaC を添加したタングステン合金を得た。

3 種類の TaC を添加したタングステン合金から厚み 2mm、直径 7mm の試料を切り出した。試料の表面を粗研磨から鏡面研磨まで実施した。応用力学研究所に設置された電子ビーム熱負荷発生装置を用いて、繰り返し熱負荷実験を行った。電子ビームエネルギーは 20keV で、ビーム径は約 3mm であった。パルスの幅は 9.5 秒 (beam on: 2 秒, beam off: 7.5 秒) であった。試料表面の最高温度を 1250°C に電子ビームの電流を調整し、100 パルスの照射を行った。熱負荷実験の後に、走査型電子顕微鏡を用いて、試料の表面を観察した。

3. 実験結果と考察

表に TaC を添加したタングステン合金の密度、粒径などを示す。参考のため、同じ方法で作製した純 W のデータも示す。他の合金に比べ、W-1%TaC の密度及び相対密度と純 W の差が最も小さいことが分かった。また、TaC の添加量の増加と共に、粒径のサイズが小さくなる。熱負荷実験結果を理解するために、TaC を添加したタングステン合金の熱伝導率の温度依存性を調べた。図 1 に、W-1%TaC、W-2%TaC 及び W-4%TaC の熱伝導率の温度依存性を示す。比較のために、純 W の結果も示される。W と W-TaC 合金においては、温度の上昇と共に、熱伝導率が下がる。純 W に比べ、W-1%TaC の熱伝導率が高い、逆に W-2%TaC と W-4%TaC の熱伝導率が低いことが分かった。

図 2—5 に走査型電子顕微鏡 (SEM) による熱負荷実験を行った W、W-1%TaC、W-2%TaC 及び W-4%TaC の表面観察結果を示す。純 W (図 2) と W-4%TaC (図 4) に大きな亀裂が発生した。一方、W-1%TaC と W-2%TaC には小さな亀裂しか発生しなかった。特に、W-1%TaC の耐熱性が良かったことが分かった。このことから TaC 粒子を多量に添加すると、逆にタングステン合金は脆くなることを示唆している。

4. まとめ

湿式化学プロセス (Wet Chemical Process) を用いて、放電プラズマ焼結する方法で 3 種類の TaC を添加した高密度のタングステン合金の開発を成功した。物性実験及び熱負荷実験の結果から W-1%TaC の熱伝導率と耐熱性が最も良いことが分かった。来年度以降に、今年度に行われた研究を踏まえ、タングステン合金における非定常熱負荷ディスラプションによる材料表面の損耗・損傷をさらに詳細に調べる予定である。また、集束イオンビーム加工装置 (FIB) を用いて、材料表面の損傷部分を切り出し、透過型電子顕微鏡により組織の詳細を調べる。

表 W 及び W 合金の密度と粒径

	W	W-1%TaC	W-2%TaC	W-4%TaC
密度 (g/cm ³)	18.8	18.6	17.9	17.4
相対密度 (%)	97.2	96.5	93.1	91.4
粒径 (μm)	6-25	8-16	1.5-6	0.5-8
平均粒径 (μm)	15	12	3	1.5

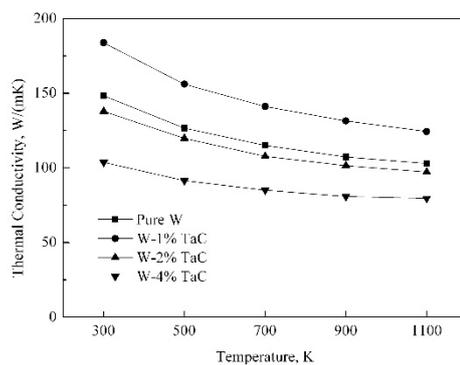


図 1 熱伝導率の温度依存性

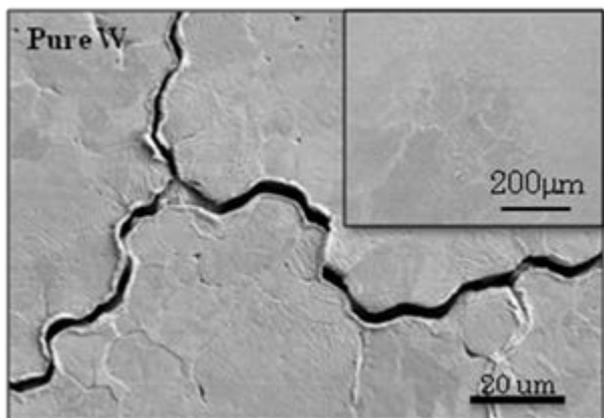


図 2 SEM による熱負荷実験を行った W の観察

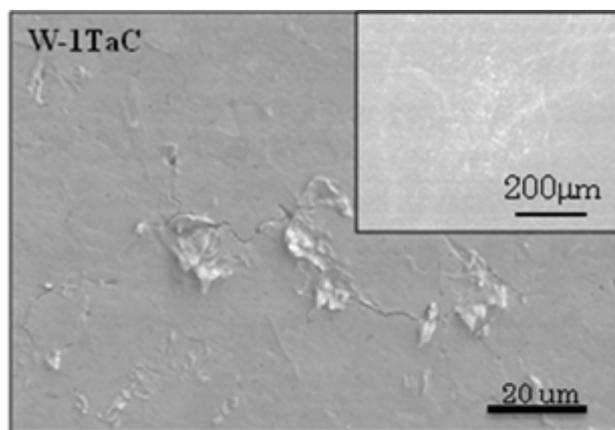


図 3 SEM による熱負荷実験を行った W-1TaC の観察

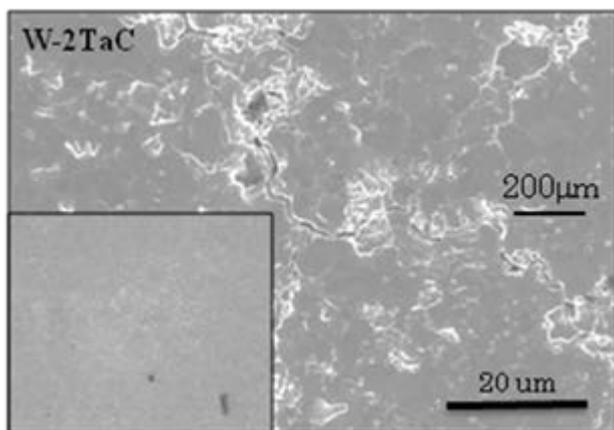


図 4 SEM による熱負荷実験を行った W-2TaC の観察

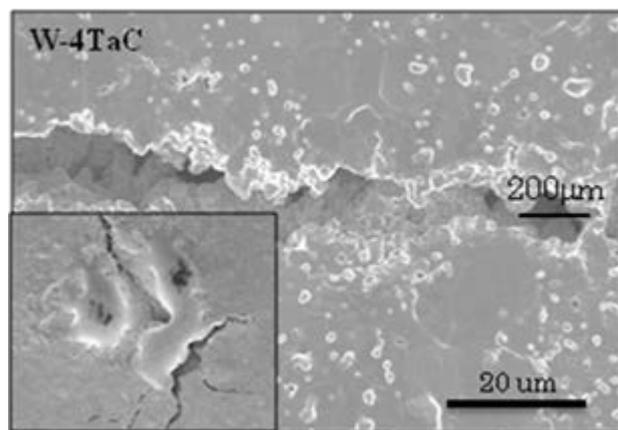


図 5 SEM による熱負荷実験を行った W-4TaC の観察

磁化プラズマの流体シミュレーション

神戸市立工業高等専門学校 電気工学科 西村 征也

【研究目的】

磁場閉じ込め方式の核融合装置や天体近傍の宇宙空間においては、高温プラズマが背景磁場に磁化された状態にある。このような磁化プラズマにおいては、磁気再結合や圧力駆動型モードなどの電磁流体力学的不安定性が発生する。磁場閉じ込め核融合装置においては、ELM と呼ばれる圧力駆動型モードによる激しい熱と粒子の乱流輸送が存在する。ELM を抑制するために、外部から共鳴磁場摂動（以下、RMP）を印可する研究が精力的に進められている。RMP は強制的に磁気再結合を起こして磁気島やストキャステック層を形成するが、この過程を RMP のしみ込みと呼ぶ。プラズマ流が存在する場合には、プラズマ流による遮蔽効果が存在するため必ずしも RMP のしみ込みが起きるとは限らない。既存の理論モデルは RMP のしみ込み閾値の実験計測を定量的に説明できないことが問題となっており、基礎研究の充実が期待されている。本研究においては、RMP による強制磁気再結合、プラズマフロー、圧力駆動型モードをセルフコンシステントにシミュレーションするための 流体シミュレーションコードを開発する。

【研究方法】

磁化プラズマを記述する簡約化 MHD 方程式をモデルとして用いる。モデルは、渦度方程式、一般化されたオームの法則、圧力の発展方程式によって構成される。ポロイダル断面をスラブ近似し、小半径方向とポロイダル方向の 2 次元空間において、簡約化 MHD 方程式の初期値境界値問題を数値的に解くコードを開発する。コードにおいては、空間微分を 2 次精度の有限差分で近似し、時間積分を 4 次精度のルンゲクッタ法で求めるアルゴリズムを用いる。簡約化 MHD 方程式においては渦度から流れ関数（静電ポテンシャル）を求めるためのポアソン方程式を数値に解くルーチン（以下、ポアソンソルバ）必要がある。

【研究結果】

本年度実施した研究について、以下の 4 つの内容を報告する。

1. ポアソンソルバの高速化

年度当初においては、ヤコビ法を用いたポアソンソルバの並列化効率の改善を試みた。通信不可を減らすためにノンブロッキング通信などを適用しても、並列化効率はほとんど改善されなかった。そこで、ポロイダル方向の周期性を活用し、ポロイダル方向の空間微分を離散フーリエ変換によって処理するアルゴリズムを試みた。このアルゴリズムの実装においては、兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究科の沼田龍介准教授の協力を得た。離散フーリエ変換に対しては FFT を用いた。スペクトル分解されたポアソン方程式は、小半径方向に座標変数に関する三重対角行列を係数行列 に持つ連立一次方程式となる。従って、LU 分解の手法によって高速に解くことが可能である。以上の実装は順調に進み、ポアソンソルバの高速化に成功した。

2. オームの法則の実装とテアリングモードのベンチマーク

モデルを渦度方程式とオームの法則を連立するものへと拡張した。テアリングモードが不安定となるハリスシートと呼ばれる磁場平衡に対して、シミュレーションを行い、テアリングモードの線形成長

率の電気抵抗依存性について、解析解と数値解のベンチマーウを行った。

3. 共鳴磁場摂動の実装と強制磁気再結合のシミュレーション

RMP を実装するためには、プラズマ-真空境界において有限の径方向磁場揺動が存在するように、ポロイダル磁束揺動の境界条件を変更する必要がある。この径方向磁場揺動がプラズマ内部までしみ込み、共鳴面（有理面）において強制磁気再結合を起こす。はじめに、テイラーの問題として知られる、テアリング安定な磁場平衡に対して単一のフーリエ成分の RMP を考えるモデルについてシミュレーションを行った。強制磁気再結合が発生し、磁気島が形成される様子が観察された。磁気島の飽和幅は真空磁気島と呼ばれる解析モデルによって予測される値と一致することが確認された。次に、平衡にプラズマフローがある場合について考えた。この場合、RMPによって歪んだプラズマ-真空境界に沿ってプラズマフローが流れるように境界条件を適切に設定する必要がある。コードにおいては、Militeello(09)において用いられている境界条件を実装した。シミュレーションの結果、プラズマフローが存在する場合に、磁気島の飽和幅が抑制されることが観察された。

4. 圧力の発展方程式の実装と初期的なシミュレーション結果

圧力駆動型 MHD 不安定性を扱うために、圧力の発展方程式をコードに実装した。径方向の磁場曲率が bad curvature の方向に十分強い場合は、抵抗性インターチェンジモードが励起されることが観察された。RMP とプラズマフローを含まない場合には、抵抗性インターチェンジモードはポロイダルモード数が $m=1, 2, 3$ などのモードが不安定となる。RMP とプラズマフローを含む場合には、RMP のしみ込みに対する抵抗性インターチェンジモードの効果を調べる事が可能である。シミュレーションの結果、抵抗性インターチェンジモードは RMP のしみ込みを促進する効果があることが分かった。

【まとめと今後の課題】

RMP による強制磁気再結合、プラズマフロー、圧力駆動型モードをセルフコンシステントにシミュレーションするための流体シミュレーションコードを開発した。コードの開発状況と初期的なシミュレーション結果について報告した。本年度はポアソンソルバの拡張を中心に行ったため、シングル CPU 用のコードを開発が中心となった。NEC SX-ACE における並列計算用のコードへの拡張は今後の課題である。例えば、FFTをFTWにすることや、スペクトル分解されたポアソン方程式のLU分解による行列解法を並列化することが今後の研究の方向性として考えられる。

【学会発表リスト】

- [1] 西村征也, 共鳴磁場摂動によって駆動される強制磁気再結合, 日本物理学会2016年秋季大会, 15aKA-12, 2016. 9. 15
- [2] 西村征也, 共鳴磁場摂動のしみ込みに対するインターチェンジモードの影響, 第33回プラズマ核融合学会年会, 29aP34, 2016. 11. 29
- [3] 西村征也, 簡約化 MHD モデルを用いた共鳴磁場摂動への非線形プラズマ応答のシミュレーション, MHDに関するNIFS ネットワーク型研究合同打ち合わせ, 2016. 12. 16

水素プラズマスパッタ法で形成される多孔質金属膜への水素混入と反跳水素の寄与

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】

水素は利用時に環境負荷が小さいことからクリーンな二次エネルギーとして注目されており、水素の製造・貯蔵・輸送に関連する技術開発が進められている。水素の安全取扱の観点や高機能材料開発の観点から、種々の材料における水素挙動の理解が求められている。ジルコニウムやパラジウム等が高い水素吸蔵特性を有するのに対して、白金やタングステン(W)等はほとんど水素を吸蔵しないことが知られている。しかし報告者らの研究により、水素プラズマスパッタリングを利用してこれらの金属から形成される薄膜は、膜形成過程で多量の水素を捕捉することが明らかとなっている。また、形成後に重水素プラズマを照射すると、比較的高濃度に重水素が保持されることも観測されている。応用力学研究所とのこれまでの共同研究により、重水素プラズマスパッタリングにより形成されるW膜は、数nmの微結晶粒から構成され多くの空隙を有することがわかっている。このことから捕捉された水素の多くはナノスケールの微結晶粒の粒界や空隙に捕捉されていると推定される。このような知見は、将来水素貯蔵用機能性材料の開発に進展をもたらす可能性がある。しかしながら、成膜過程での水素取込機構については十分には理解されておらず、微細構造と水素吸蔵・放出挙動との関係性や水素取込に寄与する放電中の水素形態について詳しく調べる必要がある。

スパッタ・成膜過程では、膜成長表面はワーキングガスである水素ガス、プラズマからの水素イオン、スパッタターゲットからの反跳水素等にさらされる。しかしながら、それぞれの水素がW膜形成過程での水素捕捉にどのように寄与しているかについては明らかとなっていなかった。一昨年度の応用力学研究所との共同研究において、プラズマスパッタ装置内に基板設置ステージを取り付け、異なる環境下におけるW堆積量と水素捕捉量を調査した。その結果、スパッタターゲットからの反跳水素の影響が支配的であることが示唆された。本研究では、成膜過程での水素取込機構の理解を深めるため、異なる水素ガス圧での実験を行った。また、重水素プラズマを用いた成膜を行い、水素同位体放出特性を調査した。

【実験方法】

RF水素プラズマによりW板をスパッタリングして、W基板及び石英基板上にW薄膜を作製した。スパッタターゲット、基板設置ステージ及び基板の位置関係と水素形態のイメージを図1に示す。水素形態モデルとして、スパッタ装置内には、水素分子、水素イオン、反跳水素の3つが存在すると考える。また、基板の設置位置として、以下の3つを対象とした。

B(Bottom)領域:プラズマとは接さず、スパッタターゲットが見通せる。

P(Plasma)領域:プラズマと接し、スパッタターゲットが見通せる。

S(Shadow)領域:プラズマとは接さず、スパッタターゲットが見通せない。

アルミニウム製の基板設置ステージは、下部のグラウンド電極上に固定し接地した。スパッタターゲットとしてW板(ニラコ社製50mm×50mm、厚さ1mm)を上部のRF電極に設置し、基板としてW箔(10mm×5mm、厚さ0.2mm)及び石英片(10mm×5mm、厚さ1mm)をステージの各位置に設置した。水素ガスは、マスフローコントローラーにより流量を制御して真空容器に導入し、排気コンダクタンスを調整して、ガス圧を制御した。

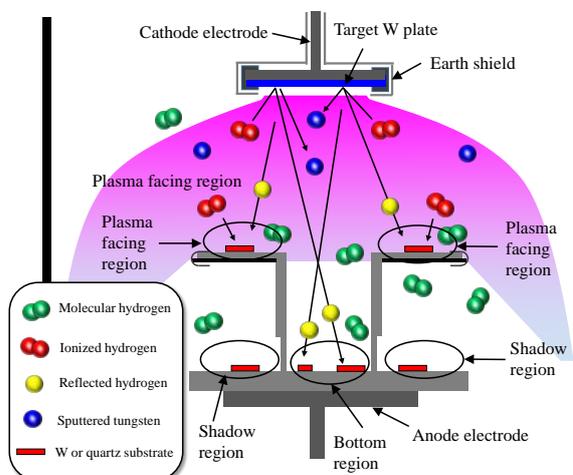


Fig.1 スパッタターゲット及び基板の位置関係と水素形態のイメージ図

Table 1 軽水素及び重水素プラズマスパッタによる成膜条件

実験	1	2	3	4	5	6	7
ターゲット	タングステン						
基板	W(10×5×0.2mm)、石英(10×5×1mm)						
放電ガス	軽水素			重水素			
成膜時間 [hr]	310			144		51	
電力 [W]	100						
圧力 [Pa]	10	2	200	10		2	200

ガス圧が安定した後、100WのRF電力を印加して放電を開始し所定の時間、放電を継続した。昨年度までに軽水素ガス10Pa、200Paでの成膜を行い、今年度は2Paでの成膜を行った。加えて、重水素ガス2Pa、10Pa、200Paでも成膜を行った。成膜前後の基板質量変化をマイクロ電子天秤で測定し、W堆積量を算出した。成膜条件をTable 1にまとめる。

TDS分析により、W膜からの水素放出挙動を観測した。W膜付W基板を石英管に充填し、真空雰囲気下で1000°Cまで1°C/minで等速昇温した。放出された水素同位体は、四重極質量分析計で測定した。W膜付石英基板は、SEM観察に用いた。P領域とB領域では、 μm オーダーの表面構造には違いが見られなかった。S領域では堆積量が少なく明瞭な表面構造観察ができなかった。

【結果及び考察】

Fig.2 軽水素プラズマによる成膜時のターゲットスパッタ速度と成膜速度の圧力依存性を示す。圧力の増加に伴いスパッタ速度が増加した。これは、イオンフラックスの増加に因ると考えられる。一方、成膜速度はP領域とB領域で圧力依存性に違いが見られた。P領域での成膜速度は2Paよりも10Paの方が速いものの200Paでは低下した。スパッタW粒子は、高いエネルギーで比較的弾道的に飛来するものと、水素分子との衝突によりエネルギーを失い散乱を経て飛来するものがあると考えられる。200Paでは散乱の効果が大きくなり、成膜速度が低下したと考えられる。B領域での成膜速度は2Paと10Paでは変化がないものの200Paでは低下した。B領域はステージの形状により散乱を経て飛来するW粒子数が低減され、弾道的に飛来するW粒子の割合が多いと考えられる。2Paと10Paでは水素分子との衝突によるW粒子のエネルギー低減効果が小さく成膜速度に影響を与えないが200Paまで圧力が高まるとW粒子がエネルギーを失い、散乱効果により成膜速度が低下したと考えられる。S領域では成膜量が少なく、圧力依存性を議論するためには成膜時間をより長くする必要がある。Fig.3にP及びB領域で形成されたW膜からのD₂及びHD放出挙動を示す。いずれの膜からも200°C付近と400°C付近に放出ピークがみられた。P領域の方が低温ピークが大きく、B領域の方が高温ピークが大きいことがわかった。また、P領域に比べてB領域の方が放出開始温度が低いこともわかった。Fig.4に成膜過程での水素捕捉モデルを示す。放出開始温度は、重水素捕捉時の温度を反映していると考えられることから、B領域に比べてP領域の膜成長表面温度が高く維持されていたことを示唆する。これはP領域がプラズマに接しており、プラズマからのエネルギー付与によるためと言える。表面層温度が高く維持されることで入射された重水素の拡散が促され、より安定なサイトに捕捉された結果、B領域に比べてP領域の方が高温側のピークが多くなり、低温側のピークは少なくなったと考えている。今後B領域に外部加熱を行うなど、水素捕捉モデルの妥当性を検証するための実験を行う予定である。

【成果発表】

[1] 野口瑞貴、片山一成他、“水素プラズマスパッタ法におけるW堆積層形成過程での水素捕捉”，第11回核融合エネルギー連合講演会、2016年7月13-14日、九州大学伊都キャンパス。
本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

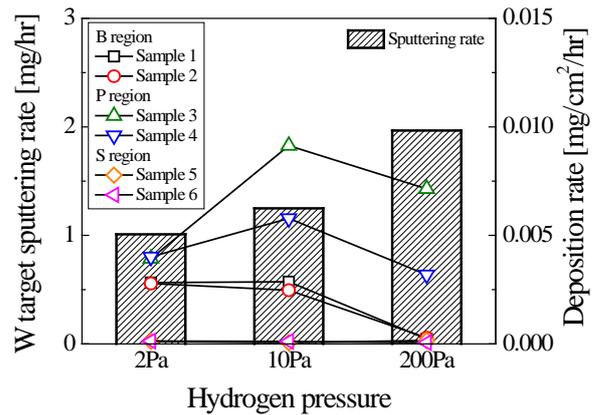


Fig.2 スパッタ速度と成膜速度の圧力依存性

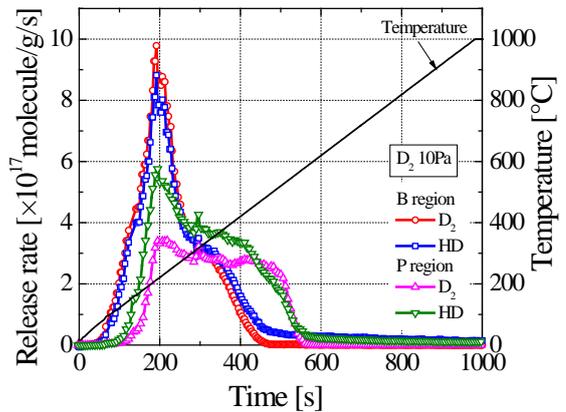


Fig.3 P及びB領域W膜からのD₂及びHD放

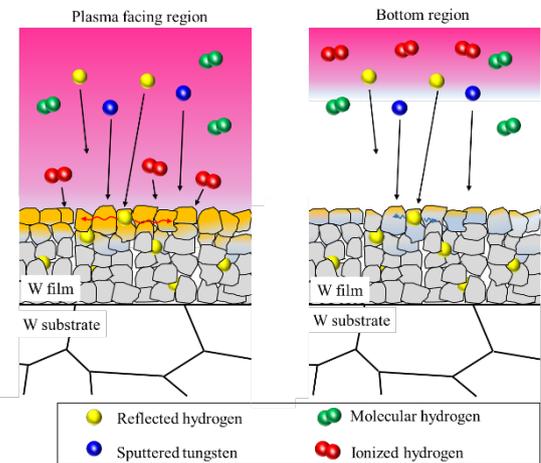


Fig.4 P及びB領域における水素捕捉モデル

高エネルギーイオン照射によるタングステン中の照射欠陥回復温度依存性と水素同位体滞留ダイナミクス

静岡大学大学院理学領域 大矢恭久

【目的】

核融合炉プラズマ対向材料であるタングステン (W) には、炉運転中に中性子や水素同位体、ヘリウム (He) などの高エネルギー粒子に曝され、水素同位体捕捉サイトとなる欠陥が導入されるとともに、He バブルが形成される。実炉環境下での水素同位体ダイナミクスを理解するため、照射欠陥および He バブルの相互作用が水素同位体滞留挙動へ及ぼす影響を明らかにすることが重要である。また、W 中の He 滞留挙動についても重要である。さらに、実炉の運転環境下では、W に水素同位体と He に同時に照射される。そのため、本研究では種々のエネルギー、照射量を制御した He と水素同位体を同時照射した W に対して、九州大学応用力学研究所の透過電子顕微鏡 (TEM) を用いて照射欠陥および He バブルの挙動の観察を行い、水素同位体および He の滞留挙動を昇温脱離法 (TDS) によって評価することで、水素同位体および He 滞留挙動に及ぼす照射欠陥および He バブルの影響を明らかにした。

【実験】

試料としてアライドマテリアル社製歪取加工済多結晶 W (10 mm^φ, 0.5 mm³) を用いた。高真空中 (<10⁻⁶ Pa)、1173 K で 30 分間加熱処理することで不純物除去を行った。この試料に対して静岡大学の 3 種イオン同時照射装置を用いて、He⁺ を照射エネルギー 3.0 keV、フラックス 1.0×10¹⁶~1.0×10¹⁸ He⁺ m⁻² s⁻¹、フルエンス 1.0×10²⁰ ~ 1.0×10²² He⁺ m⁻²、H₂⁺ または D₂⁺ を照射エネルギー 1.0~3.0 keV、フラックス 1.0×10¹⁸ H⁺ (D⁺) m⁻² s⁻¹、フルエンス 1.0×10²² H⁺ (D⁺) m⁻² まで照射した。その後、静岡大学の TDS 装置にて、昇温速度 30 K min⁻¹ にて 1173 K まで TDS を行い、D 滞留挙動評価を行った。また、核融合科学研究所 (NIFS) の高温 TDS 装置にて、昇温速度 30 K min⁻¹ にて 1673 K まで TDS を行い、He 滞留挙動の評価を行った。さらに、九州大学応用力学研究所にて TEM 観察を行い、照射欠陥および He バブルの成長・回復挙動を評価した。

【結果・考察】

図 1 に He フルエンス 1.0×10²¹ He⁺ m⁻² で He⁺ 単独照射した W と He⁺-H₂⁺ 同時照射した W における He TDS スペクトルを示す。過去の研究より、He の TDS スペクトルを三つの脱離温度領域を分けた[1]。室温から 600 K までは

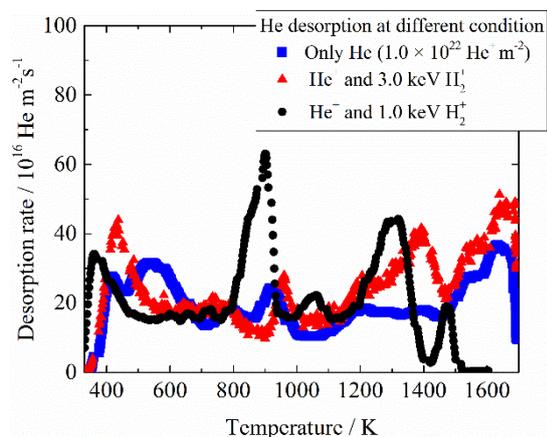


図 1 He 単独照射と He⁺-H₂⁺ 同時照射 W における He TDS スペクトル (He フルエンス: 1.0 × 10²² He⁺ m⁻²)

原子空孔による捕捉、600~1000 K は転位ループによる捕捉、1000 K 以上は He バブルの崩壊による He の放出であると帰属した。He⁺単独照射 W に比べ、He-H₂⁺ (3.0 keV) 同時照射 W では 1000 K 以上温度領域で He の放出量が大きく増加した。このことから、同時照射によって、He 単独照射より多くの He バブルが形成することが示唆された。さらに、1.0 keV の H₂⁺照射によって、900 K 付近の放出ピークが増加し、1400 K 以上の He 放出が減少した。このことから転位ループに He が捕捉されることで He 拡散・集合が抑制されるため、He バブルサイズが小さくなったことが示唆された。

図 2 に種々の He フルエンスにて He⁺-H₂⁺ (3.0 keV) 同時照射 W の TEM 写真を示す。過去の研究により、He フルエンス 1.0×10^{21} He⁺ m⁻² の単独照射によって He バブルが飽和することが明らかとなっている[2]。図 2 から、He フルエンス増加により、He バブルのサイズおよび密度が大きく増加することがわかった。これらの結果より、He 単独照射 W に比べて、He⁺-H₂⁺同時照射下 W 中の He 滞留量は He フルエンス 1.0×10^{21} He⁺ m⁻² では飽和せず、He フルエンスの増加とともに、He 滞留量も増加することが示唆された。

図 3 に He⁺-3.0 keV D₂⁺同時照射 W における D₂ の TDS スペクトルを示す。He フルエンス 1.0×10^{20} He⁺ m⁻² から 5.5×10^{21} He⁺ m⁻² までの領域においては、He フルエンスの増加に伴い D 滞留量が増加したが、He フルエンスを 5.5×10^{21} He⁺ m⁻² 以上においては、D 滞留量は大きく減少した。これは He フルエンス増加に伴う転位ループ等の照射欠陥の増加により D 滞留量が増加することを示唆している。しかし、高 He フルエンス (5.5×10^{21} He⁺ m⁻² 以上) では、図 2 に見られるように W 表面における He バブルの密度増加に伴う、D 捕捉サイトの減少により、D 滞留量が減少したと示唆された。

参考文献

- [1] M.Tokitani, et al., J. Nucl. Mater. 463(2015)91.
- [2] M.Tokitani, et al., J. Nucl. Mater. 329-333(2004)76.

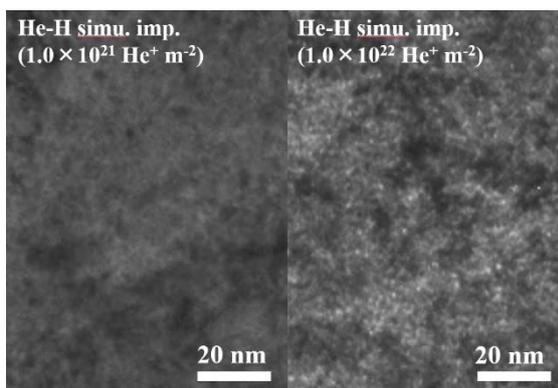


図 2 異なる He フルエンス下に He⁺-H₂⁺同時照射した試料の TEM 写真

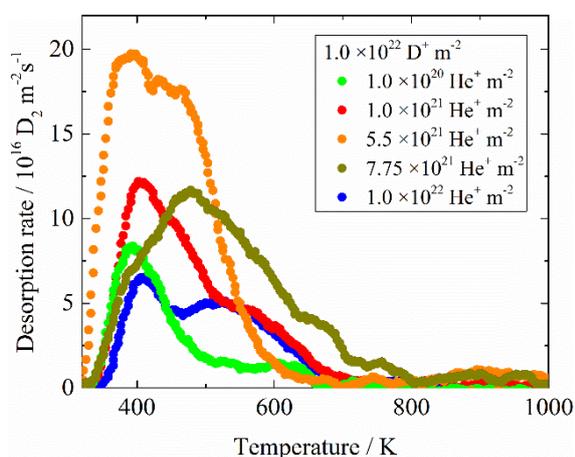


図 3 He⁺-3.0 keV D₂⁺同時照射 W における D₂ の TDS スペクトル

構造材料中の水素挙動に及ぼす照射損傷の影響

茨城大学工学部 車田 亮

1. 研究目的

核融合実験装置等の構造材料は、プラズマ対向材料を透過した中性子損傷を受けるとともに、重水素やトリチウム等が材料内部に拡散すると考えられる。一方、構造材料のき裂進展や破壊には、応力腐食割れ (SCC) や活性経路割れ (APC) 等がしばしば問題となり、その 1 つの要因として材料中の水素の影響が懸念されている。そこで、本研究では、構造材料 (ステンレス鋼等) 中の水素の透過・放出挙動が、照射環境下でどのように変化するかを調査することを目的とする。そのために、茨城大学の水素マイクロプリント法 (HMPT) や昇温脱離ガス分析装置 (TDS) と、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置や SEM・TEM の微細組織観察装置を共同研究に利用する。その結果、材料に関する豊富な知識と経験を共有しながら、核融合実験装置等の構造材料中の水素の透過・放出挙動を解明することにより、重水素やトリチウムと構造壁との相互作用を抑制・制御できる知見を得て、核融合実験装置等の構造材料の健全性および実用寿命の延長に貢献する。

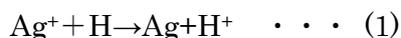
2. 実験方法

2.1 試料

供試材料は、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304L およびアルミニウム合金の A7075-T6 を採用した。特徴として、SUS304L 材は高強度鋼の欠点である応力腐食割れや粒界腐食等の発生の抑制が挙げられる。A7075-T6 材はアルミニウム合金中で最高強度を有していることが挙げられる。また、SUS304L 材には、構造機器を製作する際の塑性加工を考慮して、加工ひずみ 45[%]と 60[%]をそれぞれ与えた。本実験に使用する試料形状は、両材料共に 5×5[mm]の正方形で、SUS304L 材は厚み 0.3[mm]、A7075-T6 材では 0.6[mm]とした。それらの材料表面は、湿式研磨(~#2000)とバフ研磨(~#0.3μm)を施し鏡面に仕上げた。その後、H₂SO₄ 水溶液 (pH=2.0, 触媒: 0.1[mass% NH₄SCN])を用いて、陰極を試験片、陽極をPt とし、電圧 10[V]、電流密度 10[mA/cm²]、30[min]の電気分解を利用した水素チャージを実施した。また、試験片中央 (φ4 mm) には、銅イオン (Cu²⁺) を 1dpa 照射した。

2.2 水素マイクロプリント法 (HMPT)

水素マイクロプリント法 (HMPT) は、試料表面から放出された水素を、写真用乳剤に含まれる臭化銀の擬似的な感光現象により可視化する手法である。HMPT の原理概略図を Fig. 1 に示す。金属材料から放出される水素は、化学的に原子状態となっているため、放出された水素は、臭化銀中の銀イオンと(1)式に示すような還元反応を起こして金属銀を生じる。



その後、現像処理により金属銀を安定化し、定着処理により未反応の臭化銀粒子を溶解、除去する。こうして得られた試料表面上の SEM 観察と EDXS 分析を行い、銀粒子の位置と量から水素放出挙動を解明する。^{1,2)}

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 は、陰極チャージを施し、HMPT 試験後の SEM 観察画像を示す。一部矢印で示した白色の粒子が銀粒子である。図中の(a)はA7075-T6 の母材、(b)はA7075-T6 の照射損傷材のSEM 像を示す。母材では、銀粒子が局所的に点在し、粒界が水素の主な放出経路であることが分かった。照射損傷材では、銀粒子が粗大化し、照射損傷による転位密度の増大により、粒内からも水素の放出が確認された。銅イオ

ン照射により、材料表面層の転位密度が増加して転位ループやボイドが形成され、水素が多量に侵入し、水素の拡散が早い粒界からだけでなく、粒内からも多量に水素が放出されたと考えられる。

図中の(c)はSUS304Lの母材、(d)はSUS304Lの照射損傷材のSEM像を示す。母材では、水素放出量が非常に少なく、一部の粒界から局所的に水素の放出が確認された。また、照射損傷材では、粒界や粒内からも水素放出が確認された。銅イオン照射により、材料表面層の転位密度が増大し、転位ループやボイドを形成し、粒界のみではなく粒内からも水素の放出が起こったと考えられる。

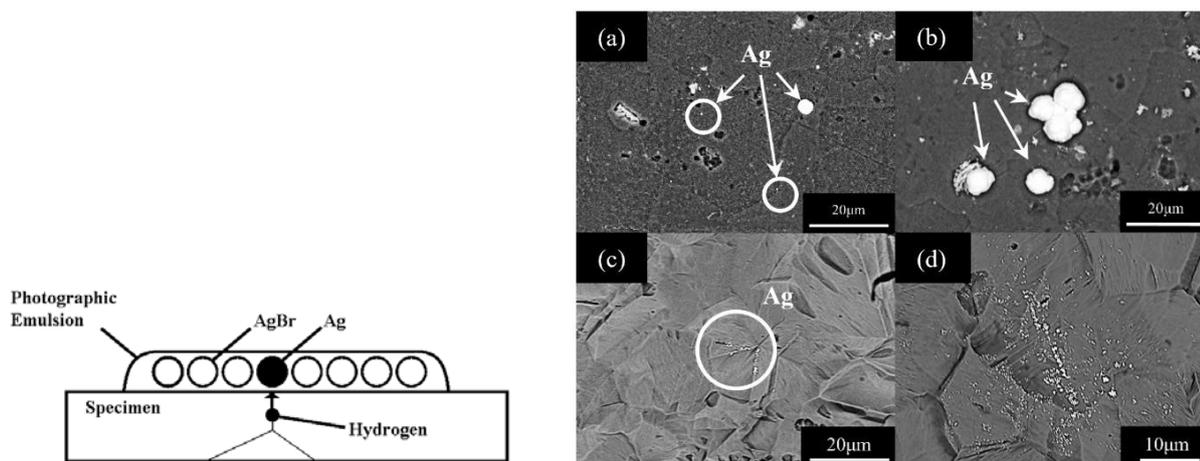


Fig.1 HMPT method. **Fig.2** SEM images after HMPT. (a) A7075-T6, (b) irradiated A7075-T6, (c) SUS304L and (d) irradiated SUS304L materials.

4. まとめ

本研究は、銅イオン照射損傷を施したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304L 材及びアルミニウム合金 A7075-T6 材の 2 種類の構造材料について、水素を可視化する手法である水素マイクロプリント法 (HMPT) を用いて、材料表面から侵入及び放出される水素の変化およびその水素のトラップサイトと照射損傷との関連を調査した。以下に得られた結果を要約して示す。

- (1) SUS304L 材およびA7075-T6 材の HMPT より、母材では、粒界析出物にトラップされた水素が粒界を通して放出され、照射損傷材では、銅イオン照射により、材料表面層の転位密度が増加し、転位ループやボイドを形成して、多量に水素が導入され、粒界のみならず粒内からも水素放出が確認された。
- (2) SUS304L 材の塑性ひずみ材では、すべり線上からも水素放出が確認され、塑性ひずみ照射材では、粒界のみならず粒内やすべり線上からも水素が集積して多量に放出された。

以上の結果から、構造材料が照射損傷と塑性変形を同時に受けた場合には、多量の水素が導入および放出されることが明らかとなり、今後、注意が必要であると考えられた。

参考文献

- 1) 和田、車田、他、第 23 回茨城講演会講演論文集、日本機械学会関東支部、(2015.8.25.日立)、133-134.
- 2) 和田、車田、他、第 24 回茨城講演会講演論文集、日本機械学会関東支部、(2016.8.26.日立)、101-102.

タングステン材料の高熱流束負荷下における損傷変化と熱応力評価

茨城大学工学部 車田 亮

【目的】 プラズマ閉じ込め実験装置の第一壁・ダイバータのアーマ材には、高温特性及びスパッタリングによる損耗特性に優れ、さらに水素リテンションの少ないタングステン(W)材が使用される。たとえば、ダイバータに使用される際には、再結晶温度の 1300°C程度以下で使用される。本研究では、これらを踏まえ、タングステンの延性脆性遷移温度(DBTT)(350°C程度)以上の高温領域に着目し、W 材を使用する際、熱負荷や接合等により発生する応力が引き起こす弾塑性変形による表面形状及び内部組織変化、亀裂発生、破壊、寿命低下等の材料挙動を明らかにする。特に、大型プラズマ閉じ込め装置のダイバータ板の開発を進める上では、まず、要素材料の試作、評価を行い、これを元にさらに改良材を作製し、試験用の小型モックアップ、プロトタイプのモックアップ等を作製・評価し、実機サイズのダイバータ板の製作を完成させる必要がある。このため、要素材の特性評価は最も基本となるものである。しかし、要素材とダイバータ板では、その実験及び使用条件が大きく異なり、ダイバータ板に使用された際の性能を、要素材で評価する方法を確立することが必要である。初年度は、要素材の熱負荷特性評価法を確立するために、Wの要素材について熱負荷実験を行い、温度変動下において人工的に熱応力を負荷し、その際発生する損傷を調べ、さらに、熱解析と比較することによる定量評価を行った結果について報告した。昨年度は、タングステンをアーマ材とした小型のモックアップについて、強制冷却下における熱挙動(温度分布等)の実験及び解析を行い結果を検討した。本年度は、さらに熱応力解析を行った結果について報告する。

【実験及び解析】 20×20×2.6 mm の低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(F82H, Fe-8Cr-2W)の表面にプラズマ溶射法(PS法)によりタングステン(W)を1 mm 被覆した。溶射は大気圧プラズマ溶射法(APS)及び減圧プラズマ溶射法(VPS)により行った。それら W 被覆 F82H 材料を、内径 7 mm の冷却管付き高伝導度無酸素銅(Oxygen Free High Conductivity Copper, OFHC)に冶金接合することによって、テスト用のモックアップを作製した。図 1 に作製したタングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(APS-W/F82H)を冷却管付き無酸素銅(OFHC)に接合したモックアップ(APS-W/F82H/OFHC)を示す。作製した APS-W/F82H/OFHC 及び VPS-W/F82H/OFHC について、電子ビーム熱負荷による熱応答及び繰り返し熱負荷実験を行った。また、モックアップの熱応答実験時の定常時における定量的な熱特性の評価を行うために、有限要素法を用いた熱解析を行った。図 2 に作成したモデルを示す。このモデルでは、冷却管内壁から冷却水への熱伝達については、冷却管の内径、冷却水の流速及び圧力、入口温度等を考慮することで、温度を関数とした相関式を用いて導出した熱伝達係数をモデルの冷却管内壁部分に定義した。また、このモデルでは F82H と OFHC 部分に、温度依存性を考慮した熱伝導率を定義した。ここで、VPS-W の熱伝導率は、W の 30~50%の実測値が報告されているので、その中間値を取って W の 40%とした。

【結果】 図3には、熱流束が 3.4 MW/m² の場合の VPS-W/F82H/OFHC に発生する X、Y 及び Z 方向の応力を示した。X 及び Z 方向に関して、VPS-W 及び F82H 部分にはせん断応力が働いており、F82H の部分で中心方向に、VPS-W 部分で外側方向に応力が印加されていることが分かる。また、Y 方向に関して、せん断応力は働かないが、F82H の部分で VPS-W 部と比較してより高い応力が働き、膨張していることが分かる。図 4 には、ミーゼス応力(a)と VPS-W の表面からの深さ方向の距離の関数とした応力(b)を示した。ミーゼス応力は、一軸に投影したスカラー値で、破壊強度の評価する際に用いられる。この解析におけ

るVPS-W部の温度は、WのDBTT以上である。従って、VPS-WとF82Hは延性材料として評価することができる。その結果、ミーゼス応力により強度特性を評価することができる。計算結果によると、Wの引張試験のデータをそのままあてはめれば、VPS-W部の応力は弾性限界以下であるが、VPS-Wの強度特性はWとは異なっていることから、Wの値をそのまま使用し評価することは難しい。また、この温度でのF82Hの0.2%耐力は、500MPa程度であることから、VPS-WとF82Hの界面のF82Hの中心付近では、塑性変形は発生しないもの考えられる。この計算結果では、VPS-WとF82Hの界面の中心(A)では、400MPaの応力が負荷されているが、実験では剥離やき裂の発生は観察されなかった。したがって、このVPS-WとF82Hの界面は、同条件の400Paの応力に耐えることができると予想される

【まとめ】 原型炉の構造材料の候補材料である低放射化フェライト/マルテンサイト鋼 F82H(Fe-8Cr-2W)の表面に、大気圧プラズマ溶射法(APS)及び減圧プラズマ溶射法(VPS)により、厚さ1mmのWを被覆した。このタングステン被覆 F82Hを冷却管付きの無酸素銅(OFHC)に冶金接合し、核融合装置のプラズマ対向材料としての使用の可能性を評価するために、強制水冷却下における熱負荷実験を行った。また、熱応力解析を行い実験結果を定量的に評価した。その結果、熱応答実験では、熱流束が増加するに従い、タングステンの表面、F82H部及びOFHC部の温度は直線的に増加した。また、熱流束が、3.2MW/m²で、200回までの繰り返し熱負荷試験では、表面形状変化、き裂や剥離は発生せず、健全性が保たれることが分かった。これらの熱応答及び繰り返し熱負荷実験から、PS-W/F82Hは原型炉のプラズマ対向材料として、高い熱特性に有することが明らかとなった。また、定常状態における熱応答特性を接合体モデルで再現し、その熱応力解析により実験結果を定量的に評価できた。

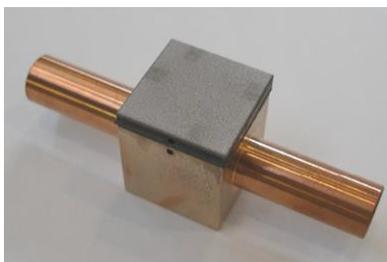


図1 APS-W/F82H/OFHCの写真

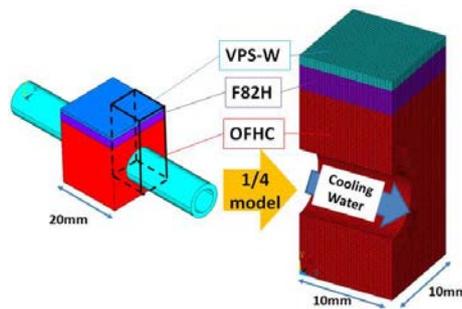


図2 作成した試験体モデル

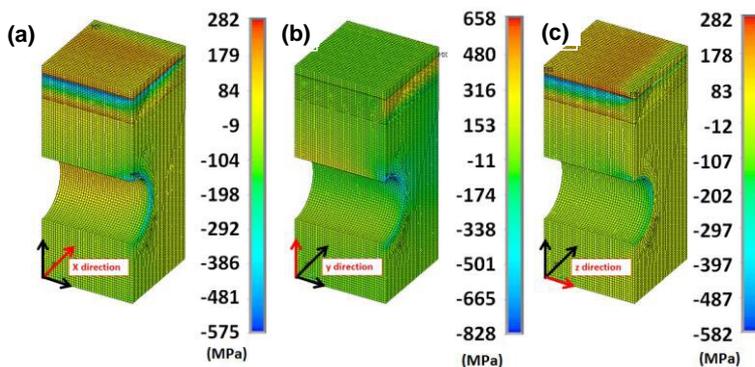
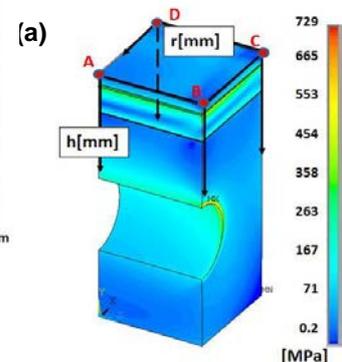


図3 熱流束が3.4 MW/m²の場合のVPS-W/F82H/OFHCに発生するX方向(a)、Y方向(b)及びZ方向(c)の応力

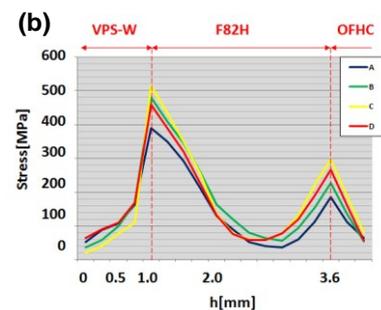


図4 ミーゼス応力(a)とVPS-Wの表面からの深さ方向の距離の関数とした応力(b)

電子ビーム照射による材料表面の高エネルギー密度入射損耗開始閾値の評価（第4報） 極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指して

応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所
糟谷 紘一

概要

表記の課題に関連する、最近の共同研究結果について、下記の項目別にその概要を述べる。(1)薄膜タングステンと、各種高耐力バックプレート材料の損耗試験、(2)放射のアップコンバージョン法を利用する新しい温度計測法、(3)関連する各種高耐力材料のXUVレーザー光による表面損耗解析

目的

応用力学研究所の電子ビーム熱負荷発生装置を用いて、諸材料表面を照射し、各種計測装置により、表面損耗量（喪失総質量）を測定する。同時に、レーザー変位計等を用いて、3次元表面損耗状態を観測する。より高い入射強度の電子ビームによる評価結果や、各種のレーザービーム照射による評価結果を、既に多く蓄積しているので、これらと、本共同研究結果の比較を行う。これらの結果を生かして、極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指す。これらが本共同研究の最終目標である。

高密度エネルギー入射損耗試験

本年度は、再稼働した電子ビーム装置により、厚いSiC板表面の照射をしたが破断したために、また、その後装置の修理に入ったために、本格的な照射実験は次年度回しとなった。材料表面の超高温度と水冷背面の温度差に伴う急温度勾配と、材料固定方法の非最適化による過度の機械的ひずみ発生が原因と推定される。また、前報記載のナノ秒EUVレーザーによる照射サンプル材料の詳細な解析を実施した。内容の中心は、プラズマ対向壁等の候補材料であるタングステン、SiC、モリブデンの照射と、種々の方法による照射後の損耗測定などであるが、詳細は文末リスト中にある本年度の関連既発表論文を参

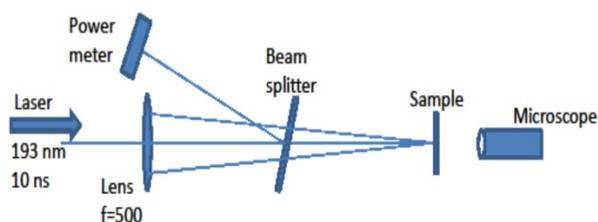
照する。これらは、むしろ厚い材料の表面損耗である。また、損耗破壊に起因する各種装置の破壊予防モニターの提案と、その初期実験結果の報告をこれまでに行ったが、市販のパーツを組み合わせたモニターの完成に向けた種々の検討と準備研究を最近実施したので、その一部を以下で述べる。これらは、むしろ薄い材料表面損耗の、実機への応用である。

厳しい環境下にある内壁検査のための光学モニターの提案と実機の完成向け予備実験

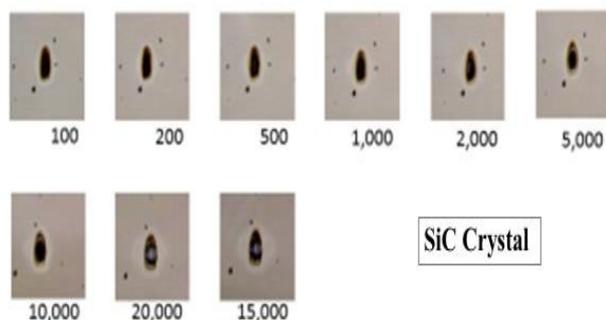
厳しい環境下に置かれる構造物の代表的なものは、核融合装置の観測窓、第1壁、リミター、ダイバーターなどの、いわゆるプラズマ対向壁である。本報告では、タングステンによるモニターヘッドの表面コーティングの代わりに薄膜タングステン（対向壁表面材相当）を用い、その背後に各種基板を設置する方法を新規に提案する。また、最近の技術の進歩により、可視光透過型SiCの入手も可能となって来たので、従来の可視光を通さないSiCの活用に加えて、可視光透過型SiC活用法の提案も行い、広範囲の各種計測法にブレークスルーを与える斬新な方法の開発ができることを示す。使用する諸材料や表面変位計は、原則として市販品を使い、それらの特性を生かした、新規な方法の提案と開発が、当グループの主要研究・開発目標である。これらの方法は、核融合分野以外の広範囲な応用分野でも利用することができる。さらに、少々異なるアイデアとして、高温核融合炉壁からの熱放射を測る方法として、アップコンバージョン法を利用する新規な方法を提案する。複雑な放射やノイズの影響を除いた、目的とする放射スペクトル領域に限定した有用な計測法開発の可能性を示す。

実験結果

薄膜材料の短パルス繰り返しArFエキシマーレーザー光照射実験の模式図を第1図に示す。透明な2種(多結晶SiC、CVD-SiC)、不透明SiC、W等を照射し、同一箇所への多重照射の積み重ねショット数を変えて、表面損耗とレーザー光貫通状態を観測した。結果の一例を第2図に示す。



第1図 ArFレーザー光(ILT)照射実験の模式図



第2図 透明多結晶SiC薄板の貫通に到る多重照射結果(顕微鏡による背面からのパターン撮影写真)

今後の課題に向けた検討結果

可視光透過炭化シリコンの損耗監視モニターへの応用可能性を検討するため、材料の小窓強度設計(対・大気圧)を行った。0.3mm厚さ(市販変位計で測定可能な厚さの最大値)のSiCの場合、直径25mm以下ならば、大気圧に耐えることが判った。

先端薄板の高温化で発生する近赤外光を、アップコンバージョンにより可視光に変換し、これを透明SiC越しに観測すれば、薄板そのものの温度が測れることになる。もちろん、貫通と同時に外方向に出てくる内部からの電磁波そのものも検出できるから、アップコンバージョンしなくとも、これらを検出すれば、破壊の瞬間を検知できるから、一応は、大型装置の破壊に至る危険な状態は十分にモニターできる。これとは別に、破壊前後の検

出ヘッド薄板の温度変化の・その場測定が、アップコンバージョン光の計測により推定できることになれば、当初の目的以上の方法論的成果が得られることになる。

そこで、市販のアップコンバージョン光発生用蛍光剤をW薄板上に塗布して、半導体レーザー光を照射して、アップコンバージョン光発生試験を行った。現在までの所、目視の範囲内であるが、アップコンバージョン光の発生を観測することができている。

謝辞

この研究は、九州大学応用力学研究所との国内共同研究費(分類番号28FP-19)の援助を受けて実施した。本研究を進めるにあたり、九州大学応用力学研究所(徳永和俊准教授、糟谷直宏准教授)チェコ・プラズマ物理研究所グループ(K. Kolacek 博士等)応用ながれ研究所(糟谷恵子副代表)核融合科学研究所、レーザー技術総合研究所(本越伸二主任研究員)電気通信大学レーザー新世代研究センター(白川晃准教授)(株)キーエンス、(株)東海ファイナセラミックス、 などの方々にお世話になった。

2017/02/28 報告

発表資料

- [1] K. Kasuya et al., 21st International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, Gmunden, Austria, September 5-9, 2016, Book of abstracts, pp.155-156, and SPIE Digital Library, Conference Proceedings, SPIE Volume 10254, 102541B (January 13, 2017); doi: 10.1117/12.2256562.
- [2] K. Kolacek et al., 26th IAEA Fusion Energy Conference, 17-22 October 2016, Kyoto, Japan, Post-dead-line poster paper, PDP-22.
- [3] K. Kasuya et al., NIFS Collaboration Workshop on Advanced Diagnostics for Burning Experiments of Magnetic and Inertial Fusion, NIFS, Japan, 27-28 September 2016.
- [4] 糟谷紘一ほか、第11回核融合エネルギー連合講演会、平成28年7月14日-15日、九州大学伊都キャンパス 椎木講堂、ポスター講演 14p105.

分光反射率測定を用いたプラズマ対向材料の表面診断

島根大学大学院総合理工学研究科 宮本光貴

1. はじめに

燃焼プラズマを定常的に取り扱う核融合炉においては、時々刻々と変化していくプラズマ対向材料の表面特性を実時間で正確に把握しておくことが、プラズマ制御と炉の安全性維持に重要である。

本研究では、光反射率スペクトル測定による材料の診断手法を提案しており、低エネルギーイオン照射やプラズマ曝露した金属ミラー材の光学特性の劣化機構を電子分光学的立場から調べることを目的とする。本年度は、主にイオン照射した SUS ミラー試料の光反射率の、エネルギー依存性およびイオン種の影響を評価した。照射による結晶構造の乱れ、および試料表面上の堆積層形成に伴う光学特性変化の検出は、将来の核融合炉における壁材料の簡便な診断手法としても期待できる。

2. 実験方法

㈱ニラコ社製の SUS316L を鏡面研磨したのち、室温で 3 および 5 keV のヘリウムイオン(He⁺)照射を行った。スーパーコンティニューム白色光源(λ : 450~2000 nm)を用いて、照射下における光反射率スペクトル変化を実時間測定した。また、照射による組織変化の反射率劣化に与える影響を調べるために SEM を用いた表面組織観察を行った。さらに、イオン種の影響を評価する目的で、3keV のアルゴンイオン(Ar⁺)を用いて同様の照射下光反射率スペクトル測定を行った。

3. 結果および考察

図1は鏡面研磨した SUS316L に室温で(a)3keV, および(b)5 keV-He⁺照射した際の光反射率変化のその場測定結果を示す。測定波長範囲においては、いずれの場合も 3 keV-He⁺照射の方が反射率の減少が大きいが、これはレーザー侵入領域 (~15 nm) に分布する欠陥量に依存すると理解されている[1]。また 5keV-He⁺照射では、照射量 10^{22} He/m² 程度を周期とする反射率の回復(振幅)が見られた。これは、損傷の蓄積に加え、一定の照射量を超えると損傷層が剥離し、それが繰り返されることが原因と考えられた。同様の回復現象は W 試料においても確認されているが、W 試料での回復周期は 1×10^{23} He/m² と

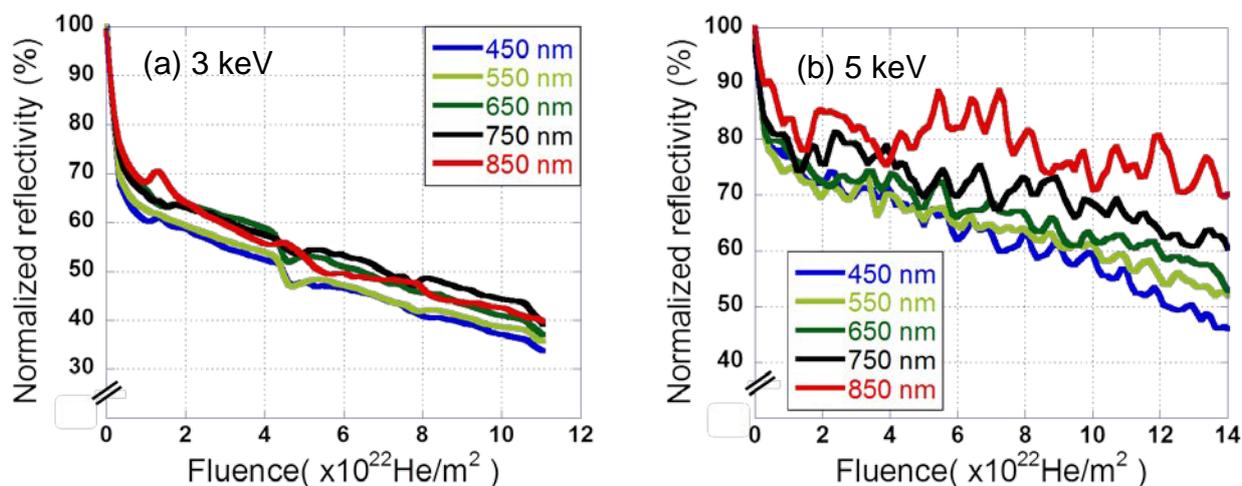


図1 SUS316L ミラー試料に室温で(a)3keV, および(b)5 keV のヘリウムイオン(He⁺)照射した際の光反射率変化の照射量依存性。

SUS 試料と比べ一桁程度差があり，両者のスパッタ率や損傷発生効率の差異に起因している[2]．図2には，1~5 keV の各エネルギーで約 10^{23} He/m²H まで He⁺照射した SUS 試料表面の SEM 観察結果を示す．5keV-He⁺照射試料でのみ，照射面に特異なステップ状構造が観察され，この形態変化が図 1(b) に見られる反射率回復の原因になったのではないかと考えられる．

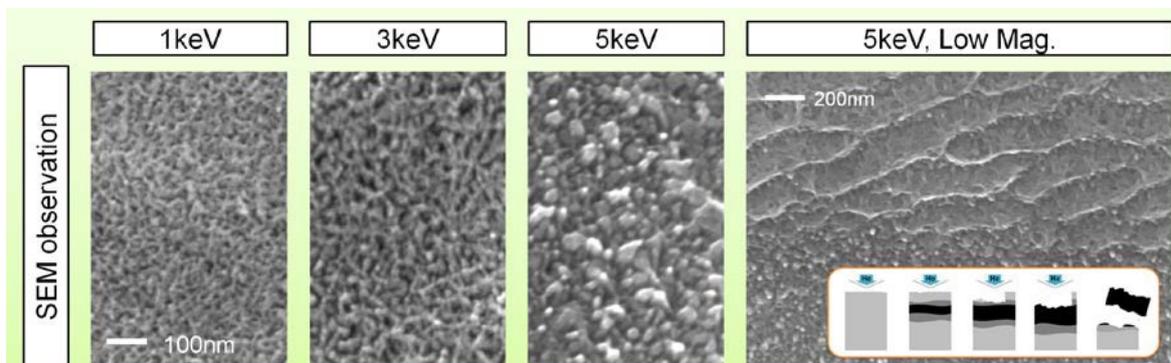


図2 1, 3, 5 keV の各エネルギーで約 10^{23} He/m²H までHe⁺照射したSUS 試料の表面微細組織

図 3 に He⁺照射による反射率スペクトル変化と比較するため，3 keV-Ar⁺照射中の反射率スペクトルを測定した結果を示す．反射率強度は He⁺照射と同様大きく低下したが，その低下度合いは大きく，He 照射より一桁程度少ない照射量で反射率が 40%まで減少した．He⁺照射では，試料表面直下に形成する

He バブルが反射率の減少の主要な要因であったのに対して，Ar⁺照射では，その飛程が浅く，He⁺と比較して一桁程度スパッタ率が高いことから，表面の形状変化の影響を強く受けているものと考えられる．今後，分光光度計を用いた絶対反射率測定や，試料表面および表面直下の微細組織観察を行い，反射率減少の要因を明確にしていく予定である．

現在，本手法の大型装置への適応性を検証するために QUEST において光反射率スペクトルの実時間測定の取り組みが始まっている．大型装置での実用化を考えるうえで，局所的な光反射率測定により得られる情報とプラズマ性能の相関を見出し，炉の運転に如何に貢献できるデータを提供していくかが課題となっている．

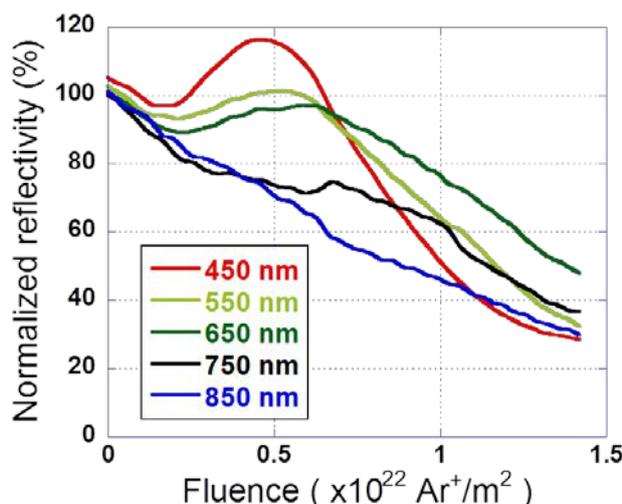


図3 SUS316L 試料に室温で3 keV-Ar⁺照射下における光反射率変化の照射量依存性．

[1] H. Urabe, M. Miyamoto et al., J. Nucl. Mater. 386 (2009) 1038.

[2] M. Miyamoto, K. Ono et al., Plasma Devices and Operations, Vol. 17 (2009) 155

● 研究組織

研究代表者： 宮本光貴（島根大学大学院総合理工学研究科准教授）

所内世話人： 渡辺英雄（九州大学応用力学研究所准教授）

研究協力者： 田中徳人，藤井悠太，東 勇太（島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程）
濱口 大（量子科学技術研究開発機構，研究副主幹）

ジルコニウム合金燃料被覆管腐食材におけるニオブ析出物の結晶構造及び電子状態分析

東北大金研 松川義孝 九大応力研 渡辺英雄

1. 背景

軽水炉の燃料被覆管に用いられるジルコニウム合金の材料寿命を決定する要素は、いわゆる照射損傷ではなく、高温水（PWR の場合約 598 K）による腐食とそれに伴う水素脆化である。Zr 合金に Nb を添加すると耐食性が飛躍的に向上することは昔から知られており、その経験則は最新の材料開発（米国の ZIRLO™ や EU の M5®、日本の J-Alloy™）にも生かされているが、耐食性向上のメカニズムは未だ明らかではない。その理由は、Nb 析出物のふるまいがこれまでの研究では十分把握できていなかったためである。先行研究では、Nb 析出物が腐食によって最終的に Zr マトリックスに再固溶するという報告が 2 つある。但し、両者は再固溶が起こる条件についての結論が異なり、一方は高濃度 Li の条件のときのみ起こると結論づけているのに対し、他方は蒸留水でも起こると結論づけている。

また、先行研究では、Nb 析出物は腐食（酸化）によってアモルファス化した後に再固溶すると結論づけている報告もあるが、このシナリオの妥当性については慎重に評価する必要がある。アモルファス化と再固溶が同時に起きているのであれば、それはアモルファス化が O と Nb の両方が拡散できる条件で起きているということを意味する。アモルファス化が酸化や水素化など、拡散を伴う過程でも起こることは 1980 年代から知られているが、従来の研究では、最終的にアモルファスを構成する 2 つの元素のうち、片方が完全に動けない条件でしかアモルファス化が確認されていない。このような共通認識を念頭に置き、本研究では PWR 模擬条件で腐食した Zr-2.5Nb 合金における Nb 析出物のふるまいを TEM/STEM-EDS/EELS で調査した。

2. 実験結果

分析の結果、(1) PWR 模擬条件（低濃度 Li）では腐食時間が 13,000 時間でも再固溶は起こらないこと、(2) 表面酸化被膜中の Nb 析出物は分析手法によっては（アーティファクトの影響で）あたかも再固溶したように見えてしまう場合があること、(3) この一見消失したように見える析出物はアモルファスの Nb₂O₅ であることを明らかにした。アモルファス Nb₂O₅ は他の Nb 酸化物と比較して、バンドギャップ

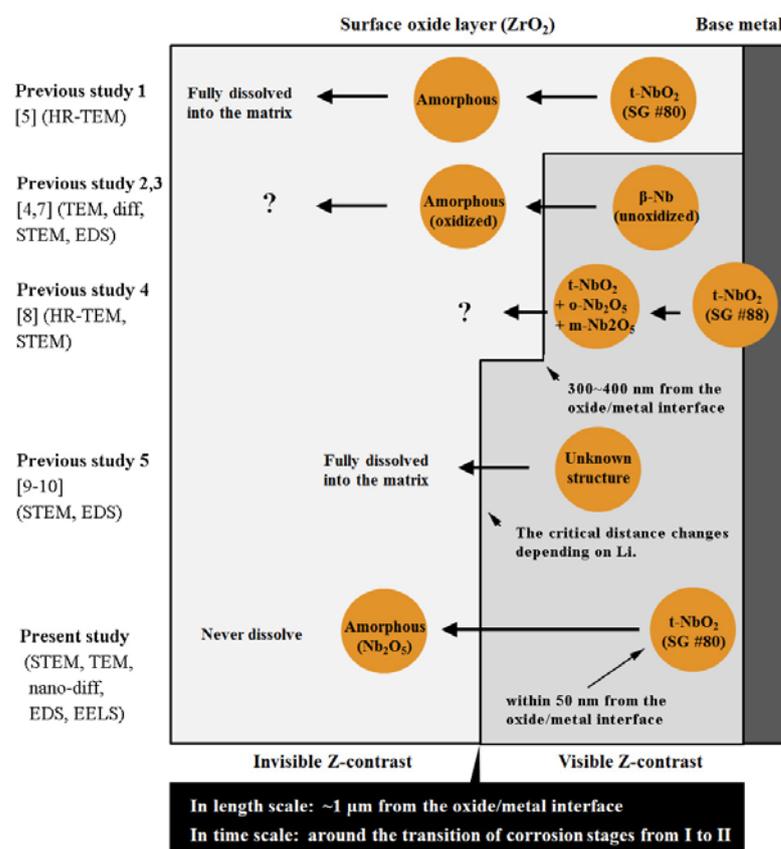


図1 Zr-Nb合金腐食材の表面酸化被膜におけるNb析出物のふるまい（従来の研究と本研究の比較）

の非常に大きい (3.5 eV) 誘電体であるという特徴がある。また、(4) アモルファス Nb₂O₅ が出現するとき、析出物はマトリックスと Pilling-Bedworth 比が大きく異なるため、結果的に約 50 GPa もの高圧が負荷された状況にあること、(5) アモルファス Nb₂O₅ が出現するタイミングが、合金の耐食性が変化するタイミング (本合金の耐食性はステージ II から良好になる) によく一致することも明らかとなった。さらに、析出物のサイズ分布を詳細に検討することによって、この温度では熱時効しても Nb は拡散できないが、酸素が関与すると拡散が促進されることを明らかにした。厳密な意味において、O と Nb の両方が動ける条件でアモルファス化を確認した最初の報告ということになる。

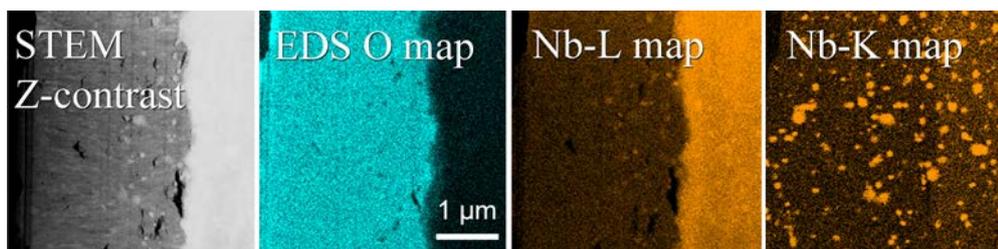


図 2 アーティファクトの影響 (Z コントラストや Nb-L 線の元素マップでは、析出物があたかも再固溶したように見える)

3. 本年度 発表リスト

[口頭発表リスト]

- 1) 松川義孝, “フェライトにおける G 相の二段階核形成: 臨界サイズと臨界組成”, 日本鉄鋼協会 2017 年秋季講演大会, 2016.9.21–23, 大阪 (阪大豊中キャンパス) .
- 2) Y. Matsukawa, “Transmission electron microscopy analysis on oxidation of Nb precipitates in Zr–Nb alloys subjected to water corrosion”, NuMat2016 (The Nuclear Materials Conference 2016), 2016.11.7–10, Montpellier (France).
- 3) Y. Matsukawa, “The two-step nucleation of G-phase in ferrite: the critical size and composition for the structural change of solute clusters”, TMS2017 (The Minerals, Metals & Materials Society 2017 Annual Meeting), 2017.2.26–3.2, San Diego (USA), (招待講演)
- 4) 松川義孝, “PWR 模擬水中で腐食させた J 合金の酸化被膜における Nb 析出物の酸化挙動の解析”, 原子力学会 2017 年春の年会, 2017.3.27–3.29, 神奈川 (東海大湘南キャンパス) .
- 5) 大熊一平, 松川義孝, “Zr–2.5Nb 合金における bcc 析出物の組成に及ぼす加工熱処理の影響調査”, 原子力学会 2017 年春の年会, 2017.3.27–3.29, 神奈川 (東海大湘南キャンパス) .

[論文発表リスト]

- 1) Y. Matsukawa, T. Takeuchi, Y. Kakubo, T. Suzudo, H. Watanabe, H. Abe, T. Toyama, Y. Nagai, “The two-step nucleation of G-phase in ferrite”, Acta Materialia, Vol. 116, 104–113, 2016 (2016 年 6 月 6 日).
- 2) Y. Matsukawa, I. Okuma, H. Muta, Y. Shinohara, R. Suzue, H. L. Yang, T. Maruyama, T. Toyama, J. J. Shen, Y. F. Li, Y. Satoh, S. Yamanaka, H. Abe, “Crystallographic analysis on atomic-plane parallelisms between bcc precipitates and hcp matrix in recrystallized Zr–2.5Nb alloys”, Acta Materialia, Vol. 126, 86–101, 2017 (2016 年 12 月 20 日).
- 3) Y. Matsukawa, S. Kitayama, K. Murakami, Y. Shinohara, K. Yoshida, H. Maeno, H. L. Yang, T. Toyama, K. Yasuda, H. Watanabe, A. Kimura, H. Muta, S. Yamanaka, Y. F. Li, Y. Satoh, S. Kano, H. Abe, “Reassessment of oxidation-induced amorphization and dissolution of Nb precipitates in Zr–Nb nuclear fuel cladding tubes”, Acta Materialia, Vol. 127, 153–164, 2017 (2017 年 1 月 14 日).

多層グラフェン膜を用いた燃料電池用水素供給源の開発

Developments of hydrogen storage for fuel cells using multilayer graphene films

名城大学理工学部 土屋 文

Bun Tsuchiya

Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

目的 安全でクリーンな水素酸素燃料電池は、火力発電や原子力発電に替わる発電機として世界的に大きな期待を寄せられている。一般に、水素酸素燃料電池は燃料(水素)、電解質および酸化剤(酸素)から構成されている。最近、水素燃料供給源(水素電極)に水素吸蔵合金(チタン水素化物)、電解質に水素イオンだけが電気伝導に関与するプロトン導電性固体高分子膜(フッ素樹脂系イオン交換高分子膜)を用いた小型化可能な高効率・高出力のマイクロ燃料電池の開発が進められている。水素電極に水素吸蔵合金を用いる理由は、ガス電極のように水素分子の解離過程を経ずに、水素原子を直接電解質中に固溶およびイオン化させて電流密度の増加を図るためである。面心立方晶を有するチタン水素化物を水素電極に用いた場合、水素電極から電解質への水素輸送温度は 200°C以上と高い値を示す。より低温で稼動するマイクロ燃料電池の開発を目指すためには、より低い水素の解離温度を有する水素電極を開発する必要がある。これまで、本研究室では、ミスト化学蒸着法を用いて、多層グラフェン薄膜を作成し、その薄膜における水素の解離温度は約 100°C以下であることを発見した。しかしながら、薄膜からの水素の加熱再放出機構についてはまだ明らかにされていない。本研究では、核反応(NRA: Nuclear Reaction Analysis)法、反跳粒子検出(ERD: Elastic Recoil Detection)法および昇温ガス脱離(TDS)法を用いて、加熱された多層グラフェン薄膜中の水素濃度および放出ガス種の解離温度を測定し、薄膜中の水素の加熱挙動について調べた。

実験方法 ミスト化学蒸着法を用いて、 1.3×10^{-3} Pa の真空排気および 925°C に加熱された石英管内にミスト状のメタノールおよび 2% H₂ を含有する Ar 混合ガスを流した後、Cu 板を 2 分間導入して多層グラフェン薄膜試料を作製した。ラザフォード後方散乱(RBS: Rutherford Backscattering Spectrometry)法および光吸収法により、作製された多層グラフェン膜の厚さは約 8 ± 3 nm (約 24 \pm 9 層程度)であると評価した。次に、多層グラフェン薄膜試料を恒温恒湿器内に導入し、約 24~30°C の室温および約 30-40% R.H. の相対湿度の雰囲気中に放置した。空気中の水蒸気が多層グラフェン薄膜内に飽和するまで吸収された後、量子科学技術研究開発機構に既存のタンデム型加速器からの 6.38–6.50 MeV N⁺イオンをプローブビームとした NRA 法を用いて、H および N 間の核反応(H(¹⁵N, $\alpha\gamma$)¹²C)により生成された 4.44 MeV のガンマ線を NaI(Tl) シンチレーション検出器により検出し、深さに対する H 濃度分布を数 nm の深さ分解能で測定した。次に、東北大学金属材料研究所に既存のタンデム型加速器からの 2.8 MeV He²⁺イオンをプローブビームとした ERD 法を用いて、作製した多層グラフェン薄膜試料を真空雰囲気中で室温から約 300°C の各温度において 10 分間の等時加熱(isochronal annealing)を行い、各温度における捕捉 H 濃度の変化について調べた。また、飽和注入後、九州大学応用力学研究所に設置された TDS 法により、放出ガス種の判別および各ガス種の解離温度を調べた。

実験結果および考察 Cu 板上に形成された多層グラフェン薄膜表面の FE-SEM 像を図 1 に示す。図 1 から、基盤の Cu 板の形状に影響するが、グラフェンは平坦になつておらず、歪んだ形状を帯びていることがわかる。RBS スペクトルおよび光吸収測定から、試料のどの位置でも、ほぼ一様の厚さであることがわかった。

次に、約 24~30°C の室温および約 30-40% R.H. の相対湿度の雰囲気の中で、長時間空気暴露された多層グラフェン膜について測定された NRA スペクトルを図 2 に示す。横軸は、N⁺イオンの入射エネルギーであり、

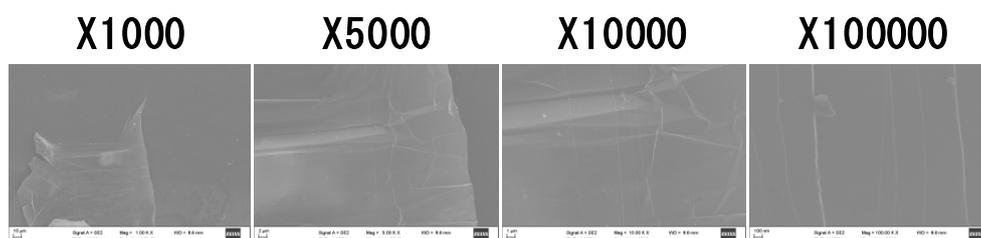


図 1 Cu 板上に形成された多層グラフェン薄膜表面の FE-SEM 像。

多層グラフェン膜表面からの深さを表す。縦軸は、多層グラフェン膜中の水素濃度を表す。図 2 から、多層グラフェン膜表面には 1 個の C 原子に対する H 原子数比(H/C)は約 0.88 であり、H 濃度が極めて高いことがわかった。また、約 24 層中の多層グラフェン膜中の H/C は約 0.03 と評価された。これらの結果より、僅かな原子状 H がグラフェン層間(インターカレーション)を占有し、多量の水(H₂O)が歪んだ多層グラフェン膜表面に吸着していることが考えられる。

次に、室温から 300°Cの温度までの各温度で 10 分間の等時加熱後、ERD 法を用いて測定された多層グラフェン膜の ERD スペクトルを図 3 に示す。ERD スペクトルから求めた作製後の多層グラフェン膜中の水素濃度は、H/C=0.74 であり、NRA 法により求めた結果とほとんど一致することがわかった。しかしながら、ERD 法では約 100 nm 以上と深さ分解能が低いため、膜表面上の H₂O とインターカレーション中の H を分けることができない。従って、縦軸のピーク強度は、多層グラフェン膜表面および層間の合計の H 濃度を表す。図 3 から、ERD スペクトルの強度は、加熱温度の増加とともに減少することがわかる。加熱温度に対する多層グラフェン膜中の捕捉 H 濃度の変化を図 4 に示す。図 4 より、多層グラフェン膜中の捕捉 H 濃度は、グラファイト中の H 濃度が 400°Cまで全く減少しないことに対して約 100°C以下の低温で徐々に減少し、300°Cで約 3 割程度まで減少することがわかった。グラファイトの場合、H は 400°C以上で CH₄ の形状で放出されることが報告されているので、多層グラフェン膜からの H は、H₂O および H₂ の形状で放出されていることが推測される。

TDS 法を用いて、重量変化が一定になった多層グラフェン膜を室温から 500°Cまで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、試料から放出されるガス種の判別を行った。H₂O が約 100°C以下の低温から放出し、続いて H₂ の放出ピークが約 500°C近くの加熱温度で観測された。放出温度は異なるが、H 放出は、多層グラフェン膜表面に吸着した H₂O の脱離、層間を占有した H 原子の脱離が律速で生じると考えられる。

まとめ NRA 法、ERD 法および TDS 法を用いて、真空内で約 300~500°Cまで加熱された多層グラフェン膜中の水素濃度変化について調べた。大気に放置された多層グラフェン膜表面には多量の H₂O が吸着しており、微量の H が層間に占有していることがわかった。また、これらの捕捉 H 濃度は約 100°C以下の低温から徐々に H₂O および H₂ の形状で放出され、300°Cで約 3 割程度まで減少することがわかった。

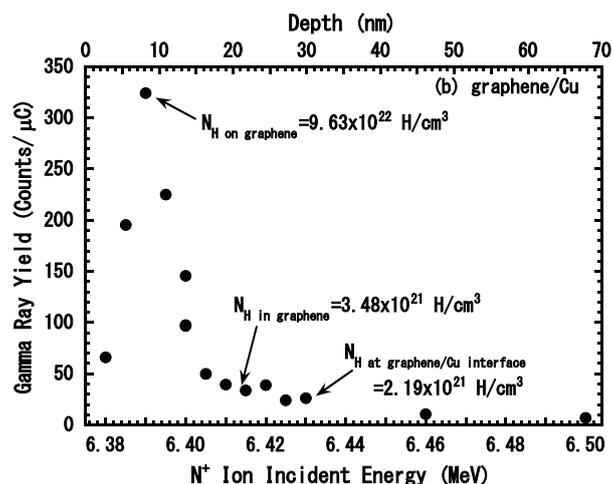


図 2 Cu 上に形成された多層グラフェン中の水素濃度分布(NRA スペクトル)。

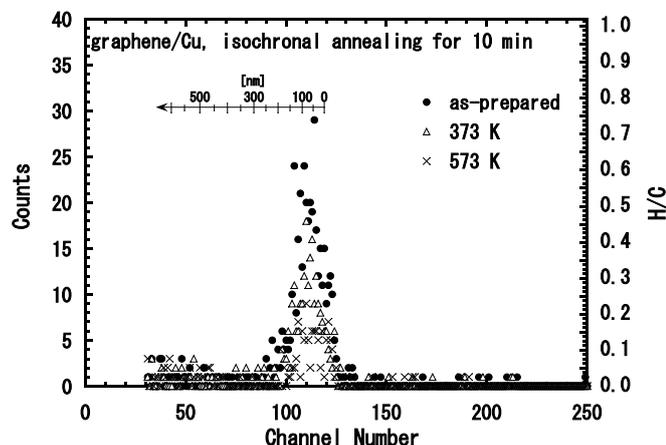


図 3 300°Cまでの各温度において、10 分間の等時加熱後の多層グラフェン中の水素濃度分布(ERD スペクトル)。

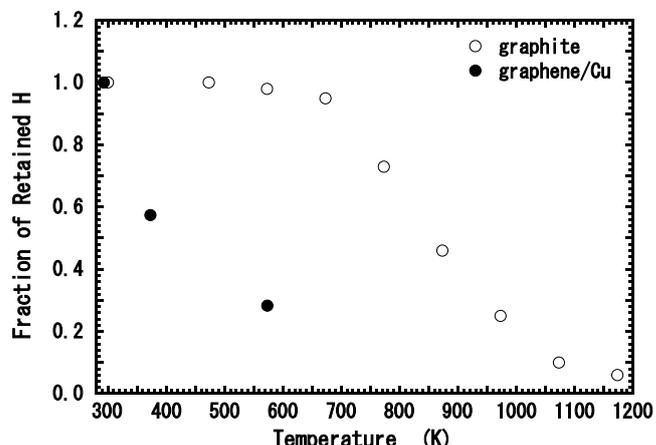


図 4 ERD スペクトルから求めた、各温度において 10 分間の等時加熱後の多層グラフェンおよびグラファイト中の水素濃度変化

不純物イオン発光線の高波長分解分光による
QUEST 周辺プラズマのトロイダル流れ計測

京都大学大学院工学研究科 四籠 泰一

目的

最外殻磁気面近傍からスクレイプオフ層に至るトカマク周辺部のイオン流れは、プラズマ不安定性の抑制、ブロップ輸送、ダイバータでの中性粒子圧縮等の事象の制御因子であることが明らかになっている。このためイオン流れの空間分布診断にもとづく流れの駆動および散逸機構の解明に向けた研究が進められている。

このような状況の中で、申請者等は高波長分解の可視分光を用いて QUEST 周辺部における不純物イオン発光線のドップラーシフトを計測し、イオンのトロイダル速度を推定することを試みている。不純物イオンを利用して水素イオンの流れを推定するにはこれらのイオンの速度分布が緩和していることが必要となる。本研究では 2 種類の不純物イオン C^{2+} , O^{+} の温度およびトロイダル速度を計測し、両者の比較から水素、不純物イオン間での速度分布の緩和を検証した。

方法

QUEST において、中心ソレノイドコイルによる電磁誘導を重畳した 8.2 GHz 電子サイクロトロン共鳴加熱放電を用いて実験を行った。波長 465 nm 付近に存在する C^{2+} , O^{+} イオン発光線を計測対象とした。

観測は中央平面の MH16 ポートに設置した合成石英窓を通して行った。弱磁場側周辺部に放射状の 14 視線を配置し、定常状態のプラズマからの発光を集光した (図 1)。集光した光はバンドル型光ファイバ (三菱電線工業 ST230D; コア径 230 μm , クラッド径 250 μm , 開口数 0.2) を用いて伝送し、ツェルニーターナ型分光器 (Acton Research AM-510; 焦点距離 1 m, 回折格子 1800 本/mm) および CCD (Andor DU440-BU2) を用いてスペクトルを計測した。波長分解能は収差の違いにより視線に応じて 20-50 pm であった。放電間に波長リファレンスの ThAr ホローカソードランプ (Photron P858A) からの光を計測することでスペクトルの波長誤差を 0.5 pm 以下 (速度換算で約 0.3 km/s 以下) まで低減した。

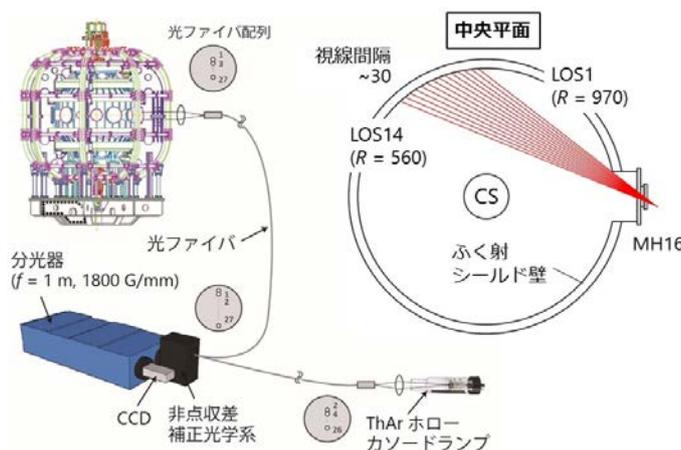


図 1. 計測系と視線

結果

視線 7 で計測したスペクトルを図 2 に示す。 C^{2+} , O^{+} イオンの微細構造遷移による複数の発光線が観測された。図中に矢印で示した 2 本の発光線を解析した。

観測された発光線形状は視線上に存在する局所的な発光線を視線に沿って積分したものである。イオンの放射率、温度、トロイダル速度の局所値を求めるために、トロイダル断面内のプラズマの軸対称性を仮定した逆変換を行った。逆変換時には中央平面を図 3 に示すようなリング状の領域 (シェル) に分割し、各領域に視線が 1 本ずつ含まれるようにした。トーラス外側から内側に向かって、各視線で計測される発光線形状

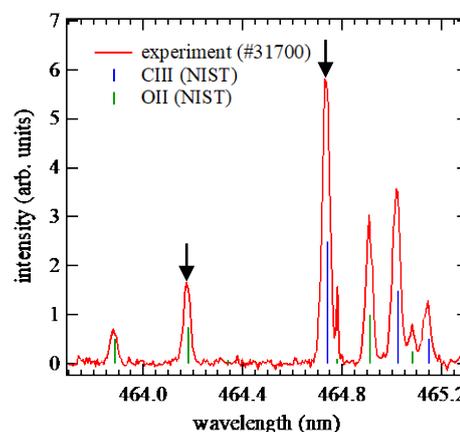


図 2. 視線 7 で計測したスペクトル

の計算値を実験値に対して最小 2 乗フィッティングし、シェル内のイオンのパラメータを決定した。逆変換の範囲は、有意なフィッティング結果を得るのに必要な S/N のスペクトルが得られた視線から最も内側の視線までとした。

ガス入射量を変化させた 3 種類の放電: 0.05 mPa (#31687), 0.1 mPa (#31700), 0.6 mPa (#31708) で計測した発光線に逆変換を適用した。得られた C²⁺, O⁺イオンの温度, トロイダル速度の差分を図 4 に示す。圧力は真空容器での値である。圧力 0.1 mPa および 0.6 mPa の条件では 2 種類のイオン発光線から得られた温度, トロイダル速度は同程度であった。不純物イオン密度は水素イオン密度に比べて小さいため, 水素, 不純物イオン間での速度分布の緩和時間は, 不純物イオン間に比べて短くなる。したがって, C²⁺, O⁺イオンが同程度の温度, トロイダル速度を持つことから, 水素, 不純物イオン間で速度分布が緩和していると考えられる。一方, 圧力 0.05 mPa の条件では C²⁺および O⁺イオンから求めた温度, トロイダル速度に有意な差が見られた。上記の 2 条件に比べてイオン温度が上昇し, 電子密度が低下したことによって速度分布の緩和時間が長くなり, 水素, 不純物イオン間で速度分布が緩和していない可能性がある。本研究により, 不純物イオンを利用した QUEST プラズマの流れ計測時には水素, 不純物イオン間の速度分布の緩和について慎重な検証が必要であることが分かった。

成果報告

- [1] K. Nii, T. Shikama, A. Fujikawa, *et al.*, “Spatially-resolved spectroscopic measurement of impurity ion toroidal rotation in QUEST”, 4th A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST), 2016/8/2-5 (ポスター).
- [2] 新居 邦亮, 四竈 泰一, 藤川 祥亘, 他, 「QUEST における不純物イオントロイダル回転の多視線分光計測」, 日本物理学会秋季大会 16aKA-3, 2016/9/13-16 (口頭).
- [3] 四竈 泰一, 新居 邦亮, 藤川 祥亘, 他, 「多視線分光による不純物イオン流れの空間分布計測」, QUEST 研究会, 2016/9/20 (口頭).
- [4] 新居 邦亮, 四竈 泰一, 藤川 祥亘, 他, 「QUEST における不純物イオントロイダル回転の多視線分光計測」, NIFS 合同研究会 2016/12/20-22 (口頭).
- [5] 新居 邦亮, 「QUEST プラズマ周辺部における不純物イオントロイダル流れの多視線分光」, 京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 修士論文 (2017).
- [6] T. Shikama, K. Nii, A. Fujikawa, *et al.*, “Spatially-resolved measurements of impurity ion toroidal flow velocity in QUEST using multiple viewing chords spectroscopy and inversion”, Fuzhou workshop on edge plasma stability and transport, 2017/3/3-4 (口頭).

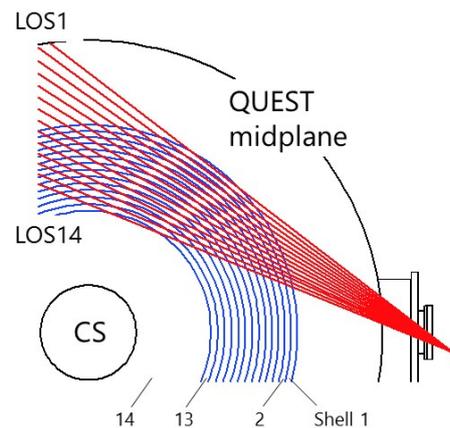


図 3. シェル配置

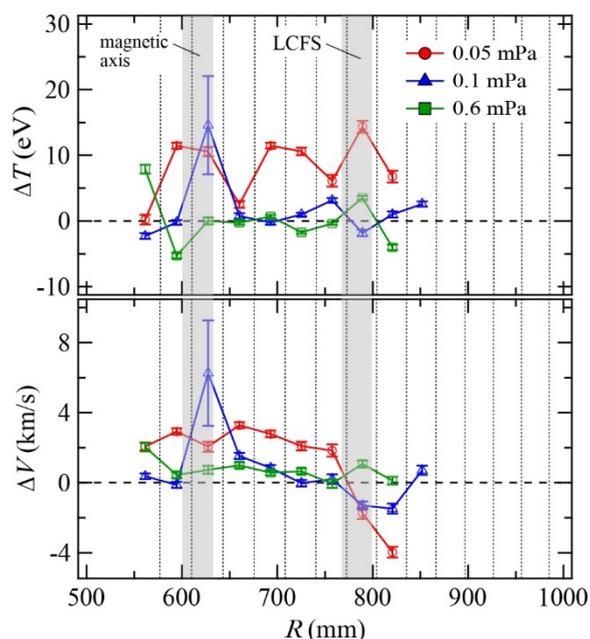


図 4. C²⁺と O⁺イオンの温度, トロイダル速度の差分 ($\Delta T = T_{C^{2+}} - T_{O^+}$, $\Delta V = V_{C^{2+}} - V_{O^+}$). R は大半径, 点線はシェル外径を表す。

金属材料における格子欠陥と水素原子の相互作用の検出法に関する研究

鹿児島大学学術研究院理工学域

佐藤 紘一

要旨

今年度は電子線照射したタングステンに高圧水素チャージを行い、水素チャージ前後での陽電子寿命値の変化から、欠陥に捕獲された水素数を検討した。同時に、水素の導入が硬さに及ぼす影響も調べた。陽電子寿命値の変化から欠陥には 2 個程度の水素が捕獲されていることが分かった。熱処理を行ったときの陽電子寿命値の変化から、欠陥からの水素の脱離が約 573K 付近から開始していることが分かった。

1. 研究背景と目的

核融合炉や加速器駆動未臨界炉は次世代のエネルギー源として有力な候補であり、低放射化フェライト鋼やタングステン、それらの構造材料として使用が検討されている。いずれも、中性子などの高エネルギー粒子によって激しい損傷を受けると同時に、核変換によって多量のガス原子が生成する。生成したガス原子は格子欠陥と相互作用し、脆化やスエリングを助長するため、その相互作用を調べることは大変重要である。本研究では、それら金属材料の格子欠陥とそこに捕獲される水素原子の数を検出することを目的とする。今年度は電子線照射したタングステンに水素チャージを行い、陽電子消滅寿命測定と硬さ試験を行った。その結果から、欠陥の水素の捕獲数と脱離温度を評価した。

2. 実験方法

本研究ではアライドマテリアル社製の厚さ 0.2mm のタングステン(純度 99.95at%)の板材を用いた。その板材からワイヤー放電加工によって直径 5mm のディスクを作成した。試料内部には加工による転位や空孔が存在しているので、タングステンを 10^{-4} Pa 以下の真空中で 1773K、1 時間の熱処理を行い転位と空孔を取り除いた。電子線照射における電子のエネルギーは 8MeV であり、照射量は 2.92×10^{-4} dpa であった。材料への水素チャージには、高圧水素チャージを用いた。試料は 573K で 240 時間熱処理を行った後、573K で 5.8MPa の水素に 240 時間曝して、試料内部に水素を導入した。次に、陽電子消滅寿命測定を行い、欠陥の大きさや量を調べた。同時に、硬さ試験を行った。その後、室温から 50K 毎に 1 時間の等時焼鈍を行い、焼鈍温度が 573K まで到達した後は、573K で等温焼鈍を行った。その都度、陽電子寿命値と表面硬さを調べた。

3. 結果と考察

表1 に電子線照射前後および水素チャージによるタングステンの陽電子寿命値の変化を示す。長寿命成分から、電子線照射後に原子空孔が形成し、水素チャージをすることによって、原子空孔が水素を捕獲し、陽電子寿命値が減少した。シミュレーションとの比較から、原子空孔には平均して 2 個の水素が捕獲されていることが分かった。陽電子消滅寿命測定と硬さ試験の変化から、573K 程度で水素が原子空孔から解離することも分かった。また、水素チャージし、等時焼鈍を行った後の硬さの変化を図 1 に示す。水素チャージを行った直後は硬さが上昇したが、その後の 573K までの等時焼鈍では水素チャージ前の硬さとはほぼ同じ値に戻り、573K での等温焼鈍では硬さがさらに低くなった。水素チャージを行った直後に硬さ

試験を行ったため、拡散性の水素が硬さに影響した可能性がある。拡散性の水素がなくなったと考えられる熱処理後の材料では水素チャージ前の硬さに戻った。硬さがさらに低下した原因は水素を原子空孔ほど強く捕獲しないサイト（転位ループなど）の変化が考えられるが、今後も継続してこの原因を調べなければならない。

表1 よく焼鈍したタングステン、 2.92×10^{-4} dpaの電子線照射したタングステン、照射後水素チャージしたタングステンの陽電子消滅寿命値

Sample	Mean lifetime [ps]	Short lifetime		Long lifetime	
		Lifetime [ps]	Intensity	Lifetime [ps]	Intensity
Well-annealed	113	—	—	—	—
Electron-irr.	150	81	28	167	72
Hyd.-charged	127	24	18	149	82
573K, 10h	147	83	20	157	80

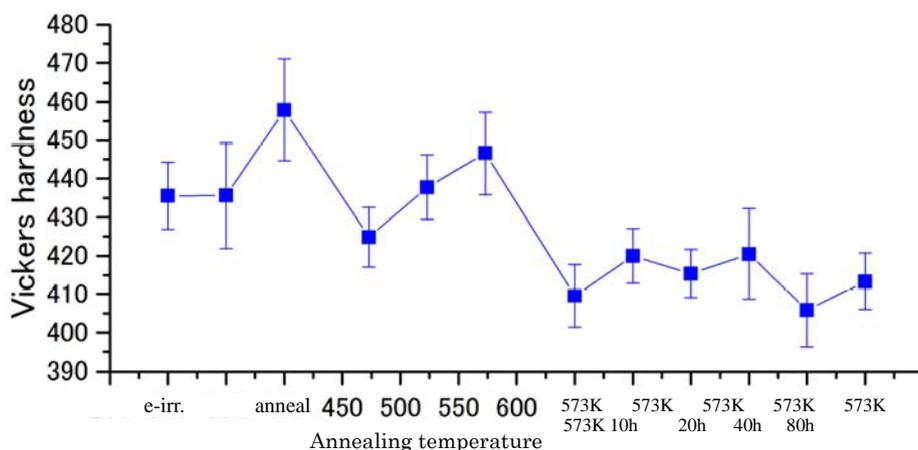


図1. 6.4×10^{-4} dpa の電子線照射後、水素チャージ、等時焼鈍、等温焼鈍したタングステンのビッカース硬さの変化。e-irr.は電子線照射、H.C.は水素チャージを示す。

成果報告リスト

なし

機械的合金化と高温等方加圧によるナノ粒子分散強化銅合金の微細構造における
高エネルギーイオン照射の影響

核融合科学研究所 室賀健夫

1. 目的

ヘリカル型核融合炉 (FFHR) の設計において、ダイバータの配置変更による中性子負荷の低減の可能性が明らかにされている。この中性子負荷の低減によってダイバータを構成する部材に適用する候補材料として銅合金が再び注目されている。過去に、高温強度、耐照射性に優れた合金として、アルミナ分散強化銅合金 (Glidcop) が、ダイバータ構成部材として検討され、数多くの試験結果が報告されている。核融合科学研究所では、Glidcop の製法や微細構造を改良することによる分散強化銅合金の大幅な特性改善を目的に、機械的合金化 (MA) と高温等方加圧焼結 (HIP) を組み合わせた新たな分散強化銅合金の製法 (MA-HIP 法) の研究を開始した。本研究ではこれらの合金特性の改善と同時に微細構造における照射損傷現象及びその強度特性への効果の理解のため、応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置を用いて、イオンビーム照射した分散強化銅合金の微視組織と強度を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

MA-HIP 法による種々の分散強化銅合金製作は次のように行った。基材となる純銅は 99.8 % の粒子を使用した。また添加粒子は、Gridcop® との比較のため、純度 99.98 % のアルミニウム (Al) を用いた。試料は、高純度不活性ガスグローブボックス内において、純銅に添加材を 1Wt.% となるよう Al を添加し、遊星型ボールミル装置により 250 rpm、1~32 時間 MA 処理を行った。その後、粉末試料を、500 °C の高温脱気処理に供した後、大気に曝すことなく軟鋼カプセルへ真空封入した。HIP 処理では、950 °C、150MPa の環境で 1 時間保持することにより焼結を行った。得られた焼結材について、カプセル開封後、光学顕微鏡 (OM) および走査型電子顕微鏡 (SEM) により組織観察を行い、ビッカース硬さ試験機を用いて機械的特性を評価した。また X 線回折装置を用いた MA 及び HIP 処理による格子定数の変化測定、電気伝導度の測定、透過型電子顕微鏡 (TEM) による内部組織観察により材料学的評価を行った。続いて、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置 (タンデム型加速器) で重イオン照射を行い、照射量及び照射温度をパラメータとした照射試料の準備を進めた。

3. 結果と考察

3-1. 合金の基本特性

回転速度を 250rpm に保ち MA 時間を進行させた結果、粉末は微細化した後、扁平化、等軸形粗大粉末へと変遷した。更に、MA ポットやボールへの凝着が抑制され、粉末の回収率が向上した。MA 時間の上昇に伴い、結晶粒形は層状となり 32 時間で局所的ではあるが微細化が見られた。この結果に対し、時間に対する結晶粒径とビッカース硬さの値を図 1 に示す。その結果、1 時間から 8 時間では結晶粒径の急激な減少とビッカース硬さの急激な上昇が見られた。8 時間から 32 時間では、大きな変化は見られなかった。この結果に対し、図 2 に結晶粒径の $-1/2$ 乗に対するビッカース硬さをプロットした結果を示す。粒径と硬度の関係を示す法則に Hall-Petch 則があるが、図 2 より、本試作合金では結晶粒径が大きいにも関わらず、Glidcop® と同程度の硬度を得た。従って試作材の強化機構として、結晶粒微細化だけでなく分散強化の効果が示唆されている。

図 3 は HIP 前後の X 線解析した結果を示す。MA 未処理材では明瞭に表れていた Al (200) は MA 開始に伴いほぼ消滅し、Cu(111) のピークはブロード化した。これは、MA 処理を施すことにより Al は Cu の母相中に固溶し、更に転位が導入され歪が蓄積されたためと考えられる。Cu(111) について、Bragg の条件から格子定数を評価した。MA 処理に着目すると HIP 前では格子定数が減少しているにも関わらず、HIP 後では MA 未処理材に近い値が得られた。これは、8 時間までの MA では、HIP 前後とも Al が Cu に固溶していたが、32 時間の MA では、HIP 後固溶した Al が析出し、マトリクスが純銅に近づいたためと考えられる。

内部組織観察には、TEM と付随のエネルギー分散型 X 線分光器 (EDS) を用いて、32 時間 MA 試料について内部組織観察とマッピングを行なった。その結果、Al が濃化した粒子が広い領域で観察された。また内部組織は、微細領域と粗大領域に分離され、粗大領域では、Al 濃化粒子は粒界に偏在し、マトリクスはほとんど純銅であった。一方、微細領域では粒界および粒内に Al 濃化粒子が観察された。以上の結果から、微細領域が強度を保っていると考えられる。

3-2. 照射試験

製作試料を 0.1mm 厚さ、3mm 径のディスクに打ち抜き、表面を電解研磨した。重イオン照射は、2.4MeV のCu²⁺イオンを用い 2×10^{-4} dpa/s の照射強度で0.1, 1, 5, 10, 20, 30 dpa 照射を進めている。また比較のため無酸素銅を600℃ 2 時間焼鈍した材料も同様に照射を進めている。現在ほぼ半分の照射試料の製作が終了し、マイクロビッカース硬度、TEM 観察の準備を進めている。

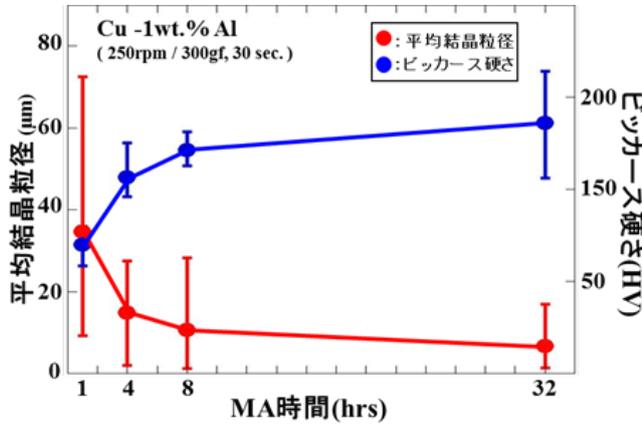


図 1 MA 時間の進行に伴う粒径とビッカース硬さ

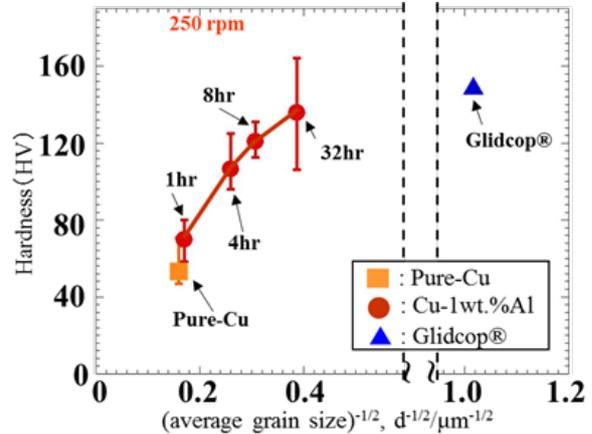


図 2 MA 時間の進行に伴う粒径と硬度の変化

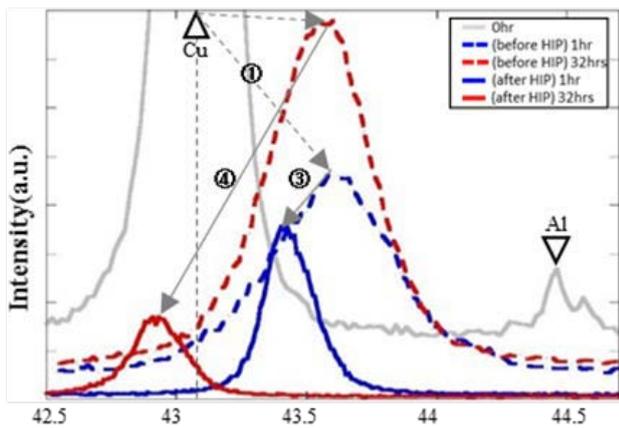


図 3 HIP 前後のX 線解析の結果

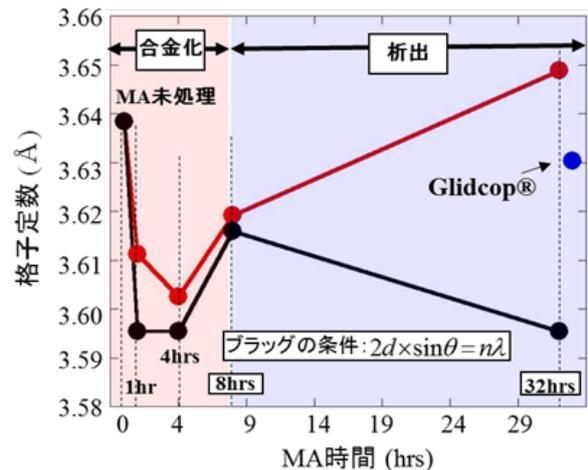


図 4 HIP 前後の格子定数の変化

4. 研究組織

室賀健夫、菱沼良光、能登裕之（以上核融合科学研究所） 渡辺英雄（九大応力研）

5. 発表論文

T. Yamada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, H. Nakamura, Development of a dispersion strengthened copper alloy using a MA-HIP method, Nuclear Materials and Energy, Volume 9, December 2016, Pages 455–458.

H. Watanabe, K. Yamasaki, A. Higashijima, H. Taguma, T. Nagasaka, T. Muroga, Microstructural changes of Y-doped V-4Cr-4Ti alloys after ion and neutron irradiation, Nuclear Materials and Energy, Volume 9, December 2016, Pages 447-450.

先進ブランケットを指向した酸化物絶縁被覆材の微細構造における 高エネルギーイオン照射の影響

核融合科学研究所 菱沼 良光

1. 研究目的

液体金属や熔融塩を用いた核融合先進ブランケットの要素技術開発において、MHD による液体金属の圧損や透過によるトリチウム漏洩の抑制は大きな課題である。その対策としてブランケット部材への酸化物被覆が検討されている。酸化物被覆層における中性子照射効果は、先進ブランケットを設計する上で、大変重要な因子である。しかしながら、中性子照射効果については国内的に原子炉が停止している事情も申ことながら、大変手間がかかる上に長期間の照射時間を要する。一方で、イオン照射は損傷領域が限定されるものの短時間で大きな照射量が期待できる。イオン照射は、中性子照射の加速試験に相当するものであり、酸化物被覆材の中性子照射効果を検討する上で重要な知見を与えるものである。そこで、九州大学応用力学研究所に設置されている重イオン照射が可能な高エネルギーイオン発生装置にて照射損傷された酸化物被覆層の微視的構造及び膜質の変化を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

$\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS316}$ 単層被覆材は核融合研の MOCVD 装置にて成膜された。 Er_2O_3 被覆は直径 10 mm、厚さ1mm の SUS 基板上に成膜し、その成膜条件は500℃の3時間とした。なお、 Er_2O_3 被覆材の厚さは約300 nm 程度であると確認した。 $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS316}$ 被覆材を九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器にて成膜表面に対してイオンビーム照射を実施した。なお、イオン源は 2.4 MeV の Cu^{2+} イオンとした。イオンビーム照射前にTRIM コードにて $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ における照射損傷速度を計算した後に、 Er_2O_3 酸化物層における照射量として室温にて 0.01 から 1.5 dpa 相当の Cu^{2+} イオン照射を実施した。

Cu^{2+} イオン照射前後の $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ 単層試料に微細組織や微細構造の観察は、X 線回折 (XRD) 走査型電子顕微鏡 (SEM) 及び透過型電子顕微鏡 (TEM) 等の分析装置を用いて実施した。なお、TEM 薄片化試料は、集束イオンビーム加工装置 (FIB) にて作製した。一方、 Cu^{2+} イオン照射前後の $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ 単層被覆材の膜質変化の 1 つとして、 Er_2O_3 被覆と SUS 基板との間の剥離強度に注目したスクラッチ試験も同時に実施した。図 1 にスクラッチ試験機の外観と原理を示す。スクラッチ試験は、自動車の多重塗膜や DLC 等の硬質被膜の剥離を数値化する目的で頻繁に用いられており、すでに日本工業規格 (JIS) にも認定されている試験法である。

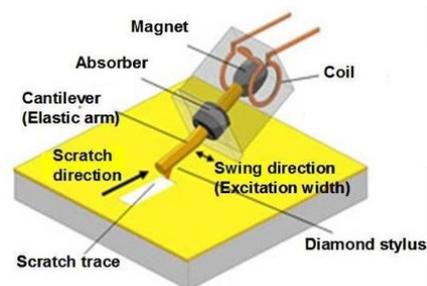


図 1 ナノスクラッチ試験機の外観と試験原理図

3. 結果と考察

3-1. Cu^{2+} イオン照射前後の Er_2O_3 被覆層の微細構造変化

図2 に Er_2O_3 被覆における Cu^{2+} イオン照射前後の制限視野電子回折 (SAED; Selected Area Electron Diffraction) パターンを示す。得られた回折パターンは Er_2O_3 相の指数として同定出来た。これは、1.5dpa のイオン照射をしても Er_2O_3 の結晶構造は維持されることを示唆している。また、XRD でもイオン照射前後の Er_2O_3 結晶に変化がないことが確認されている。これらによって、1.5 dpa の Cu^{2+} イオン照射でも、 Er_2O_3 結晶は十分な耐性を有し結晶構造が維持されることが分かった。今後の課題としては、高温下や更なる照射量での Er_2O_3 結晶の構造変化の検討が挙げられる。

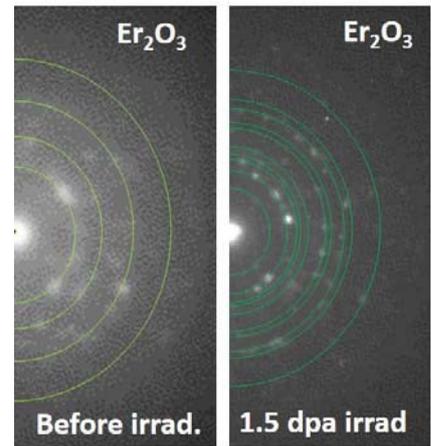


図2 Cu^{2+} イオン照射前後の Er_2O_3 被覆層の SAED 回折パターン

3-2. スクラッチ試験による $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ 層界面における剥離強度評価

スクラッチ試験は、ダイヤモンド圧子の荷重を増加させながら被覆膜に押し付けるために、摩擦力も増加する。被覆膜の表面を滑っている状態では、摩擦係数に比例して摩擦力は単調に増加する。しかしながら、膜の剥離が発生すると顕著な摩擦係数の変化が現れる。この摩擦力に変化が生じる荷重を剥離する臨界荷重とし、剥離強度として評価している。図3 に $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ 単層被覆の剥離強度における照射損傷量依存性を示す。照射損傷量の増加に伴って剥離強度は低下する傾向が観測された。1.5 dpa の照射損傷では、未照射と比較して約 85 %の強度まで低下した。照射損傷によって強度が低下する原因について考察する。図4 に 1.5 dpa の照射損傷を受けた試料の断面STEM像を示す。 Er_2O_3 層とSUS 基板の界面には、約 200 nm の厚さの反応層が生成している。また、この反応層は、照射損傷量の増加に伴って厚くなる傾向があり、照射損傷によって剥離強度が低下する主な要因は層界面に生成する反応層にあると考えられる。今後は、 Cu^{2+} イオン照射による剥離強度の低下と層界面付近に生成する反応層の相関について詳細に検討する必要がある。また、TRIM 計算コードでも明らかのように、界面及び SUS 基板での照射損傷量は $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ 被覆と比較して約 2 から 4 倍多いことから、照射損傷を受けた SUS 基板内での照射損傷過程と反応層の生成機構との相関についても検討する必要がある。

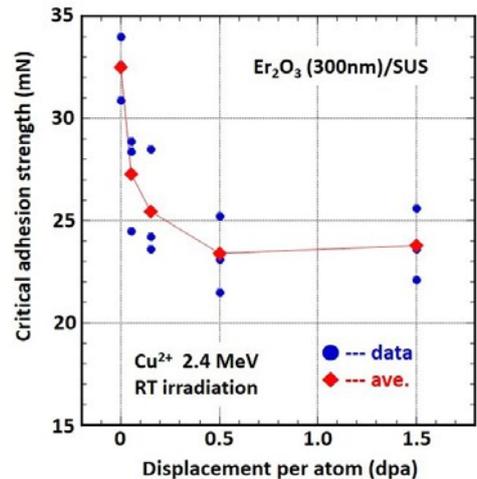


図3 $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ の剥離強度における照射損傷量依存性

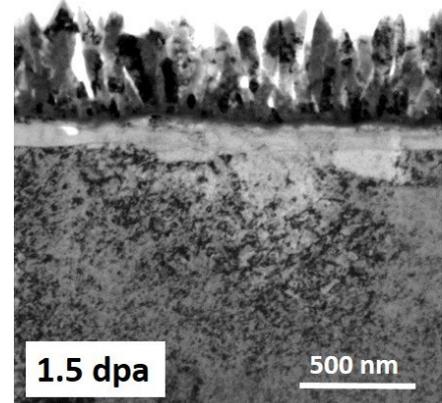


図4 1.5 dpa の照射損傷を受けた $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{SUS}$ 断面における STEM 像

粒内ベイナイトからなる鉄鋼材料の中性子照射後微細組織

(研究代表者) 阪本 辰顕¹⁾、仲井 清真²⁾、渡辺 英雄³⁾¹⁾愛媛大、²⁾愛媛大学名誉教授・客員教授および三浦工業株式会社社外取締役・監査等委員³⁾九大応力研

1. 緒言

耐照射損傷性に優れる合金を作製するために、照射欠陥のシンクを材料中に導入することが効果的であることが知られている。たとえば組織の微細化により界面を多量に導入することが望ましい。超微細な粒内ベイナイトのみからなる鉄鋼材料においては、幅数ミクロンのベイナイト・ラスが旧オーステナイト粒内に多方位に生成し、微細な組織が形成される。その結果、ラス界面が高密度に導入されるため、高い耐照射損傷性を有する鉄鋼材料が作製できることが期待される。我々はこれまでオーステナイト化処理の前に冷間圧延や（フェライト+オーステナイト）二相共存領域で等温保持を行うことにより粒内ベイナイトの生成を制御できることを明確にしている。これまでの中性子照射した試料の透過型電子顕微鏡（TEM）観察の結果、圧延の有無にかかわらず転位ループと思われるコントラストが観察された。しかし、これらの機械的性質との関連性はいまだ不明な点が多い。そこで本研究では、中性子照射を行った粒内ベイナイト鋼の TEM 観察を行い、機械的性質に及ぼす中性子照射効果を実験的に明らかにすることを目的とする

2. 実験方法

鉄鋼材料の化学組成を Table 1 に示す。室温で 0~10%の冷間圧延を施した後、750°Cで 60s の等温保持を施し、続いて 1400°Cで 300s オーステナイト化処理を施した。その後 500°Cで 20s のベイナイト生成処理を施した後、氷塩水中に焼入れた。熱処理を施した試料にベルギー・モル研究所に設置されている原子炉（BR2）で中性子照射を行った。照射条件を Table 2 に示す。

これらの鉄鋼試料と V 合金 TEM 試料をツイングジェット電解研磨法により作製した。TEM 観察を JEM-ARM200F（加速電圧 200kV）を用いて行った。

3. 結果および考察

Figure 1 に中性子照射を施した鉄鋼材料の明視野像を示す。圧延無しの試料（CR00 と称する）では見られない 10nm 程度の粒状の析出物が圧延 5%（CR05 と称する）と 10%（CR10 と称する）の試料では見られた。この析出物は中性子照射前にはこれまで見られていない。CR10 について、この粒状の析出物周囲の EDS マッピングを行った。その結果を Fig.2 に示す。析出物の箇所には Cu と S が検出された。このことから CR05 と CR10 において中性子照射によって Cu が析出したと考えられる。Fe 中の Cu の析出についてはこれまで多くの報告があり、析出初期には bcc、続いて 9R、最終的に fcc の構造になることが知られているが、本研究においては析出物の結晶構造はいまだ未確認であり、今後の課題である。

一方、引張試験の結果において、中性子照射による降伏強度の増加は CR00 で最も大きく、CR10 で最も小さかった。すなわち Cu の析出が見られない CR00 において降伏強度の増加が著しく、Cu が析

Table 1 鉄鋼試料の化学組成(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	N	O
0.075	0.25	1.45	0.001	0.001	0.2	0.003	0.002

Table 2 BR2 における中性子照射条件

specimen	capsule	cycle	temperature(°C)	fluence(n/m ²)
鉄鋼材料	14M-33BR	MICADO-8 CALLISTO	290	~1 x 10 ²⁴

出したと思われる CR05 や CR10 では降伏強度の増加が抑制されているため、Cu の析出の照射脆化への影響はほとんどないと考えられる。これは Cu が微細であるためであると考えられる。

4. 論文と学会発表

今年度はありません。

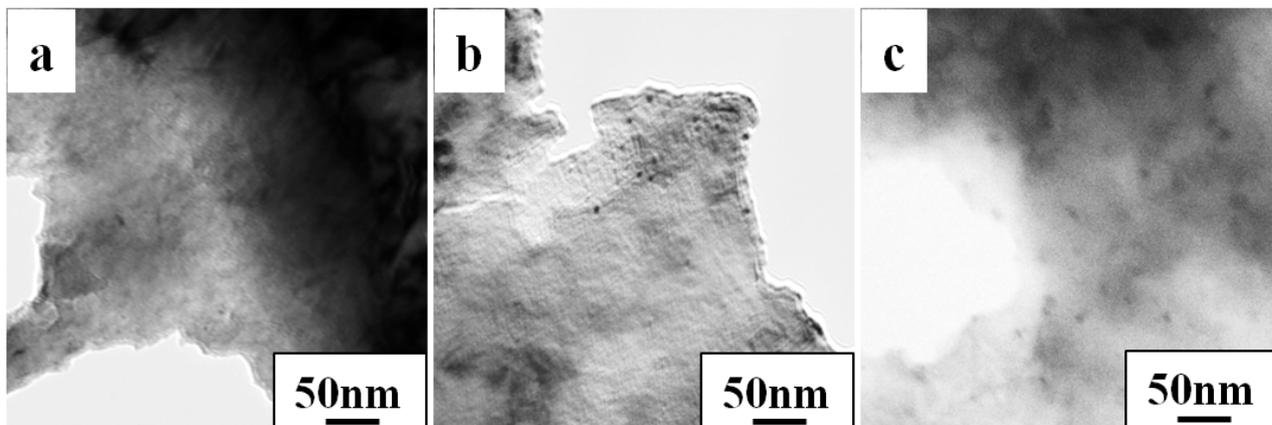


Fig.1 鉄鋼材料の中性子照射後の TEM 写真. (a) 圧延無し、(b)圧延 5%、(c)圧延 10%.

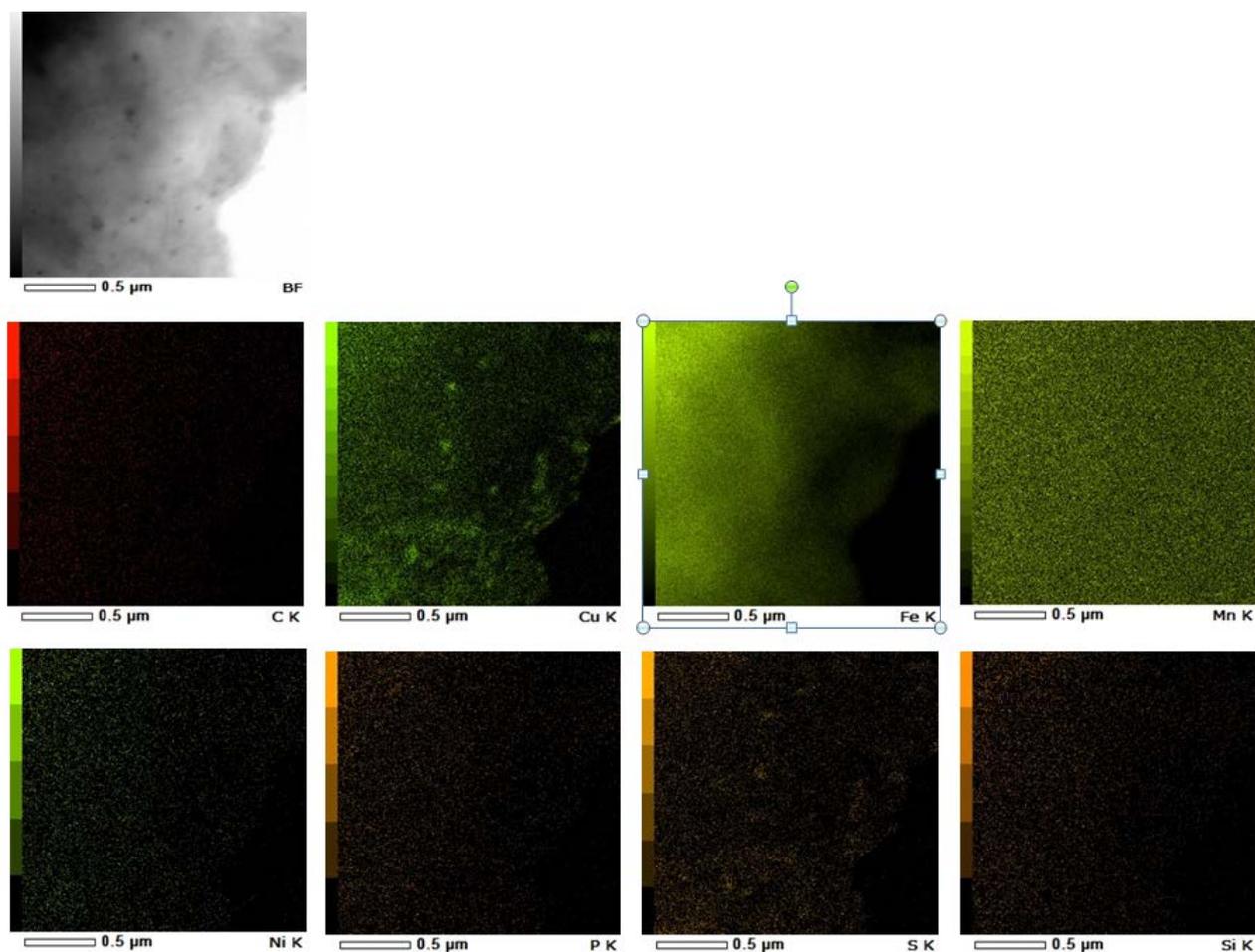


Fig.2 圧延 10%の試料における中性子照射後の TEM による元素マッピング.

乱流輸送シミュレーションにおける 計測シミュレータを利用した系統的な Validation 解析法の確立

核融合科学研究所 ヘリカル研究部
沼波 政倫

研究の目的

磁場閉じ込め核融合研究において、高温プラズマの異常輸送機構の解明と定量的な輸送予測は最重要課題の一つである。ジャイロ運動論的シミュレーションによる数値解析は、5次元位相空間上の分布関数の発展を扱うことが出来、乱流輸送の物理解明には強力な解析手法である。計算コードや計算機の発展に伴い、ジャイロ運動論的手法による多くのシミュレーションが実行できるようになってきたが、一方で計算結果に対する定量的な解析の重要性が増している。本研究課題の目的は、ジャイロ運動論的乱流シミュレーションに対する乱流計測シミュレータ[1]を用いた実験計測模擬の手法をさらに発展させ、系統的なValidation 解析を念頭に新しい乱流解析の手法を確立することである。これまでに実施した共同研究課題では、乱流揺動分布の解析に威力を発揮する位相コントラスト・イメージング (PCI) による数値計測を実行し、乱流揺動のスペクトル構造や空間分布を解析することが可能になってきている。本研究課題では、計測シミュレータを用いて現実の実験計測により即しながら、ジャイロ運動論的シミュレーションを系統的で定量的な乱流解析手法に発展させることを目的とする。

研究方法

本研究課題では、局所フラックス・チューブ近似の下での実施したジャイロ運動論的コード「GKV-X」[2]による乱流シミュレーションから得られるデータを基礎にして進める。これまでに実施した主にヘリカル系におけるジャイロ運動論的シミュレーションでの乱流揺動データ(磁力線に沿った3次元揺動分布データ)を乱流計測シミュレータに渡し、PCI 模擬計測を実行する。ここでは、計測視線方向に沿った線積分値をPCI 計測であると解釈した上で、再構成された局所スペクトルの空間解像度についても評価する。

- 実験での計測を模擬したシミュレーション
これまでに得られたGKV による乱流シミュレーション・データ、特に密度揺動のデータから、PCI での計測視線に考慮しながら計測模擬を行う。PCI はプラズマの密度揺動についての高い解像度での波数スペクトルを得る計測手法であるが、ここでの計測シグナルは視線垂直方向に有限の空間領域を伴って視線方向に沿った積分値として得られる。
- 径方向に渡った計測模擬シミュレーション
GKV は局所フラックス・チューブ・コードであるため、径方向に渡った計測模擬を行うために、同一の実験ショットに対応した複数のフラックス・チューブで実施した GKV シミュレーション結果を用意し、図 1 のように共通の計測視線を用いてPCI の計測模擬シミュレーションを行う(図 1)。計測模擬で得られる密度パターンからフーリエ変換によって波数スペクトルを得る。

今年度の成果

今年度は、実験での計測視線を模擬しながら、径方向に渡った計測模擬シミュレーションを実施し、そこから得られた PCI シグナルについて詳細に評価した。線積分を行って得られた PCI シグナルから、局所的な値を解像することが課題であるが、磁場配位データから得られる磁力線のピッチ角情報がその解像に有益になる。また、局所的なスペクトルを評価するには、乱流シミュレーションデータの空間解像度に十分に注意しておく必要がある。図 2 は、局所揺らぎと積分シグナルの分解から得た波数-周波数スペクトルである。これより、ある波数と周波数の領域に揺動ピークが現れていることが分かる。

まとめ

数値計測シミュレータは、プラズマ・シミュレーションと実際の実験計測結果を直接比較が可能にする強力なツールである。本課題では、特に、乱流構造の理解に強力な手法の一つとなる PCI 計測の模擬を実施し、計測シミュレータにおける PCI 計測モジュールを複数の磁気面におけるフラックス・チューブ上で実行されたジャイロ運動論的乱流シミュレーションの乱流密度揺動データに適用し、計測模擬されたスペクトルデータを得た。数値計測シミュレータは、今回の PCI 計測モジュールだけでなく、プラズマ中の電場計測に威力を発揮する HIBP 計測のモジュールなど、他の計測模擬手法も有している。今後は、新古典的粒子シミュレーションで得られる密度分布データへの HIBP 計測模擬など、適用範囲を大きくし、乱流シミュレーションに加えて、運動論的シミュレーション研究の Validation 解析の強力なツールとして、実際の実験計測への貢献に繋げていきたいと考えている。

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] N. Kasuya, *et al.*, Plasma Sci. Technol. **13**, 326 (2011).
- [2] M. Nunami, *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, 016 (2010).

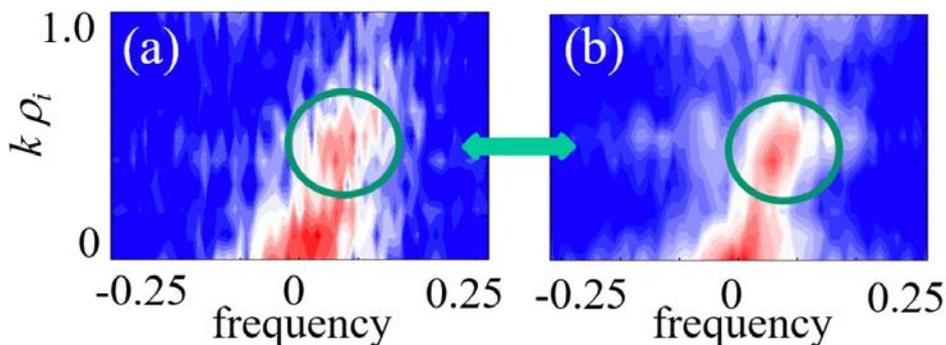


図 2: 局所揺らぎ(a) と積分シグナルの分解(b) から得た波数-周波数スペクトル。

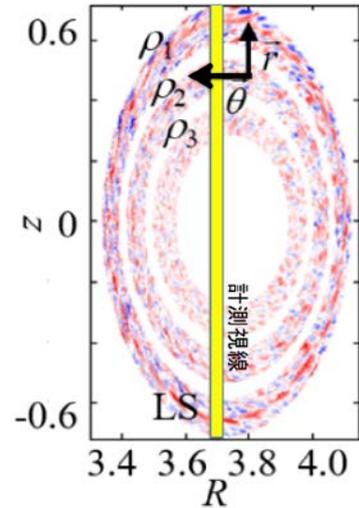


図 1: 複数のフラックスチューブにおける乱流シミュレーションデータと模擬計測視線。

鉄系合金の電磁気特性と照射ナノ組織の関係

岩手大学理工学部 物理・材料理工学科 鎌田康寛

目的

原子炉圧力容器 (RPV) に内貼されたステンレス鋼クラッド材は、 γ オーステナイト相を母相として、溶接割れを防ぐため10%程度の δ フェライト相を含む二相構造をとる。約300°Cの照射環境下で長期運転した場合、ナノ・マイクロ組織に変化が生じて機械・腐食特性が低下し劣化する可能性がある。铸造二相ステンレス鋼では、300-500°C程度で長時間熱時効した際にフェライト相で鉄とクロムが二相分離して脆化することが知られており、二相分離に敏感な電磁気計測による非破壊脆化評価法の研究提案がなされている。一方、電磁気特性の変化と脆化材のナノ組織との対応関係および、熱と照射が脆化に与える相乗効果について、十分に解明されていない。本年度は、(1) 二相ステンレス鋼バルク材を用いて、500°C時効で熱脆化を生じさせた際の、硬度および磁気特性の変化とナノ組織との関係を調べた。並行して、鉄系合金の磁気特性に与える照射効果を明らかにするため、(2) Fe-Ni 合金のエピタキシャル単結晶膜を用いて、重イオン照射実験を行った。

研究成果 1 (二相ステンレス鋼の熱時効ナノ組織)

実用二相ステンレス鋼 (S32750、Fe-25Cr-7Ni-4Mo) の厚板から放電加工機により薄板試験片 (15×3×1mm) を切り出し、真空加熱炉を用いて 500°Cで 480 時間まで所定の時間時効した。マイクロビッカース硬さと研究室で組上げた装置で磁気ヒステリシス計測を実施した。さらに FIB 加工によりフェライト相領域を切り出し、ARM (JEOL 原子分解能分析電顕、九大) を用いて時効による元素分布の変化を調べた。

図 1 に、マイクロビッカース硬さとヒステリシス計測より求めた保磁力の熱時効時間依存性を示す。硬さは時効初期に大きく増加して一定傾向を示した後、長時間時効でさらに大きく増加した。保磁力も同様の变化挙動を見せたが、特に長時間時効による増加量が大きかった。図 2 に 50 時間および 480 時間時効後の二相ステンレス鋼の、Cr および Mo のEDS 元素マップを示す。50 時間時効材では粒界付近で Mo の偏析が見られるが、粒内で顕著な変化は見られなかった。一方、480 時間時効材では、Cr の二相分離と Mo 系化合物の析出が確認された。後者の析出物は、磁壁幅と同程度のサイズで非磁性であると予想されることから、磁壁のピン止めが強いと推測され、保磁力増大の主因と考えられる。

研究成果 2 (Fe-Ni 合金の磁気特性に与える照射効果)

超真空電子ビーム蒸着法により、厚さ 200nm の Fe-39at%Ni 合金 および Fe-31at%Ni 合金を、MgO(001)基板の上に 500°Cで成長させた。成膜後に 1000°Cでアニールし、EBSD 測定に相判定と方位解析を行った。図 3 に極点図を示す。いずれの薄膜も、fcc-Ni(001)[100]/MgO(001)[100]の方位でエピタキシャル成長していることを確認した。これらの試料をタンデム型加速器 (応力研) で 2.4MeV Cu²⁺により室温でイオン照射した。2 つの合金薄膜の未照射材、0.9dpa 照射材の磁化曲線を図 4 に示す。Fe-39Ni 合金では顕著な変化は見られなかったが、Fe-31Ni 合金では磁化曲線の形状が変化するとともに、磁化温度曲線の測定から母材に比べてキュリー温度の高い磁性相が照射により生じていることを確認した。35%Ni 前後の Fe-Ni 合金はインバー合金と言われ、磁氣的に特異な性質を示すことが知られている[文献]。空孔の形成に伴う原子間距離の拡大や、カスケード損傷過程での短距離秩序化が生じ、低 Ni 組成の Fe-Ni 合金の磁性に影響を与えた可能性が考えられる。

まとめ

実用二相ステンレス鋼の熱時効材のナノ組織評価を行い、非破壊脆化評価を実現する上で不可欠となる磁気特性とナノ組織の関係を明らかにした。また、Fe-31%Ni 合金の磁気特性が、イオン照射により大きく変化することを明らかにし、磁性相の安定性の観点から原因を考察した。照射環境下で使用する磁性材料の安定性を考える上での一つの指針となる成果と考える。

参考文献：M. Schilfgaarde, I. A. Abrikosov, B. Johansson, Nature, 400 (1999) 46-47.

成果報告：Y.Kamada, T. Kabutomori, J.N. Mohapatra, S. Kobayashi, H. Watanabe

“Nanoscale-structures and magnetic properties of neutron and ion irradiated Fe-Cr binary alloys”, 4th Nuclear Materials Conference, NuMat2016, P1-51, Nov. 7, 2016, Montpellier, France ほか

研究組織：鎌田康寛, 小林悟, 村上武, 高橋智史, 小宅智樹：岩手大・理工、渡辺英雄：九大・応力研

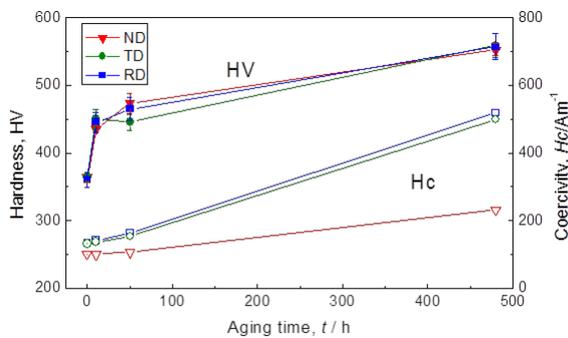


図 1 硬さと保磁力の時効時間依存性 ND,TD,RD は切出方向 (試験片長手方向)

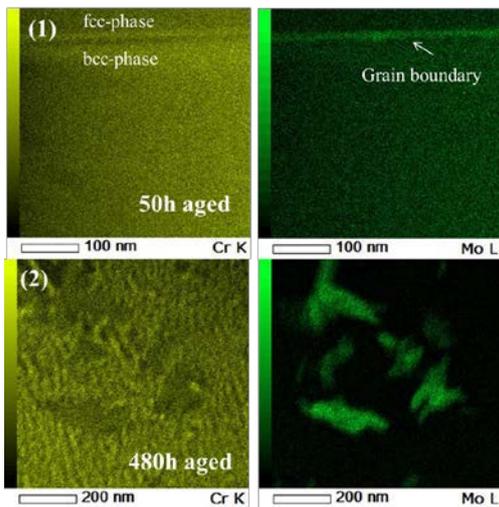


図2 500°C熱時効材のCr 及びMo 分布 (1) 50 時間後 (2) 480 時間後

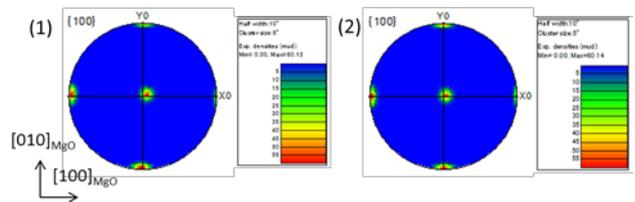


図4 Fe-Ni 薄膜の{100}極点図 (1) Fe-39Ni、(2)Fe-39Ni

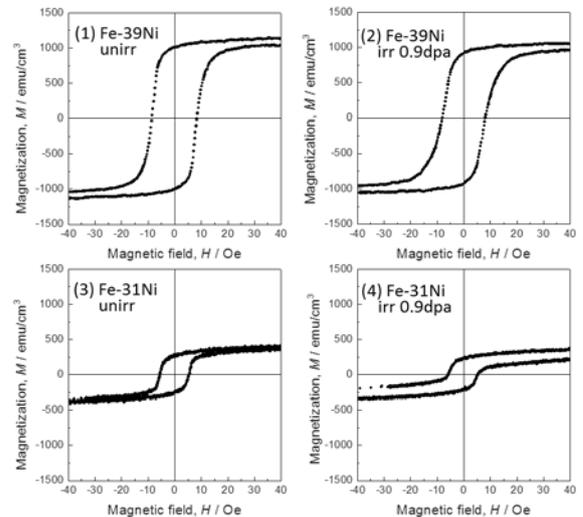


図4 Fe-Ni 薄膜の室温磁化曲線, Fe-39Ni :(1)未照射材 (2)照射材 Fe-31Ni :(3)未照射材 (4)照射材

大規模シミュレーションによる MHD 不安定性の 3 次元構造解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 佐藤雅彦

LHD 実験においては、体積平均ベータ値が約 5% のプラズマが得られている。このような高ベータ LHD プラズマでは、周辺部に磁気丘が存在するため、理論的には周辺部にて MHD 不安定である。このような高ベータ LHD プラズマの MHD 特性を明らかにするため、非線形 MHD コードである MIPS コードを用いた解析を進めている。これまでに行ってきたシミュレーションでは、周辺部にて抵抗性バルーニングモードが不安定であるが、非線形状態において MHD 不安定性の影響がコア領域へおよび、最終的にはコア崩壊が引き起こされることを示してきた。本研究では、このコア崩壊現象の解析を進め、コア崩壊現象のメカニズムの詳細について調べた。

本研究で用いた MIPS コードは、一流体 MHD 方程式を初期値問題として数値的に解くシミュレーションコードである。円柱座標系のもとで微係数を 4 次精度の中心差分で離散し、時間積分については 4 次精度のルンゲ・クッタ法が用いられている。MPI により並列化が行われており、大規模計算が可能なシミュレーションコードである。MHD 平衡は、入れ子状の磁気面の存在の仮定を用いない HINT2 コードを用いて構築した。この構築した MHD 平衡に対して、微小な初期摂動を加え、その後の物理変数の時間発展を MIPS コードで計算することになる。物理現象の解析のため、円柱座標系で得られた物理変数を Boozer 座標系上でフーリエモード展開を行っている。そのため、HINT2 コードで構築した MHD 平衡に対応した Boozer 座標系を構築する必要がある。この Boozer 座標系は、VMEC コードと NEWBOZ コードを用いて行う。その構築方法は次の通りである。まず、HINT2 コードで得られた MHD 平衡に対して、磁力線追跡を行い、最外殻磁気面を同定し、最外殻磁気面の形状データを取得する。その最外殻磁気面を境界条件として、VMEC コードにより MHD 平衡の再構築を行う。VMEC コードで得られた VMEC 磁場スペクトルデータを、NEWBOZ コードで Boozer 磁場スペクトルデータを取得する。

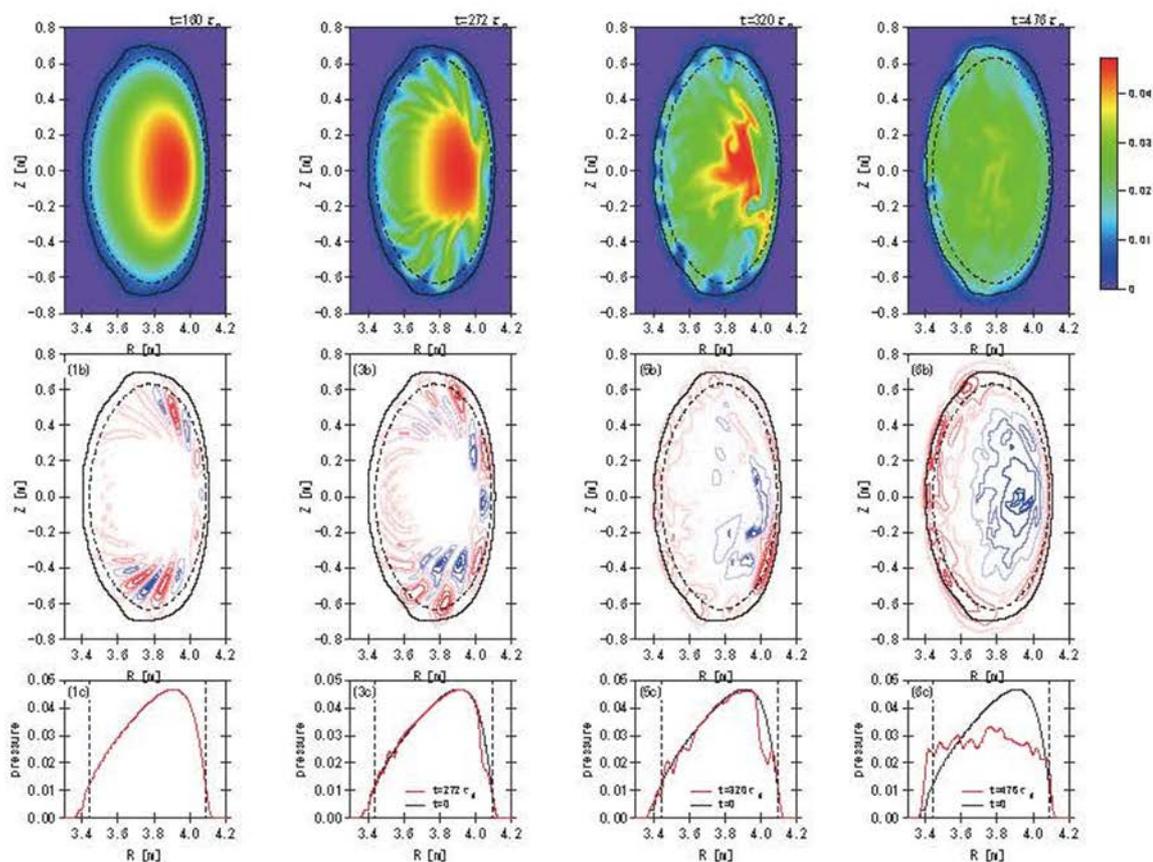


図 1. 縦長断面での圧力分布（上段）、摂動圧力分布（中段）、 $z=0$ 上での圧力分布（下段）の時間発展。

本解析では、中心ベータ値が 9.2% の MHD 平衡を考え、磁気レイノルズ数は 10^5 を仮定した。線形計算によれば、この平衡はトロイダルモード数 n が $10 \leq n \leq 15$ のモードが最も線形不安定であった。

図 1 に非線形シミュレーションで得られた縦長断面での圧力分布、摂動圧力分布、 $z=0$ 上での圧力分布の時間発展を示す。非線形初期段階では、線形不安定モードにより、周辺部にて圧力の平坦化が見られるが、最終的にはコア領域全体で圧力分布の平坦化が発生する。モードごとの時間発展を調べると、非線形初期段階に低次モードの急速な成長が見られる。この低次モードは周辺部にて発生するが、次第にコア領域へ広がっていく。線形段階と非線形段階における $n=1 \sim 3$ の径速度のモード構造を図 2 に示す。ここでは、ポロイダルモード数は $1 \leq m \leq 5$ に対して示している。赤の太線は $(m,n)=(1,1)$ モードに対応する。この図から、コア領域にて $(m,n)=(1,1)$ が他のモードよりも増加していることがわかる。この $n=1$ のフローパターンは図 3 の通りになる。磁気軸にて有限な振幅を持つため、コア領域をシフトする流れになっている。この流れによって中心から周辺への輸送が起こり、中心圧力の低下が起こる。詳細なモード解析を行ったところ、 $(m,n)=(1,1)$ の径速度は、主に、 $n=10$ と $n=11$ のモードカップリングにより増大していることがわかった。非線形段階のコア領域では低次モードが支配的となり、非線形的に生成された低次モードの自己相互作用によるモードカップリングが原因で、中心圧力の著しい低下が発生することがわかった。

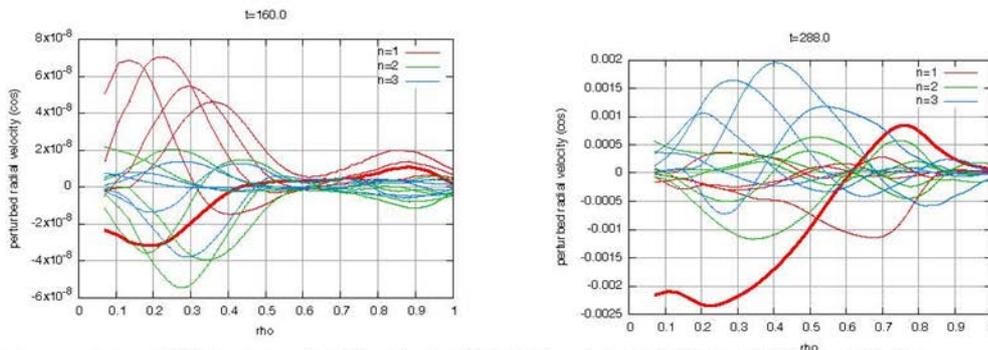


図 2. $n=1 \sim 3$ の径速度のモード構造。左図は線形段階、右図は非線形初期段階に対応する。

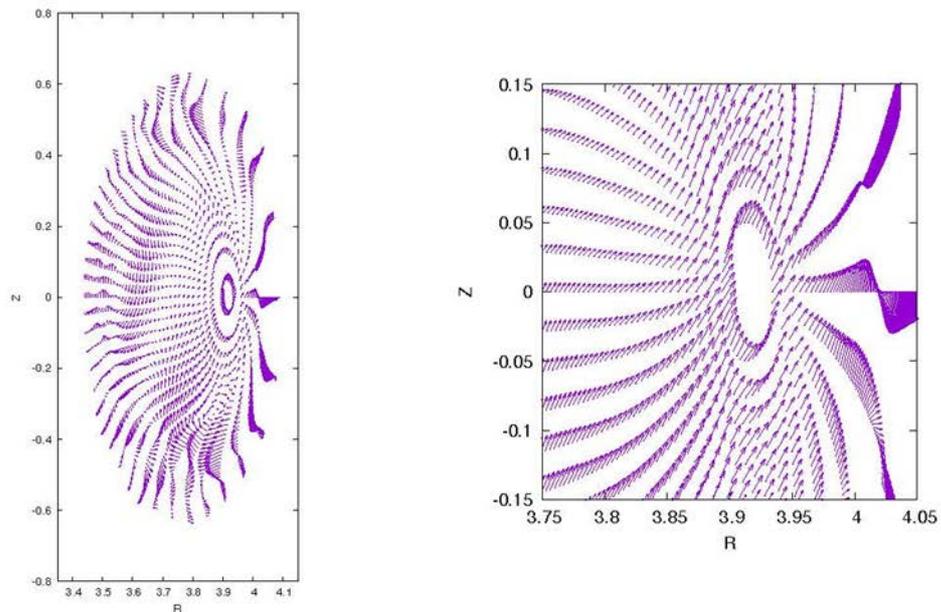


図 3. 非線形初期段階における $n=1$ のフローパターン。右図は、コア領域を拡大した図である。

高 Ni 鋼材料の微細組織安定性に関する研究

原子力機構 井上 利彦

1. はじめに

高 Ni 鋼は、良好な耐スエリング特性を有していることから燃料被覆管材料として開発されている一方、照射や高温熱時効にともなう延性の低下が課題である。照射実績を有する Nimonic PE16 では γ' ($\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$) 析出物の粗大化や粒界での再析出が延性低下の要因の一つとされている^[1,2]。これら課題を克服するため、JAEA では Nimonic PE16 で利用している γ' 析出型とは異なる炭窒化物析出型の高 Ni 鋼 (15Cr-35Ni 鋼) と、 γ' よりも安定と考えられる γ'' (Ni_3Nb) を加えた γ'/γ'' 析出型の高 Ni 鋼 (15Cr-43Ni 鋼) の 2 鋼種を開発し、特性評価を進めている。本研究では、耐スエリング特性や照射下での微細組織安定性の評価を目的として、系統的な条件での照射試験が可能な TIARA にてイオン照射を行った。

2. 実験

供試材は主に 2 種類の高 Ni 鋼 (①15Cr-35Ni 鋼 (0.05C-15Cr-35Ni-2.3Mo-1.5W-0.4Nb-0.2V (wt%), 23%CW +720°C × 10hr)、②15Cr-35Ni 鋼-28 (0.05C-15Cr-35Ni-2.3Mo-1.5W-0.4Nb-0.2V (wt%), 23%CW +720°C × 10hr+10%CW) とした (表-1、2 参照)。また、耐スエリング特性の相対比較のために、中性子照射データが豊富な PNC316 鋼 (0.05C-16Cr-14Ni-2.5Mo-1.8Mn-0.7Si-0.025P-0.004B- 0.1Ti-0.1 (Nb+Ta) (wt%), 20%CW) を同時に照射した。照射条件は、トリプルビーム照射モード (12MeV-Ni³⁺イオン、1.05MeV-He イオン、380keV-H イオン) において、試験温度 550、600、650°C、照射量 100、250 dpa (同時照射における He イオン及び H イオンの注入量は 100 dpa において、それぞれ 100appm、1500appm) とした。その後、各試料の損傷領域について集束イオンビーム装置 (FIB) による試料加工及び透過型電子顕微鏡による微細組織観察を行った。

3. 結果と考察

2 種類の高 Ni 鋼のボイドスエリング (体積率) の照射量依存性を図 1 に示す。比較材の PNC316 鋼及び 15Cr-35Ni 鋼で顕著なボイドスエリングが認められた照射温度 600°C において、10%冷間加工を加えた 15Cr-35Ni 鋼-28 は、耐スエリング特性が照射量 250dpa においてもボイドスエリングが低く抑えられていることを確認した。照射量 100 dpa 試料では、15Cr-35Ni 鋼-28 (製造まま材) を用いた転位密度評価や微細組織観察の結果から、高い転位密度及び転位上の微細な炭化物の析出物を観察していることから、照射欠陥のシンクサイトとして追加工した加工転位が有効に働いたため、15Cr-35Ni 鋼-28 の体積変化率が抑えられたと考えられる。照射量 250 dpa 試料においても、体積変化率が抑えられていた。この理由として、PNC316 鋼と 15Cr-35Ni 鋼-28 の析出物数密度は同じレベルに低下していると考えられるため、高 Ni 化により体積変化率が抑えられたと考えられる。

	Ni	Cr	Mo	W	Nb	V	Ti
15Cr-35Ni	35	15	2.3	1.5	0.35	0.2	0.01
15Cr-35Ni-28	35	15	2.3	1.5	0.32	0.2	<0.01
PNC316	14	16	2.5	-	0.1 (Nb+Ta)	0.01	0.10

表-1 供試材の化学組成

15Cr-35Ni	SA(1,130°Cx2min)+23%CW+HT(720°Cx10hr)
15Cr-35Ni-28	SA(1,130°Cx2min)+23%CW+HT(720°Cx10hr)+10%CW
PNC316	SA(1,095°Cx1min)+20%CW

(SA:Solution Annealing, HT:Heat Treatment, CW:Cold Working)

表-2 供試材の加工熱処理条件

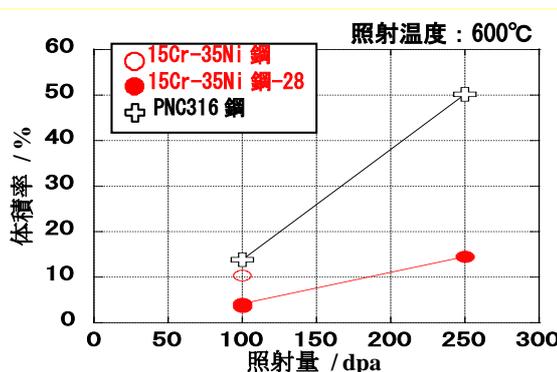


図 1 各鋼種のスエリング特性の照射量依存性

低エネルギーヘリウムプラズマ照射によるナノブリスターの形成機構

九州大学応用力学研究所 吉田直亮

1. 緒言

核融合炉におけるダイバータ材やプラズマ対向壁材の候補として高融点でスパッタリング損耗が少なく熱伝導性にも優れたタングステン及びその合金が有力な候補材料と考えられており、近年様々な視点から集中的に研究が行われている。W は本来脆い材料であり高い熱負荷によって発生する内部応力に十分耐えられるかなど、課題も多いのが現状である。また、核融合炉環境下では高い熱負荷のみならず燃料である水素同位体や核融合反応によって発生するヘリウムのプラズマや中性粒子による激しい照射損傷も懸念される。特に、He 原子が集合することによって発生するHe バブルは、ダイバータで問題となる 1000°C 以上の高温においても表面に特異なファズ構造を形成することが報告され、近年大きな関心を集めている。一方、炉壁では比較的溫度が低い（600°C 程度）ファズ構造のようなドラスティックな表面劣化現象はこれまで報告されておらず一般的な関心は比較的低い。

核融合科学研究所のLHD では一般的なH プラズマ放電に加えHe プラズマ放電も頻繁に行われている。例えば第 18 サイクル (C-18、2014 年) では約 1/4 がHe 放電であり、プラズマ対向材料への影響が特に大きい長時間放電では専ら He が用いられている。本研究では He による長時間放電が頻繁に行われるようになったC-15 から C-18 においてプラズマ曝露された W 等におけるナノレベルでのプラズマ照射損傷について研究した。

2. 実験方法・結果・考察

プラズマとの相互作用が強いLHD の Inner Board 部(図 1 9I-3, 9I-5 位置等)にW およびSUS316L の板材や予め薄膜化した試料を設置し、C-15 から C-18 のプラズマに曝露した。試料は各キャンペーン終了後取り出し、板材からは収束イオンビーム加工装置を用いて断面薄膜試料を切り出した後、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いてプラズマ対向面直下の微細組織を調べた。また、走査型電子顕微鏡による表面組織観察やナノインデントを用いたプラズマ曝露面の表面硬度測定も合わせて行った。

図 2 にあらかじめ薄膜化した後プラズマ曝露した W 薄膜試料 (厚さ 80nm 程度) の TEM 写真である。明視野像には直径数 nm の白点像や 20nm を超える明るい像が大量に見られる。また、暗視野像 (g=(110)) では更に微細な像が全面を埋め尽くしている。これらの像はプラズマ曝露によって大量のナノサイズのキャビ

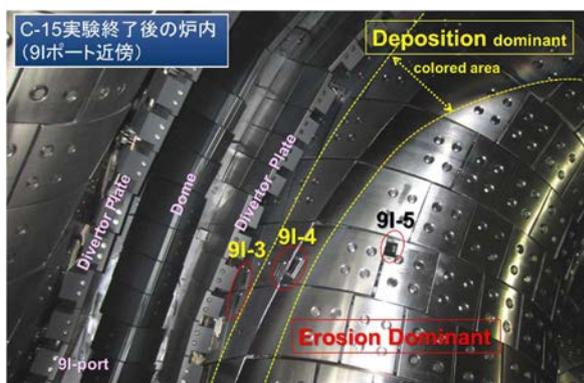


図 1 LHD 炉内写真。損耗ドミナントな 9I-3、9I-5 等に試料を設置

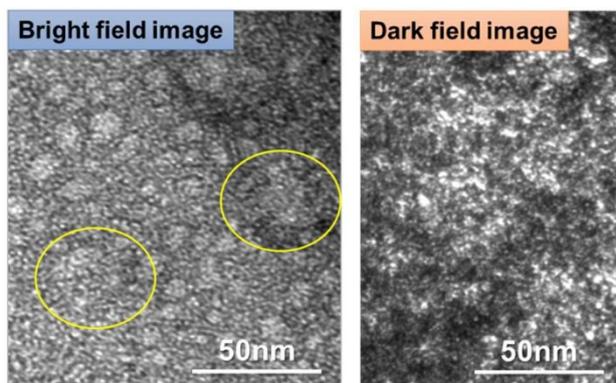


図 2 W 薄膜試料の透過電子顕微鏡写真。
C16 9I-5 W

ディリーや転位ループが発生していることを示している。大きい明るい像は成長してキャビティーあるいは剥離による膜厚の減少を示している。これまでの基礎研究からこのような激しい損傷を起こすことができるのはHe プラズマのみであることが解っており、これらの照射欠陥はHe を用いた長時間放電下で形成されたものと言える。典型的な He プラズマ放電下でのプラズマ対向面における He deposition rate (apa/s) と vacancy の発生速度 (dpa/s) の深さ分布を図3に示す。長時間放電では数分から数10分間放電が持続することを考えると、すさまじい量の He と欠陥が導入されていることが理解できる。実際、プラズマ曝露した試料における He は深さ約 50nm 程度までの領域に

強く捕捉され、表面近傍での濃度は 20at%程度に達していることが別途行った GD-OES 分析から明らかになっている。これらの事から微細なキャビティーは内部に大量の He を含む He バブルであることがわかった。図4は典型的なプラズマ曝露 W の断面 TEM 写真である。直径数 nm 以下の微細な He バブルは主に深さ 20nm 以上の領域に分布しており、深さ 60nm の領域まで存在が確認できる。一方、表面から 20nm 程度までの領域では直径 5-10nm 程度まで成長した球形の He バブルが多く見られる。更に表面層では深さ約 10nm 程度の局所的な剥離が多数発生している。部分的な表面剥離は走査型電子顕微鏡によっても確認した(図5)表面の微細な窪みは He の高い内圧によってバブル間に亀裂が走り発生するブリストアの表皮(蓋)が欠落してできたものと思われる。一般的にはプラズマ対向材料の損耗量はスパッタリング損耗を想定して評価されているが、今回の実験結果は W の場合ブリストリングも重要な損耗プロセスであることを示唆している。

図4に見られるように表面直下約 155nm の領域は黒ずんだコントラストを持っており、試料を傾斜シブラッグ条件を変えてもコントラストは殆ど変化しない。このことはこの領域の結晶格子が発生した転位ループやバブルによって激しく歪んでいることを示唆している。また、XPS, GD-OES 及び EDS による表面分析からこの表面直下領域には Heのみならず、C、O、B 等が相当量混入しておりいわゆるミキシング層が形成されていることも判っている。大量の照射欠陥や不純物元素が存在する最表面直下は本来脆い W を更に固くし脆くしていることが想定されたため、ナノインデントを用いて表面近傍の硬度を測定した。図6に示すように表面下15nm 程度までの領域の硬度は非照射材の7倍の硬度を示し、ブリストリングによって表面層が容易に剥離し損耗が起り易い条件になっていることが確認できた。W とは対照的に、高い靱性を持つ SUS316L では W と同様大量のバブルが形成されているにもかかわらず表面につながる亀裂は観察された

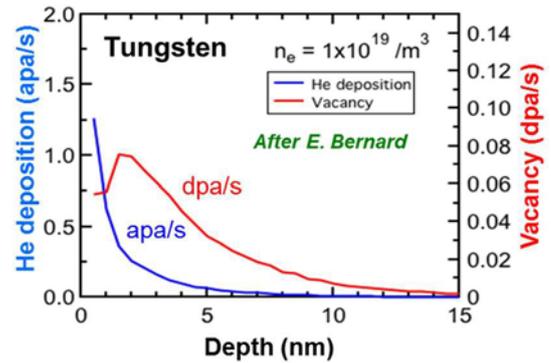


図3 LHDにおけるHe主放電下のHe注入(apa/s)と弾き出し損傷(dpa/s)の深さ分布

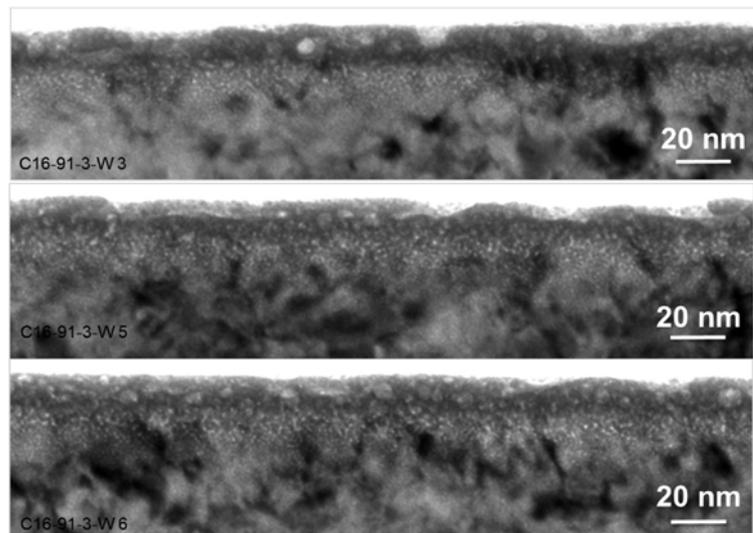


図4 損耗ドミナント領域(C16-9I-3)に置いたWの断面TEM写真。表面近傍に種々の激しい損傷が発生。

ものの表面層が剥離したと思われるような窪みは殆ど認められなかった。

最後に、この様なナノブリスター形成による損耗が核融合炉の第一壁で起こりうるかどうかを考察する。核融合炉環境と LHD 環境の大きな違いは：①LHD の炉壁温度は高々150°C 程度と低い。②LHD では He と H の照射は単独で起こるのに対して、核融合炉では同時照射となり He のフラックスは水素同位体の 1/10 程度である。これまでの研究から He 照射下の He バブルの発生・成長過程は 600°C においても室温と大差なく、ナノサイズのバブルが大量に発生することがわかっている。また、水素と格子欠陥との強い相互作用は精々 400-500°C 程度までであり核融合炉で問題となる 600°C では H が He の挙動に強い影響を与えることは考え難い。以上の観点から、核融合環境下においても LHD で見られたようなナノブリスター形成による損耗と剥離したブリスター表皮のプラズマへの混入によるプラズマ汚染が想定され、W 壁の寿命やプラズマへの影響を評価する上で無視できない現象である。線形プラズマ発生装置等を用いた定量的な基礎研究が期待される。

現在、LHD で長年にわたりプラズマ曝露された保護板（ステンレス鋼）について同様な研究を進めている。この結果が纏まり次第、来年度になるが、今回報告した成果も合わせて学会での発表および論文の投稿を予定している。

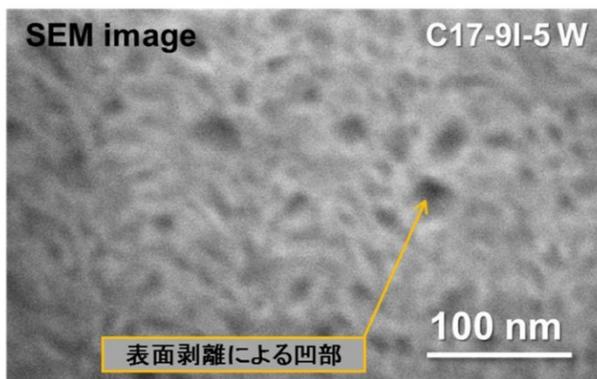


図5 損耗ドミナント領域 (C17-9I-5) においてプラズマ曝露した W の表面形状を示す SEM 写真。

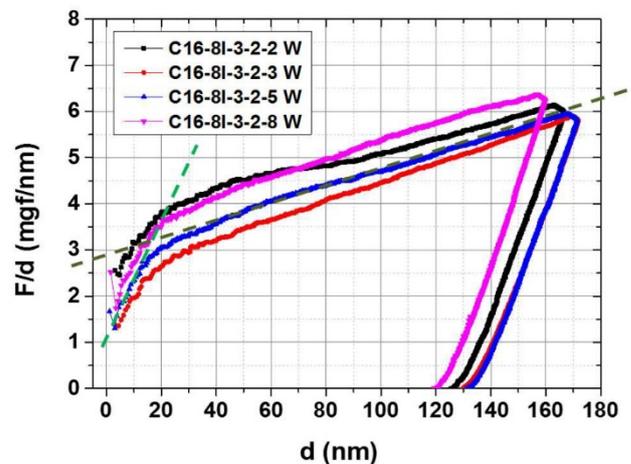


図6 損耗ドミナント領域 (C16-8I-3) においてプラズマ曝露した W のナノインデントを用いた硬度評価

プラズマ乱流における非線形伝搬と、局地集中豪雨の統計解析への応用の研究

(Nonlinear Propagation Phenomena in Plasma Turbulence

and Its Application to Statistical Analysis of Localized Torrential Rainfall)

杉田 暁¹、佐々木 真²、荒川弘之³¹中部大学 中部高等学術研究所 国際GISセンター、²九州大学 応用力学研究所、³帝京大学

序論

近年、乱流プラズマに外部から擾乱を印加することにより、プラズマの強い応答が非線形・非局所的に伝搬することが、実験 [1] 及び非線形シミュレーション [2] で明らかにされた。この応答の非局所的かつ弾道的な伝搬過程は、広く自然科学、社会科学の分野において重要となる現象である。大気・海洋・土壌汚染に代表される環境問題や、伝染病の感染、各種災害時の正誤入り混じった情報など、リスクが相互に関連した事象や情報は、非線形的に、時空間的に波及・伝搬する特徴を有しているが、既存の古典的な拡散モデルでは記述できない現象であり、このような事象を理解し、共存し、持続可能な社会を構築することは、人類社会に課せられた大きな課題である。特に、平成26年8月に広島市を襲った豪雨に代表される、突発的な局地的大雨や集中豪雨、及びそれに伴う洪水・内水氾濫や、地すべり・土石流などの災害に、急激な状況変化への対応ができず、被害が生じる事例が増加している。近年整備されてきた、時空間に高分解能かつ国土全域を覆う気象データを利用して、局地的大雨や集中豪雨に関する知見を得、そのダイナミクスを理解することにより、減災に寄与することは重要である。

著者は、これまで核融合プラズマ乱流中で、乱流の塊（クランプ、ブロップ）が非線形的に伝搬し、非拡散的な輸送を駆動する現象について非線形シミュレーションと統計的解析手法を用いて研究を行ってきた [3] また、地理情報システム/デジタルアースを利用した防災に関する研究を行い、気象と自然災害の重要性に着目している [4] これらの経緯から、気象、特に局所的な集中豪雨に関しての実証的な統計的定量化、及び非線形ダイナミクスの統計的手法による定式化の可能性があるため、今回の研究対象の情報として選択した。

方法

本研究で取り扱う気象データとして、気象庁・一般財団法人気象業務支援センターの配信する「高解像度降水ナウキャスト」を用いた。高解像度降水ナウキャストは、2014年8月7日から配信の始まった新しいデータで、5分間隔で配信される全国250mメッシュの格子データであり、そのサイズは、圧縮状態で1日あたり46GBにもなる大規模データである。全国20カ所のドップラーレーダー、気象庁・国交省・地方自治体の保有する全国10,000カ所の雨量計の観測データ、国交省XRAIN等を活用することで実現されている。特に今回は、配信されるデータに含まれる予測データは用いず、リアルタイムの実況データのみを解析の対象とし、台風の影響が大きく、岩手県岩泉町での豪雨災害などのあった2016年8月下旬から約2ヶ月間のデータを対象にプレリミナリな統計解析を行った。

結果

まず、高解像度ナウキャストについて、大規模データの取扱い、局所的集中豪雨についての統計的定量化の基盤を構築するため、Web GIS上での可視化を行った(図1)。過去のデータについては、閲覧、検索、解析を目的に2015年11月初頭より上記のデータ配信を受け、中部大学中部高等学術研究所国際GISセンターのデジタルアース・サーバに蓄積を行っており、一部をウェブ・サービスとして公開している [5]。次に、全国、及び一部地域のデータについて、プレリミナリな統計解析を行い、図2に5分間降水量の、全国・2ヶ月間での時空間積分値の確率密度関数を示した。分布は極めて裾が長く、降雨が単純な確率に基づく過程ではないことを表している。

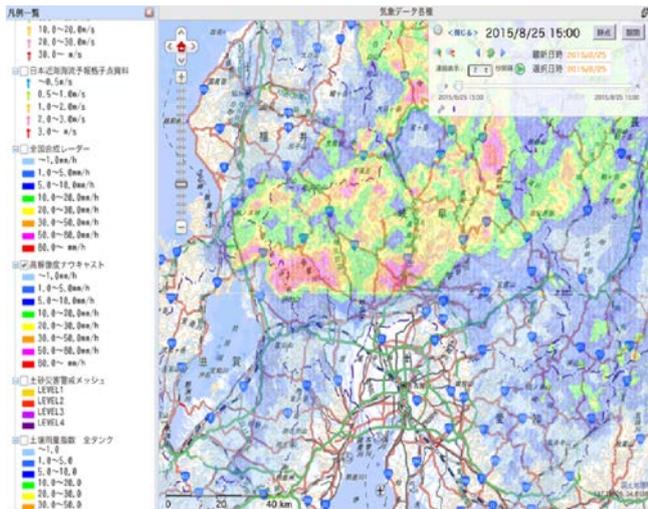


図 1 高解像度降水ナウキャストの Web GIS 上での可視化

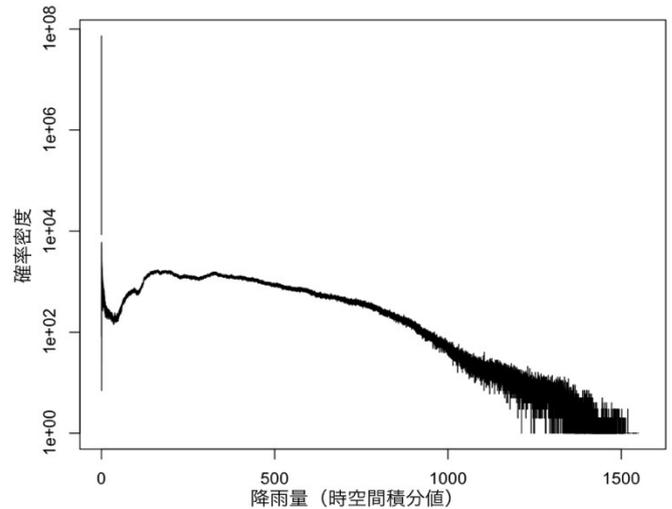


図 2 降水量の時空間積分値の確率密度関数

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所平成 28 年度共同利用・共同研究 28FP-33、中部大学問題複合体を対象とする共同利用・共同研究 IDEAS201631、及び文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1201030) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Inagaki, et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 113006.
- [2] N. Kasuya, et al., Plasma Phys. Contrl. Fusion 57 (2015) 044010.
- [3] S. Sugita, et al., Plasma Fusion Res. 9 (2014) 1203044.
- [4] S. Sugita, et al., 5th Digital Earth Summit (2014) and 6th Digital Earth Summit (2016).
- [5] <http://de08.digitalasia.chubu.ac.jp/map/index.jsp> (要ログイン)

酸化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

九大工 山口芳昭 (学生), 山口理一郎, 永石大誠 (院), 吉岡 聰, 安田和弘, 松村 晶
CEA-Saclay Jean-Marc Costantini

1. 目的

蛍石構造酸化物セラミックスは、放射線照射下において優れた耐照射損傷性を持つことが報告されている。二酸化ウラン (UO_2) はこれまでに軽水炉燃料としての実績があり、安定化ジルコニア (YSZ) は、長寿命核種の核変換母相材料として期待されている。これらの材料中には核分裂片による高密度電子励起損傷が誘起され、イオントラックと呼ばれる柱状の照射欠陥が形成される。これまで、 UO_2 の模擬材料として同一の結晶構造と類似の物性を持つ CeO_2 を用いてイオントラックに関する研究が行われており、 CeO_2 中のイオントラックは蛍石構造を保持するものの、2 nm 程度の中心領域で原子数密度が低下していることが明らかにされている。一方、YSZ は同じく蛍石構造を呈する酸化物であるが、酸素副格子に構造空孔が存在し、また、室温から 1000 °C での熱伝導度は約 $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ と、 UO_2 および CeO_2 の $1/3$ 以下の低い値を示す。このため、YSZ 中のイオントラックは UO_2 や CeO_2 とは異なる構造や形成効率を示すことが考えられるが、YSZ 中のイオントラック構造に関する知見は十分ではない。本研究では、核分裂片を模擬した高速重イオンを照射した YSZ の微細組織を透過電子顕微鏡法により観察し、YSZ 中のイオントラック構造及び形成効率を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

ZrO_2 に Y_2O_3 を 9.8 mol% 添加した板面(001)面の YSZ 単結晶、および 8 mol% の Y_2O_3 を含む YSZ 粉末から作製した焼結体を使用した。YSZ 粉末を一軸加圧および静水圧加圧により柱状ペレットに成形し、1600 K まで昇温した後、12 時間保持して室温まで冷却し、焼結体を作製した。焼結体を低速ダイヤモンドカッター、SiC 耐水研磨紙で厚さ約 500 μm にし、YSZ 焼結体および単結晶を直径 3 mm の円板に打ち抜いた。これらを回転研磨機により厚さ約 150 μm にした。この試料に日本原子研究開発機構のタンデム加速を用いて 200 MeV Xe^{14+} イオン (電子的阻止能値: 28 keV/nm) を室温にて $3 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 照射した。ディンプラーにより照射試料の中心領域を厚さ約 15 μm まで薄くし、Ar イオン研磨装置を用いて薄膜試料とした。この試料を九州大学超顕微解析研究センター内のハイコントラスト補助電子顕微鏡 (JEOL, JEM-2100HC) により明視野法を用いて加速電圧 200 kV にて観察した。また、同施設内に設置される収差補正走査/透過電子顕微鏡 (JEOL, JEM200F) を用いて走査透過電子顕微鏡法による高分解能観察を行った。

3. 結果および考察

図 1 に 200 MeV Xe^{14+} を $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ まで照射した YSZ の同一視野における明視野像を示す。YSZ 中のイオントラックは、 CeO_2 中のイオントラックと同様にフォーカス条件に依存して白黒反転するフレネルコントラストとして観察された。このことは、YSZ 中のイオントラック中心領域の原子数密度が CeO_2 の場合と同様に低下していることを示している。

YSZ 中のイオントラック密度の照射量依存性を得るため、200 MeV Xe^{14+} を $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ から $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の範囲で照射し、明視野法により観察した。図 2 にイオントラック数密度の照射量依存性を CeO_2 の結果と共に示す。YSZ 中のイオントラックは直径 1.5 nm であり、 CeO_2 のトラックサイズ (直径 2.2 nm) に比べて小さいことがわかった。また、図 2 より、YSZ および CeO_2 共にイオ

ントラック数密度は低照射領域において照射量に比例して増加し、高照射領域では飽和していることがわかる。このことは、いずれの試料でも高照射領域ではイオントラックの形成と回復が平衡していることを示している。しかしながら、イオントラック蓄積過程の解析から得られた形成効率、 CeO_2 の 0.61 に対して YSZ では 0.05 となり極めて小さい値となった。さらに飽和数密度は、YSZ ($8.3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$) の方が CeO_2 ($4.7 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$) の 2 倍程度高い値を示した。この飽和数密度に基づいて、YSZ および CeO_2 の回復影響領域をそれぞれ直径 2.8 nm、および 13.2 nm の柱状領域と評価した。以上の結果は、 CeO_2 よりも YSZ の方が高密度電子励起損傷からの回復が起こりやすいことを示している。これには YSZ 中の酸素構造空孔が影響を及ぼしていると考えられるが、更なる研究が必要である。

YSZ 中イオントラックの詳細な構造を調べるため、HAADF-STEM 法による観察を低照射量 ($3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$) および高照射量 ($5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$) 試料に対して行った。図 3(a) に示す高照射領域の低倍 HAADF-STEM 像からイオントラックは黒いドットコントラストとして観察され、YSZ の原子数密度が低下していることを示している。図 3(b) に 1 つのイオントラックを拡大した原子分解能像を示す。白い点は Zr 副格子に対応しており、イオントラック中心領域においても Zr 副格子の周期性は保たれている。また、幅 5 nm 程度の領域で信号強度が低下している(図 3(c))。信号強度が大きく低下している領域(幅 1.5 nm) はフレネルコントラストのサイズとほぼ一致し、この領域の原子数密度が低下していることを示している。

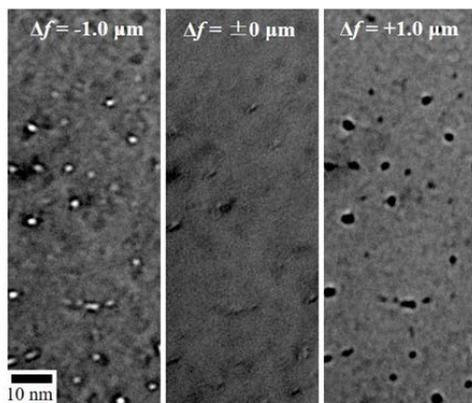


図 1 200 MeV Xe イオンを $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 照射した同一視野 YSZ TEM 明視野像。 Δf は、デフォーカス量の値を示している。

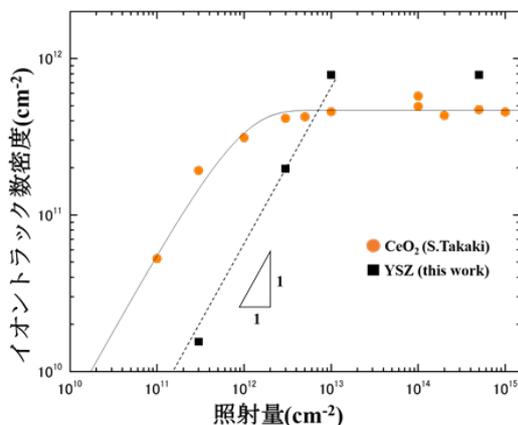


図 2 YSZ 中イオントラックの面密度の照射量依存性。CeO₂ のデータは Takaki による。S. Takaki, et al. Nucl. Instr. Meth. B, 326 (2014) 140.

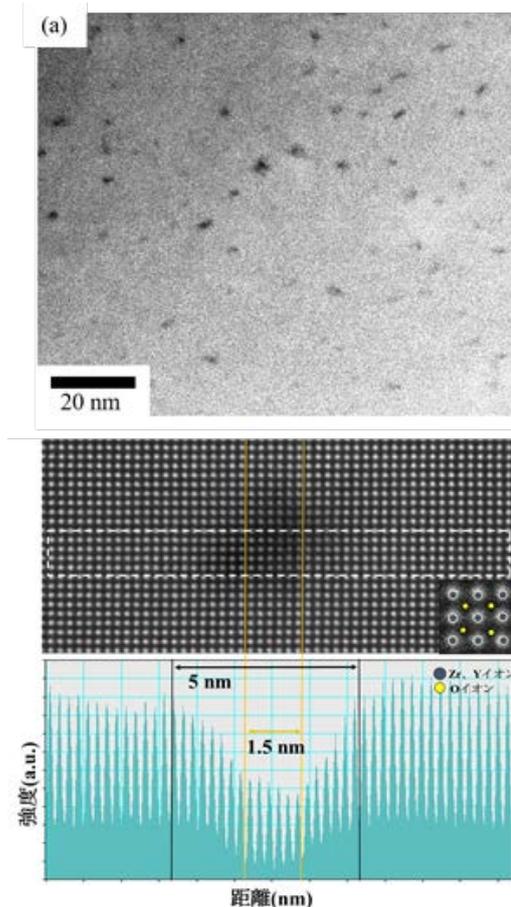


図 3 200 MeV Xe¹⁴⁺ を $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 照射した YSZ 中イオントラック (a) 低倍 HAADF-STEM 像、(b) 高分解能像、(c) (b) の点線で囲んだ領域の信号強度

タングステンの水素吸蔵に対する表面改質効果に関する研究

筑波大学数理物質系 坂本瑞樹

1. はじめに

タングステンは低損耗、高融点、低水素吸蔵率という特長から核融合炉のプラズマ対向材料の最有力候補材と考えられている。しかし、プラズマに照射される材料の表面状態は、照射損傷、スパッタリング、再堆積、バブル形成等のプラズマ・材料相互作用に起因する表面改質により変化し続けることが知られている。この表面改質が材料の水素吸蔵・放出特性に与える影響の理解は、材料の特性を理解する上で重要である。今年度は、タングステンへの重イオン照射による水素吸蔵特性への影響に着目して研究を進めた。応用化学研究所のタンデム加速器により再結晶タングステン試料に 2.4MeV の Cu^{2+} イオンを照射した後、その試料に小型プラズマ生成装置 APSEDAS (筑波大学) を用いて低エネルギー・高フラックスの重水素プラズマを照射し、昇温脱離ガス測定から水素同位体吸蔵特性を評価した。

2. 実験結果及び考察

本研究で用いた試料は、アライドマテリアル社製の ITER 仕様タングステン (10mm x 10mm x 1mm) を 2000°C で 1 時間焼鈍した再結晶タングステンである。結晶粒径は 10~50 μm 程度であり、表面は鏡面研磨されている。再結晶タングステンを用いる理由は、材料中の潜在的な欠陥の影響を極力減らし、重イオン照射の影響を見やすくするためである。この試料に対して、九州大学のタンデム加速器を用いて、2.4MeV のエネルギーの銅イオン (Cu^{2+}) を照射した。今回の実験で用いた銅イオン照射用ステージは温度制御が可能となっており、室温、500K、873K の 3 種類の試料温度にて、4dpa まで銅イオン照射を行った。この時の銅イオンのフラックスは、 $5 \times 10^{15} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

九州大学において銅イオン照射された 3 種類のタングステン試料に対して、筑波大学の小型プラズマ生成装置 APSEDAS (筑波大学) を用いて重水素プラズマ照射を行った。照射したプラズマの電子温度と電子密度はそれぞれ約 10 eV と約 $2.8 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ である。フラックスは約 $3.8 \times 10^{21} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、フルエンスが $2.0 \times 10^{25} \text{m}^{-2}$ までプラズマ照射した。プラズマの空間電位は約 30V であり、アース電位の試料に入射する重水素イオンのエネルギーは 30eV と考えられる。放射温度計で測定した照射中の試料表面温度は約 480K であった。プラズマ照射後に試料を昇温脱離装置に移し、十分に真空排気を行った後に、1K/s の昇温速度で 1173K まで加熱して試料から放出されるガス量を四重極分析器にて測定した。

図 1 に 3 種類の試料の昇温脱離スペクトルを示す。どのスペクトルにも 3 つのピークがあることが分かる。それぞれのピークでの温度は、①約 640K、②約 750K、③約 850K であり、銅イオン照射時の試料温度が室温から 873K まで変化してもピーク温度にはほとんど変化

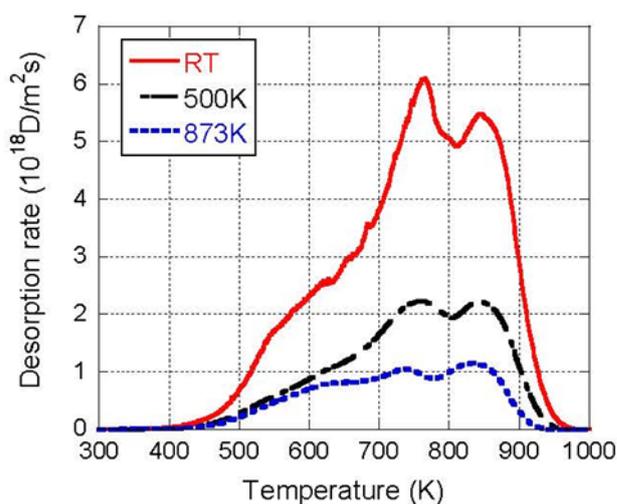


図1 試料温度が室温、500K、873K において銅イオンを 4dpa まで照射したタングステン試料の重水素の昇温脱離スペクトル

がないことが分かる。これらの温度は試料中の欠陥の種類と関係しており、低温から順に①dislocationとgrain boundary、②vacancy、③nano-voidとvacancy clusterであると考えられる。各ピーク温度での脱離速度は、銅イオン照射時の試料温度が高くなるほど減少しており、脱離速度を積分して得られるタングステン試料中の重水素リテンションも図2に示すように減少している。銅イオン照射時の温度が高くなることで、欠陥の生成が抑制されることが示唆される。今後、透過型電子顕微鏡観測を通して、欠陥の微細組織と重水素吸蔵特性の関係を詳細に調べることが必要である。

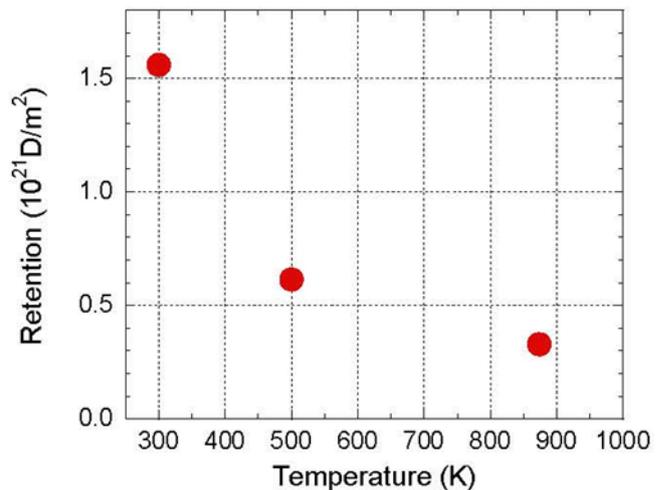


図2 重水素吸蔵量の銅イオン照射時試料温度依存性

3. 研究組織

氏名	所属	職名等	役割分担
坂本 瑞樹	筑波大学・数理物質系	教授	代表者
寺門 明紘	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (D1)	表面計測
野尻 訓平	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (D1)	プラズマ計測
田中 裕樹	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (M2)	プラズマ実験
伊能 俊太郎	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (M1)	水素吸蔵解析
宮本 光貴	島根大学・大学院総合理工学研究科	准教授	水素吸蔵解析
時谷 政行	核融合科学研究所	助教	微細組織解析
渡邊 英雄	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人
吉田 直亮	九州大学・応用力学研究所	名誉教授	微細組織解析

4. 成果報告

- (1) 田中裕樹、坂本瑞樹、渡邊英雄 他「高エネルギー銅イオン照射されたタングステンの重水素吸蔵特性評価」第11回連合講演会（九州大学、平成28年7月）15P064.
- (2) H. Tanaka, M. Sakamoto, H. Watanabe, et al., “Deuterium retention in heavy-ion-irradiated tungsten exposed to low energy and high flux plasma”, 13th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission and Fusion Engineering, 26-29 Sep. 2016 (Hefei, China)
- (3) 田中裕樹、伊能俊太郎、坂本瑞樹、渡邊英雄 他「重水素プラズマ曝露された照射欠陥導入タングステンの昇温脱離スペクトルの解析」第33回プラズマ・核融合学会年会（東北大学、平成28年12月）01aP79.

磁場閉じ込めトロイダルプラズマ中の電子乱流熱輸送における 非局所性に関する包括的研究

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 田村直樹

目的 研究代表者らは、乱流に支配された磁場閉じ込めトロイダルプラズマ中の電子熱輸送に対して確率論的手法を適用し、磁場閉じ込めトロイダルプラズマの閉じ込め状態に関する新しい評価手法を提示している。これにより、例えば、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（Large Helical Device: LHD）で生成されたプラズマにおいて観測されている非局所輸送現象と呼ばれるプラズマ周辺部を冷却するとほぼ同時にプラズマ中心部の電子温度が上昇する現象が、従来考えられていたプラズマ中心部において輸送が改善する遷移現象が発生したためではなく、1) プラズマ周辺部において輸送が改善する遷移が発生し、2) そのプラズマ周辺部が輸送の変化に対して裕度の高い状態になっているプラズマ中心部と相互作用を起こしたためであることが明らかになった。本研究では、九州大学応用力学研究所の単独研究及び研究代表者と応用力学研究所所内世話人である稲垣滋教授との共同研究で培ってきたデータ解析手法などをヘリカルプラズマのみならず、トカマクプラズマで得られた実験データにも適用することで、磁場閉じ込めトロイダルプラズマ中の電子乱流熱輸送における非局所性に関する包括的理解を得ることを目的としている。

研究方法 九州大学応用力学研究所の単独研究及び研究代表者と同研究所との共同研究で培ってきたデータ解析手法などをヘリカルプラズマのみならず、トカマクプラズマで得られた実験データにも適用する。平成28年度は、米国で稼動していた大型トカマク装置 TFTR で得られた電子乱流熱輸送における非局所性に関する実験データを解析した。

研究結果 図1に、米国のプリンストン大学プラズマ物理研究所（PPPL）で稼動していた大型トカマク装置 TFTRで観測されていた非局所輸送現象の一例を示す。時刻 2.325 秒（図中の縦破線）において、カーボンリミターからカーボン小片がプラズマに侵入したことで、それに呼応するように中心の電子温度が上昇しているのが分かる。上述の通り、このような現象は核融合科学研究所のLHDにおいても観測されている。図2(a)に、この時の局所電子温度勾配の時間発展を示す。参考として、図2(b)に、LHDの非局所輸送現象発現前後の局所電子温度勾配の時間発展を示す。TFTRでは周辺冷却に伴って急増した電子温度勾配が、LHDの場合とは異なり、保持されずに減少した。しかし、一旦減少した電子温度勾配は再び過渡的に増加した。また、その電子温度勾配の過渡的な増加は、プラズマ周辺

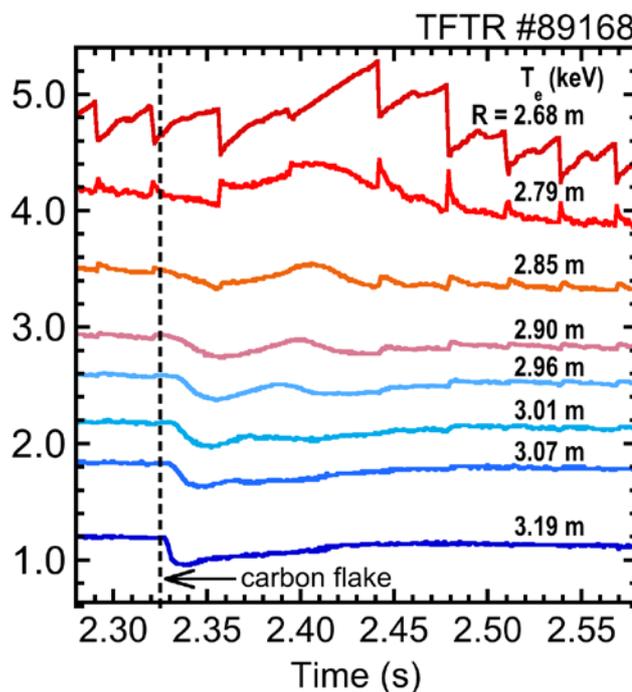


図1. TFTRで観測された非局所輸送現象の一例。時刻 2.325 秒付近でリミターからのカーボン小片がプラズマに侵入したことで、非局所輸送現象が発現している。

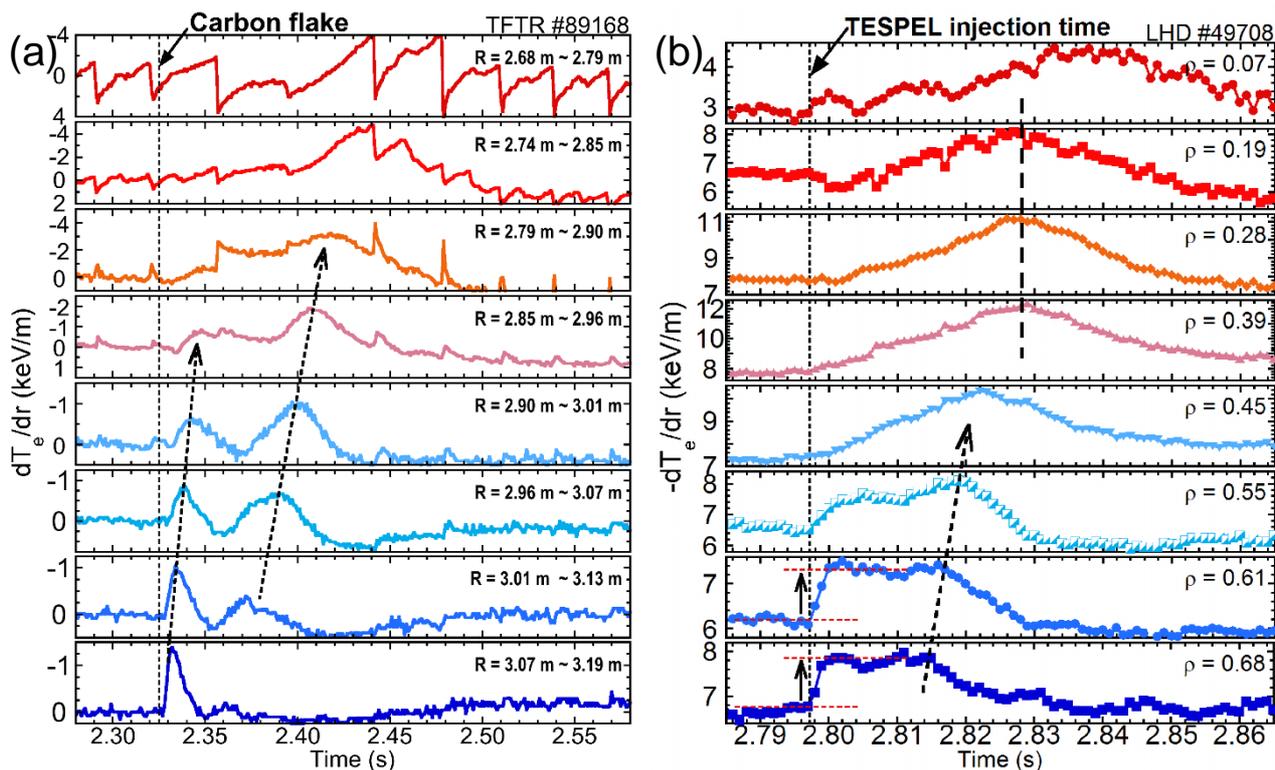


図 2. (a) TFTR において非局所輸送現象が発現した時の局所電子温度勾配の時間発展、(b) LHD において非局所輸送現象が発現した時の局所電子温度勾配の時間発展。

部からプラズマ中心部に向けて伝搬しているように見える。このように、周辺冷却に呼応して中心電子温度が上昇する、という観測される事象は同じであるにも関わらず、局所電子温度勾配が示唆する輸送の変化はヘリカル型のLHD とトカマク型のTFTR で大きく異なっている可能性が高いことが明らかとなった。

今後の予定 大型のヘリカル型装置LHD、中型のトカマク型装置HL-2A、そして大型のトカマク型装置TFTR それぞれにおける非局所輸送現象に対して、共通の解析手法を適用することで、これまで得られなかった知見を得ることができた。今後、3つの装置間における比較研究をさらに詳細に進めることで、磁場閉じ込めトロイダルプラズマにおける電子乱流熱輸送における非局所性に関する包括的理解の獲得を目指す。

研究成果報告 特になし。

研究組織 (合計10名)

研究代表者：田村直樹 (核融合科学研究所)

研究協力者：稲垣滋、永島芳彦、藤沢彰英、伊藤早苗 (以上、九州大学応用力学研究所)、土屋隼人、徳沢季彦、居田克巳、伊藤公孝 (以上、核融合科学研究所)

酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院
エネルギー理工学部門
橋爪 健一

1. 目的

プロトン導電性酸化物は、500°C以上の高温で水素ポンプとして使用できることから、核融合システムにおいて生成するトリチウムを含むガスの精製、回収の上で非常に重要な電気化学素子の一つである。トリチウムは、軽水素や重水素および水素含有ガス、ヘリウムなど他のガスとの混合ガスとなることが想定される。このような混合ガスからプロトン導電性酸化物を水素ポンプとして使用し、高温ガス中の水素ガス分離、回収、および、トリチウム濃度の測定精度を向上させる方法が期待されている。本研究では、プロトン導電性セラミックスとして、セレート系 (BaCeO₃)、ジルコネート系 (CaZrO₃)、インデート系 (BaInO_{2.5}) などの材料から材料を選択し、重水素あるいは重水を用い水素同位体の溶解・放出挙動に関する実験・解析を行う。

我々は、最もプロトン伝導度の高い BaCeO₃ 試料について、トリチウム水蒸気を用いて溶解度や拡散係数を明らかにしてきた。そのトリチウム分析の際、室温大気中で試料表面から、徐々にトリチウムが放出されることを見出した。そこで、本実験では、BaCeO₃ 試料からの放出挙動とともに水素含有ガス種（水素分子と水蒸気）による水素溶解度の違いを明らかにすることを目的とした。具体的には、高温で重水、重水素に曝露溶解した BaCeO₃ 試料を準備し、室温大気中での保持時間を変化させて、応用力学研究所および当研究室の昇温脱離ガス分析装置 (TDS) を用いて水素同位体放出挙動を観測した。

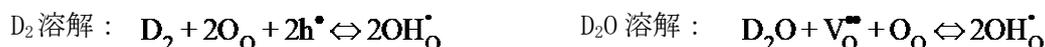
2. 実験

10%Y 添加 BaCeO₃ 粉末（原料粉末を（株）TYK より購入）を、金型プレス、静水圧プレス（200MPa）で円板形状に成形後、粉末焼成法（大気中 1873K、20h）により焼結体円板（密度 98%TD 以上、直径約 8 mm、厚さ約 2 mm）を得た。この焼結体円板を切断加工し、短冊形状試料（0.5×2×8 mm³）を準備した。この試料を、一旦 1000°C で真空加熱し残留ガス成分を放出させた後、重水素あるいは重水蒸気曝露（773K、3h、約 30Torr）を行った。その後、1日から1週間、試料を大気中に保持後、TDS 装置にて試料からの重水素を含むガス種（HD、D₂、HD0、D₂O）の TDS スペクトル（昇温速度 1K/sec）を測定した。

3. 結果と考察

D₂、D₂O 曝露した Y 添加 BaCeO₃ の 1 日大気保持後の TDS スペクトルを図 1、図 2 に示す。D₂ 曝露した試料では、水素ガス（HD、D₂）の放出ピークが大きく、水蒸気ピーク（HD0、D₂O）も観察される。また、ピーク温度に差があり、水素ガスでは約 600°C、水蒸気は約 750°C であった。一方、D₂O 曝露した試料では、ほとんどが、水蒸気ピーク（HD0、D₂O）であり、ピーク温度は D₂ 曝露試料とほぼ同じ約 750°C であった。HD、HD0 の H 成分は大気保持中の同位体交換が主要因と考えられるが、詳細な供給源、供給機構については今後の検討課題である。

図 3 は、D₂、D₂O 曝露した BaCeO₃ の 1 日、3 日、7 日大気保持後の TDS スペクトルから得られた残留 D 量である。D₂、D₂O 曝露試料で、溶解条件は同じであるが、水素溶解量は D₂O 曝露試料の方が 1 桁以上高いことが分かる。これは、水素の溶解反応式がそれぞれ、



と書かれ、 D_2O 曝露では Y 添加により形成した酸素イオン空孔 (V_O^{\bullet}) が、水蒸気の溶解として水素溶解反応に利用されるためである。また、大気保持時間については、 D_2O 曝露ではほとんど残留 D 量に変化していない。この D_2O 曝露の結果は、先行研究であるトリチウム水蒸気曝露実験の表面からの放出の結果と比較、検討すると、試料表面の近傍では水素の同位体交換による水素の放出が起こるが、1 週間程度ではバルク中からの顕著な放出は起こらないと解釈できる。一方、 D_2 曝露では溶解量が低だけでなく低下が見られる。図 4 は D_2 曝露の結果を再プロットしたものである。この低下速度から重水素の拡散係数を評価すると $10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度の値が得られた。室温での水素の拡散係数の過去の報告はないが、高温側の拡散係数の文献データから外挿した値とほぼ一致した。

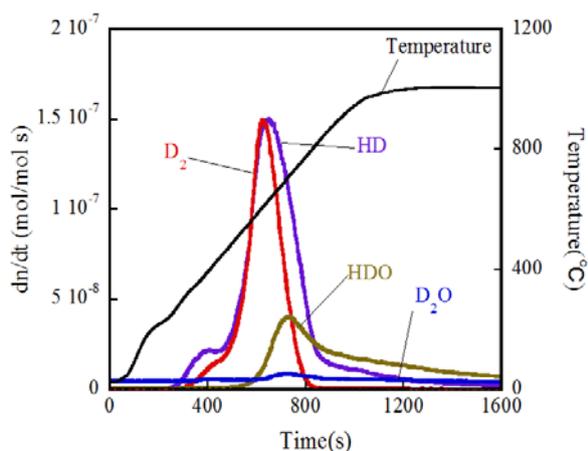


図 1 重水曝露 BaCeO₃ 重水素放出スペクトル

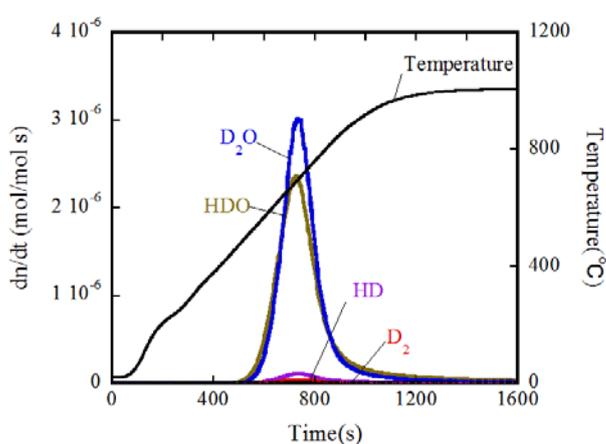


図 2 重水曝露 BaCeO₃ 重水素放出スペクトル

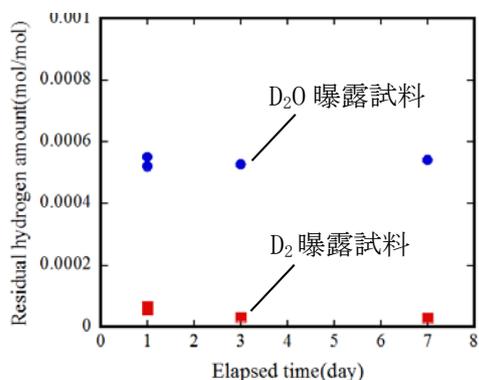


図 3 室温大気保持後の BaCeO₃ 中の残留 D 量

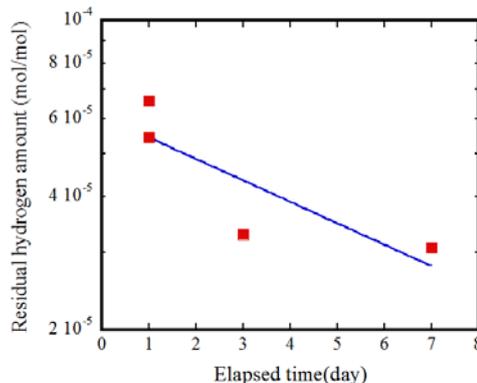


図 4 D_2 曝露 BaCeO₃ 中の残留 D 量

4. まとめ

本年度行った TDS 実験の結果は、酸化物プロトン導電体 BaCeO₃ 中の水素溶解挙動の水素源の化学種による違いを明らかにするものであり、水蒸気溶解では溶解度が高く、室温大気保持での放出も少ないが、水素ガス溶解の場合は、溶解度は低く、室温大気保持での放出は多いことが分かった。

5. 研究組織

九大総理工：橋爪健一 大学院生：植田侑吾、後藤健吾、城慎之介 学部生：岩佐匡浩
九大応力研：渡辺英雄

オーステナイト系ステンレス鋼のイオン照射試験および照射特性評価

日立製作所 研究開発グループ 王昀

1. 目的

現在、原子炉の炉内構造材を対象として、耐食性、耐 SCC 性並びに耐照射性を向上したオーステナイト系ステンレス鋼の開発に取り組んでいる。その特性評価の一環として、耐照射脆化性、耐照射誘起粒界偏析性を評価する必要がある。そこで、九州大学応用力学研究所殿所有の重イオン照射システムを用いて、イオン照射により、照射欠陥を導入した開発材料の照射特性の評価を試みた。2016 年度は耐照射特性に及ぼす合金添加元素影響を明らかにすることを目的とし、ナノインデンテーション法によりオーバーサイズ元素添加/非添加材を対象とした照射硬化特性を評価した。

2. モデル合金組成

モデル合金の試作目標組成を表 1 に示す。耐照射特性への添加元素影響を明確化することを目的とし、欠陥捕獲元素種及び欠陥捕獲元素種濃度を变化させた 3 種のモデル合金を作製した。表 2 に照射試験のマトリクスを示す。添加元素量を振ったモデル合金に加え、比較材及び実機製造条件にて作製した開発材を対象として、照射試験および評価を実施する。

表 1 供試材の試作目標組成

No.	材料ID	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	#	備考
1	LC0	<0.01	<0.01	1.70	<0.005	<0.003	10.70	19.00	0.02	-	低C無#
2	LC0.6	<0.01	<0.01	1.70	<0.005	<0.003	10.70	19.00	0.02	0.60	低C高#
3	LC1.4	<0.01	<0.01	1.70	<0.005	<0.003	10.70	19.00	0.02	1.40	低C超高#

表 2 イオン照射試験に用いる供試材及び照射試験条件

温度	照射量	SUS316L	実機プロセス材 (LC0.6 相当)	LC0	LC0.6	LC1.4
300°C	0.3dpa	◎	◎	◎	◎	◎
	1dpa	◎	◎	◎	◎	◎
	3dpa	◎	◎	◎	◎	◎

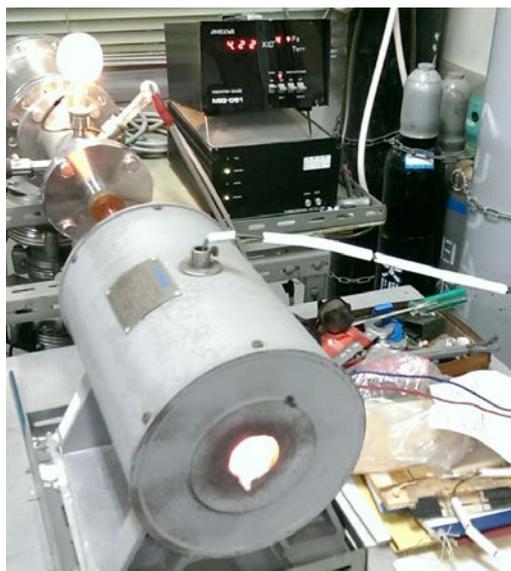
3. 2016 年度実施項目

(1) イオン照射用試験片作製

所定の熱処理を加えた供試材より $\phi 3 \times 0.2t$ の TEM ディスクを採取し、表面を電解研磨してから、真空焼鈍を実施する。電解研磨は、「磷酸 168cc+無水クロム酸 20g+精製水 32cc」の溶液を用いて、電圧 12V で、1sec 間行った。真空焼鈍は、図 1 に示すように、試験片を石英管に真空封入した状態で、「1050°C/5min→炉冷」の条件で行った。



(a) 石英管による試験片の真空封入



(b) 真空熱処理用電気炉

図 1 試験片の真空焼鈍

(2) イオン照射試験

欠陥集合体形成挙動，照射誘起偏析特性を評価するために，0.3, 1.0, 3.0dpa の Ni^{3+} イオン照射を実施した．イオン照射条件を表 3 に示す．解析コード SRIM-2008 により求められた深さ方向の照射損傷分布を図 2 に示す．線量率ピーク位置は $1050 \pm 100\text{nm}$ であることを確認した．

表 3 イオン照射試験の条件

イオン照射装置	HVEE 社製タンデム型加速器
イオン種	Ni^{3+} (3.2MeV)
照射速度	3.5×10^{-4} (dpa/s)
照射温度	300°C
目標照射量	0.3, 1.0, 3.0dpa (線量率のピーク位置)

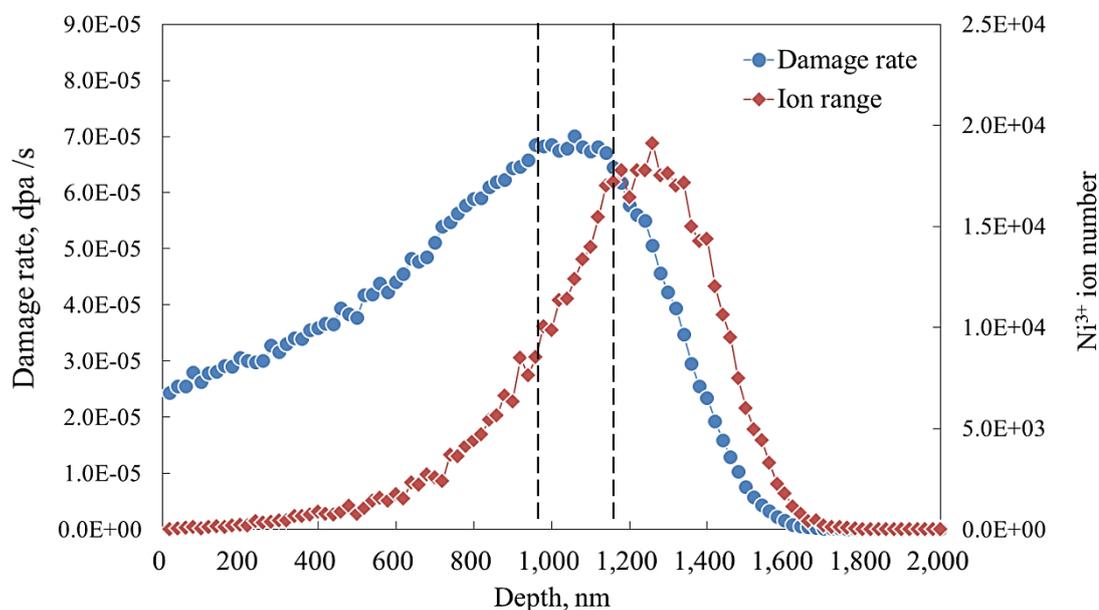


図 2 損傷分布の深さ依存性 (SRIM-2008 による計算)

(3) 硬さ評価

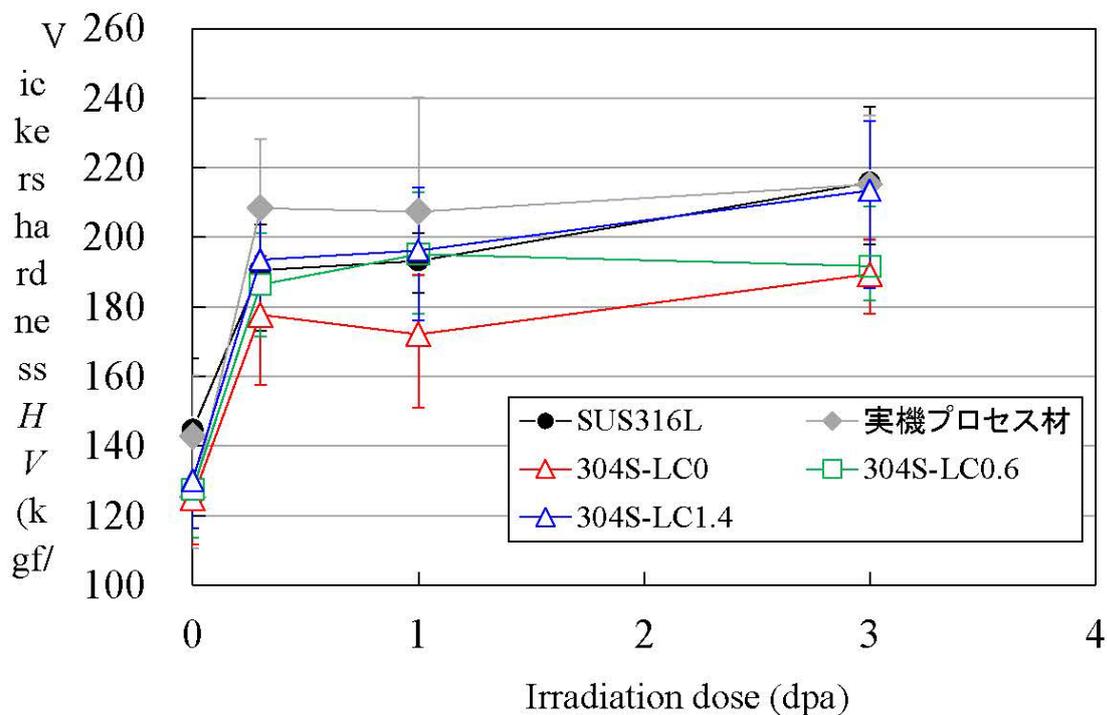
イオン照射試験を行った供試材を対象とし、ナノインデンテーションによる微小硬さ変化評価を実施した。測定は、九州大学所有の Elionix ENT-1100 ナノインデンタを用いて、最大荷重 5mN で行った。照射前の電解研磨後並びに照射後にインデンテーション硬さ測定を実施し、照射による硬化量を評価した。

4. 硬さの測定結果

図 3 に照射前後のビッカース硬さ測定結果を示す。事前にビッカース硬さ標準試料を対象に、ナノインデンタから得られた硬さパラメータ H_T と HV の関係式を求めた。この関係式から、各試験片の照射前後で測定した硬さパラメータ H_T をビッカース硬さ HV に換算した。

図 3 (a) に示した硬さ HV では、LC0.6 相当の実機プロセス材は、1dpa までは他の材料に比べて若干硬さが高い傾向が確認された。組織観察により、本材の結晶粒径はモデル合金および SUS316L に比べて小さかった。一方、3dpa では現行材 SUS316L と同等な硬さとなることが示唆された。

図 3 (b) に示した硬さ増量 ΔHV では、現行材 SUS316L に比べて、3dpa までの照射量では、全体的にモデル合金および実機プロセス材は SUS316L と同等な照射硬化特性を有することが示唆された。



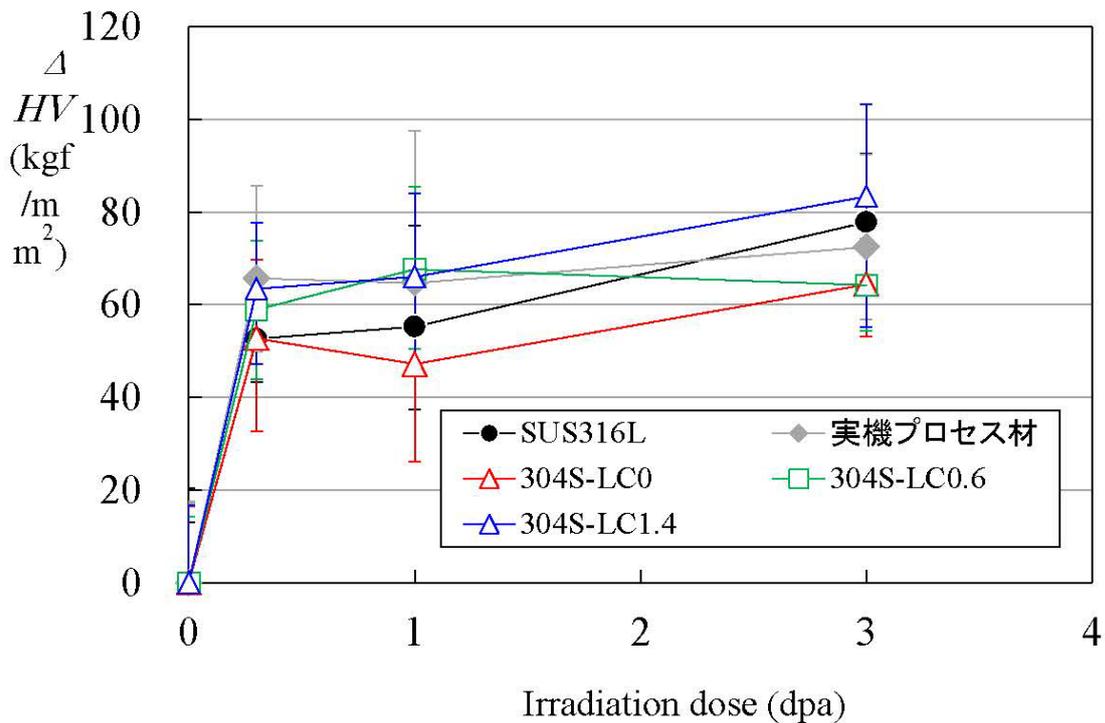


図3 照射試験後の硬さ変化

5. まとめ

耐照射特性に及ぼす合金添加元素影響を明らかにすることを目的とし、ナノインデンテーション法によりオーバーサイズ元素添加/非添加材を対象とした照射硬化特性評価を実施した。

オーバーサイズ元素を添加したモデル合金および実機プロセス材は、3dpa までの累積照射量では、SUS316L と同等な照射硬化特性を有することを確認した。

6. 今後の課題 と対応

今後は各モデル合金を対象に、照射誘起粒界元素偏析特性に及ぼすオーバーサイズ元素の添加量の影響を検討するため、照射済みの試験片から、収束イオンビーム (FIB) を用いて粒界サンプルを採集し、透過型電子顕微鏡 (TEM) 分析を実施する計画である。これにより、オーバーサイズ元素の添加による照射誘起粒界元素偏析の低減効果を検討する予定である。

プラズマ輸送理論

代表者 核融合科学研究所 伊藤公孝
所内世話人 稲垣滋

目的

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

本研究では、トロイダルプラズマの乱流に対し、繰り込み理論に基づく遷移理論を構成し、乱流輸送と構造形成の理論基盤を研究することを目的とする[1]。あわせて、輸送コードに用いられる理論式を最新の理論展開に沿ったものへと高度化することを目的とする。そして、非平衡系プラズマの統計力学を構築することを目指す。

Heating heats turbulence から Fuelling fuels turbulence へ

従来のプラズマ乱流輸送の考え方では、マイクロ乱流は定常状態に達し、輸送量は巨視変数に応じた値をとると考えられてきた。輸送係数がその位置その時刻の鋸歯変数で表現されるという、「局所クロージャー」仮説という考え方である。本共同研究を通じて、この局所クロージャー仮説の破れを確認する大きな進歩を得ている。すなわち、勾配-熱流関係にヒステリシスが存在[2]し、これを説明する試みとして位相空間における新しい駆動力を取り入れた乱流物理像[3]を提示してきている。プラズマ加熱という「分布関数を変形する力」に着目することで、プラズマの加熱入力が直接に熱流を変化させるという、「Heating heats turbulence」という概念を提示している。

今年度の共同研究では、「Heating heats turbulence」描像に立脚することで、輸送の同位体効果に対する結果を得た。分布関数を変形する力を表現するパラメタ

$$\Gamma_h = \frac{\delta P}{\delta p} \frac{1}{\chi_N k_{\perp}^2}$$

と乱流輸送係数の加熱による増倍率

$$1/(1 - \Gamma_h)$$

が提案されている[3]。P は加熱入力であり、直接加熱入力が乱流や輸送に影響する様相が示された。 Γ_h に対する水素同位体効果を考えると、共通なパラメタに対し、水素イオンの質量が増すと Γ_h が低下する。その結果、輸送ヒステリシスの幅が狭くなり結局輸送量が減

少することを理論的に示した[4,5]。ヒステリシスの幅は **Observable** であり[2]、今後の検証が待たれる[5,6]。

乱流は直接加熱されるのみならず、粒子補給からも影響を受ける。「Fueling fuels turbulence」という考え方である[7]。ここでは、SoL プラズマの揺動が粒子補給を介して炉心プラズマ揺動に転写されるという過程を定式化した。SoL 密度が変動すると、それに応じた中性粒子密度の変動が生じ、イオン化による粒子補給が変化する。その結果、炉心の密度揺動へと変動が伝わる。炉心プラズマの揺動レベルの混合長理論予測値からの増倍率が

$$\frac{C}{\rho_i \Delta_n k^2} \left| \frac{\tilde{n}_e}{\langle n_e \rangle} \right|_{SoL}$$

としてまとめられている。ここで C は $O(1)$ の定数、 Δ_n は中性粒子の侵入長である。この係数はイオンの質量比に依存することが報告されており[7]、同位体効果を考える上での新たなパスとなる可能性がある。

展望

以上の共同研究成果は、プラズマの乱流輸送の根本問題を解決する為の今後の研究の方向を示している。

謝辞

This work was supported in part by the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

成果論文

1. S.-I. Itoh, et al: Project Review J. Plasma Fusion Res. **90** (2010) 793
2. S. Inagaki, et al. Nucl. Fusion **53** (2013) 113006
3. S.-I. Itoh and K. Itoh, Sci. Rep. **2** (2012) 860
4. S.-I. Itoh, K. Itoh, S. Inagaki, Nucl. Fusion **57** (2017) 022003
5. K. Itoh, et al.: 'Hysteresis and fast timescale in transport relation of toroidal plasmas' 26th IAEA Fusion Energy Conference OV-P8, Kyoto, Oct.17-22.2016
6. 伊藤公孝 「LHD 重水素実験を舞台とした学術研究」プラズマ核融合学会 第33回年会 S2-6 東北大学 2016.11.29-12.2
7. K. Itoh, et al., submitted to Nucl. Fusion (2017)

共同利用研究集会

第 14 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

14th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

研究代表者 京都大学 村上定義
所内世話人 糟谷直宏

1. 研究集会の開催目的

応用力学研究所においては、これまで京都大学との共同研究により核燃焼プラズマ統合コード構想を発足させ、活動を行ってきた（プロジェクトの詳細は<http://p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/>）。このプロジェクトは、科研費「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」（2004~2006）、「統合コードによる ITER プラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」（2007~2010）、「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発」（2008~2012）等によって部分的に支援されてきた。各年度の活動状況および次年度の活動計画を含めて成果報告会を毎年開催している。今回で第 14 回目となるが、そのうち、第 2 回~第 8 回と第 11 回~第 13 回は応用力学研究所の共同研究集会として開催してきた実績がある。第 11 回よりトロイダルプラズマを対象を拡大し、炉心プラズマと周辺プラズマ、MHD 現象と輸送現象、高エネルギー粒子と乱流輸送、加熱・電流駆動と長時間運転等の複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションについて、包括的なアプローチとして議論しようとするものである。

2. 開催日時

開催日程：2016 年12 月7 日（水）－ 8 日（木）

開催場所：九州大学応用力学研究所 2 階大会議室

講演数：22 件、参加者数：24 名

3. 研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの進展について議論するため研究集会を 2 日間にわたって開催した。講演 22 件の申し込みが集まり、件数は例年並みであった。外国(韓国)からの参加者もあった。内容別に分類するとトーラス統合シミュレーション 2 件、加熱・粒子供給 1 件、運動論的效果 4 件、乱流 8 件、輸送 3 件、SOL/ダイバータ 2 件、MHD 1 件、材料 1 件であった。便宜上分類をしたが複数の分野にまたがる内容も多い。どれも質の高い研究成果報告であった。今回のプログラムの特徴は基礎実験装置を対象とした乱流のセッションを構成することができたことである。運動論効果、材料特性などの研究と合わせ、プラズマ複合現象のシミュレーションの基盤となる基礎研究の発表が数多くあり、幅広い研究内容を含む研究会とすることができた。このように毎年新たな話題も随所に加えながら研究会の数を重ねることができている。さらに本年もポスドク・学生による講演が 8 件あり、当該分野の若手の底上げを図りながら研究を進展できていることも印象付けることができた。以下に講演内容を抜粋して説明する。

本年度の研究会は、藤田による高エネルギー粒子生成磁場を含む平衡解析についての講演から始まった。高エネルギー粒子の軌道計算を含む拡張の初期結果を報告した。本多はトーラスプラズマのトロイダル回転について、ITER における実磁場配位を考慮した評価、JT-60SA における共鳴摂動磁場の効果、JT-60U の H モードにおける residual

stress による自発回転など多岐にわたる成果を報告した。福山は世界における ITER に向けた統合モデリングの趨勢について講演した。共通データフォーマットの構築およびその適用状況や各国における統合シミュレーションの進展を多くの例を交えて解説した。林は JT-60SA の放電シナリオについて統合コード TOPICS のコア-エッジ結合モデルの進展を報告した。ダイバータ熱負荷低減に欠かせない不純物輸送について評価した。Hahm は電子内部輸送障壁形成における補足電子の役割について講演した。乱流低減について $E \times B$ シアとトロイダル歳差運動シア両者が重要であり、両者を考え合わせることで多様な電子内部輸送障壁形成の機構を説明することができる。また、矢木はジャイロ流体モデルを用いた乱流シミュレーションで局所的に加えた熱ソースへの応答から、内部輸送障壁の形成機構について報告した。瀬戸は BOUT++を用いたグローバル解析によりバルーニングモード不安定性の特性を調べた。

ヘリカルプラズマも必要な研究対象で、その中でも LHD は現在稼働中の大型装置として精力的に研究がなされている。沼波はジャイロ運動論コードを用いて、LHD における複数種粒子の効果を解析した。同位体効果、水素/ヘリウムプラズマ比較、不純物ホール放電時の輸送といったトピックスについて ITG/TEM の不安定性とそれらによる輸送の評価をし、実験結果との比較を図った。糟谷は LHD での実磁場配位を用いたジャイロ運動論シミュレーションから得られた乱流の 3 次元データに対して、実験計測シミュレーションを適用し、実験との比較を図っている。登田は GKV によるイオン温度勾配不安定性計算結果をモデル化して輸送計算に取り入れるため、電子の扱いを断熱的にした場合と非断熱的にした場合の比較を行った。村上は LHD 重水素実験時の中性子発生予測結果を報告した。前田は同位体効果を含む各種モデルによる輸送シミュレーション結果を報告した。

基礎実験装置を対象とした乱流シミュレーションからも、磁場閉じ込めプラズマに共通する物理機構の理解が図られている。佐々木と小菅は直線装置 PANTA を対象として、複数の乱流駆動源、不安定性がある場合の競合過程についてシミュレーション及び理論解析の結果を報告した。阿部は PANTA 装置で必要な役割を果たす中性粒子について、粒子コードを用いた分布計算とその結果を反映させた抵抗性ドリフト波乱流計算を行い、中性粒子分布がモードスペクトルに影響することを示した。松井は PANTA 装置の乱流状態のパラメータ依存性について調べた。

周辺および壁材料特性の研究も進展している。滝塚は PIC シミュレーションでダイバータプラズマにおける物理機構について考察した。デタッチメントに関する衝突性プラズマにおいても運動論的效果の重要性を指摘した。東郷は 1 次元数値モデルと解析モデルを用いてダイバータ板粒子束の解析を行った。大澤からは水素によるタングステン中の空孔クラスターの成長促進についての第一原理シミュレーション結果が報告された。

統合輸送コード TASK については、福山の講演に加えてそれぞれに様々な進展が報告された。フォッカープランクシミュレーションについては奴賀から電子分布関数の hot tail による逃走電子生成について報告された。また永井から ITER 燃焼プラズマの放電立ち上げシナリオについて評価がされた。池田からは電子サイクロトロン周波数帯波動解析のための粒子コード開発について報告された。

来年度も第 15 回研究会を九州大学で開催するべく応用力学研究所共同研究に応募すること、また本年度で退職となる福山先生の長年の貢献に対して感謝の意を表して、閉会した。

4. 研究集会プログラム

(18 min talk+7 min discuss or 10 min talk+5min discuss)

12月7日(水)

9:00 – 12:45 核融合エネルギーフォーラムサブクラスター会合

12:45 – 13:45 昼休み

13:45 – 13:55 はじめに 村上 (京大)

(座長：村上)

13:55 – 14:20 講演 1-1 藤田 (名大)

Analysis of axisymmetric equilibrium including magnetic field generated by energetic particles

14:20 – 14:45 講演 1-2 本多 (量研機構)

Predictions of toroidal rotation and torque sources arising in non-axisymmetric perturbed magnetic fields in tokamaks

14:45 – 15:10 講演 1-3 福山 (京大)

Status of integrated modeling activity for ITER

15:10 – 15:35 講演 1-4 林 (量研機構)

Integrated modeling of JT-60SA high-beta steady-state scenario 15:35 – 15:50 休憩

(座長：藤田)

15:50 – 16:15 講演 1-5 T. S. Hahm (Seoul Univ.)

Role of trapped electron dynamics in ITB formation

16:15 – 16:40 講演 1-6 沼波 (核融合研)

Turbulent transport of multi-ion-species plasmas in helical systems

16:40 – 17:05 講演 1-7 糟谷 (九大)

Turbulence diagnostic simulation for comparison with experiments

17:05 – 17:30 講演 1-8 奴賀 (核融合研)

Fokker-Planck simulations of runaway electron generation in tokamak disruption

17:30 散会

19:00 – 21:00 懇親会 (馳走 やまとや 博多駅東店にて)

12月8日(木)

9:00 – 9:05 事務連絡

(座長：登田)

9:05 – 9:30 講演 2-1 佐々木 (九大)

Status and future plans of turbulence simulation on linear plasmas

9:30 – 9:55 講演 2-2 小菅 (九大)

Cross scale energy transfer in parallel flow shear driven turbulence

9:55 – 10:10 講演 2-3 松井 (九大)

Nonlinear simulation on profile formation with drift-wave instability in linear devices

10:10 – 10:25 講演 2-4 阿部 (九大)

Turbulence simulation of structural formation considering neutral particle profiles in linear devices

10:25 – 10:40 休憩

(座長：福山)

10:40 – 11:05 講演 2-5 滝塚 (阪大)

Kinetic simulation for edge plasma and detached divertor

11:05 – 11:30 講演 2-6 東郷 (筑波大)

Research on behavior of divertor particle flux with a one-dimensional numerical model

- and an analytical one
- 11:30 – 11:55 講演2-7 大澤 (九大)
Vacancy cluster growth in tungsten induced by hydrogen
- 11:55 – 13:00 昼休み
(座長：糟谷)
- 13:00 – 13:25 講演3-1 矢木 (量研機構)
Simulation study on internal transport barrier formation using gryofluid model
- 13:25 – 13:50 講演3-2 瀬戸 (量研機構)
Linear analysis of non-ideal ballooning mode instability with real electron inertia
- 13:50 – 14:05 講演3-3 池田 (京大)
PIC simulation of EC wave propagation and absorption in plasmas
- 14:05 – 14:20 講演3-4 永井 (京大)
Start-up simulation of burning plasma by integrated modeling code TASK
- 14:20 – 14:35 休憩
(座長：矢木)
- 14:35 – 15:00 講演3-5 登田 (核融合研)
Construction of reduced transport model by gyro-kinetic simulation with kinetic electrons in helical plasmas
- 15:00 – 15:25 講演3-6 村上 (京大)
Prediction of neutron production in the deuterium experiment of LHD
- 15:25 – 15:40 講演3-7 前田 (京大)
Heat and particle transport modeling of LHD plasma by integrated transport simulation
- 15:40 – 16:00 まとめ 糟谷 (九大)
- 16:00 散会

5. 参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属
鈴木隆	量研機構	福山淳	京都大
林伸彦	量研機構	村上定義	京都大
本多充	量研機構	池田智英	京都大
矢木雅敏	量研機構	永井一輝	京都大
瀬戸春樹	量研機構	前田涉吾	京都大
登田慎一郎	核融合研	大澤一人	九大応力研
沼波政倫	核融合研	糟谷直宏	九大応力研
奴賀秀男	核融合研	小菅佑輔	九大応力研
T.S.Hahm	SNU	佐々木真	九大応力研
滝塚知典	大阪大	阿部哲	九大総理工
藤田隆明	名古屋大	松井庸介	九大総理工
東郷訓	筑波大	大野友嗣	九大総理工

国際プラズマ乱流データ解析ワークショップ

応用力学研究所 稲垣 滋

目的と背景

プラズマ乱流及び乱流輸送に関するデータ解析に関する国際的なワークショップを開催する。本議論を契機にプラズマ乱流実験および乱流物理の理解の深化に寄与する。本研究集会は高エネルギーイオン輻射に関して行ってきたワークショップ及び日中プラズマ乱流データ解析ワークショップという日中の研究者による研究グループが中心となり行われてきた作業会を更に発展させたものである。本作業会を契機にその後大きく進展した研究が多く、近年の乱流物理の進展に大きく寄与している。一例として磁気島や MHD と乱流揺動との関連の理解、ICE と高速イオン分布との相関の観測が挙げられる。このようなこれまでの活動において、応用力学研究所を中心とした研究グループの存在感は極めて高く、中国の若手研究者らを先導する立場にあった。本作業会を主催する事で応用力学研究所のリーダーシップが一層強化され、アジア及び世界でプラズマ乱流研究を先導する事を目指す。

研究集会の開催

第一回

開催日時：2016.10.24-28

開催場所：九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長：稲垣 滋

第二回

開催日時：2017.1.26-27

開催場所：九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長：稲垣 滋

予算の執行

中国西南物理研究所(SWIP)からの1名(J. Cheng)、Warwick 大学からの1名(R. O. Dendy)の招聘旅費に執行した。

本研究集会の特徴

本研究集会は実作業を重要視する。招待者らによる話題提供、問題定義の後、各テーマの詳細講演を行う。その後グループごとにデータ解析作業を行い、参加者全員が一同に会し途中結果の報告及び議論を行う。最終日には作業結果をレビューし、サマリーを行う、という形式で行われた。今回の議論では2016年に開催されたIAEA国際会議での共著論文を主に少なくとも3編の論文が共著論文として投稿される。また、次回EPS会議での発表内容も検討した。

研究集会のまとめ

1. MHD と turbulence との相互作用

近年、静電的揺動と電磁的揺動との相互作用が注目されている。このため本会議では主に HL-2A の実験データに関して以下の点について議論を行った。

- Response of turbulence/Er at sawtooth
- Dynamic synchronization & Sawtooth
- Fulx of parallel momentum: Profiles of stresses and turbulence

鋸歯状波の伝搬に伴って乱流が増加する事が示され、統計誤差について議論された。条件付き平均法を試みる。

2. Internal Transport Barrier (ITB)

ITB は高い閉じ込め特性を有し魅力的であるが未だシミュレーションで ITB 形成の再現に成功した例はなく、その形成機構は不明な点が多い。近年 HL-2A にて ITB の形成が観測された。本会議ではその結果について以下の観点で議論を行った。

- Discovery of Double internal transport barrier, birth & termination of ITB, etc.
- Dynamic study after the collapse of the Long-Lasting Mode, by CXS conditional average

今後の作業として、いつ、どこで ITB が形成されるのか、その条件を明らかにする、ITB 形成後のフローと温度の勾配がどのような時間スケールで発展するかを明らかにする、事が了承された。

3. Ion Cyclotron Emission (ICE) と ELM との関連

ICE と ELM の関連は ELM のプリカーサの探求という点から非常に重要である。本会議ではこのテーマに関して以下の 2 つの発表があった。

“Modelling and interpretation of ion cyclotron emission chirping during ELM crashes in KSTAR plasmas”

“Ion Cyclotron Emissions around edge-localized mode”

本会議では ELM を周辺に局在化したモード構造を指し、バースト的な崩壊のステージを ELM crash と呼ぶ。どちらの現象に対しても同期して ICE が変化する。また、Crash 直前に ICE スペクトルの変化が観測された。ICE がどこから来ているのかという議論があり、周波数スペクトルから磁場強度が分かり、磁場強度から位置が特定できるとの議論があった。またその際、アンテナのサイズの制限で基本波計測の感度が低くても、高調波から基本波の周期を精度よく求められる事が確認された。

応用力学研究所研究集会

"プラズマ乱流実験の大容量データからの物理情報抽出新手法の開発"

日時: 2017年2月23日-24日

場所: 応用力学研究所2F会議室

プログラム

2月23日(木)

13:30-13:40

はじめに (藤澤)

13:40-14:10

直線ヘリコンプラズマにおける径方向構造のトムソン散乱計測 (富田)

14:10-14:40

直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析 (山田)

14:40-15:10

イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメソスケール構造の解析手法の開発 (大館)

休憩

15:20-15:50

複雑ネットワークの手法を用いたプラズマ乱流時系列データの新しい解析手法の開発 (谷澤)

15:50-16:20

レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発 (秋山)

16:20-16:50

バイスペクトル解析による電子温度勾配モードと低周波揺動の非線形結合過渡応答特性解明 (金子)

16:50-17:20 全体討論

2月24日(金)

9:30-10:10 招待講演

磁場閉じ込めプラズマにおける局在化したプラズマ変形の観測 (居田)

10:10-10:40

直線プラズマ装置 PANTA における音速分子ビーム入射軌道の観測 (小林)

10:40-11:10

医療用 CT における画像再構成手法のプラズマ乱流計測への応用 (荒川)

11:10-11:40

マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発 (徳沢)

13:30-15:00 全体討論

再生可能エネルギー発電の kW 価値と系統影響の評価

東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科 近藤 潤次

1. 序論

再生可能エネルギー発電の多くは発電出力が気象・海象状況等により変動する。一方、電力系統では常に電力需要以上の発電設備容量（供給力）を確保しなければならない。電力需要の多い時間帯は供給力に余裕が無いので、その時に高出力を期待できる電源は価値が高い。この観点で定義した発電設備の価値が kW 価値である。本研究では、風力発電、潮流発電、波力発電の kW 価値を算出した。紙面制約より、風力発電の結果については既発表資料[1]を参照いただき、本資料では潮流発電と波力発電の kW 価値の K90 手法[2]による算出結果を記す。

2. 潮流発電

日本の海域の中で、潮流の流れが速いとされる瀬戸内海の 3 地点(来島海峡・速吸瀬戸・大島瀬戸)に、水平軸プロペラタービン式[3]または垂直軸ダリウス式[4]の潮流発電機を設置した場合を想定した。図 1 に各方式の発電機の出力量を示す。潮流パワーは流速の 3 乗に比例するが、潮流パワーから発電電力への変換効率を、プロペラ式は 44% [5]、ダリウス式は 28% と想定し、定格出力に達する流速以上では定格出力になるとした。また、解析に用いたデータは、2016 年の中国電力の 1 時間毎の電力需要 [6] と、海上保安本部海洋情報部の推算 [7] した 2016 年の流速である。2016 年の中国電力において需要が高かった夏の日、冬の日、その中間期の一日における流速変化の例を図 2 に示す。潮流は潮汐と同様に、地球と月・太陽との位置関係によって定まる周期的な流れであり、日本の海域では月の引力による半日周期の M2 分潮と太陽の引力による半日周期の S2 分潮などが潮流に主要な影響を及ぼす。

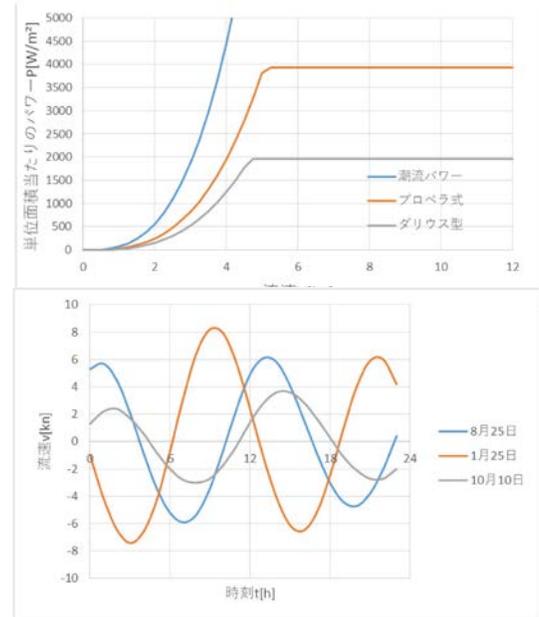


図 2 一日における流速変化の例

K90 手法では、まず 2016 年の 1 年間の電力需要が大きい上位 100 時間を抽出し、その高需要 100 時間における各潮流発電出力の持続曲線（発電出力値を大きい順に並べ替えたグラフ）を描く（図 3）。図 3 の横軸の時間確率 90% での発電出力を kW 価値とする。評価した kW 価値の値を表 1 に示す。表 1 より以下のことが分かる。

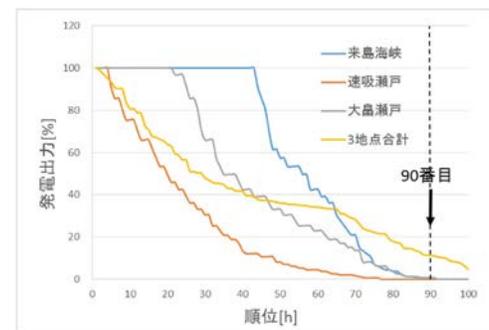


図 3 高需要 100 時間における各潮流発電出力の持続曲線（プロペラ式）

- 各潮流発電設備の kW 価値は 1% にも満たないが、3 ヶ所を集合化した総発電出力の kW 価値は 10% を上回る。これは、各潮流発電設備の出力は零となる時間があるが、3 ヶ所あれば（少なくとも高需要 100 時間は）常にどこかの発電設備は発電するという平滑化効果 [8] に依る。線路混雑の問題が無ければ、需給バランスは系統全体（今回の場合は中国電力全体）で維持すれば良いので、集合化した総発電出力に関して kW 価値を評価すべきである。
- 効率も単位面積当たりの定格出力も高く設定したプロペラ式の方が、潮流エネルギーを有効利用できる。しかし、設備利用率と集合化した場合の kW 価値はダリウス式の方が若干高くなった。これは設備利用率や kW 価値を定格出力に対する割合で評価したためである。

3. 波力発電

北海道、北陸、四国の 3 電力系統エリアの沿岸（北海道 5 ヶ所、北陸 4 ヶ所、四国 6 ヶ所）に、

表 1 潮流発電の設備利用率と kW 価値の評価結果

		来島海峡	速吸瀬戸	大島瀬戸	合計
プロペラ式	設備利用率[%]	46	17	41	
	K90値[%]	0.78	0.00	0.78	11.34
ダリウス式	設備利用率[%]	51	21	46	
	K90値[%]	0.00	0.00	0.00	14.19

Pelamis Wave Power 社により開発された Pelamis 波力発電装置 (定格 750 kW) を設置した場合を想定した。図 4 に Pelamis の発電出力特性を示す。波力パワーは有義波高 $H_{1/3}$ の 2 乗と有義波周期 $T_{1/3}$ の積に比例する式で表されるが、Pelamis の発電出力もこれらを変数とした表で記されている [9]。また、解析に用いたデータは、2013-2015 年の北海道、北陸、四国の各電力会社エリアの 1 時間毎の電力需要 [10-12] と、NOWPHAS 波浪観測データ [13] である。

一例として、2015 年における高需要 100 時間における各波力発電出力の持続曲線を図 5 に示す。図 5(c)において集合化の時間確率 90%が90 時間とずれている理由はデータ欠損である。図 5 から分かるように、今回の評価の結果では、各波力発電設備も集合化総出力についても、kW 値はほぼ零となった。その原因は、高需要期にあまり発電できていない事、数カ所の集合化では平滑化効果が小さいこと、日本の海象に対して Pelamis の定格出力が大きすぎる事¹が挙げられる。

4. 結論

波力発電と潮流発電の kW 値を評価した。今回の評価結果では、潮流発電では比較的高い kW 値を望める結果となった一方で、波力発電の kW 値は低い結果となった。ただし波力発電設備として想定した Pelamis の定格出力が大ききことと、kW 値を定格出力に対する割合で表した影響が大きい。最後に、本報告書の図やデータは当研究室に在籍する井手裕介君と西野順菜さんの卒業論文より引用したことを付記し、感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 齋藤大地・鈴木優・近藤潤次：「風力発電の kW 値の評価手法の比較」, 電気学会新エネルギー・環境/高電圧合同研究会, FTE-16-35, pp. 133-138 (2016.7)
- [2] 宮崎聡・阿部英文・山地憲治・都筑建：住宅設置太陽光発電データ分析による kW 値の評価, 電気学会論文誌 B, 124 巻 11 号, p.1293-1299 (2004)
- [3] 川崎重工業株式会社：「着定式潮流発電装置」, 平成 25 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会発表資料, <http://www.nedo.go.jp/content/100546658.pdf>, pp. 38-47 (2013)
- [4] 木方靖二・塩野光弘：「来島海峡におけるダリウス形水車による潮流発電」, 電気学会論文誌 D, Vol.112, No.6, pp.530-538 (1992)
- [5] 藤井雅之・綿屋茂男：「大島瀬戸の潮流発電に関する研究」, 独立行政法人国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校紀要 39, pp. 52-57 (2006)
- [6] 中国電力でんき予報：過去の電力使用実績データ, <http://www.energia.co.jp/jukyuu/download.html>
- [7] 第五管区海上保安本部海洋情報部：「瀬戸内海潮流推算」, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN5/index.html>
- [8] 例えば, 日本風力エネルギー学会訳：「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社, pp. 108-110 (2013)
- [9] J. Aubry, H.B. Ahmed, B. Multon, A. Babarit, A. Clement, "Wave Energy Converters", Ch. 11 in Marine Renewable Energy Handbook, pp. 323-366, ISTE Ltd., 2012.
- [10] 北海道電力：「過去の電力使用状況データダウンロード」, <http://denkiyoho.hepco.co.jp/download.html>
- [11] 北陸電力：「電力使用状況データダウンロード」, <http://www.rikuden.co.jp/denki-yoho/index.html#download>
- [12] 四国電力：「過去の使用状況データのダウンロード」, <http://www.yonden.co.jp/denkiyoho/download.html>
- [13] 国土交通省港湾局：「全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス) 波浪データ」, <http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.htm>
- [14] 渡部富治・近藤叔郎：「21 世紀のクリーンな発電として波力発電 (原理から応用まで)」, パワー社, p. 101 (2005)

¹ 文献 [14]に「Pelamis の定格出力 750 kW は、有義波高 $H_{1/3}=5.5$ m, 有義波周期 $T_{1/3}=8$ s, 単位幅当たり波力パワー106.5 kW/m という常識外の高い波力パワーを基準にしているため、実海域運転での設備利用率は大変低い値(例えば 10%以下)になりかねない。」旨の記述がある。

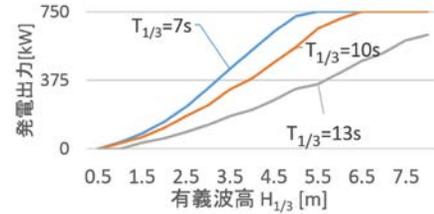
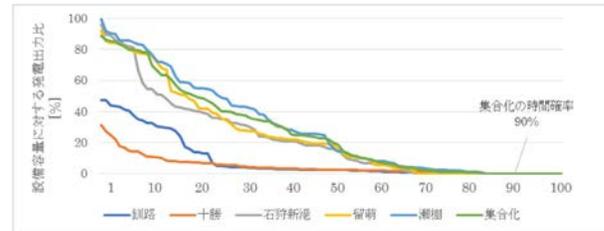
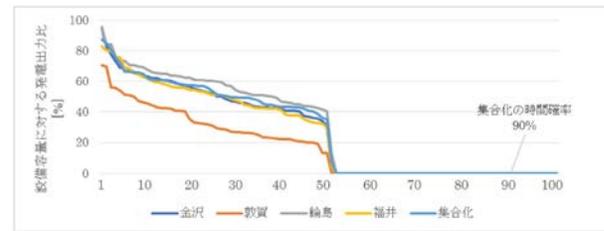


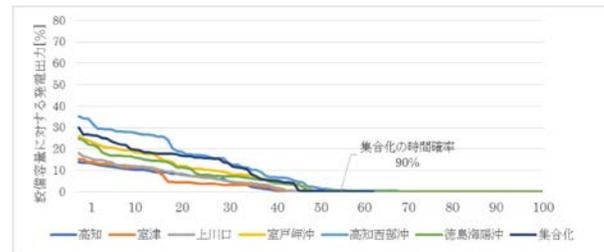
図4 Pelamis の発電出力特性



(a) 北海道



(b) 北陸



(c) 四国

図 5 高需要 100 時間における各波力発電出力の持続曲線

風力発電の電力系統瞬時電圧低下時の制御手法の開発

Development of Instantaneous Voltage Drop Detection Device in Power System for Wind Turbine

代表：雪田和人（愛知工業大学 工学部 電気学科）

所内世話人：吉田茂雄（九州大学 応用力学研究所）

目的

再生可能エネルギーによる発電装置を電力系統と連系する場合、各国で規定されている系統連系要件（グリッドコード）に基づいた制御が必要となる。このグリッドコードには、電力系統の瞬時電圧低下が発生した場合、電力系統に大量連系している発電装置のいっせい解列による電力系統の不安定を防ぐために、電力系統との連系を維持し運転を実施するフォルトライドスルー（FRT）についても記載されている。このFRTに関しては、太陽光発電装置においては十分な研究開発が実施されているものの、発電機のエネルギーを時々刻々変動する風に依存している風力発電に関しては十分でないものと思われる。特に、数 kW から数十 kW の小型風力発電機を系統連系する場合には、経済性の観点から太陽光発電用の系統連系装置が用いられる場合も少なくない。しかしながら、出力変動が激しい風力発電に関しては、太陽光発電用に調整された系統連系装置が十分な対応ができないものと想定される。

そこで本研究では、実際の小型風力発電を用いて、風力発電の出力変動が発生した場合にも、グリッドコードを満たすシステムの開発について基礎的な検討を実施した。

提案方法

発電能力が数 kW 程度の小型風力発電は、大型風力発電装置と異なり、経済性の観点などから高価パワーエレクトロニクスなどが導入されていなく、風車と発電機からなる単純な構造なものが多くが現状である。また、大型発電機と異なり小型の場合は、回転数が高く、慣性も小さいことが特徴としてあげられる。このため、太陽光発電装置の出力変動と比較すると、系統連系装置の入力されるエネルギーは変動が激しいことが予想される。さらに、系統連系装置が起動し、系統連系実施の瞬間においては、十分なエネルギーが必要とされるため、系統連系装置入力側の電圧低下が懸念される。このような一次側での電圧低下が発生した場合、この低下深度にも依存するが、再度系統連系するまでに数分間の待機時間が必要とされる場合がある。このような小型風力発電システムにおける年間総発電量について注目すると、大きな損失となることが予想される。

そこで本研究では、以下の方法について検討を実施した。

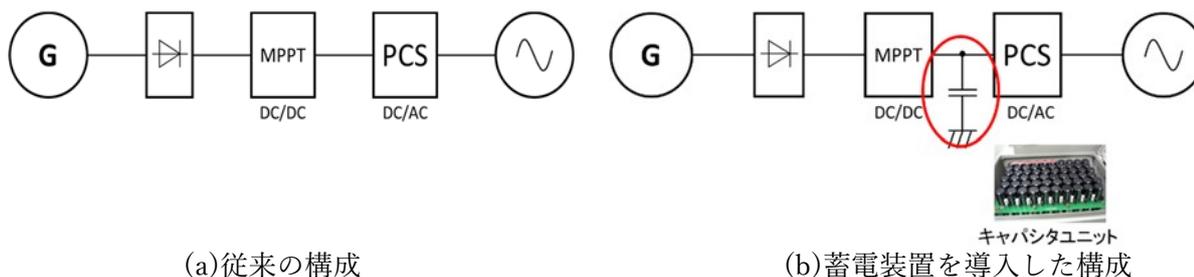
- (1) .系統連系装置の入力側である一次側の電圧低下発生時においても、数秒で再連系する方法
- (2) .系統連系装置の入力側に小容量の蓄電装置を導入する方法

モデル系統

本研究で用いたモデル系統の構成図を図1に示す。また、実際の外形を図2に示す。さらに、各装置の仕様を表1に風力発電機、表2に系統連系装置を各々示す。

本研究は、図1に示すような小型発電機、整流器、系統連系装置、最大負荷追従装置、蓄電装置から構

成して小型発電機モデルを用いた。同図に示すように系統連系装置の一次側には最大負荷追従装置が接続し、二次側には電力系統としている。



(a)従来の構成

(b)蓄電装置を導入した構成

図1. モデル系統

表1.風力発電の仕様

設備名称	風力発電装置
タイプ	直線翼垂直軸型
翼数	5枚
容量	2kW



(a)小型風力発電装置



(b)系統連系装置

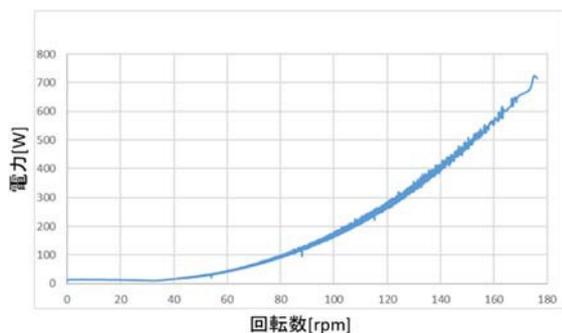
図2. 実験装置外形図

表2. 系統連系装置の仕様

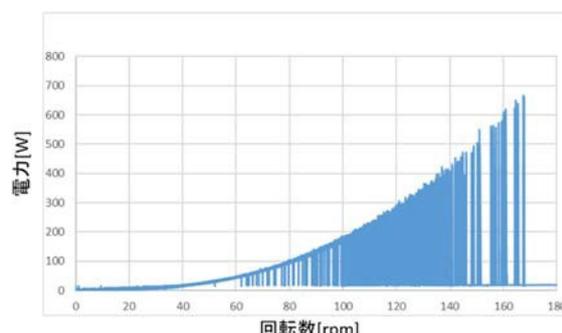
設備名称	パワーコンディショナー (太陽光発電用)
出力容量	10kW
入力電圧	DC 150~570V
出力電圧	AC 202V

実験結果

本研究の実験結果を図3に示す。同図には発電機の回転数と電力の特性を示している。ここで図3(a)には本研究で提案した(1)と(2)を併用した場合であり、(b)は従来の構成の場合である。(a)と(b)を比較すると、従来のシステムでは回転数が高くなるにつれて電力が安定していないが、提案方法を導入したシステムでは、回転数と電力が安定していることがわかる。これにより、本提案方法の有効性がわかる。



(a) 提案方法実施時

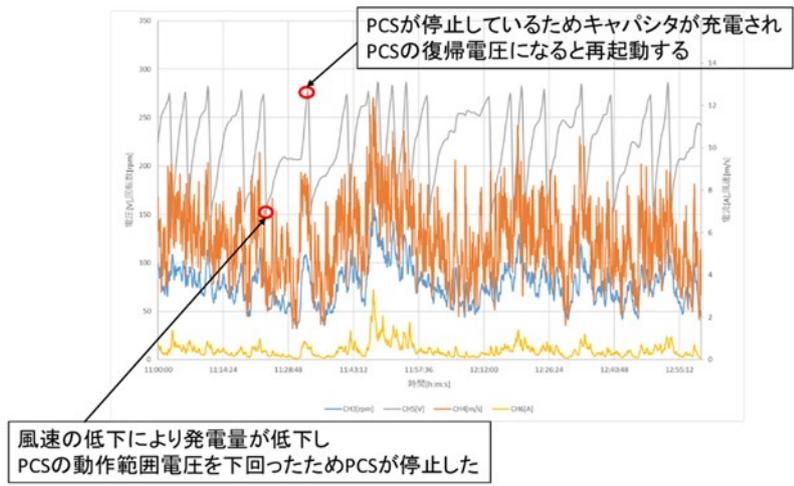


(b) 従来方法実施時

図3.実験結果 (回転数と電力特性)

成果報告

濱仲真和、雪田和人、細江忠司 (愛知工業大学) 吉田茂雄 (九州大学): 風力発電の電力系統瞬時電圧低下の一検討, 電気学会 東海支部 第2回若手セミナー 2017年2月



マルチカラム型波力発電装置 MC-OWC のエネルギー変換性能に関する研究

九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門

安澤 幸隆

E-mail : yasuzawa@nams.kyushu-u.ac.jp

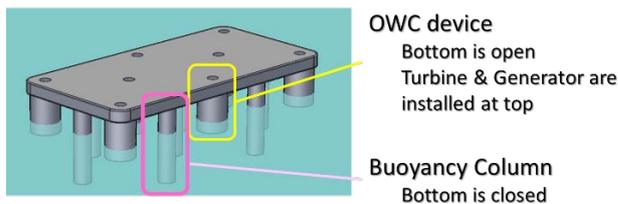
東日本大地震以降、原子力発電の長期停止および削減方針により、日本の発電量のおよそ9割が化石燃料による発電から得ている。しかし、その化石燃料はほぼ全量を海外から輸入に頼っている状況であり、化石燃料の産出国には政治情勢が不安定な中東地域も多いため、化石燃料の安定供給が困難になる可能性がある。この状況において、エネルギー源を原子力や化石燃料に替わるエネルギー源が求められており、地域自立型である海洋再生可能エネルギーの利用に関心が高まっている。

そこで、著者らは、海洋再生可能エネルギーの1つである波力エネルギーに着目し、複数の発電用カラムと浮力カラムおよびデッキ構造からなるマルチカラム型波力発電用浮体の研究をおこなっている。これまでの研究において、複数の円筒振動水柱(以下:OWC)カラムに対して、波およびOWC内の水領域に対して3次元境界要素法に基づき、複数のカラム間の相互干渉影響および空気室との干渉を含んだ波浪中応答を計算するプログラムを開発した。

さらに九州大学応用力学研究所の深海水槽を利用して、複数の発電用カラムと浮力カラムを配置して実験を行い、空気室内の水位や圧力を計測しエネルギー1次変換性能を解析して数値解析の値と比較し、マルチカラム型波力発電装置の一次変換応答特性について研究してきた。

その結果、数値解析結果の周波数応答曲線の水槽試験結果と数値解析結果は、定性的にも定量的にもよく一致し、カラム間の流体力学的干渉についても、両者で確認できた。しかし、試験結果による一時変換効率の周波数応答曲線には、数値解析では得られない変動やピークが観察された。

そこで、数値解析の高精度化を目指し、非線形性の強い、空気室の挙動について理論的検討を行った。実機サイズでは、圧縮性影響が顕著になるという scale effect が示された。今後、それを検証するための水槽試験を実施する予定である。



マルチカラム型波力発電浮体



水槽試験用試験体

高空の風力利用についての研究

(株) T M I T ・研究開発部・所長、
首都大学東京・システムデザイン学部・客員教授
藤井 裕矩

要旨

今後ますます我が国の再生エネルギー生産において重要な分野となると予想される風力エネルギー発電方法について、強い恒常的な風力が得られる高空風力発電について基礎研究を行った。世界的にも先進的な高度な技術が要求されるため、その基礎的な部分である軽量風車の開発について実験的に研究を進めた。

序論

風力発電が今後の重要な自然エネルギー供給手段であることは言を待たない。風力発電においては風況の良い場所の選択が主要な要素である。風況の良いところとして、地表部のキャノピーを越えた高度の位置が一つとしてあげられる。このような高空における風力発電技術ははまだ未開発の分野として残され、海外でも米国、オランダなどで開発の端緒が開始されたところである。本研究は、代表者の提唱のもと日本で関係する研究者たちが高空風力を利用した風力発電の研究を主軸にして結集したものである。この研究者は、直線翼型風車の研究者・製作者、UAVや飛行船、さらに航空機などの飛行技術の研究者・製作者、制御技術研究者、宇宙テザー技術の研究者、各種メカニズム設計製作の研究製作者などからなる専門家集団を形成している。このうちテザー技術はエネルギー伝達機構として有望視されているものである。一方、九州大学応用力学研究所における共同研究の大きな枠組みとして平成 22 年度より「新エネルギー力学」の分野が作られ、九州大学でも風力発電技術の研究開発にかかわっており、新川教授においては高空発電に関する本研究におけるリーディング・メンバーとして、大きな期待を背負ってもらっている。このため、九州大学応用力学研究所との共同として研究を遂行した。

実験日程と経過

2016 年 3 月 13-14 日に行ったフェーズ 1.5 (0.2kW 級) の風車性能の風洞実験 (工芸大学) に続いて、本年度は以下のように実施した。

- ▶ 2016 年 5 月 21、22 日 敦賀松原海水浴場においてフェーズ 1 モデルのデモンストレーション実験
- ▶ 2016 年 6 月 1 日 神奈川工科大学においてテザーによるトルク伝達実験
- ▶ 2016 年 7 月 1 3 日 石川県白山市松任海水浴場において風の浮揚実験 (離陸、安定、着陸) 実験
- ▶ 2016 年 8 月 3-5 日 神奈川工大においてフェーズ 1.5 テザー伝達試験
- ▶ 2016 年 9 月 11-14 日 九州大学風洞と応用力学研究所、九州大学筑紫キャンパスにおいてフェーズ 1.5 (0, 2kW 級) 風車の風洞実験。
- ▶ 2016 年 9 月 11-14 日 日本機械学会 2016 年度年次大会 (九州大学伊都キャンパス) に参加。
- ▶ 2016 年 9 月 15 日 九州大学 応用力学研究所において「第 4 回全体会議」開催、(西棟 6 F 多目的

研究交流室)

- ▶ 2016年10月29、30日 工芸大風洞を用いたテザー型飛翔体、エレボン装備機とインフレーター軽量設計機の風洞実験
- ▶ 2016年3月16、17日 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会(東京理科大学)に参加し17日には第5回全体会議」を開催(予定)

技術課題への成果

本年度の研究成果により、以下の2つの技術課題について、3のように風洞実験でのデモンストレーションを行った。

技術課題：

1. 試作した軽量風車の性能実験

風洞における動作・性能測定

2. エネルギー伝達手法

フェーズ1.5における試作軽量風車からテザーでつながれた発電機へのトルク伝達実験

デモンストレーション：

3. フェーズ1.5 (0.2kW) 風車全体風洞実験

フェーズ1.5風車は、0.2kWとはいえ、直径0.6m、全幅は1.5mにも及ぶ大型となる。このため、九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞を用いて2016年9月11-14日に風車自由回転実験ならびにテザー伝達による発電デモンストレーションを行った(Fig.1: 図中、直径600mm、スパン1500mmの直線翼風車が天井に吊り下げられ回転し、テザーを介して台上の発電機に回転エネルギーを伝達する。)。その結果、Fig.2に示すように直線翼風車が揚力型としての回転を行うことを確認し、現在解析中であるが、発電の確認を行った。

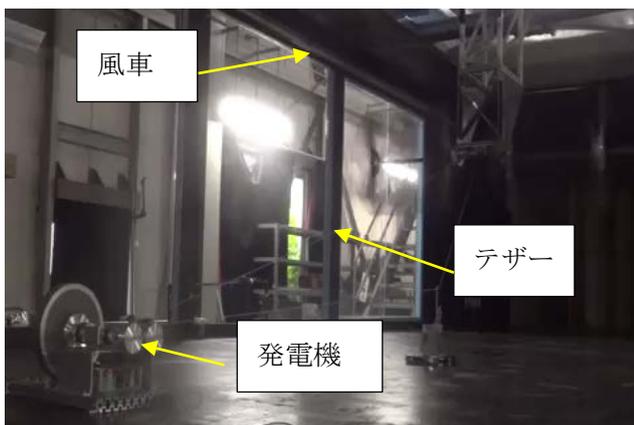


Fig.1 大型境界層風洞での実験

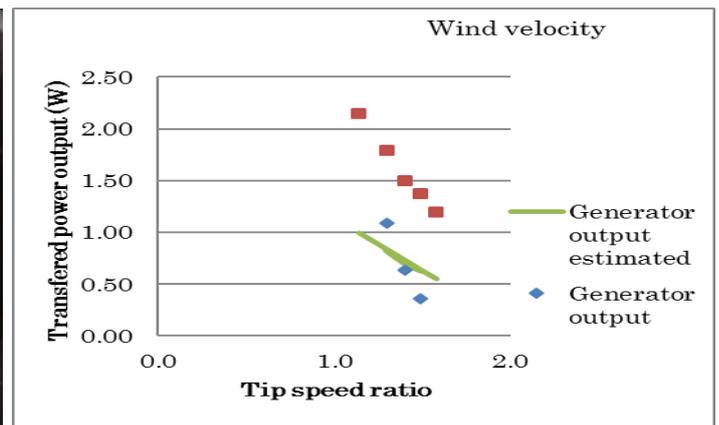


Fig.2 周速に対する伝達された電力値

主に以上の3点については結果と考察について、いずれも、「研究成果報告」の節で示したように学会で発表し、議論した。(「研究成果報告」の項参照。)

研究組織（性別・年齢）

氏名	所属	役職	性別	年齢
藤井 裕矩	T M I T	所長	男	71
大久保 博志	神奈川工科大学	教授	男	66
新川 和夫	九州大学	教授	男	——
草谷 大郎	都立産業技術高専	准教授	男	——
高橋 泰岳	福井大学	准教授	男	43
中嶋 智也	大阪府立大学	講師	男	——
遠藤 大希	九州大学	博士課程 1 年	男	27
上井 満広	神奈川工科大学	修士課程 2 年	男	25
丸山 勇祐	前田建設	研究員	男	45
岩原 誠	(有) ザクシス	代表取締役	男	——

研究成果報告

*学会論文

- 1) Hironori A. FUJII, Masahito HIRAKAWA, Mitsuyosi Tuchiya and Kenji UCHIYAMA, Space tether technology and its application to air borne wind energy generation, Proceedings of the 26nd Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, Yoshinodai, Kanagawa, 2016、 pp.TBD.
- 2) 藤井裕矩, 平川雅人, 内山賢治, 渡部武夫, 草谷大郎、「風型テザー風車の動力伝達テザーとテザー形状の検討」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016 年 6 月, pp. 39-46.
- 3) 草谷大郎, 藤井裕矩, 川崎天揮, 富田匠, 黒田将茂, 角館李果、「高空風力発電用の繫留型オールインフレータブル構造航空機の検討」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016 年 7 月 18 日, pp. 47-54.

*学会発表

- 1) 藤井 裕矩、渡部 武夫、草谷 大郎、小島 広久、「スーパー・テザー展開性能の飛行後検討」、(社)日本航空宇宙学会第 47 期定時社員総会/年会講演会、2016 年 4 月 14~15 日、東京大学山上会館。
- 2) 草谷大郎, 川崎天揮, 富田匠, 黒田将茂, 角館李果、「インフレータブル飛行機の検討と無人機試作」、日本航空宇宙学会第 47 期定時社員総会/年会講演会講演集 CD-ROM 1B13, pp. 201-202、2016 年 4 月 14~15 日、東京大学山上会館。
- 2) 草谷大郎、藤井裕矩、渡部武夫、「係留気球式高空発電装置の動向と取り組み」、ブイヤント航空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016（平成 28 年）年 6 月 20 日。
- 3) 藤井裕矩、渡部武夫、草谷大郎、内山賢治、「走行するテザーを持つ風型風車の運動の定式化について」、第 2 回ブイヤント航空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016（平成 28 年）年 6 月 20 日
- 4) 土屋光慶、藤井裕矩、平川雅人、草谷大郎、内山賢治、「近年のインフレータブル・カイトプレ

- ーンの形式とオーバービュー」、第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、2016年7月18日。
- 5) 草谷大郎、藤井裕矩、川崎天揮、富田匠、角館李果、黒田将茂、「高空風力発電用のインフレーター航空機の検討」第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、2016年7月18日。
- 6) 大久保博志、佐藤 強、原田恭輔、渡辺大誠、藤井裕矩、「高空プラットフォームを利用した風力発電に関する研究」、第60回宇宙科学技術連合講演会講演集、JSASS-2016-4187、2016.9.7
- 7) 藤井裕矩、大久保博志、丸山勇祐、栗田 篤、Zxivanovich Sava、「テザーシステムによる再生可能エネルギーの伝達について」日本機械学会2016年度年次大会、J0550404、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス。
- 8) 丸山勇祐、藤井裕矩、大久保博志、岩原 誠、佐藤 強、原田恭輔、松井 正宏、関 和希、「テザーを活用した浮遊風車への縦軸直線翼風車 の特性について」、日本機械学会2016年度年次大会、J0550405、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス
- 9) 遠藤大希、「複合高空発電プラットフォームの基礎研究」、日本機械学会2016年度年次大会、J0550407、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス
- 10) 近藤智行、高橋泰岳、小島令子「カイト型テザー係留飛行ロボットを用いた小型 風力発電システムの試み」日本機械学会2016年度年次大会、G1500401、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス
- 11) Hironori A. FUJII, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, and Takeo Watanabe,"Air Borne Wind Energy Generation on Tethered System," *Proceedings of WVEC2016 TOKYO C-3-6*,(2016), 2 November 2016,University of Tokyo, Japan.
- 12) 草谷 大郎、富田 匠、藤井 裕矩、「高空風力発電用カイツーン」第38回風力エネルギー利用シンポジウム、2016年11月30日・12月1日、科学技術館、千代田区、東京、B5-4.
- 13) 藤井 裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「テザーを用いた風力発電について(機能試験)」、第38回風力エネルギーシンポジウム、第38回風力エネルギー利用シンポジウム、2016年11月30日・12月1日、科学技術館、千代田区、東京、C4-6.
- 14) 藤井裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「テザー型高空風力発電の研究-2016年度進捗報告」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-01、2017年3月16-17日、東京理科大学。
- 15) 真志取秀人、伊藤 香織、井上 美潮、「垂直軸風車のための曲率翼に関する予備研究」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-02、2017年3月16-17日、東京理科大学。
- 16) 原田恭輔、佐藤 強、相原浩司、小川慎平、大久保 博志、藤井 裕矩、遠藤 大希、丸山 勇祐、「テザー型高空風力発電の研究—直線翼風車モデル(Phase1.5)の風洞試験」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-03、2017年3月16-17日、東京理科大学。
- 17) 花田 泰智、遠藤 大希、高橋 泰岳、田村 剛志、「連風浮体利用型高空風力発電に関する実験的研究 (IoT計測機器の有用性に関する報告)」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-04、2017年3月16-17日、東京理科大学。OS0201-04、
- 18) 近藤智行、高橋泰岳、遠藤大希、「連風を用いた小型高空風力発電の試み」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-05、2017年3月16-17日、東京理科大学。
- 19) 山本広樹、草谷大郎、「高空風力発電用繫留テザーのためのトルク制御アーム付巻取装置モデル」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-06、2017年3月16-17日、東京理科大学。
- 20) 丸山勇祐、藤井裕矩、大久保博志、遠藤大希、草谷大郎、関和希、「テザーを利用した高空風力発電装置の設備利用率に関して」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0202-01、2017年3月16-17日、東京理科大学。
- 21) 大久保博志、小川慎平、相原浩司、原田恭輔、佐藤強、藤井裕矩、岩原誠、丸山勇祐、「テザー型高空風力発電の研究—テザーによる動力伝達について」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0202-02、

2017年3月16-17日、東京理科大学.

2 2) 藤井裕矩、平川雅人、土屋光慶、内山賢治、「テザー型飛翔体の運動特性の基礎研究」
草谷 大郎、「高空風力発電用繫留型インフレータブル飛翔体の検討」、日本機械学会関東支部第23期総会・
講演会 OS0202-03、2017年3月16-17日、東京理科大学.

2 3) 草谷大郎, 富田匠, 藤井裕矩, 丸山 勇祐、渡部武夫「高空風力発電用繫留型インフレータブル飛翔体の
検討、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0202-04、2017年3月16-17日、東京理科大学.

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究（一般研究）の助成を受けたものである。

三角翼バタフライ風車の開発研究および流体構造連成解析

鳥取大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻 原 豊

1. はじめに

鳥取大学は、小形風力発電の低コスト化を目指して垂直軸風車の過回転抑制機構(OCS: Over-speed Control System)の開発を行っており、その実効性を示してきた。現在、企業等の協力も得て、図1(a)に示す実用機サイズの小形風力発電機として、アルミ三角翼バタフライ風車の試作機を開発中である(ただし、2017年2月時点では発電機などの電装部品は装備されていない)。本研究は、この風車の性能や安全性を予測するため、翼一枚ごつて有限要素法(FEM: Finite Element Method)による構造解析と数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)による流体力解析を連成させた流体構造連成解析(FSI: Fluid Structure Interaction)を行い、垂直軸風車の翼の挙動と安全性に関する知見を得ることを目的とする。本年度は、その前段階として翼一枚ごつてのFEM構造解析とCFD解析をそれぞれ独立に(非連成で)実施した。

2. 方法

計算対象は、ロータ直径: $D=7.0\text{ m}$ 、ロータ高さ: $H=2.7\text{ m}$ 、翼弦長: $c=0.242\text{ m}$ 、翼型:NACA0018の垂直軸タイプの三角翼バタフライ風車の一つの三角翼(図1(b))である。計算ソルバーはFEMとCFDの両解析ともにSTAR-CCM+ ver.11.02を用いた。構造解析で簡単のため、翼の端面を完全固定(位置、角度の各々3成分を固定)とした。計算格子はテトラメッシュを選択し、基準サイズは2mm、総セル数約920万セルである。FEMでは遠心力と重力のみを考慮し、空力荷重は考慮していない。流体解析の計算領域は直径 $48D$ 、長さ $64D$ の円柱体積内とし、流入端より $24D$ の位置に風車モデル(一翼)の回転中心を設定した。CFD解析では主として非構造格子のポリヘドラルメッシュを採用した。計算領域の総セル数約1200万セルである。風速は 12 m/s とし、先端周速比が3.0, 4.0, 5.0, 5.5となる4つの回転数(65rpm, 85rpm, 110rpm, 120rpm)について計算した。本研究のCFDでは平均特性がほぼ収束する6回転まで計算を実行し、最後の1回転のトルク平均値からトルク係数や出力係数などを算出した。なお、本対象風車の回転数が110rpm以上では傾斜角が 5° 以上になるが、本年度の計算では翼傾斜は考慮していない。

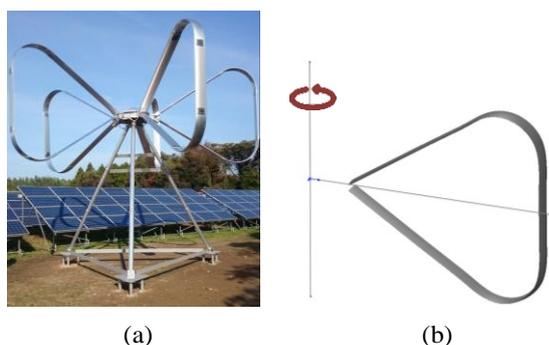


図1 三角翼バタフライ風車の実証機(a)と翼解析モデル(b)

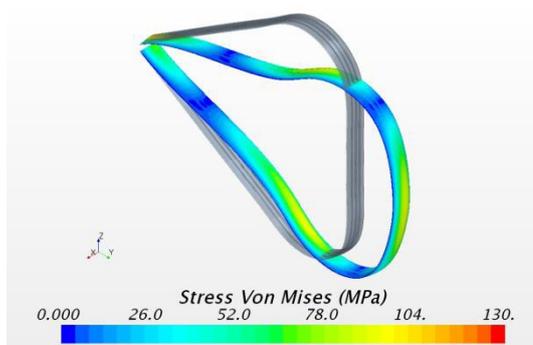


図2 変形量と応力分布($N=120\text{ rpm}$)

3. 主な結果と考察

回転数 $N=120\text{ rpm}$ の場合の構造解析結果を図2に示す。灰色で示す翼は変形前の翼形状であり、カラーグラデーションが変形後の形状を10倍に拡大して表示したものであり色が応力を表す。翼は半径方向外向きに大きな遠心力を受け変形している。最大応力は翼根元で発生し、その大きさは 155.14 MPa である。一方最大変位は回転中心から最も離れている翼の直線部中央で発生し、その大きさは 79.46 mm である。 $N=110\text{ rpm}$ までの最大相当応力は材料の許容応力 136 MPa 以下であり、

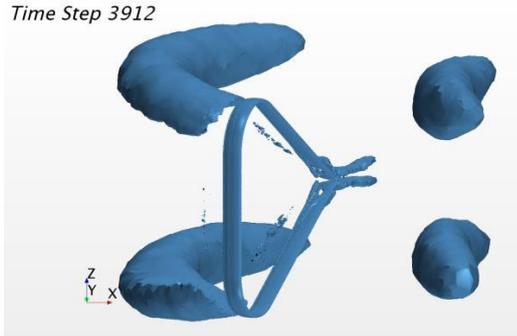


図3 Q 値等値面($Q=5\text{ s}^{-2}, \lambda=5.5$)

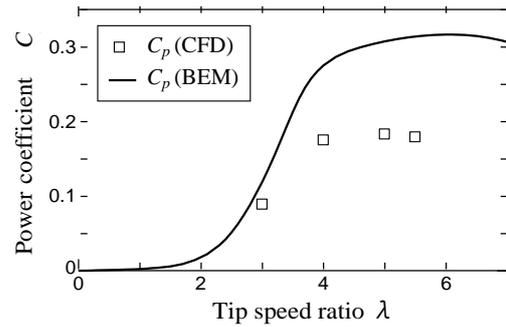


図4 1つの翼の出力係数に関する CFD と BEM の比較

全固定の翼端面を除けば、最大回転数の $N=120\text{ rpm}$ においても、許容応力を下回る結果となっている。

CFD で計算された Q 値の等値面($Q=5\text{ s}^{-2}$)を $\lambda=5.5$ の場合を例として図3 に示す。図3 より翼の曲線部から翼端渦に相当する渦が放出されていることが分かる。図4 は出力係数 C_p の先端周速比依存性である。CFD の結果 (シンボル: □)に加え、翼素動量理論(BEM)に基づく結果も実線で示してある。CFD による予測 C_p は $\lambda=5$ において0.18 を示し、出力としては1062 W に相当する。BEM と CFD の予測は定性的には一致している。しかし、過去の実験値で調整したパラメータを用いたBEM 予測に比べて、CFD 予測の C_p はその約58 %であり小さい。原因として計算格子が粗い可能性がある。現状の計算コストを考えると、計算格子密度を広い領域でさらに密にすることは現実的ではないが、今後、不一致の要因や改善などを検討していく必要がある。

【研究組織】

原 豊	代表者	鳥取大学大学院	准教授	男	52 歳
奥谷将裕	協力者	鳥取大学大学院	修士2 年	男	24 歳
田川公太郎	協力者	鳥取大学・地域学部	准教授	男	45 歳
住 隆 博	協力者	佐賀大学大学院	准教授	男	43 歳
秋元博路	協力者	大阪大学大学院	特任教授	男	49 歳
吉田茂雄	所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授	男	50 歳

【成果報告】

- (1) Masahiro Okutani, Yutaka Hara, Kazuki Mishima, Kotaro Tagawa, Shigeo Yoshida, A Study on Triangular - Blade Butterfly Wind Turbine with Mechanical Over-Speed Control System, The 6th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering (JSMME 2016), B3-6, 2016. 9. 24-27, 鳥取大学.
- (2) Masahiro Okutani, Yutaka Hara, Kazuki Mishima, Kotaro Tagawa, Shigeo Yoshida, PERFORMANCE PREDICTION OF TRIANGULAR-BLADE BUTTERFLY WIND TURBINE WITH MECHANICAL OVER-SPEED CONTROL SYSTEM, The 15th World Wind Energy Conference and Exhibition (WWEC2016 TOKYO), D-5-1, 2016.10.31-11.2, 東京大学.
- (3) 奥谷将裕, 原豊, 田川公太郎, 吉田茂雄, 佐野貴聡, 三角翼バタフライ風車の構造と流体力に関する数値解析, 日本機械学会 中国四国支部第55 期総会・講演会, Paper_No.409, 2017.3.7, 広島工業大学(発表予定).

ガウス関数を用いた水平軸風車後流速度分布の表現

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 要旨

変動流入風に対する風車後流モデルの構築のため、主流風の風向変動が風車後流の速度欠損領域に与える影響に着目し、風向標準偏差の影響を考慮したガウス関数を用いた風車後流モデルの開発を行った。

2. 序論

ウィンドファームでは、上流側風車を通過することにより発生した後流が下流側風車の発電量低下や疲労増加を引き起こす。したがって、ウィンドファームにおける最適な風車配置の提案や、ウィンドファームの総発電量の予測のためには、風車後流の速度分布の正確な予測が求められる。しかし、風車後流の速度分布は、主流の乱流強度や流入風向、ウィンドシアといった様々な流入風条件に影響を受ける。

本研究では、水平軸風車の後流速度分布を正確に予測するために、主流の条件を考慮できる風車後流モデルを構築することを目的とする。とくに、後流の回復は主流と後流の混合によるものであるため、自然風況下では主流の乱流強度よりも風向変動が後流の回復に大きく影響していると考えられる。そこで、本申請では主流の風向変動に焦点を当てた後流モデルの開発を行う。

3. 方法

水平軸風車後流モデルの基本形として、風車スケールモデルを用いた風洞実験を行い、定常流に適用できるガウス関数後流モデルを構築する。この後流モデルでは、後流の最大速度欠損値と後流広がり幅の半値（半値全幅）をパラメータとして用いる。次に、風車への流入風の風向（ヨー偏角）と風車後流の横方向への移動量の関係を明らかにする。ヨー偏角時の流入風と後流の速度三角形を風車軸方向の誘導速度係数を考慮して仮定する。そのために、30kW風車を用いたフィールド実験の時系列データを用いて、流入風の風向から予測される風車後流中心の横方向移動量および後流の横方向分布を比較する。また、主流の風向変動が風車後流に与える影響をガウス関数後流モデルに組み込むため、後流風速分布の半値全幅を風向標準偏差の関数として表す。さらに、風向変動を考慮したガウス関数後流モデルにより、風車後流の風速分布を計算し、30kW風車のフィールド実験で計測された後流の速度分布と比較を行い、開発した後流モデルの妥当性を検証する。

4. 結果と考察

4.1 ガウス関数を用いた風車後流速度場のモデル化

- (1) 斜め流入風状態では風車後流の風速欠損は正面流入風状態と比較し低下する。ガウス関数後流モデルにおいて、ロータ面に働く推力の減少をヨー偏角から見積もることにより、この影響の考慮を行った。
- (2) 斜め流入風状態において風車後流に偏向が生じる。風車後流中心の横方向位置 Y は風車ロータ回転面通直後の風向 θ_{wake} で直線的に移動するものと仮定し、 θ_{wake} を流入風向 θ およびロータからの主流方向距離 x の関数として次式のように表した。

$$Y = x \cdot \tan \theta_{\text{wake}} = x \cdot \tan \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{3}{2} \cdot \tan \theta \right) \right\} = \frac{3}{2} x \cdot \tan \theta$$

- (3) 流入風向から予測した風車後流中心の横方向移動量と風車後流による速度欠損領域の横方向分布を比較し、流入風向と風車後流の移動量は多くの時間帯でおおむね同様の変動を示し、風車後流が

流入風の横方向速度によって移動していることを確認した。

- (4) 風向標準偏差 σ_θ に対する半値全幅 D_r の拡大率を一次関数で近似し、半値全幅 D_r を風向標準偏差 σ_θ の関数として表した結果、次式が得られた。

$$D_r = 0.0366 \sigma_\theta + 1.0784$$

- (5) モデルの簡易化のため、風車後流の分布形状およびロータ回転面に働く局所推力の分布の変化を無視して、同心円状のガウス関数を用いた。風車後流速度分布は、流入風速にウィンドシアの速度分布を考慮し、次式のように表した。

$$U_{\text{wake}}(r) = U_{\text{ref}} \hat{U}_N(r) = U_{\text{hub}} \left(\frac{z+H}{H} \right)^{\alpha_s} \left[1 - \hat{U}_D \exp \left\{ -\frac{r^2}{2\hat{D}_r^2} \right\} \right]$$

4.2 フィールド実験結果との比較

- (1) モデルの計算結果と実験値の風速の最大欠損値および半値全幅はおおむね一致した。
- (2) 周速比が大きくなるにしたがってロータ推力および後流内主流方向無次元風速比の最大欠損量は大きくなる。モデルはこの傾向をよく再現した。
- (3) 乱流強度別のデータセットを作成し、データセット中の風向標準偏差の平均値を算出し、間接的に乱流強度と風車後流の速度分布の関係を示した。モデルの計算結果もフィールド実験結果も、乱流強度が大きくなるにしたがい、後流風速の最大欠損値が減少する傾向がみられた。
- (4) 翼ピッチ角を変化させたときの風車運転状態における風車後流速度分布を抽出し、モデルとの比較を行った。いずれのピッチ角においても、モデルの計算結果と実験値の風速の最大欠損値および半値全幅はおおむね一致した。また、モデルはピッチ角が大きくなることによる、推力の低下や最大欠損値の減少をよく再現した。

5. 研究組織

研究代表者 前田太佳夫 (男・53 歳) , 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 教授
 研究協力者 鎌田 泰成 (男・48 歳) , 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 准教授
 研究協力者 村田 淳介 (男・35 歳) , 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 助教
 研究協力者 藤原 惇嗣 (男・25 歳) , 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 博士前期課程
 研究協力者 松岡賢史朗 (男・23 歳) , 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 博士前期課程
 所内世話人 吉田 茂雄, 九州大学応用力学研究所, 教授

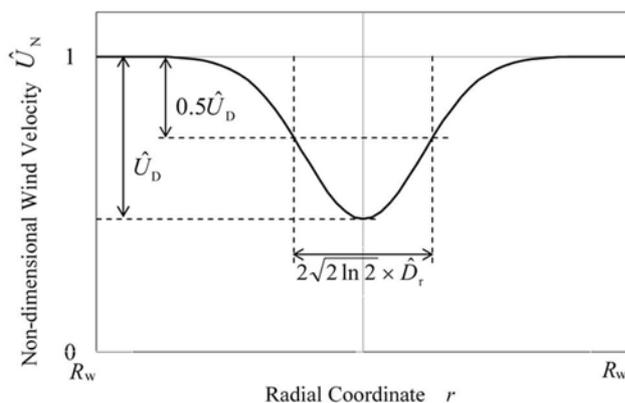


図1 ガウス関数による風車後流のモデル化

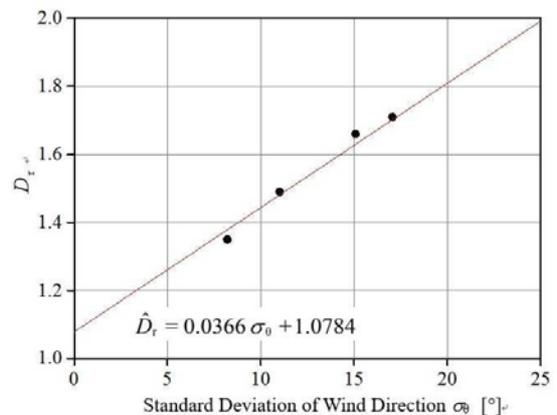


図2 実験値による半値幅の近似

張架式風力発電装置の開発

研究代表者 江崎丈巳 福岡大学 名誉教授

研究協力者 烏谷隆 九州大学応用力学研究所 准教授

1. 要旨

支柱とワイヤーを用い空中で複数の風車を支持する張架式風力発電装置でワイヤーへの風車固定を兼ねる複列前置フィンで集風器を構成、風車効率の向上を図る。本実験では、野外用に設計した集風器効果を大型風洞により確認する。

2. 序論

最近 自然エネルギーは、風力やソーラー発電として急速に普及している。しかし、化石燃料などの代替エネルギーとなり得るにはまだほど遠いものがある。モノづくりで科学技術に基づく新たな概念発生は、社会の進歩に欠かせないことと言える。ここでは、図的手段による形状考察から測定データをベースに装置の有効性を検討する。風力発電装置の開発は、搭上で大型の風車を回す方式が主流である。この方式でわが国での国土情勢を見た場合、陸上では多くの発電量を見込めないのは明らかでオフショアをはじめとし小型分散方式などの検討が必要と思われる。近年、太陽光発電に替わり

小型風力発電機（20KW未満）への関心が急速に高まりつつある。張架式風力発電装置は、支柱間に平行ワイヤーを張りその間に1.1Kw(11m/s)の小型・マイクロ風力発電機を吊るすものでソーラーと同じように風車の集合利用を行うものである。本法では、支柱にインフラ普及を目的とした電柱を転用することで普及の障害を極力取り除き以下のような効用を期待できる。

- 1) 風車は、地面に垂直の直線構造なので陰影が僅かで空中利用のため耕作地などに影響を与えない。
- 2) 風車は空中で帯状に配置するため各ローターで均一のエネルギーが得られ、単機20KW風車に比べ効率が良くなどである。

3. 実験方法

Fig. 1 に示すように大型風洞内に風車と開発の集風器を設置し、風速 $V=2 \sim 10 \text{ m/s}$ の範囲で測定を行った。風発電機は市販の出力 $P=600 \text{ W}$ でローター径が 1300 mm 、翼型 SD2080 でレイノルズ数 $Re=8 \times 10^5$

である。集風器は、Fig. 1 に示すように全長が 2000 mm を超えるため横置きとした。本実験では、性能確認のために 1) 軸受換装品による風車出力、 2) 集風器吐出風速、 3) 風車との組み合わせによる

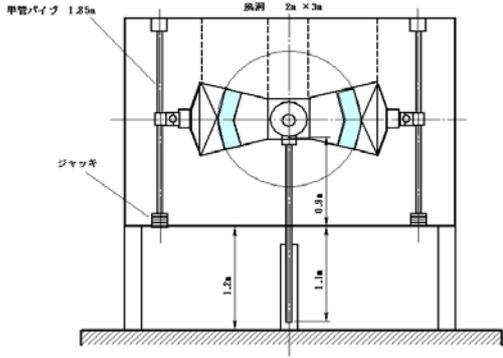


Fig.1 風洞内装置概要

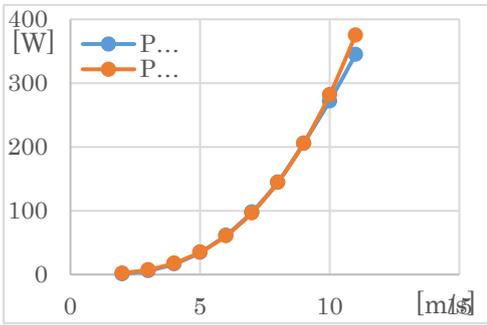


Fig. 2 供試風車出力

効果測定を予定した。しかし、3)については、風洞内で組立て時に集風器の誤寸が判明、所定の性能が期待できないため1)、2)についてのみの性能確認だけとした。集風器は、吸い込み口が矩形の面積で 0.32m^2 と吐出口が 0.1m^2 で開口比が約1:3.2の比率で前回より高目である。吐出口の形状は、Fig. 4 右に示すように上部は、直線状であるが下部は山形になっていてローターの円弧の先端の方に近づくようにしている。本構造は、集風部の圧縮率を高めローター先端の有効部へ吐出する構造となっている。

風速測定実験（江崎・松島）では、Fig. 3 に示す風洞備え付けトラバーサー先端の熱線流速計の位置をコンピューターに入力し自動測定を行った。測定点は、Fig. 4 左図で気流X方向に5、6点で、さらに右図で中心よりY方向3か所とし、Z方向に中心から2か所を5点、右端のみを6点とした。ここで $a=445, b=340$ で高さは $C=220$ である。

4. 実験結果

Fig. 2 は、供試風車の出力を示す。出力はメーカーカタログとほぼ一致する。また、集風器の吐出風速は、Fig. 4 に示すように吐出口上部からX軸方向に最大6点とし、またZ軸方向に中心部から右側のY軸方向に3か所とし、最右翼だけZ軸方向に6点とした。Fig. 5 は、測定値を示す。

5. 考察

Fig. 5 は、前回最高風速を記録した吐出口風下 $X=140\text{mm}$ で $V=10\text{m/s}$ での吐出口の風速分布を示す。この状態は $V=2\text{m/s}$ を除いて $4\sim 10\text{m/s}$ までほぼ同じ状態であった。風速は、吐出中間部 100mm 付近で最大になり以降は少し下がる傾向にある。前回の基本形状の結果に近い。吐出形状と開口比が高いことが影響していると考えられる。

6. 成果報告

3次元形状の集風器に吐出口の下部を山形にし、よりローター外周付近に吐出風が集中する構造を制作、その性能を計測した。吐出部高の中間部付近では、約1.2倍の風速向上が認められた。この倍率は、風速 $4\text{m/s}\sim 10\text{m/s}$ の範囲でほぼ一定であった。この位置は、ほぼ前回の基本形状に近いものであった。本実験に当たり職員の松島、渡辺様および鳥谷、大屋先生方に謝意を表します。



Fig. 3 トラバーサーと熱線流速計

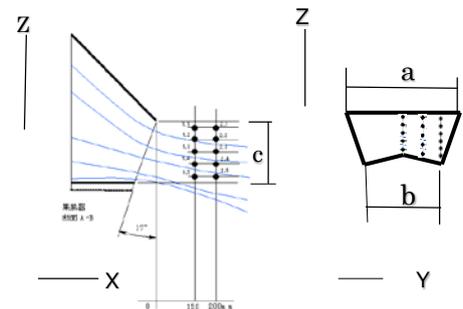


Fig. 4 吐出後部の測定点

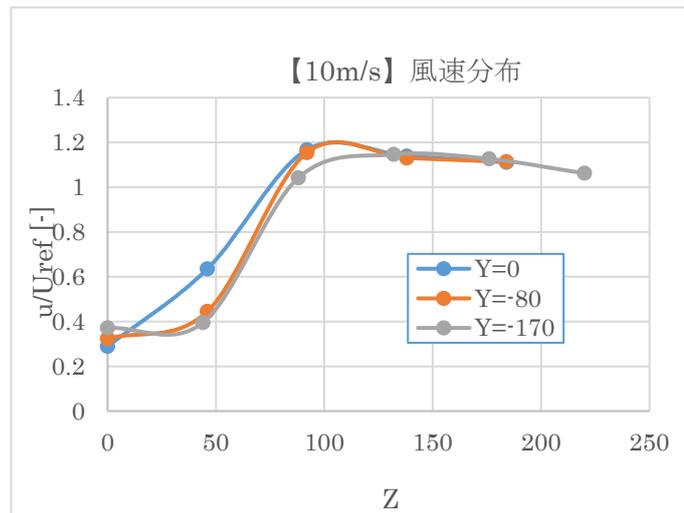


Fig. 5 吐出口の風速分布

新しい発想による風力発電の研究

(株) TMI T・研究開発部・所長
首都大学東京・システムデザイン学部・客員教授

藤井 裕矩

要旨

今後ますます我が国の再生エネルギー生産において重要な分野となると予想される風力エネルギー発電方法について、高空風力発電について研究集会を開催し、プロジェクトの遂行について議論を行った。本課題は世界的にも先進的な高度なプロジェクトであるため、多方面からの新技術の開発について研究発表と意見交換を行った。

1. はじめに

本研究では、最先端技術の総合による未踏技術の開発をめざし、具体的にはいまだ未開発の分野として残され、海外でも米国、オランダなどで開発の端緒が開始されたところである高空における風力発電技術を取り上げた。本研究グループは、大学・会社・研究所における航空宇宙技術ならびに風車技術に関して専門的な学識と経験を持つ研究者たちが高空風力を利用した風力発電の研究を軸にして結集したものであり、これを核としてフロンティア技術に携わる知的工学技術の集団を構成した。

また、九州大学応用力学研究所における共同研究の大きな枠組みとして平成 22 年度より「新エネルギー力学」の分野が作られ、九州大学でも風力発電技術の研究開発にかかわっている。いま、共同研究の特定研究「再生可能エネルギーの大規模導入技術に関する研究」の研究統括者である吉田教授に参加いただき研究範囲を充実することにした。このため、九州大学応用力学研究所の共同研究として研究集会を開催し、高空風力発電について議論を深め、我が国における本課題の進め方についてまとめを進めた。

2. 高空風力を用いた発電に関する研究会議について、

研究会議は、今回九州大学筑紫キャンパスにおいて第 4 回全体会議を開催したほか、適宜 実験終了時にメールにて報告した。

- ▶ 2016 年 9 月 15 日 九州大学 応用力学研究所において「第 4 回全体会議」開催、(西棟 6 F 多目的研究交流室)
- ▶ 2017 年 3 月 17 日 東京理科大学葛飾キャンパスにおいて「第 5 回全体会議」開催予定、(研究棟 4 階 工学部機械工学科会議室 2)

◎ 「高空発電研究会」第 4 回全体会議 (2016 年 9 月 15 日)

* 場所：風洞と応用力学研究所、九州大学筑紫キャンパス

* 〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6 丁目 1 番地

* W 6 0 1 : 九州大学 応用力学研究所、西棟 6 F 多目的研究交流室

出席者（順不同、敬称略）：藤井裕矩、大久保博志、吉田茂雄、平川雅人、土屋光慶、原田恭輔、小川慎平、佐藤強、相原浩司、Tarek Naem Dief、関和市、高橋泰岳、近藤智行、遠藤大希、池田和泰、花田泰智、丸山勇祐、黒崎保秀、以上 18 名。

議題：高空風力を用いた発電に関する研究について年度中間報告

- 10:00～10:40 全体計画の進捗状況報告
藤井裕矩（TMIT研究開発部、首都大学東京名誉教授）
- 10:40～11:00 高空風力発電システムPhase 1のまとめ（仮題）
原田恭輔、大久保博志（神奈川工科大学）
- 11:00～11:20 敦賀での実験など福井大参加の行事報告（仮題）
高橋泰岳、近藤智行（福井大学）、
- 11:20～11:40 Kite Power System
Tarek Naem Dief、Shigeo Yoshida（九州大学）、
- 11:40～12:00 Phase1.5における風車設計（仮題）
丸山勇祐（前田建設工業（株））
<昼食休憩90分>
- 13:30～13:50 軽量翼の製作方法（仮題）
遠藤大希（九州産業大学）
- 13:50～14:10 Phase1.5風洞試験用治具を用いたトルク伝達特性試験（仮題）
相原浩司 小川慎平、大久保博志（神奈川工科大学）
- 14:10～14:30 係留式高層プラットフォーム研究の紹介（仮題）
佐藤 強、大久保博志（神奈川工科大学）
- 14:30～15:30 パネル討論（日本におけるエアボーン風車の今後）
司会：吉田茂雄（九州大学）
感想提供：黒崎保秀（（社）日本再生可能エネルギー推進機構）、
【まとめ】 関 和市（東海大学）
-

◎「高空発電研究会」第5回全体会議（2017年3月17日）（予定）

* 場所：東京理科大学葛飾キャンパス研究棟4階 工学部機械工学科会議室2、

* 〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1

出席者（順不同、敬称略）：藤井裕矩、大久保博志、原田恭輔、小川慎平、相原浩司、佐藤強、草谷大郎、山本 広樹、関和市、近藤智行、遠藤大希、丸山勇祐、中台 章、大渡 賢治、以上 14 名。

議題：高空風力を用いた発電に関する研究について年度最終報告

- 10:00～10:40 テザー型高空風力発電の研究—2016年度進捗報告
藤井裕矩（TMIT研究開発部、首都大学東京名誉教授）
- 10:40～11:00 連風浮体利用型高空風力発電に関する実験的研究（仮題）
遠藤大希（九州産業大学）
- 11:00～11:20 連風を用いた小型高空風力発電の試み（仮題）
高橋泰岳、近藤智行（福井大学）、

- 11:20～11:40 高空風力発電用繫留テザーのためのトルク制御アーム付巻取装置モデル
山本 広樹
- 11:40～12:00 テザーを利用した高空風力発電装置の設備利用率に関して（仮題）
丸山勇祐（前田建設工業（株））
<昼食休憩90分>
- 13:30～13:50 Phase1.5モデルの風洞試験について
原田恭輔、大久保博志、小川慎平、相原浩司、佐藤強）
- 13:50～14:10 テザーを用いた動力伝達に関する検討—特に張力と巻き付け方に関して—
小川慎平、大久保博志、原田恭輔、相原浩司、佐藤 強
- 14:10～14:30 発電機を搭載したプラットフォームによる高空風力発電の概念検討
相原浩司、大久保博志、原田恭輔、小川慎平、佐藤 強
- 14:30～15:00 高空風力発電用繫留型インフレーターブル飛翔体の検討
草谷大郎、藤井裕矩
- 15:00～15:30 パネル討論（非定常飛行を行う凧の運動）
司会：吉田茂雄（九州大学）
話題提供：中台 章（ジオスポーツ）、
【まとめ】 関 和市（東海大学）

3. 研究組織

研究組織は、表1に示す通り申請時から大幅に増加している。

表1

藤井 裕矩	TMIT、首都大学東京	所長
大久保 博志	神奈川工科大学	教授
新川 和夫	九州大学	教授
関 和市	逢甲大学大学院	教授
内山 賢治	日本大学	教授
吉田 茂雄	九州大学	教授
Tarek Naem DIEF	九州大学	博士課程
野々山 登	神奈川工科大学	コーディネーター
吉野 和芳	神奈川工科大学	准教授
草谷 大郎	都立産業技術高専	准教授
真志取 秀人	都立産業技術高専	准教授
山本 広樹	都立産業技術高専	准教授

高橋 泰岳	福井大学	准教授
山根 正睦	福井大学	特命准教授
渡部 武夫	帝京大学	講師
中嶋 智也	大阪府立大学	講師
金子 憲一	大阪府立大学	助教
遠藤 大希	九州産業大	助手
丸山 勇祐	前田建設工業	研究員
岩原 誠	(有) ザクシス	代表取締役
浅生 利之	THK 株式会社	専任部長
咲山 隆	THK 株式会社	研究員
会田 智幸	THK 株式会社	研究員
栗田 篤	(有) トライアス	代表取締役
大渡 賢治	(株) コスモテックス	
笹原雄二郎	(株) スーパー・サイエンス・テクノロジー	
Rob Stroeks	オランダ大使館 科学技術部	シニア・アドバイザー
佐藤 強	神奈川工科大学	学生
原田 恭輔	神奈川工科大学	学生
相原 浩司	神奈川工科大学	学生
池田 和泰	九州産業大	学生
田村剛志	九州産業大	学生
花田 泰智	九州産業大	学生
近藤 智行	福井大学	
平川 雅人	日本大学	学生
土屋 光慶	日本大学	学生

4. 研究成果報告

* 学会論文

1) Hironori A. FUJII, Masahito HIRAKAWA, Mitsuyosi Tuchiya and Kenji UCHIYAMA, Space tether technology and its application to air borne wind energy generation, Proceedings of the 26nd Workshop on JAXA Astrodynamics

and Flight Mechanics, Yoshinodai, Kanagawa, 2016、 pp.TBD.

2) 藤井裕矩, 平川雅人, 内山賢治, 渡部武夫, 草谷大郎、「**凧型テザー風車の動力伝達テザーとテザー形状の検討**」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016年6月, pp. 39-46.

3) 草谷大郎, 藤井裕矩, 川崎天揮, 富田匠, 黒田将茂, 角館李果、「**高空風力発電用の繫留型オールインフレータブル構造航空機の検討**」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016年7月18日, pp. 47-54.

*学会発表

1) 藤井 裕矩、渡部 武夫、草谷 大郎、小島 広久、「**スーパー・テザー展開性能の飛行後検討**」、(社)日本航空宇宙学会第47期定時社員総会/年会講演会、2016年4月14~15日、東京大学山上会館。

2) 草谷大郎、藤井裕矩、渡部武夫、「**係留気球式高空発電装置の動向と取り組み**」、ブイヤント航空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016(平成28年)年6月20日。

3) 藤井裕矩、渡部武夫、草谷大郎、内山賢治、「**走行するテザーを持つ凧型風車の運動の定式化について**」、第2回ブイヤント航空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016(平成28年)年6月20日

4) 土屋光慶、藤井裕矩、平川雅人、草谷大郎、内山賢治、「**近年のインフレータブル・カイトプレーンの形式とオーバービュー**」、第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、2016年7月18日。

5) 草谷大郎、藤井裕矩、川崎天揮、富田匠、角館李果、黒田将茂、「**高空風力発電用のインフレータブル航空機の検討**」第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、2016年7月18日。

6) 大久保博志、佐藤 強、原田恭輔、渡辺大誠、藤井裕矩、「**高空プラットフォームを利用した風力発電に関する研究**」、第60回宇宙科学技術連合講演会講演集、JSASS-2016-4187, 2016.9.7

7) 藤井裕矩、大久保博志、丸山勇祐、栗田 篤、Zxivanovich Sava、「**テザーシステムによる再生可能エネルギーの伝達について**」日本機械学会2016年度年次大会、J0550404、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス。

8) 丸山勇祐、藤井裕矩、大久保博志、岩原 誠、佐藤 強、原田恭輔、松井 正宏、関 和希、「**テザーを活用した浮遊風車への縦軸直線翼風車 の特性について**」、日本機械学会2016年度年次大会、J0550405、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス

9) 遠藤大希、「**複合高空発電プラットフォームの基礎研究**」、日本機械学会2016年度年次大会、J0550407、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス

10) 近藤智行、高橋泰岳、小島令子「**カイト型テザー係留飛行ロボットを用いた小型 風力発電システムの試み**」日本機械学会2016年度年次大会、G1500401、2016年9月11~14日、九州大学伊都キャンパス

11) Hironori A. FUJII, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, and Takeo Watanabe, "Air Borne Wind Energy Generation on Tethered System," *Proceedings of WWEC2016 TOKYO C-3-6*, (2016), 2 November 2016, University of Tokyo, Japan.

12) 草谷 大郎、富田 匠、藤井 裕矩、「**高空風力発電用カイトの検討**」第38回風力エネルギー利用シンポジウム、2016年11月30日・12月1日、科学技術館、千代田区、東京、B5-4。

13) 藤井 裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「**テザーを用いた風力発電について(機能試験)**」、第38回風力エネルギーシンポジウム、第38回風力エネルギー利用シンポジウム、2016年11月30日・12月1日、科学技術館、千代田区、東京、C4-6。

14) 藤井裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「**テザー型高空風力発電の研究-2016年度進捗報告**」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-01、2017年3月16-17日、東京理科大学。

15) 真志取秀人、伊藤 香織、井上 美潮、「**垂直軸風車のための曲率翼に関する予備研究**」、日本機械学会

関東支部第23期総会・講演会 OS0201-02、2017年3月16-17日、東京理科大学。

16) 原田恭輔、佐藤 強、相原浩司、小川慎平、大久保 博志、藤井 裕矩、遠藤 大希、丸山 勇祐、「テザー型高空風力発電の研究—直線翼風車モデル(Phase1.5)の風洞試験」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-03、2017年3月16-17日、東京理科大学。

17) 花田 泰智、遠藤 大希、高橋 泰岳、田村 剛志、「連風浮体利用型高空風力発電に関する実験的研究 (IoT計測機器の有用性に関する報告)」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-04、2017年3月16-17日、東京理科大学。OS0201-04、

18) 近藤智行、高橋泰岳、遠藤大希、「連風を用いた小型高空風力発電の試み」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-05、2017年3月16-17日、東京理科大学。

19) 山本広樹、草谷大郎、「高空風力発電用繫留テザーのためのトルク制御アーム付巻取装置モデル」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0201-06、2017年3月16-17日、東京理科大学。

20) 丸山勇祐、藤井裕矩、大久保博志、遠藤大希、草谷大郎、関和市、「テザーを利用した高空風力発電装置の設備利用率に関して」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0202-01、2017年3月16-17日、東京理科大学。

21) 大久保博志、小川慎平、相原浩司、原田恭輔、佐藤強、藤井裕矩、岩原誠、丸山勇祐、「テザー型高空風力発電の研究—テザーによる動力伝達について」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0202-02、2017年3月16-17日、東京理科大学。

22) 藤井裕矩、平川雅人、土屋光慶、内山賢治、「テザー型飛翔体の運動特性の基礎研究」
草谷 大郎、「高空風力発電用繫留型インフレーターブル飛翔体の検討」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0202-03、2017年3月16-17日、東京理科大学。

23) 草谷大郎、富田匠、藤井裕矩、丸山 勇祐、渡部武夫「高空風力発電用繫留型インフレーターブル飛翔体の検討、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 OS0202-04、2017年3月16-17日、東京理科大学。

5. まとめ

再生可能エネルギーにおける風力発電の将来的な手法として、高空の強い恒常的な風力を利用する手法を含め、新しい発想による風力発電の研究について本年は全体集会として2回、いずれも東京の科学技術館と東京工業大学で開催し、学際領域における研究として本課題のメンバー間での理解を深めプロジェクトとしての可能性についてのまとめを進行した。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究（研究集会）の助成を受けたものである。