

平成25年度

核融合力学分野
共同研究成果報告

特定研究 2: 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

応用力学研究所 伊藤 早苗

背景と目的

近年の実験技術の進展により、高精度時間サンプリング・空間多チャンネルでのデータの取得が普及している。例えば九州大学の PANTA 装置の乱流ドックでは 1TB/day 以上のデータが生成される。このようなビッグデータを網羅的かつ効率的に処理し、知識を獲得する事が必要である。パターン認識は乱流の時空間構造を観測する最も基本的な手法である。この時、雑音成分の低減技術、統計精度向上技術、複数のデータ解析手法の統合、等が求められる。本特定研究では、PANTA 実験等から得られるプラズマ乱流のビッグデータから自明でない新たな物理情報を抽出する手法の開発を行う。

サブテーマ

本特定研究では 10 のサブテーマが提案されている。またサブテーマリーダーが一堂に会する研究集会（稲垣）を開催した。

主要な成果

プラズマリモートセンシングと高速データサンプリング技術の進展により、多くのビッグデータのサンプルが取得できている。これらビッグデータの解析が行われた。マイクロ波周波数コム反射計（徳沢）開発が進展し、信号からのプラズマ乱流揺動の抽出に成功した。LHD では長時間放電において微小揺動成分の観測に成功した（土屋）。PANTA ではストリーマプラズマの高速度カメラ計測が初めて行われた（大館）。新たな解析法として、プラズマ中の波動伝搬の瞬時位相により突発的磁力線構造遷移の観測を行った（居田）。同様に多チャンネルプローブの位相差の瞬時値解析が進展した（大島）。プラズマ乱流構造に関しては、バイアス実験時の乱流構造（山田）、電子温度勾配モードと結合する第 3 のモードの観測（金子）、高速イオン励起 GAM の同定（井戸）が進展した。電子熱輸送の状態評価のための確率論的手法が確立した（田村）。このような揺動計測の発展に対応し、シミュレーションを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析計測（糟谷）が進展した。

今後は、サブテーマ間の情報交換を更に活性化し、新たなアイデアの着想を促すとともにプラズマ乱流データ解析手法の検証及び統合を進める。

目的

磁気面のストキャスティック化は、周辺プラズマの制御やコアプラズマの閉じ込めに重要な役割を演じる。プラズマによる磁気面のストキャスティック化の発生の原因とプラズマ閉じ込めへの影響を明らかにするため、磁力線構造の観測手法の開発を行う。本研究を通じて開発された波動伝搬解析手法の応用が、磁力線の可視化手法として確立されつつある。本手法の更なる高度化には、開いた磁力線構造での波動伝搬の理解が必要となり、応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験研究に応用する事を目的としている。

実験方法

プラズマ中に熱波動を励起し、その伝搬特性により磁力線構造を推定する方法を開発してきた。今年度は、波動伝搬を用いて磁力線構造を明らかにした上で、磁力線構造の電子の熱輸送、イオンの熱輸送、さらに運動量輸送に与える影響を調べる研究へと発展させた。熱波動の wavelet 解析を基盤とし、コンディショナル平均法等を組み合わせる。LHD の実験データや PANTA での開いた磁力線構造におけるプローブデータを用いて解析手法の検証を行い、信頼性を向上させる。

実験結果

LHD において中性粒子ビームの入射方向を切り替えた時のトロイダル回転速度、運動量、回転変換角度、磁気シアの時間変化を図 1 に示す。時刻 $t=5.3s$ において中性粒子ビームの入射方向を等価電流方向から反等価電流方向に入れ替えた。周辺部の回転変換角度が減少、中心部の回転変換角度が増加することで磁気シアが 1.3 から 0.5 に減少するのが観測された。磁気シアが 0.5 程度まで減少した後に突然トロイダル回転速度が減衰する現象が見られされた。この時、プラズマ中に励起された熱波動の伝搬特性により磁力線構造の推定を行った。プラズマにおける熱波動伝搬の位相の遅れの空間分布に、3 つのパターンが観測された。時刻

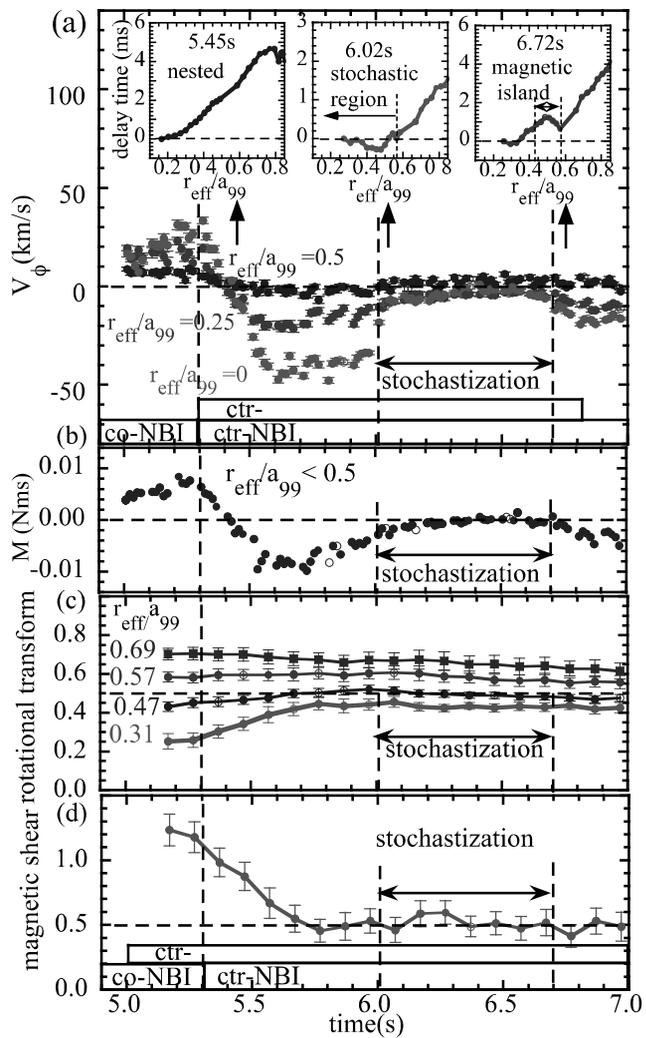


図 1 中性粒子ビームの入射方向を切り替えた時の(a)トロイダル回転速度、(b)運動量、(c)回転変換角度、(d)磁気シアの時間変化

5.45s で観測されている位相遅れの単調増加の空間分布は入れ子状(nested)の磁気面を示している。トロイダル回転速度が減少する前後で磁力線構造が変化しているのがわかった。一方、時刻 5.45s で観測されている位相遅れ分布の平坦化は、磁気面がストキャスティック状態になっている事を示している。さらに放電の後半で見られる山形の位相の遅れの空間分布は、プラズマ内部に磁気島ができていた事を示している。

ストキャスティック化の前後 (5.64s と 6.44s) のトロイダル回転速度、イオン温度、電子温度の空間分布を図 2 示す。ストキャスティック化に伴い、空間分布の平坦化が見られるが、その度合いには違いがある。イオン温度の平坦化に比べ電子温度の平坦化の度合いが大きい。運動量と (イオンの) 熱輸送を比べると、運動量に与える影響の方が大きい事がわかる。これらの影響を熱拡散係数、または粘性係数で評価すると、電子拡散係数の増加は 20 倍以上、イオン拡散係数の増加は 2 倍、粘性係数の増加は 5 倍であった。またストキャスティック化前には 1 近くであったプラントル数がストキャスティック化後には 4 程度に増加しており、ストキャスティック化の粘性への影響が定量的に評価された。

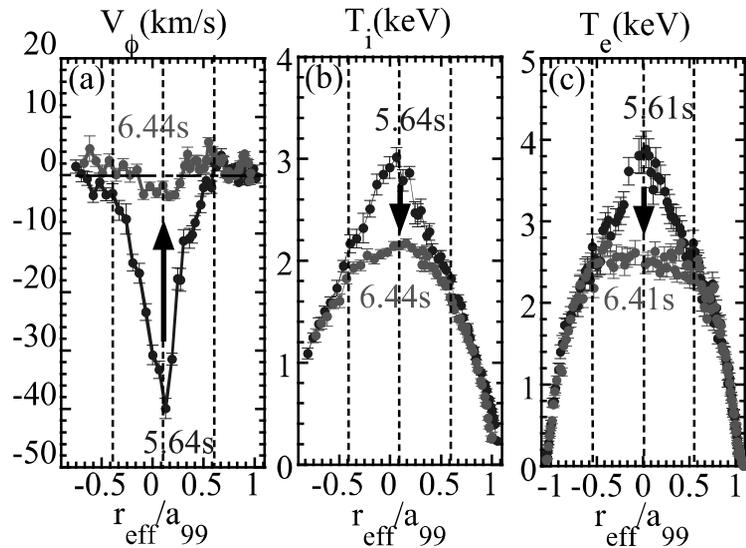


図 2 ストキャスティック化の前後 (5.64s と 6.44s) の (a) トロイダル回転速度、(b)イオン温度、(c)電子温度の空間分布

考察

熱波動伝搬の位相の遅れの空間分布から、磁場のトポロジーを推定できる事が実験的に確かめられ、熱輸送、運動量輸送との関連が明らかになった。この「波動伝搬を用いた磁力線構造観測法」は磁力線が閉じているプラズマコア部だけではなく、磁力線が開いているプラズマ周辺部や、直線磁場装置のプラズマ、さらには LHD 以外のトロイダル磁場閉じ込め装置にも応用が可能で、今後の発展が期待される。特に、将来の核融合装置では周辺局在モードという MHD 不安定性を抑制する為に、プラズマ周辺部に摂動磁場を加えることが計画されている。摂動磁場を加えた時に磁場がストキャスティック状態になっているかどうかを実験的に調べる手段として、波動伝搬を用いた磁力線構造観測法は極めて有効な手法と考えられ、この手法の開発は大いに期待されている。

研究組織

居田克巳
稲垣滋
小林達也

核融合科学研究所
九州大学応用力学研究所
九州大学・総合理工学部

マイクロ波計測器信号からの乱流揺動信号抽出法の研究

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

1. 目的

核融合発電を目指す高温プラズマ閉じ込め研究において、乱流物理研究は最重要研究課題である。これまで、高温プラズマ中の乱流を計測する手段が非常に限られていたが、近年新しい非接触な計測手法としてマイクロ波を用いた乱流揺動計測法が開発・適用されるようになってきた。特に、計測器システムに新しい素子技術が活用できるようになったことだけでなく、新しい解析手法が開発されてきたことによって世界各国の実験に適用されてきている。本研究では、ハードウェアとして新しく開発を進めている空間同時多点計測システムの構築と、それによって得られる詳細な空間構造を求めることをまず当初の目標とし、この計測システムをプラズマ実験へ適用することによって得られる大規模データに対して、開発が進んできたデジタル信号処理手法を駆使し、乱流信号を抽出する技術開発を行い、プラズマ乱流物理への知見を得ることを目的とする。

2. 計画と実験方法

まず、空間多点を同時に観測し、乱流の構造・物理を知るために、情報通信分野において開発適用が行われてきている周波数コムを発振源とする新型多チャンネルマイクロ波コム反射計の構築を行う。そして、この計測システムを核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)プラズマへ設置し密度揺動およびそのポロイダル回転分布の計測に適用する。また、乱流輸送において、温度揺動に関する知見が得られると期待されている新しい計測手法である correlation ECE (cECE) システムの構築とそのLHDプラズマへの適用による電子温度揺動計測データも取得し、これら大容量データに含まれる雑音成分から乱流揺動信号を、効率的かつ高精度で抽出する技術手法を確立することを目指した研究を行う。

3. 実験結果

本研究による周波数コムを用いた ka -band マイクロ波ドップラー反射計の開発を行い、平成 24 年度にLHDプラズマ実験に初めて適用し、ドップラーシフトを生じた散乱信号が得られることが確認できた。空間多点からの散乱信号を同時に効率よく入手する方法として、2つの手法がある。一つはフィルタバンク方式と呼ばれる複数の異なる周波数特性

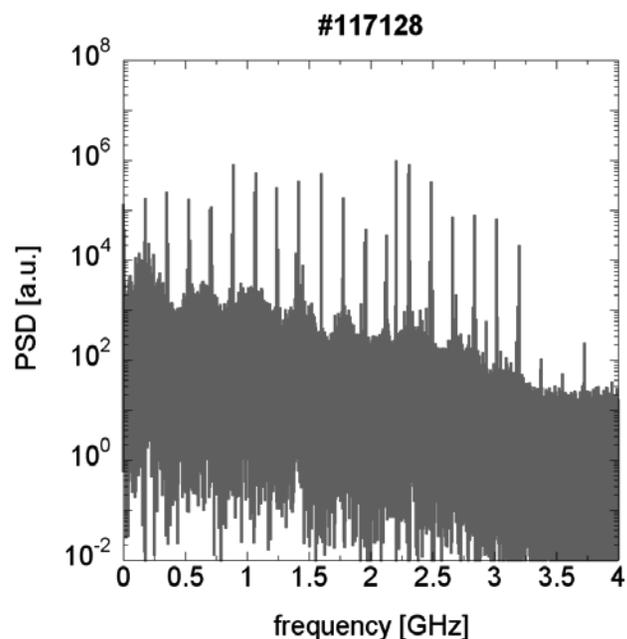


図1: デジタルオシロスコープで収集した信号のうち 50 μ s 分の時間データから求めた周波数スペクトル。周波数コム各成分が得られている。

を持つバンドパスフィルタによって、信号を弁別処理する方法で、これにはチャンネル数分の処理システムが必要である。もう一つは、データを広帯域のまま直接収集し、計算機によるデジタル処理によって弁別する方法である。これまで、このデジタル処理を行うのに十分な帯域を持つデータ収集手法がなかったが、最近の高速ADC技術の進展によって、可能となってきた。今回、サンプリングレート最大80GS/s(帯域20GHz)という非常に高速かつ高帯域なオシロスコープを用いて散乱波信号を直接取得し、得られた大容量データの処理を試みた結果について以下に説明する。

図1は、得られたデータから50μs分を切り出しFFT処理した周波数スペクトルである。周波数コムの各成分に対応する多数の中間周波数(IF)成分のピークが観測できている。次に、これらの各ピーク成分を弁別する。図2に20GS/sで収集した100Mポイントのデータを基にして、周波数解析処理した中間周波数2.31GHzの周波数成分のスペクトルを示す。図のように其々の成分毎に問題なく弁別して抽出し処理できることが分かった。

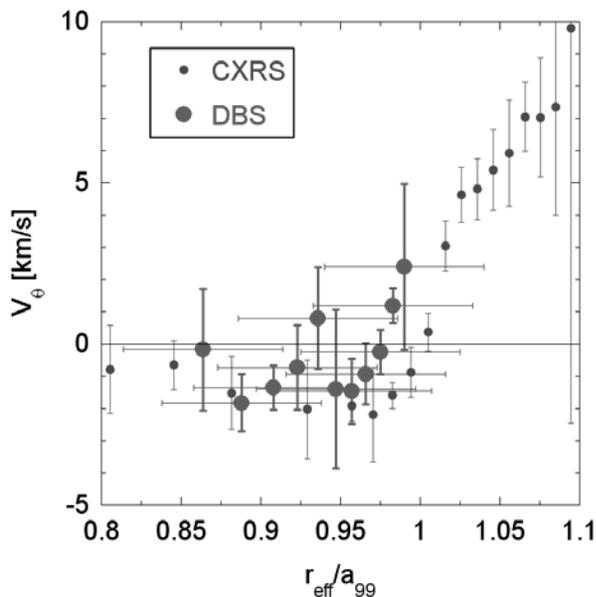


図3: 多点ドップラー反射計により求めたポロイダル速度分布(赤点)と参考のためのCXRS計測結果(緑点).

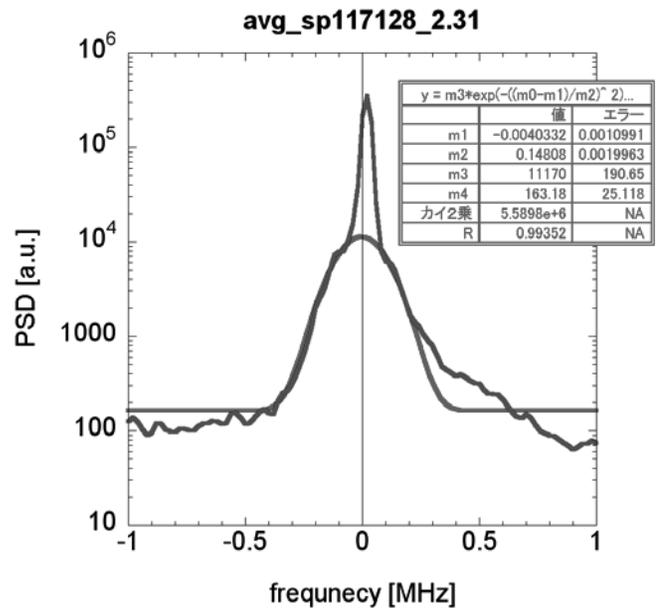


図2: 中間周波数2.31GHz成分をデジタル処理により抽出した例。密度揺動のドップラーシフトによる周波数スペクトルの変化がみえる。

同時多点計測することにより、周波数成分毎(すなわち異なる空間位置)の密度揺動成分のドップラーシフト量を求めることができる。このドップラーシフト量 f_D はポロイダル速度 v_{\perp} と $f_D \approx -k_{\perp} v_{\perp}$ という関係性を持つ。図2の赤線のようにガウシアン分布で周波数スペクトルにフィッティングを施し、各空間点でのドップラーシフト量を算出し、これとビームトレースコード(LHDGAUSS code)を用いて求めた波数 k_{\perp} を用いて、ポロイダル速度分布を求めることが出来た(図3)。参考として、荷電交換分光法(CXRS)により測定されたポロイダル速度分布も併せて表示しているが、誤差の範囲でよく合っていると考えられる。

この全散乱信号を直接収集し、デジタル処理による周波数弁別を行うという手法は世界初の実証結果であり、論文発表を予定している。今後時間応答を求められるように解析手法の開発をすすめていく。

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

高知工業高等専門学校電気情報工学科 谷澤俊弘

1 研究目的

超高温の磁場閉じ込めプラズマ中には圧力・密度・温度勾配が普遍的に存在し、それによってドリフト波乱流が形成される。安定したプラズマ閉じ込めのためには、この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 基本的アイデア

時系列解析では、時刻 t における時系列データ $x(t)$ をその時刻以前のいくつかのデータ $x(t-1), x(t-2), \dots$ とランダムノイズ $\varepsilon(t)$ を用いて

$$x(t) = a_0 + a_1x(t-l_1) + a_2x(t-l_2) + \dots + a_wx(t-l_w) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

と表わす線形モデルの手法が広く用いられている。ここで、パラメータ a_0, a_1, \dots, 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にするように決められる。この線形モデルの一種である Reduced Auto-Regressive Model (RAR) は、モデルの最適化基準として、さらに情報量基準 (information criterion) を用いることにより、いくつかの時間遅れ項 $x(t-l_1), x(t-l_2), \dots, x(t-l_w)$ から最適な部分集合を選び出すものである。

2012年、研究代表者（谷澤）と研究協力者（中村）は、RARモデルによって式(1)の形に表わされた時系列データは、各項 $x(t), x(t-l_1), x(t-l_2), \dots, x(t-l_w)$ をノードと解釈し、各時間遅れ項から時刻 t の項 $x(t)$ へ向う連結線を引くことにより、有向ネットワークとして表現できることを指摘した。また、谷澤・中村は、その手法を地震データ等に適用し、振動の定性的な違いがネットワークトポロジーの違いとして明確に表現されることも見出した [1, 2, 3]。(図1参照。) RARモデリングは多変数の時系列データにも用いることができ、このネットワークを用いた可視化法は多次元の時系列データ解析にも有効であることがわかっている [4]。

時系列モデリングに基づくデータ解析は、実際に観測されたデータを用いて行うことができ、そのデータを生み出す微視的メカニズムを知る必要がない。この点で、時系列モデルをネットワークとして表現し解析するこの手法は、プラズマ乱流のように微視的メカニズムが複雑で第一原理からの計算が困難な系を理解するための有効な手段になり得ると考えられる。

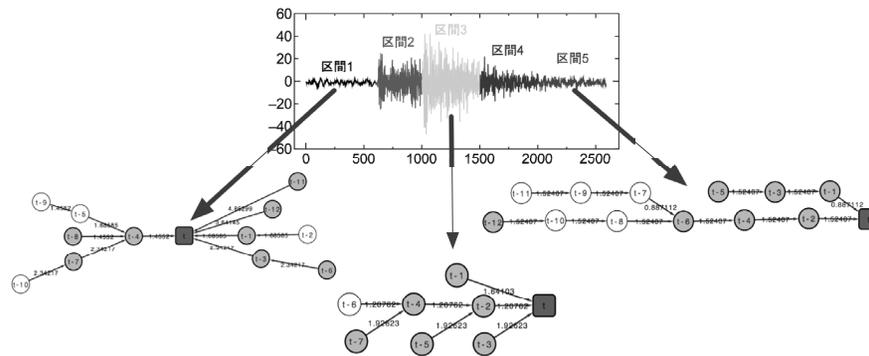


図1 1982年3月の浦河沖地震での振動データを5つの区間に分け、区間1, 区間3, 区間5を谷澤・中村の手法によりネットワークとして視覚化したもの。振動の定性的な性質の違いがネットワークトポロジーの違いとして明確に表現されている。

3 今後の研究の方向について

円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の各位置での物理量は多次元時系列データとして表現される。さまざまな状況下におけるドリフト波乱流の数値シミュレーションデータを、谷澤・中村の手法により複雑ネットワークとして視覚化し、データが表現する物理とネットワークトポロジーとの対応関係を解析していく。主な解析対象は抵抗性ドリフト波乱流コード Numerical Linear Device を用いてシミュレートされる直線装置プラズマにおける乱流データである。また、合わせて実測データの解析により、プラズマ乱流の非局所的相関関係の解明も行いたい。

4 研究成果発表

現在のところなし。

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).
- [2] Toshihiro Tanizawa and Tomomichi Nakamura: “Complex network from time series,” the Proceedings of 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2011), Kobe, Japan, Sep 4-7, 2011, pp.690-692 (2011).
- [3] 「時系列データの持つ構造の推定方法及び装置, 記録媒体ならびにプログラム」, 発明者: 中村知道, 谷澤俊弘, 桜田一洋, 特許出願番号: 2011-144894 (2011).
- [4] David M. Walker, Antoinette Tordesillas, Tomomichi Nakamura, and Toshihiro Tanizawa: “Directed network topologies of smart grain sensors,” Physical Review E, Vol. 87, 032203 (2013).

25 特 2-4

磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価のための 確率論的手法の高度化

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 田村直樹

研究の目的

研究代表者らは、乱流に支配された磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子の熱輸送状態に対して確率論的手法を適用することで、磁場閉じ込め高温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することに成功している。本研究の目的は、同評価手法で取り扱う測定データに対し雑音成分の低減技術や統計精度向上技術などを適用して同評価手法の高度化を目指すとともに、異なるデータ解析手法と組み合わせることで自明でない新たな物理情報を抽出することである。

研究方法

本研究で行っている確率論的手法による磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価では、その過程で「時間」に関する情報が失われてしまう。しかしながら、熱輸送の状態の、特に安定性を議論しようとした時、その状態を決定づけている時間スケールを知ることは非常に重要である。また、最近の磁場閉じ込め高温プラズマに関する研究において、一つの事象に対して複数の時間スケールが観測されている例があり、事象に対して特徴的な時間スケールは自明ではない可能性がある。これらのことを踏まえて、電子熱輸送の状態評価で取り扱っている実験データ中に現れる特徴的な時間スケールの抽出を試み、それが確率論的手法によって評価された電子熱輸送状態とどのような関係性を持っているのか考察した。

研究結果

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)で測定された電子サイクロトロン放射信号から評価された電子温度勾配の空間分布の時間発展と電子熱流束の空間分布の時間発展を図1に示す。図1の横軸(時間軸)は、LHD プラズマの周辺部を冷却するために LHD プラズマに入射されたトレーサー内蔵固体ペレット(TE SPEL)のプラズマ侵入時刻を $t = 0$ としている。図1(a)より、TE SPEL がプラズマに侵入した直後、プラズマ周辺部の広い領域($\rho > 0.62$)で電子温度勾配が瞬間的に増加していることが分かる。これは、TE SPEL 入射に伴う同空間領域の電子温度の瞬間的減少が原因と考えられる。これを発端として、プラズマ中心部にまで電子温度勾配の変化フロントが伝播している(図1(a)中の赤斜破線)ことも分かる。ここで注意すべきことは、図1(b)より、この時非常に広い領域($\rho < 0.62$)における電子熱流束が既に変化を開始している点である。この非常に広い領域における電子熱流束の変化は、既に同プラズマにおいて発見されている長い相関長を持つ揺動との非局所相互作用によるものと考えられる。したがって、図1(a)で示されている電子温度勾配の変化フロントの伝搬は、非局所輸送現象の直接的原因ではなく副次的なものと考えられる。一方、電子温度勾配の変化フロントが弾道的にプラズマ中心部まで伝搬した後、広い領域($\rho < 0.4$)で電子温度勾配は時間遅れなく変化していることが分かる。つまり、非局所輸送現象が発現した後の電子温度勾配の変化に二つの時間スケールが存在していることが明らかとなった。

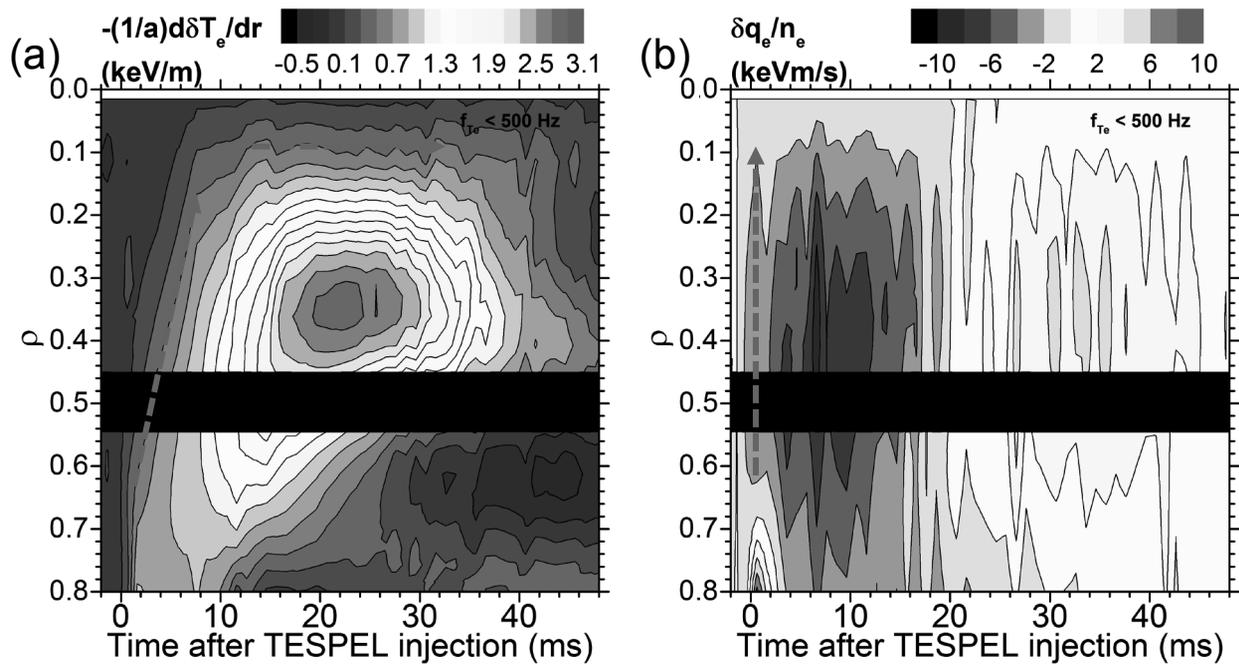


図1. LHD においてトレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)入射によって非局所輸送現象が発現した場合における(a)電子温度勾配の変化分の空間分布の時間発展と(b)電子熱流束の変化分の空間分布の時間発展。

考察

確率論的手法による磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価だけでは、各空間位置の電子熱輸送がどのような時間スケールで相互作用しているのかまでは分からなかった。しかし、今回の解析により、非局所輸送現象が発現した後には二つの時間スケールが存在することが明らかとなった。いずれの時間スケールも、輸送の非局所性との関係が強いと考えられる。

研究成果報告

ここで示したような解析結果を以下の学会で発表した。

N. Tamura, K. Ida, S. Inagaki, T. Tokuzawa, K. Itoh, K. Tanaka, H. Tsuchiya, T. Shimosuma, S. Kubo, Y. Nagayama, S. Sudo, H. Yamada and LHD Experiment Group, “A short-lived metastable state of electron heat transport in edge-perturbed LHD plasmas”, 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (October 2-4, 2013, Kyushu Univ., Fukuoka, Japan)

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)、小林達哉(九州大学総合理工学府)、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)

デジタルコリレーション E C E の開発

核融合科学研究所 土屋 隼人

1. 背景

プラズマ研究の中でも乱流構造に関する実験研究においては要求される計測には、高いレベルの時間分解能と空間分解能を同時に満たすことが望まれる。微細構造を計測するには非接触型の計測が必須であるが、磁化プラズマにおいては電子温度計測となる電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測はその候補となりうる。しかし、ECE 計測は背景ノイズや機器に由来する熱ノイズが多いことが難点である。近年、ノイズ提言の手法としてコリレーション ECE が広まりつつあるが、従来以上の多チャンネル計測となることや、狭帯域のマイクロ波計測となる等ハードウェア的な煩雑さが増す割には解析の柔軟性が乏しい。そこで、単一チャンネルかつノイズを数値的に除去できるデジタルコリレーション ECE 計測を提案し、一昨年度より共同研究にて解析手法の開発を行った。そこで、本年度は実データの取得とその解析を試みた。

2. デジタルコリレーション E C E の概要

電子デバイスの進歩によりデータ収集装置の高速化が目覚ましく、ECEの周波数帯 (RF : ~100GHz) からヘテロダイン検波を行った中間周波数帯 (IF : ~数GHz) を直接デジタル化することが可能となった。そこで、IF デジタル化されたデジタルデータで数値解析的に コリレーション解析を行う手法を本研究で「デジタルコリレーション ECE」(DCECE) として提案している。図1に従来型のマルチチャンネル型 ECE 計測と DCECE のシステム図を示す。

従来型のマルチチャンネル部分の素子を一つのアンプとデジタルイザーで置き換えることができるので、機器に由来する周波数特性やノイズを受けにくくなる。一方、サンプリングされた IF データは非常にデータ量が大きく、長時間のデータ収集には向いていない。

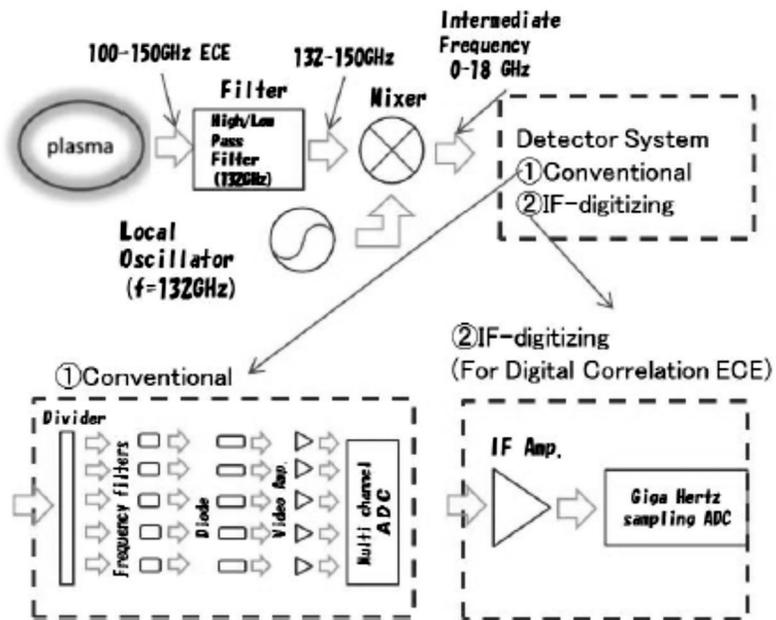


図 1 DCECE システム図

3. LHD プラズマデータ取得

核融合科学研究所（岐阜県）にある大型ヘリカル装置（LHD）において、134-150GHzのECE信号を132GHzの局部発振器を用いてダウンコンバートしたIF信号を高速デジタイザー（LabMaster 10-36Zi, teledyne lecrocy 社製, バンド幅36GHz, サンプルングレート 80GHz, データ取得時間 6.4msec）にて取得することができた。同時に、従来型のマルチチャンネル型のラジオメーターでも同ECE信号を観測し、比較ができた。観測したプラズマはECHおよびNBIで加熱された電子温度4keV程度のプラズマであり、観測領域はトーラス外側の規格化小半径 $\rho=0.2-0.5$ である。図2(a)にIF信号と示し、図2(b)にそのスペクトラムを示す。図2(b)の横軸0GHzは $\rho\sim 0.5$ のECE132GHzに相当する。ECEをIFにダウンコンバートするために使用したミキサーの有効周波数特性が18GHz未満に表れている。電子温度を絶対値較正する場合には周波数特性を考慮する必要があるが、狭帯域の温度揺動に着眼している場合には、平均温度で規格化するために周波数特性は問題にならない。図2(c)には従来型ラジオメーターによる電子温度揺動（赤線）と図2(b)の6-7kHzのパワースペクトラムの時間変化から得られる電子温度揺動（黒線）が示される。IFスペクトラムの時間幅の取り方と平滑化変数にもよるが、図に示すように、従来型より早いサンプルングレートの温度揺動を取得することができる。その温度揺動の平滑化されたスペクトラムを図2(d)に示す。100kHz以上のいくつかパワーピークを見ることができたが、これらの揺動について引き続き注意深く解析を行う。

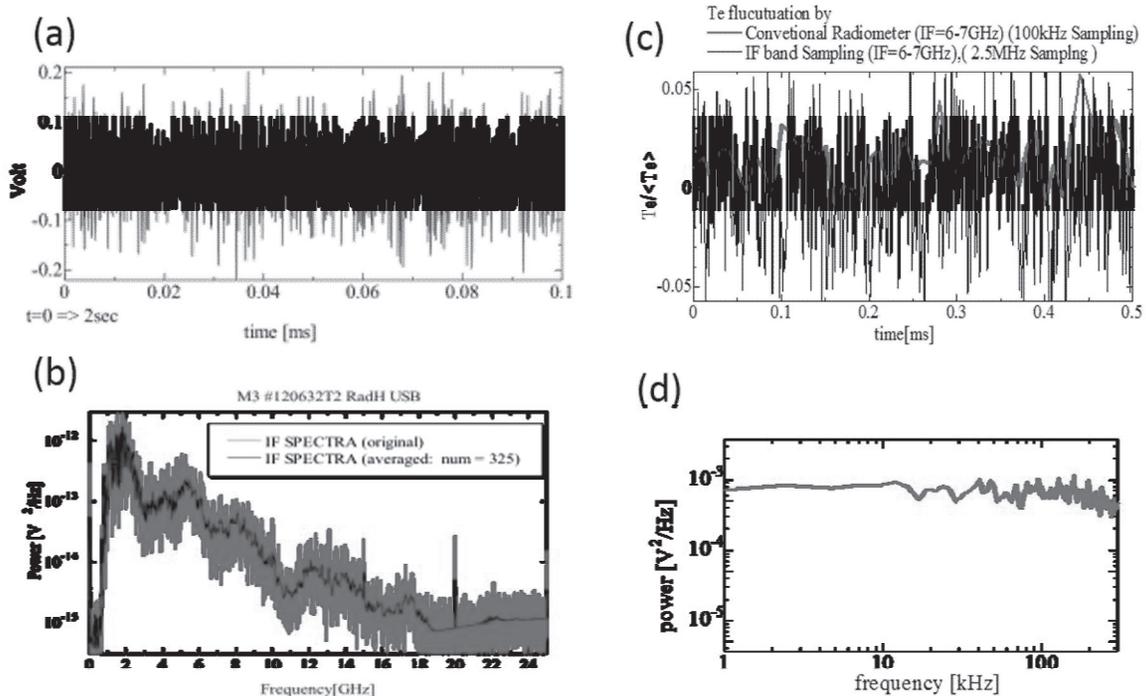


図 2 (a)IF 信号、(b)単一 IF スペクトラムと平滑化された IF スペクトラム、(c)IF スペクトラムの時間変化より得られる電子温度揺動と従来型ラジオメーターによる電子温度揺動、(d) 電子温度揺動スペクトラム

25 特 2-6

プラズマ乱流データ解析研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2: 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」における個別課題の成果の統合を議論する。

目的と背景

様々なプラズマ乱流データを対象とし、共通な物理機構を抽出する一連の手法の確立を目指す。特定研究 2 で議論する手法は、ビッグデータの処理法、偽相関の排除法、変数間の相関の検出、理論的なモデリング、シミュレーションによる予測、等非常に多岐に渡る。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、本手法の開発に新たな展開がもたらされることが期待できる。本特定研究で取り組む課題はプラズマ乱流に限らず、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

2014 年 3 月 3 日に応用力学研究所 2F 会議室において研究会を開催した。研究会のプログラムを添付する。

予算の執行

予算は研究会参加の旅費に執行した。

研究集会のまとめ

今回は、従来の報告に加え、実際に取得済みのビッグデータをハンドリングしながらその解析法を議論するための作業会を兼ねた。

技術論：高速デジタルオシロスコープや高速カメラにより、1 秒程度のプラズマ放電実験において、1-10GB のデータが取得されるようになった。自由度の高い小型装置の実験では 100 回程度の放電を行い、乱流の統計的性質を求める。このため解析対象となる乱流データは 1TB となる。このような巨大データに対しては近代的なコンピューティング技術が必要となる。今回の作業会では最近のデータ処理技術について使用するプログラミング言

語や数値アルゴリズムを検討する。

統合化：本カテゴリーにおける個別テーマは以下のように3つにカテゴリー分けすることができる。

1. シミュレーションと連携した乱流物理の構築

- ・プラズマ乱流の過渡応答シミュレーション（乱流長距離相関の観測）
- ・シミュレーションを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析
- ・帯状流及びストリーマ理論を基にした帯状流・ストリーマ検出法の開発
- ・電子温度勾配モードと低周波数モードとの共存と競合
- ・イオン温度勾配モードの同定

2. 新たなりモートセンシング技術の開発

- ・先進マイクロ波周波数コム反射計の開発
- ・レーザー誘起蛍光法によるプラズマ乱流の観測
- ・デジタル相関 ECE の開発
- ・高速度カメラ計測データの処理

3. ビッグデータからのパターン抽出

- ・熱パルス伝搬の瞬時位相と瞬時位相の検出(Hilvert 変換)
- ・cineMRI 法を応用した、乱流パターン抽出法の開発

今回は巨大データが取得・蓄積された事による研究課題の鮮明化をはかる。プラズマリモートセンシング技術の進化によりプラズマを乱さずに高速、高精度で実験データを取得する事が可能になってきた。この実験データの高精度化はシミュレーションにも更なる解像度を要求する。このように課題間での交流が深化する事で統合化に向けた研究が一層進捗する事を期待する。

議論：使用するツールへの影響を議論する。ウェーブレット解析やバイスペクトル解析は、解析結果のデータが元データよりも大きくなる。このような手法の適用のノウハウについて議論を行う。

今後の予定

個別課題間の統合を更に進める。新たなりモートセンシング技術について、レーザーの波面検出に注目し、研究協力者を開拓する。

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 の非線形結合機構解明

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 モードが助長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

本実験は図 1 に示す東北大学 Q_T-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 (3-4eV) 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グステン電極を 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。すなわち、電子密度、空間電位の空間勾配が一定の下で、電子温度のみの空間勾配を制御し、その時のプラズマ中の不安定揺動 (ETG モード) に対する影響を調べる。具体的には、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することでドリフト波 (DW) モードが励起されることを観測し、さらに径方向電場による $E \times B$ 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。

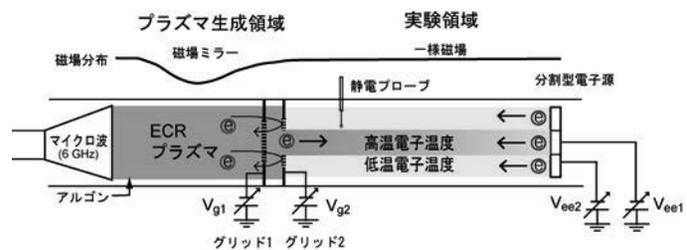


図 1: 電子温度勾配形成実験装置。

3. 実験結果及び考察

上記の装置を用いて ETG を形成したところ、ETG 強度の増大に伴い、周波数が約 0.4 MHz の高周波揺動 (ETG モード) と約 7 kHz の低周波揺動 (DW モード) の二つの揺動が励起されることが観測された。これらの ETG モード及びドリフト波モードに対する $E \times B$ シアの効果を調べるため、電子源電位 V_{ee1} を変化させて垂直方向電場 (E_z) を形成・制御し、それに起因する $E \times B$ シ

アを制御しながら実験を行った。

図 2 に電子温度勾配が (a) 弱い場合 ($\nabla T_e \sim 1.0$ eV/cm) と (b) 強い場合 ($\nabla T_e \sim 2.4$ eV/cm) の E_r に対する ETG モード及びドリフト波モードの $\tilde{I}_{es}/\bar{I}_{es}$ の依存性を示す。ETG が小さい場合、ETG モードの揺動強度は電場の符号によらず、ある閾値を超えると ($|E_r| > \sim 1$ V/cm) 抑制され、理論的な予測と一致することが明らかとなった。一方、ETG が大きい場合は、ETG モードの揺動強度が -0.6 V/cm $< E_r < 0$ V/cm (比較的弱い電場) の領域で抑制され、ETG が小さい場合と異なる傾向が観測された。

図 3 に ETG を変化させた場合の E_r に対する高・低周波密度揺動間のバイコヒーレンス \hat{b}^2 の依存性を示す。 E_r を変化させ $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ シアを制御したところ、ETG が小さい場合は非線形結合度の変化はなく、ETG が大きい場合のみ負の E_r の強度が強くなることに従って、ETG モードとドリフト波モードとの非線形結合度が強くなることを観測した。この結果から、 -0.6 V/cm $< E_r < 0$ V/cm の領域では、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ シアによって ETG モードとドリフト波モードの非線形結合度が強まり、ETG モードからのエネルギー移送が増加することで ETG モードの揺動強度が減少したと考えられる。すなわち、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ シアが ETG モードの抑制のみではなくドリフト波モードとの非線形結合度にも影響を与えることを初めて観測した。

4. 研究組織

金子 俊郎, 畠山 力三, 文 贊鎬 (東北大学), 伊藤 早苗, 稲垣 滋, 小林 達哉 (九州大学)

5. 研究成果報告

- 1) [招待講演] “Plasma structure control and new-concept plasma process for novel nano-bio materials”, T. Kaneko, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2013 年 7 月 14~19 日.
- 2) [招待講演] “電子温度勾配モードとドリフト波モードのマルチスケール非線形結合機構解明”, 金子俊郎, 文贊鎬, 畠山力三, 応用力学研究所 RIAM フォーラム 2013, 九州大学応用力学研究所, 福岡, 2013 年 6 月 6 日.
- 3) [招待講演] "直線磁化プラズマにおける電子温度勾配揺動の観測", 文贊鎬, 畠山力三, 金子俊郎, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 徳島, 2013 年 9 月 25~28 日.
- 4) “Dynamics of Nonlinear Coupling between Electron-Temperature-Gradient Mode and Drift-Wave Mode in Linear Magnetized Plasmas”, C. Moon, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, Physical Review Letters, Vol.111, No. 11, pp.115001-1-4. 2013.

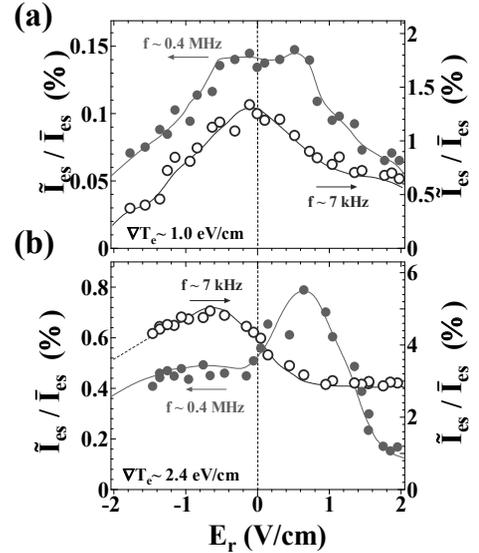


図2: ETGが (a) 小さい場合と (b) 大きい場合の E_r に対する高・低周波密度揺動の規格化振幅強度の依存性。

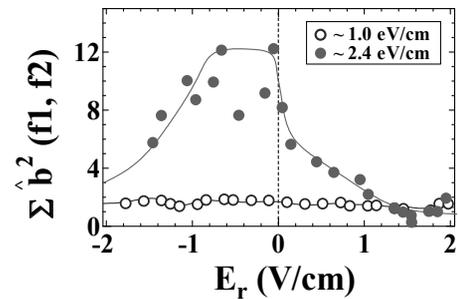


図3: ETG を変化させた場合の E_r に対する高・低周波密度揺動間のバイコヒーレンスの依存性。

目的

プラズマの揺動の情報を含んだ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 プラズマからの可視光の放射を高速カメラで計測したデータを解析対象とする。本報告では 2014 年 2 月 1 3 日に行った実験の初期解析結果を主に報告する。

実験結果

図 1 に示すように、PANTA 装置の放電部の対向面に高速カメラを設置し、軸に平行な方向から高速カメラによる測定を行った。図 2 に測定データの一例を示す。64 ピン静電プローブアレイが影として映っているのがわかる。像のまわりに黄色で示したフレームは測定周波数に対応した測定可能範囲であり、像の明るい部分をほぼカバーし、揺動の典型的な周波数よりも十分速い 50kHz のフレームのデータの解析を行った。

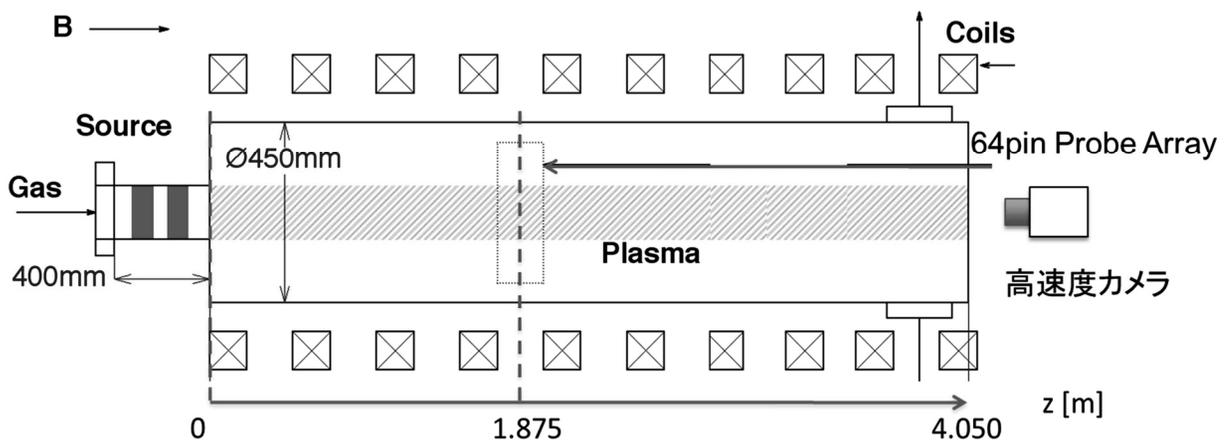


図 1 PANTA 装置と高速カメラの配置

プローブアレイによるイオン飽和電流の揺動のスペクトルを図 3 に示す。大部分のパワーは 10kHz 以下、ポロイダルモード数 3 以下に集中していることがわかる。この時の高速カメラの動画を特異値分解法で分解した結果を図 4 に示す。高速カメラの画像の強度は ArI、II が主成分で主として密度揺動を反映した情報と考えられる。

特異値の減少分布からはコンポーネントの 7 番程度までは意味がある。それより小さいコンポ

ーネントはノイズの影響を強く受けている可能性がある。特異値分解によりデータは相互に直行する $m = 1 \sim 3$ のモードに分解された。コンポーネント 1, 2 の周波数は 2.4kHz であり、図 3 に comp1, 2 と示した低周波のピークに対応する情報が観測されている。また、コンポーネント 5, 6 はポロイダルモード数 3 であて、周波数は 6-8kHz であり、図 3 のコンポーネント 5, 6 と示したピークに対応するものと考えられる。 $m=1, m=2$ に関連した複数のモード(コンポーネント 3, 4, 7) も同時に検出されている。特異値分解法では、観測時間内での空間的・時間的な相関から、相互に直行するモード構造に分解しているため、観測時間内にモード間結合があるような場合に単純な空間構造を持つモードに分解できなかったものと考えられる。

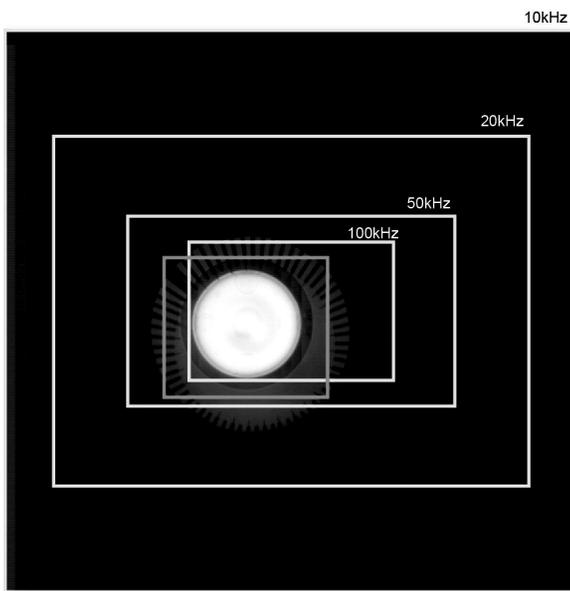


図 2 高速カメラの測定周波数と測定可能エリア。図中緑の枠は図 4 で示す計測結果の表示域を示す。

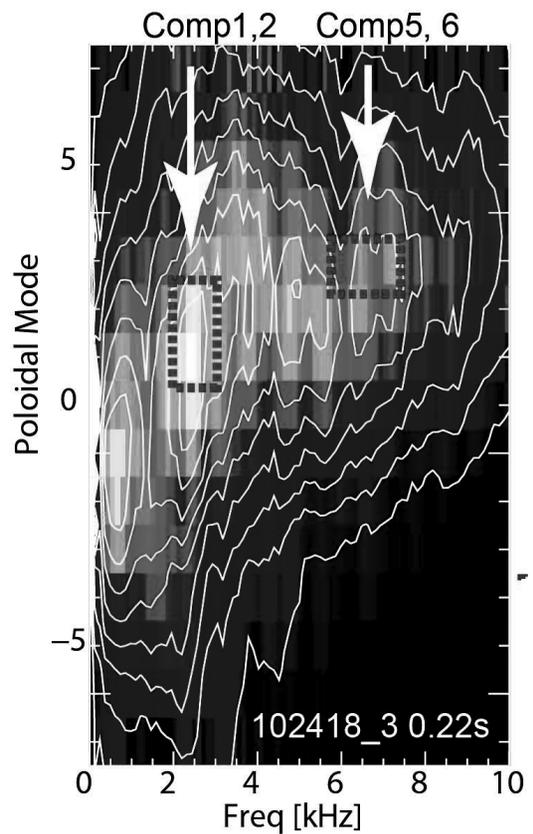


図 3 イオン飽和電流の周波数・ポロイダルモードスペクトル。Comp1,2 と Comp5, 6 は図 4 の空間的特異ベクトルに対応する。

前年度の横の窓からの測定に比べると、軸上の測にはモード構造を分離しやすいようにおもわれる。プラズマ光の強度分布を使って位置を調整し軸上での測定を行ったつもりだったが、データを見るとやや斜めからの観測であった可能性があり、今後アライメントの精度を向上させる必要がある。それにより磁力線上に広がっている揺動の磁力線垂直方向の動きを測定できる。

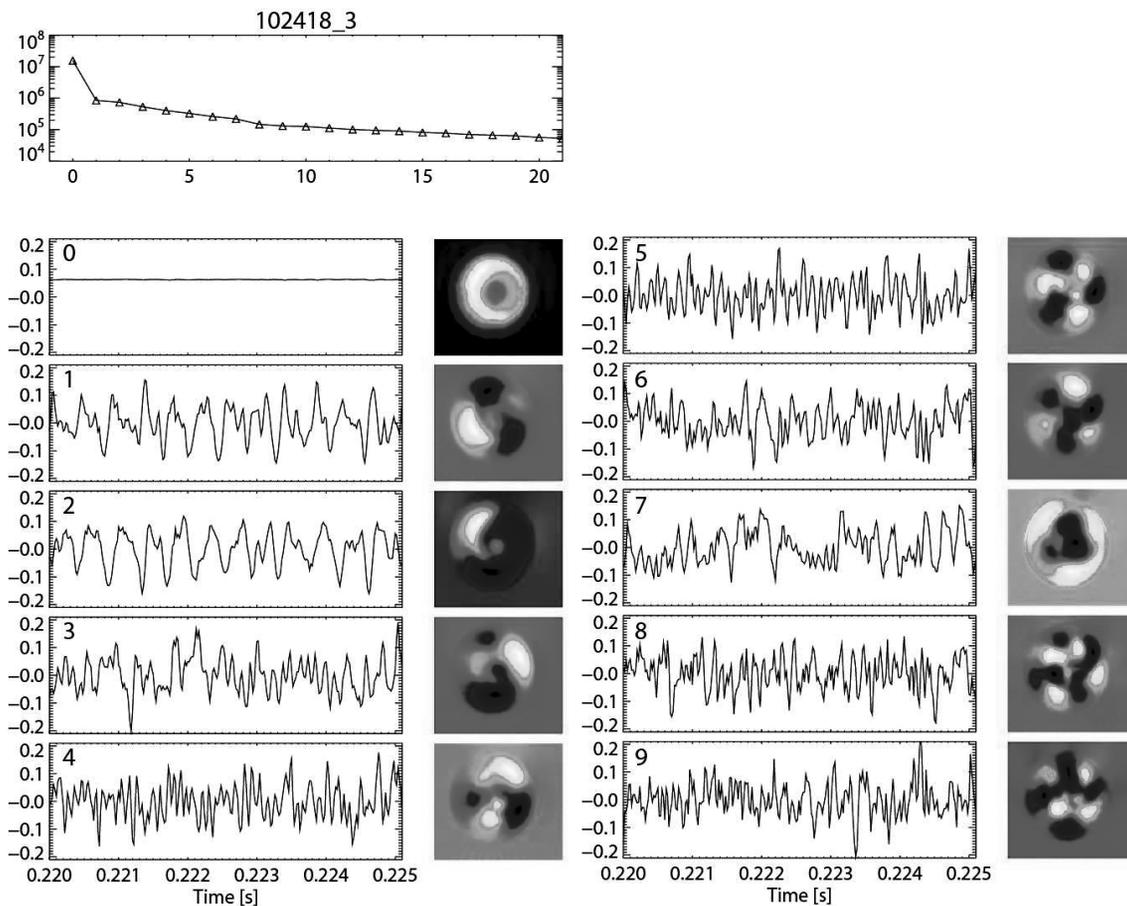


図4 高速度カメラの動画画の特異値分解法による分解結果。特異値の分布と(図上)、時間的固有値、空間的固有値を0番目の成分から9番目の成分まで示した。イメージの表示範囲は図2の緑枠で示した位置に対応する。

今後の解析手法の開発

これまで、モードの空間構造の検出は可動式の静電プローブによる時空間相関解析より求められていた。軸上からの高速度カメラの測定により、空間構造の同定をより簡便に行うことができることを示すことができた。各点での計測結果が同時計測であることは、時空間相関解析より優れた点であり、モード間の相互作用についてさらに解析を進めることができるものと考えられる。現在は解析用のコンピュータの制約で全動画データを実メモリ中に保持することができていないため、bi スペクトル解析などを行うことができていない。大容量メモリを搭載した解析用のコンピュータをNIFSに準備しているので、静電プローブデータと動画データの双方を用いて、径方向の情報を含んだ相関解析を今後行っていきたいと考えている。

今年度に出版された論文

[1] S. Ohdachi, et. al., “Spatial Mode Structure of Magnetohydrodynamic Instabilities Observed by a Tangentially Viewing Soft X-ray Camera in LHD” accepted by IEEE transactions on plasma science

[2] T. F. Ming, S. Ohdachi et. al., “Estimate of the deposition of carbon pellets using a high-speed VUV imaging system in the LHD”, Plasma Science and Technology, Vol. 15, No. 12, (2013) p1178-1183.

高次相関解析の並列処理による高性能化に関する研究

京都大学大学院工学研究科 福山 淳

研究目的：プラズマ・核融合分野では、測定技術の向上に伴い、時間および空間解像度が大幅に増加し、短時間の間に大量の実験データを取得することが可能になってきている。また、実験の長時間化に伴う蓄積データの増大も著しい。応用力学研究所の PANTA 実験装置においても、多チャンネル測定装置を用いて得られる実験データが一放電あたり数 10GB 以上に達し、その高次相関解析のデータ処理時間が 1 日を超える場合も少なくない。本研究においては、高次相関解析等の実験データ処理を高性能に行うため、複数コアの計算機による並列処理を導入し、アルゴリズムの検討ならびにコードの実装を行い、高速な実験データ処理を実現することを目的としている。

研究方法：実験データの高次相関解析においては、時間的あるいは空間的に離れた位置での測定値の相関を計算する必要があり、データ処理の局在性が低くなるため、並列処理にはなじまない面がある。本研究では相関解析と同様な構造をもつ高速フーリエ変換処理 (FFT) の並列化を参考にして、相関解析の並列化アルゴリズムを検討する。次に、最終的に導かれた並列化アルゴリズムに基づいて計算コードを実装し、解析解との比較による検証を行う。最後に、PANTA 実験装置において測定された乱流データを利用して相関解析を行い、並列処理による高性能化の評価を行う。

研究成果：

1. 昨年度に引き続き、代表的な相関解析である **Bispectral analysis** について、並列化 FFT ライブラリの利用により、処理の高速化を図った。通常の逐次処理、OpenMP による共有メモリ型並列処理、MPI による分散メモリ型並列処理のそれぞれについて、処理性能を処理データ量の関数として求めるとともに、コンパイラ (gcc, icc) およびコンパイラオプションの比較も行った。
2. さらに **Wavelet bicoherence analysis** についても、FFT による処理を行い、並列処理の評価を開始した。

今後の予定：大規模データ処理に向けて、メモリ割付やファイル入出力の並列化を含めて高速化の検討を行い、その最適化をはかる。そして具体的にデータ処理コードを作成し、PANTA 実験装置の測定データを例として処理性能の比較を行う。

研究組織：

氏名	所属	職名等	役割・担当分野
福山 淳	京都大学	教授	代表者
稲垣 滋	九大応力研	准教授	実験データ解析
佐々木 真	九大応力研	助教	実験データ解析

トーラス装置における乱流計測の為のプローブ開発とそのデータ解析手法の検討

京都大学 エネルギー理工学研究所 大島慎介

1. 背景・目的

静電プローブは、簡便、安価でありながら高時空間分解能を有する計測器であり、プラズマの乱流研究において強力なツールである。直線型装置 PANTA において、マルチチャンネルプローブはプラズマ乱流の時空間構造観測に用いられ、乱流の自発的構造形成の物理の解明に大きく寄与してきた。一方、トカマク及びヘリカル等のトーラス型装置においては、設置ポートの制限やプラズマの熱負荷の問題からプローブ構造の自由度が少なく、乱流の物理描像の解明に必要な諸量を計測するためには最適なプローブ設計を進める必要がある。本研究では、プローブ計測に精通した応用力学研究所の研究者らと共同で、トーラス装置に適用可能、且つ乱流研究に適したプローブを開発する。また、得られたデータの解析手法についても検討を行う。上述した観点から、周辺乱流揺動の可視化を目指し、可視化用のプローブの開発とそれを用いた可視化手法の検討を行う。揺動構造を可視化することによって、様々なプラズマのパラメータに依存して乱流を特徴づける指標がどのように変化するか視覚的に示すことが期待できる。今年度は、可視化手法として、解析信号を用いることで信号間の強度、および位相差を高い時間分解能にて評価する手法を考案した。この手法の誤差評価の検討を行うと同時に、条件付平均法を用いることでその誤差を低減できることを示した。更に実際にビーム放射分光計測器のデータに手法を適用することで、揺動の二次元構造を示すことに成功した。本手法は開発を進めている二次元プローブを含め広く適用可能である。

2. 解析信号を用いた揺動の可視化手法

フーリエ変換を用いたスペクトル解析においては、時間・周波数の不確定性原理 ($\Delta t \cdot \Delta \omega \sim 1/2$) によって時間および空間分解能の両立は困難である。例えば、時間的に振幅、および周波数が変わる信号 $x(t) = A(t) \cdot \exp(2\pi i f(t)t)$ を考え、この信号に短時間フーリエ変換を用いると、元の信号 $x(t)$ はある時間に振幅と周波数を定義できるにも関わらず、時間・周波数空間双方に広がったスペクトログラムを得ることになる。この原因は、ある任意波形を異なる周波数の波の和で構成されるという考え方を基としており、時間分解能に優れると一般にいわれるウェーブレット変換等においても同様である。乱流のような多くの周波数成分からなるような場合においては、この考え方は自然であるが、時間的にその振幅や周波数を変化するような単

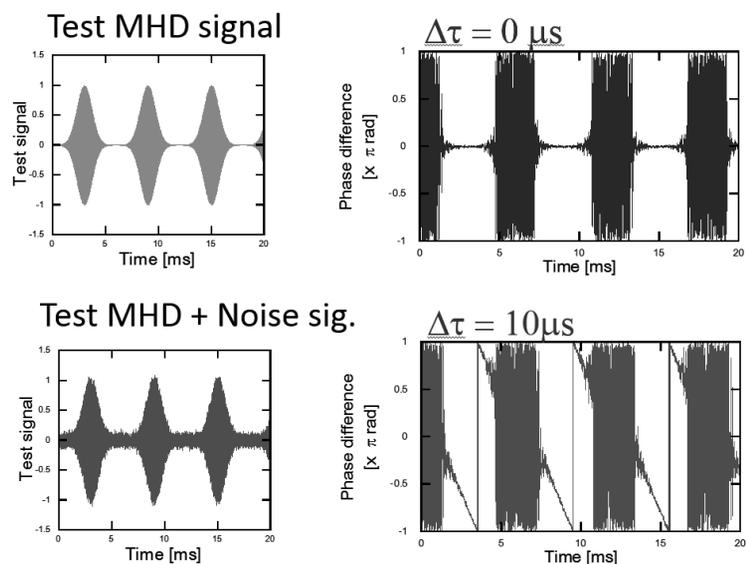


図 1. (左上)周期的に現れる MHD 信号を模擬した信号と、左下それにガウシアン雑音を加えた信号。及び、それらの瞬時位相差について、(右上) 時間差 $\tau=0\mu\text{s}$ の場合と (右下) 時間差 $\tau=10\mu\text{s}$ の場合について評価した結果。

一周波数のコヒーレントなモード、例えば非線形的な挙動を示す MHD 不安定性、を記述することに対しては適していない。

ここで解析信号を用いた解析手法に注目する。解析信号は、複素数であり $Z(t) = r(t) \cdot \exp(i\theta(t))$ とあらわすことができ、元信号 $x(t)$ のヒルベルト変換によって簡単に得ることができる。 $r(t)$, $\theta(t)$ はある時間での強度、位相であり瞬時強度・位相と呼ばれる。また、この瞬時位相の時間微分 $d/dt(\theta(t)) = \omega(t)$ は瞬時周波数と呼ばれる。瞬時強度に関しては揺動のエンヴェロープを評価する際に一般によく使われている。このように、時間的にその振幅や周波数を変化するような単一周波数の信号に対しては、解析信号によって表現することで直観的にその特徴を把握することができる。ここで、さらに瞬時位相の差である瞬時位相差という考え方を導入することで、2 つの信号の位相差の時間変化を評価することができる。2 つの解析信号 $Z_{1,2}(t) = |Z_{1,2}(t)| \exp(i\theta_{1,2}(t))$ の内積をとると、 $Z_1^*(t) \cdot Z_2(t) = |Z_1^*(t)| \cdot |Z_2(t)| \exp(i\varphi(t))$ であり、ここで $\varphi(t) = \theta_2(t) - \theta_1(t)$ となり、ある時間の両信号の位相差を評価することができる。

瞬時位相差を評価した例を図 1 に示す。まず、非線形挙動を示すバースト的な MHD 不安定性を考え、時間的に変動する強度と周波数を有する $x(t) = A(t) \cdot \exp(2\pi i \cdot f(t)t)$ と表記可能な信号を作成した (図 1 左上)。ここで、揺動は 6ms ごとに繰り返し現れ、周波数は 90kHz から 30kHz まで変化するとした。この信号に、ガウシアンホワイトノイズを重畳した波形が、図 1 左下に示されており、この両者の位相差を評価した結果が図 1 右の上下に示される波形である。二つの信号間の時間ラグがない場合 ($\tau=0\mu\text{s}$)、バースト的な MHD を模擬した信号の強度が十分強い時間帯において位相差がゼロとなっており、位相差が正しく評価されていることがわかる。さらに、時間のラグが存在する場合 ($\tau=10\mu\text{s}$) には周波数が時間的に変化していることに起因して位相差が時間的に変化していることがわかる。

3. ビーム放射分光計測の結果への本手法の適用例

ここで考案した手法を実際にビーム放射分光計測による密度揺動の計測結果に適用した結果を図 2 に示す。このときプラズマは中性粒子ビーム単独で維持されており、およそ 0.5 ms の短い周期で再帰的に高速イオン励起不安定性が発生している。ビーム放射分光法で計測した密度揺動の強度およびチャンネル間の位相差を評価し、さらに条件付平均法を用いることで平均的な揺動構造を再現した。揺らぎの強度と計方向の位相構造は時間的に変化し、らせん状の構造が形成され、そして消失していく。高速イオンとプラズマの非線形的な相互作用の結果として、実空間、あるいは速度空間の高速イオン分布の変化によって、このような構造発展が起こっていると考えられる。

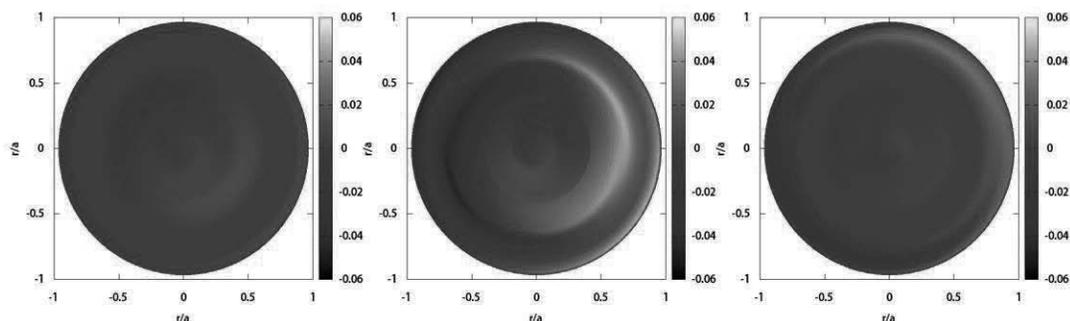


図 2 ビーム放射分光計測によって計測したあるプラズマ断面の密度の揺らぎの二次元構造。不安定性の典型的な平均的な (-0.1, 0, +0.1ms) , 不安定性が発生するたびに、らせん状構造が形成され、また消失していく。

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

目的

直線磁化プラズマは低温度で近接性に優れ、乱流計測に有意である。九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA の前身 LMD-U において、メゾスケール構造の一種であるストリーマーが世界で初めて発見された[1]。この発見は、120 チャンネルに及ぶ静電プローブデータの同時計測に加え、二次元フーリエ解析や、二次元バースペクトル解析という革新的な方法により実現した。しかしストリーマー構造に関しては、その発生のメカニズムや制御方法、乱流輸送に与える影響など、未だに解明されていない研究課題が多い。そこでストリーマーが発生している PANTA 実験装置のエンドプレートにバイアス電圧をかける実験を行い、ストリーマー構造の変化を観測することで、ストリーマーのコントロールや構造の発生機構の解明など、更なるストリーマー研究の進展を目指す。

実験方法

PANTA を用いてストリーマー実験を行い、エンドプレートバイアス実験によってストリーマー（周方向に揺動が局在した構造）の空間構造がどのように変化するかを観測した。PANTA は軸方向の長さが $z = 4$ m、内径 $r = 0.45$ m の筒状の直線装置である。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させる。軸方向の磁場は 0.01–0.15 T まで変化させることができるが、0.09 T に設定し、内部に封入したアルゴンの圧力を 0.8 mTorr に調整すると、ドリフト波乱流がストリーマー構造を形成する。中心部の密度は 10^{19} m^{-3} 程度、電子温度は平坦で 3 ± 0.5 eV である。軸方向 $z = 1.885$ m の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブ[2]が設置されている。このプローブにより、半径 $r = 40$ mm の位置での詳細で精度の良い乱流の時空間構造を観測することが出来る。また、軸方向 $z = 1.625$ m もしくは 3.625 m の位置には径方向 5 チャンネル静電プローブが設置されており、プラズマの電子密度や浮遊電位分布を測定する事ができる。エンドプレートの近傍の $z = 3.95$ m の位置に、プラズマの直径のほぼ半分となる直径 50 mm の電極があり、50 V までの電圧をかけることができる。

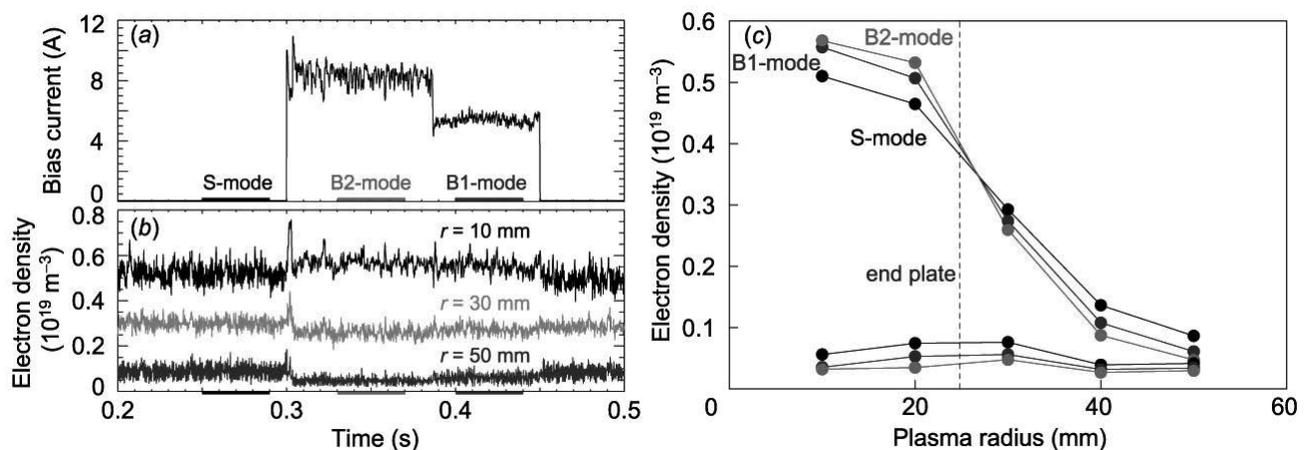


図 1. エンドプレートに 50 V のバイアスをかけた時の(a)バイアス電流と(b) $r = 10, 30$ および 50 mm での電子密度揺動。バイアス電流が低い状態を B1 モード、高い状態を B2 モードと呼ぶ。(c)ストリーマー、B1 モード、B2 モードの時の電子密度・揺動分布。

実験結果

ストリーマーが発生している状態（実験条件：磁場 0.09 T、圧力 0.8 mTorr）のエンドプレートにバイアス電圧を最大 50 V まで印加した[3]。電圧 20 V 程度までは、バイアス電流は線形に増加し、5.5 A に達すると増加しなくなった。電子密度はバイアス電極の内側 ($r = 10, 20$ mm) では徐々に大きくなり、外側 ($r = 30, 40, 50$ mm) では小さくなり、やはり 20 V 以上では変化が止まった。揺動レベルも各径方向位置で 20 V までは徐々に減少していった。ところが 50 V になると、突然バイアス電流が 2 つの値を取るようになり、バイアス中に 2 状態間で遷移を繰り返した。図 1 は 0.3–0.45 s の間バイアスをかけた時のバイアス電流と各径方向位置での電子密度・揺動である。バイアス電流が 20 V の時とほぼ変わらない 5.5 A の状態を B1 モード、8.5 A に増加した状態を B2 モードと呼ぶことにする。図 1 ではバイアス中 B2 モードから B1 モードへ一度だけ遷移している。バイアス中、密度はバイアス電極の内側である $r = 10, 20$ mm では増加し、外側の $r = 30, 40, 50$ mm では減少し、全体としてはピーキングする形となり、B2 モードの方が B1 モードより変化が顕著である。密度揺動レベルはストリーマー、B1 モード、B2 モードの順に徐々に減少している。

次に、周方向 64 チャンネルプローブによって測定した $r = 40$ mm の位置でのイオン飽和電流の時空間構造の変化を示したのが図 2[(a)はストリーマー状態、(b)は B1 モード、(c)は B2 モード]である。ストリーマー状態では、周方向に揺動が局在した構造が塊となって下方向にゆっくりと伝播しているのが分かるが、B1 モード、B2 モードと変化するにつれて、局在構造が消失し、周期的な孤立波状態へと遷移しているのが分かる。このようにバイアス実験中にストリーマー構造が破壊され、密度揺動が抑制される現象が確認されたが、その原因を探るために径方向 5 チャンネルプローブによって浮遊電位構造を調べた。バイアス中も電子温度分布が平坦だと仮定すると、浮遊電位の勾配から径方向電場が推定できる。実験では $z = 1.625$ m の位置ではバイアス中に径電場の変化は見られなかった。ところがエンドプレートに近い $z = 3.625$ m の位置では、バイアス中に径電場が -100 V/m から -200 V/m と大きく変化する事が確認された。このことからこの現象は、エンドプレート付近で生じた径電場の変化によってプラズマ全体の乱流構造の大きな変化が引き起こされたことが分かった。

参考文献

- [1] T. Yamada *et al.*, Nature Phys. **4**, 721 (2008).
- [2] T. Yamada *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 123501 (2007).
- [3] T. Yamada *et al.*, Nucl. Fusion **54**, in press (2014).

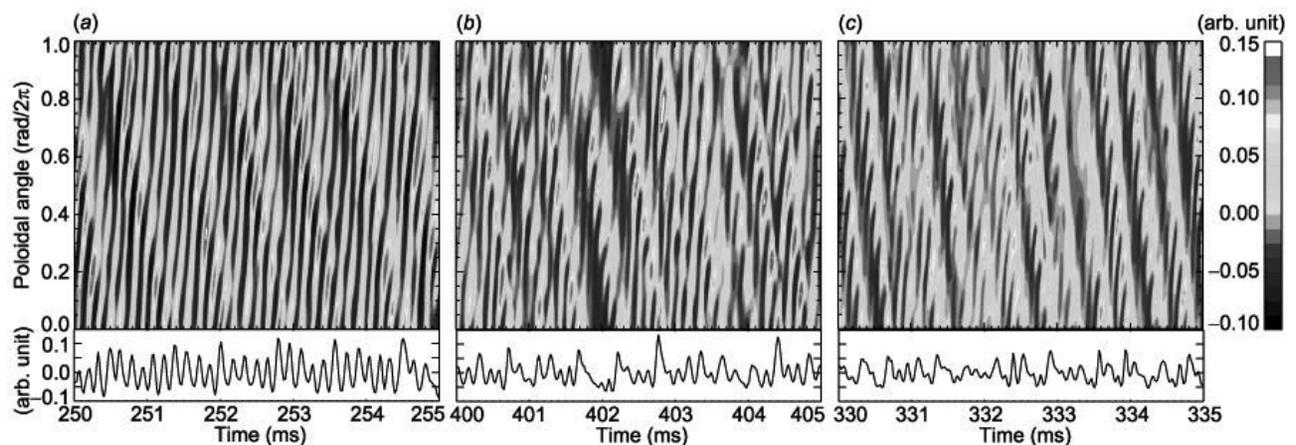


図 2. 周方向 64 チャンネルプローブにより観測した(a)ストリーマー状態、(b)B1 モード、(c)B2 モードの時のイオン飽和電流の時空間構造。各図の下に周方向角度 0 の位置の波形を載せている。

「磁場閉じ込めプラズマにおける乱流及び帯状流の検出方法の開発」

核融合科学研究所 ヘリカル研究部

井戸 毅

・ 目的

磁場閉じ込めプラズマの物性を理解する上で、プラズマの輸送特性を決定づけていると考えられる乱流の振舞いを理解することが重要である。近年では局所的な微視的乱流だけでなく、それらの非線形相互作用により形成される大きな空間構造を持つ揺らぎがプラズマの輸送に大きな影響を及ぼすことが明らかになりつつある。したがって、局所的な微視的乱流と同時に大規模構造を持つ揺らぎを同時に測定・解析することが、プラズマ物性を実験的に解明する上で不可欠である。しかしながら、核融合炉を見据えた磁場閉じ込め装置では乱流に関するデータは計測可能な物理量の種類、計測できる空間点ともに限られている。そこで、本共同研究を通じ、応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験研究を通じて開発された揺動解析手法の応用や、理論解析及びシミュレーション結果に基づく効率的な実験手法と解析手法の開発を進め、限られた乱流計測データからより多くの物理情報を抽出することを目的として本研究を行う。

特に今年度は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) において観測されている高速イオン励起 GAM 発生時にバルクイオンのエネルギー Spektral が変化する現象の物理機構の解明のために、GAM に伴う電位揺動とその空間構造を直接的に計測することを目的として本研究を進めた。

・ 実験方法

高速イオン励起 GAM からイオンへのエネルギーの流れに関しては、M. Sasaki et al. *Plasma Phys. Control. Fusion* **53**, 085017 (2011)により理論的にその可能性が示されているが、本実験条件下においてイオンのエネルギー Spektral の変化を定量的に説明できるのか、共鳴条件が満たされているのか、などが明らかになっていない。GAM に伴う電位揺動は重イオンビームプローブ (HIBP) を用いて測定するが、GAM の電位揺動の振幅が大きく、HIBP のダイナミックレンジを超えるため、昨年度までは絶対値の正確な計測が出来なかった。そこで今年度はダイナミックレンジを上げるため、プローブビームとして通常用いる金イオン(Au⁺)ではなく、銅イオン(Cu⁺)を用いるためにイオン源の改造を行った。また、共鳴条件が満たされるための物理機構の候補の一つとして考えられるポロイダル断面における非一様性を測定するために、HIBP のビームライン制御系の改良を行った。

・ 実験結果

GAM の発生とバルクイオンのエネルギー Spektral の変化を再現し、その際の電位揺動

の計測を行うことが出来た。電位揺動の振幅は 7 kV であり、これから GAM のエネルギー密度は 1.7 J/m^3 と見積もられた。FORTEC-3D コードを用いた GAM の減衰率は $2000(1/\text{s})$ であり、これによるバルクイオン温度の上昇率は 35 keV/s と見積もられた。中性粒子分析器(NPA)によるイオン温度計測により測定されたバルクイオン温度の上昇率は 30 keV/s であり、定量的に GAM によるバルクイオンの加熱と考えると矛盾が無い結果となった。ただし、ここで用いた減衰率は、バルクプラズマの温度で決まる周波数を持つ GAM が、バルクイオンによって吸収される場合の減衰率であり、高速イオンによって励起される高周波数の GAM の減衰率として用いるのは不相当である可能性がある。今後、正しい減衰率の評価法の検討が必要である。

また、高エネルギーイオンとの共鳴により発生した GAM が低エネルギーのバルクイオンと共鳴することは直接的には困難である。共鳴条件を満たす可能性として高波数の電位揺動の励起が考えられる。そのような揺動が励起されているかどうかを調べるために、ポロイダル断面をスキャンできるように HIBP のビームライン制御系の改良を行った。ハードウェアの整備は完了し、2次元電位分布の計測は行えたが、GAM の計測はマシンタイムが無く行えなかった。これに関しては次年度以降の課題として残った。

- ・ 研究成果報告

無し

- ・ 研究組織

井戸 毅 (研究代表者)	核融合科学研究所	准教授
清水昭博	核融合科学研究所	助教
稲垣 滋 (所内世話人)	九州大学応用力学研究所	准教授
佐々木 真	九州大学応用力学研究所	助教

光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発と その応用に関する研究

九州大学 応用力学研究所 出射浩

研究目的：

光・電磁波を用いた計測は、測定対象に擾乱を与えずに波動・揺動といった局所的な物理量を対象とでき、測定される局所情報を用いて大域のダイナミクスを理解する重要な計測手法となっている。雲レーダやライダーによる雲やエアロゾルの計測、波浪に伴う海表面散乱による海上風計測、地表面計測、プラズマでの散乱計測など応用分野は多岐に及ぶ。計測技術として、反射の不連続面の利用、位相測定による高空間分解能化など、新たな試みが進められている。また、観測される局所的な反射・散乱射情報をどのように理解するか等の解析モデリングも広く議論されている。本課題では、多岐に渡る応用分野での計測技術・解析モデルの課題を、分野を横断して議論し、新たな方法論の模索を目指す。先進的な光・ミリ波・マイクロ波計測の観測的研究、解析理論・モデリング研究に関する研究集会を持ち、応用力学研究所共同研究の特定研究テーマとして個別に提案されている課題を総括的に議論することを目的とする。

研究進捗：

応用力学研究所共同研究の特定研究としては、他分野を横断する広範なテーマを立ち上げる新たな試みである。別途、個別に採択されている「光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する研究（研究集会）」では、その観測、解析理論・モデリングに関し、各課題で問題となっている点を紹介いただき、各々で行われている計測手法・技術を、分野を横断して議論した。研究集会後も引き続き議論を深め、フェーズアレイ、アダプティブアレイアンテナを用いた計測・解析が一つの課題と考えられた。データストリーミング法や Capon (DCMP) 法を用いた適応信号解析が共通の課題として上げられ、具体的な共同研究課題として進めることとした。大気乱流の3次元構造の解像では、乱流構造の高さ方向分解で異なる周波数を用いた散乱計測が行われている。プラズマ密度分布計測でも、異なる周波数を用いた反射計測が行われている。両者ともフェーズアレイ、アダプティブアレイアンテナを用いた計測・解析で、同一の解析手法が適用できる。共同研究の成果は、6月に開催される国際会議（20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics）で発表するよう、投稿した。プラズマの輻射計測においても、単一周波数ながら同様の適応信号解析が適用可能であり、併せて同国際会議で発表するよう、投稿した。プラズマ計測で併せてデータストリーミング法を取り入れた計測システムを立ち上げており、新たな実験・計測の展開が期待される。

ウィンドプロファイラの鉛直流測定を活用した雲・降水の定量的測定

京都大学生存圏研究所 山本真之

1. 研究目的

2015 年の打上げが予定されている EarthCARE (EC) 衛星は、ミリ波雲レーダー (Cloud Profiling Radar; CPR)・ライダー等を用いた雲・エアロゾルの全地球的な衛星観測から気候変動予測の精度向上に向上することを目的としている。EC 衛星に搭載された CPR・ライダー等の複合測定データを用いた雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発は、九大応力研の主導で開発が進められている。しかし、雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発に不可欠である、高精度の鉛直流・雲物理量測定データが不足している。EC 衛星用 CPR で計測するドップラー速度を用いた雲微物理量リトリーバルにおいて、鉛直流はリトリーバルされた物理量の不確定性を生む最も高い要因である。そのため、鉛直流の高精度測定データを用いた雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発とその評価が必要である。

ウィンドプロファイラ (Wind Profiler Radar; WPR) は、鉛直流を数分以下・数 100m 以下の時間・鉛直分解能で測定できる特長を備える。特に 50MHz 帯 WPR は、降水・雲の領域においても精度よく鉛直流を測定できる、他の観測機器にはない特長を持つ。本研究では、地上設置の WPR と降水粒子を観測する気象レーダー・CPR 等の観測データを活用することで、EC プロジェクトにおける雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発に寄与できる雲・降水の定量的測定手法を開発する。さらに開発した測定手法を活用することで、高精度の鉛直流・雲物理量・降水物理量の観測データセットを作成する。

2. 研究成果

2.1 鉛直流計測データの処理手法の開発

WPR は、屈折率擾乱に起因するエコー (乱流エコー) のドップラースペクトルから鉛直流及び乱流強度を計測する。近年のレーダーイメージング技術の発展に伴う高分解能化により、WPR の取得データ量は最大で数 100GB/日に及ぶ。そのため、計算機実験により、高速かつ高精度でドップラースペクトルのパラメータ (受信強度・ドップラー速度・スペクトル幅; 以下、スペクトルパラメータ) を計算する手法を開発した。さらに、スペクトルパラメータの計測誤差を定量的に評価する方法を確立した。開発成果を学会で発表するとともに、査読付き論文に投稿した。

50MHz 帯 WPR は、乱流エコーと降水粒子エコーを分離して受信可能であるため、降水領域中の鉛直流を高い時間・鉛直で計測できる唯一の測器である。しかし、降水領域内の鉛直流測定における降水粒子の影響を定量的に評価し、さらに降水粒子の影響を極小としつつ鉛直流を得る手法は確立していない。昨年度に引き続き、降水領域内の鉛直流を精度よく得る手法の開発に取り組んだ。計算機実験により、乱流エコーを検出するエコー強度範囲に制約を加えてドップラー速度 (鉛直流) を推定することで、鉛直流計測に置いて降水粒子の影響を極小化できることを示した。さらに、エコー強度範囲に制約を加えて得た受信強度とスペクトル幅に補正を加えることで、これらの計測精度を向上させる手法を開発した。開発成果を EC 衛星検証グループの研究成果発表会で報告した。現在、研究成果を査読付き論文に投稿する準備とともに、50MHz 帯 WPR 等の観測データセットの作成を進めている。

2.2 1.3GHz 帯レンジイメージング WPR の開発

レンジイメージングは、多周波切替え送信と適応信号処理を組み合わせることで、WPR の高鉛直分解能 (30-50 m) 計測を可能とする。レンジイメージングは、雲頂・雲底・融解層付近などの小鉛直スケールの鉛直流擾乱を解像する有用な測定手法である。昨年度に、1.3GHz 帯 WPR にレンジイメージング機能を実装することで、50MHz 帯 WPR では測定できない大気下層 (高度 2km 以下) における鉛直流の高精度計測を実現した。今年度は、1.3GHz 帯レンジイメージング WPR で取得した大気境界層の鉛直流計測データの解析を進めることで、大気境界層内のサーマル、下層雲、及び大気重力波に伴う鉛直流変動の詳細を示すことに成功した。研究成果を学会で発表するとともに、査読付き論文に投稿する準備を進めた。

2.3 WPR 用デジタル受信機の開発

WPR の計測精度劣化の要因となる地面からの不要信号(クラッタ)のアダプティブな抑圧には、多チャンネルかつ安価な受信機が必要である。また、50MHz 帯 WPR の計測高度向上には、オーバーサンプル付きレンジイメージング測定機能の付加が望ましい。多チャンネル受信や 50MHz 帯 WPR の性能向上を目的とした、WPR 用デジタル受信機の開発を進めている。開発中のデジタル受信機は汎用ソフトウェア無線機である Ettus Research 社製の USRP を用いるために低コストである。さらに、リアルタイム信号処理をパソコンで実施するため、柔軟な信号処理の実装が可能である。今年度は、50MHz 帯 WPR へのデジタル受信機の付加に必要な諸検討を実施した。さらに、特定研究の研究集会において、WPR のデジタル受信機のシステム紹介を実施した。

3. 今後の展開

現在作成中の 50MHz 帯 WPR・気象レーダー・CPR 等の観測データセットを用いた雲・降水物理量の高精度測定手法の開発を行う。観測データセットの作成と雲・降水物理量の測定手法の開発を通じ、EC プロジェクトにおける雲微物理量リトリバルアルゴリズムの開発に貢献する。デジタル受信機などの計測システムの開発にも取り組む。特定研究の他課題との情報交換を進めることで、特定研究の発展可能性を探っていきたい。

4. 研究成果

論文及びプロシーディング

- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Error estimation of spectral parameters for high-resolution wind and turbulence measurements by wind profiler radars, *Radio Sci.*, 投稿中, 査読有り.
- 橋口浩之, 山本真之, T. Gan, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz, 山本衛, 中城智之, 岡本創, 1.3GHz 帯レンジイメージング大気レーダーによる大気境界層内の高分解能観測, 第7回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム(第233回生存圏シンポジウム)プロシーディング, 京都府宇治市, 2013年9月, 査読なし.

学会発表

- Yamamoto, M. K., Y. Shibata, M. Abo, T. Mega, H. Hashiguchi, N. Nishi, H. Okamoto, T. Shimomai, M. D. Yamanaka, M. Yamamoto, Timbul Manik, and Syafrijon, Measurement of vertical air velocity and hydrometeors in stratiform precipitation by 47-MHz wind profiler radar and 532-nm polarization lidar, 36th Conference on Radar Meteorology, 2A.5, Breckenridge, Colorado, USA, 16-20 September 2013.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, and H. Okamoto, Accuracy assessment of spectral parameters of range-imaging wind profiler radars, 第7回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム(第233回生存圏シンポジウム), 京都府宇治市, 2013年9月.
- 橋口浩之, 山本真之, T. Gan, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz, 山本衛, 中城智之, 岡本創, 1.3GHz 帯レンジイメージング大気レーダーによる大気境界層内の高分解能観測, 第7回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム(第233回生存圏シンポジウム), 京都府宇治市, 2013年9月.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, H. Okamoto, Accuracy assessment of spectral parameters for RIM WPRs, International Symposium on Earth-Science Challenges (ISEC) 2013, P03, 京都府宇治市, 2013年10月.
- 山本真之, T. Gan, 岡本 創, 大野 裕一, 橋口 浩之, 山本 衛, ウィンドプロファイラーによる鉛直流計測を活用した EarthCARE 衛星雲プロダクトの検証提案, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, A366, 宮城県仙台市, 2013 年 11 月.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, H. Okamoto, Accuracy assessment of spectral parameters of range-imaging wind profiler radars, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, D211, 宮城県仙台市, 2013 年 11 月.
- Yamamoto, M. K., T. Gan, and H. Okamoto, Validation of EarthCARE product using vertical wind measurement by wind profiler radars, Joint PI Workshop of Global Environment Observation Mission 2013, 東京都千代田区, 2014 年 1 月.
- 山本真之, ウィンドプロファイラーレーダーによる大気の流れ・乱れの計測, 光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する研究集会, 福岡県春日市, 2014 年 1 月.

1. はじめに

マイクロ波イメージングは、磁場閉じ込めプラズマ中の揺動現象の解明に有力な手段として注目されているが、誘電体媒質中の透過特性を利用した物体内部の可視化、全天候型の車載レーダ、航空機搭載レーダ等、リモートセンシングの分野でも有用である。我々も平成 19 年度よりスポットライト方式マイクロ波合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) の研究を進め、平成 24 年度までに周波数 15.5 ± 0.8 GHz のシステムを製作、平成 24-25 年度ヘリコプター搭載による画像取得試験を実施した。

マイクロ波 SAR では電波法により周波数帯域が制限されるため、十分な空間分解を実現することが困難という問題があった。代表者等は、この問題をクリアするシステムとして、マイクロ波で振幅変調された近赤外レーザレーダを用い、合成開口処理により被測定対象の二次元、三次元イメージングを実現することを提案してきた。レーザの変調周波数は電波法の規制に該当しないため、1-18 GHz の超広帯域変調が可能であり、反射光信号の解析を復調マイクロ波領域で行うことにより、マイクロ波 SAR では実現不可能な空間分解 1-10 cm が期待される。

本システムは、光無線融合を利用した計測開発ということが出来る。空間に放射されるのは、安全性に優れた赤外光であり、マイクロ波は空間に発射されないことに加えて以下の特長を有している。

- i) 従来型パルスレーザレーダでは反射レーザ光の強度だけが測定され、位相データを測定することはできない。本開発システムでは、通常のマイクロ波 SAR と同様に、振幅・位相両成分を測定できる。
- ii) 合成開口レーダにおける信号処理において、しばしば SN 比低下の原因となるスペckル雑音については、マイクロ波を光源とする場合大きな問題となるが、本研究のようにレーザを光源とする場合は問題とならない。一方、レーザを使用する際課題となるコヒーレント長については、本研究のように復調したマイクロ波領域で信号処理を行うため殆ど影響してこないことになる

2. マイクロ波変調レーザ応用合成開口レーダ

「超広帯域マイクロ波変調レーザ」、「スポットライト方式合成開口レーダ」、および「画像処理・制御システム」を組み合わせた全システムのブロック図を図 1 に示す。平成 24-25 年度青色の装置の導入を進め、平成 25 年度研究の基礎となるマイクロ波変調レーザレーダの検証実験を進めた。赤色部分は、平成 26 年度の導入を目標としている。黒色部分は、マイクロ波合成開口レーダで製作してきたものと同様で、併用可能である。

システムは、外部マイクロ波発振器信号により変調された赤外レーザ (波長 1.55 μm) を発生する光送信機、光伝送のための光ファイバー、ファイバークラップラおよび光学系、光出力を被測定対象に照射したのち反射波を受信および検知し、マイクロ波信号成分を復調する光受信機、および、復調マイクロ波信号と参照波の干渉のためのマイクロ波ミキサから構成される。マイクロ波信号は、マイクロ波発振器から分離された参照波成分とミキサで混合され中間周波数成分が得られることになる。

周波数掃引 (FM) レーダでは、反射波の全光路と参照波光路の間の差を L 、光送信機に入力する電圧制御マイクロ波発振器の掃引周波数幅を Δf 、掃引時間を Δt とすると、反射波と参照波の干渉により得られる中間周波数成分は次式で表される。

$$f_{IF} = \frac{L}{c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{L_r}{c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t} + \frac{\Delta L}{c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (1)$$

ただし、 $L = L_r + \Delta L$ 、 L_r は送受信機内の実効光路、接続する光ファイバー、光デバイスを含む全光路から参照波光路を差し引いた値、 ΔL はレーザ光学系からは対象物までの距離、 c は光速である。

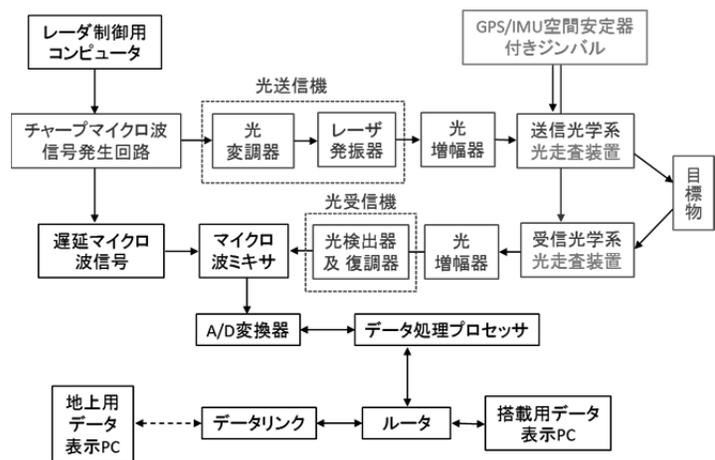


図 1. マイクロ波変調レーザ応用 SAR の構成.

3. レーザレーダの原理的検証実験

図2(a)は、掃引周波数幅を変化させたときの中間周波数の変化を示す。掃引時間は $\Delta t = 18 \text{ ms}$ 、 L は一定である。図2(b)は、掃引時間を変化させたときの中間周波数の変化を示す。掃引周波数幅 $\Delta f = 4 \text{ GHz}$ および L は一定である。中間周波数は掃引周波数幅および掃引時間の逆数に対して線形関係にあり、(1)式が良く満足されている。上記テストを行った後、対象物体(ミラー)の位置に対する遅延時間(位相遅延)を求めるレーダとしての原理検証実験を行った。その結果を図3に示す。中間周波数は対象物体の位置に比例しており、上式は満足されている。この結果からレンジ方向の空間分解は $\pm(1-2) \text{ cm}$ と評価された。周波数帯域を広くとり線形性をさらに向上させれば、空間分解は改善することが期待される。

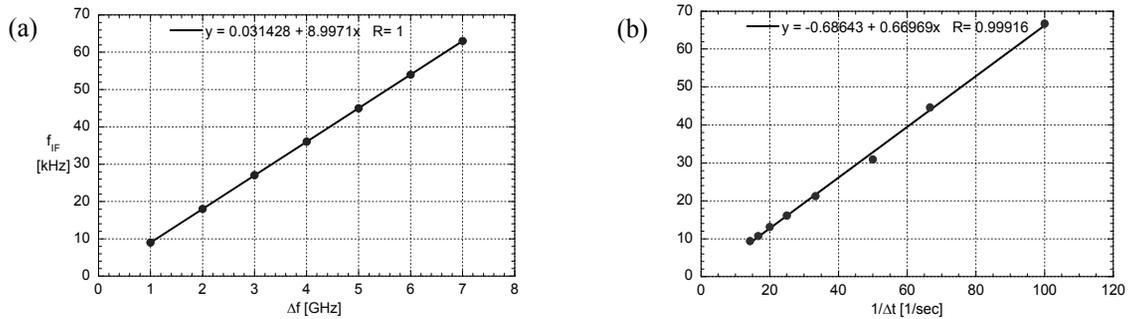


図2. (a) 中間周波数 vs. 掃引周波数幅、(b) 中間周波数 vs. 掃引時間の逆数.

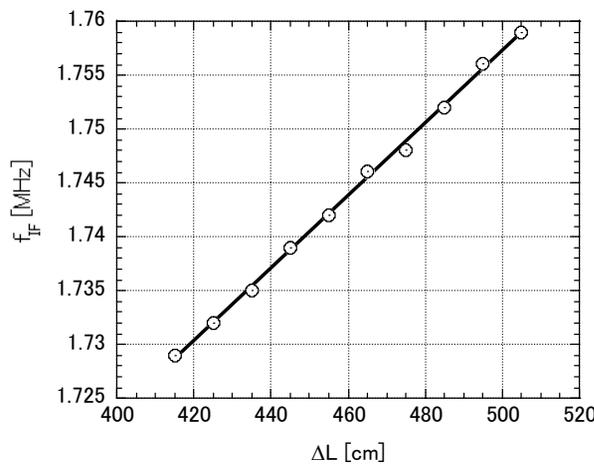


図3. 中間周波数 vs. 対象物までの距離—レーザレーダの検証.

4. まとめ

レーザレーダ装置としての原理的検証結果が得られた。測定の誤差評価から、レンジ方向の空間分解 $\pm(1-2) \text{ cm}$ と推定された。電圧制御発振器の周波数掃引の線形性をさらに向上させればこの値は改善することが期待される。平成26年度は実験室内での画像生成試験(SARの検証)に進む予定である。

5. 研究成果報告

- [1] A. Mase, N. Ito, Y. Kogi, H. Ikezi, M. Inutake, X. Wang, D. Kuwahara, Y. Nagayama *et al.*, Proc. Int. Symp. Electromagnetic Theory (URSI Commission B) (May 2013) pp. 242-245 (招待講演).
- [2] X. Wang, I. Sakagami, and A. Mase, J. Electromagnetic Waves and Applications **27**, 6, 758-771 (June 2013).
- [3] 王、間瀬、池地、近木、犬竹、内野：電気関係学会九州支部連合大会、熊本(2013年9月24日).
- [4] Y. Kogi, H. Ikezi, A. Mase, N. Ito, M. Sato, A. Suzuki, F. Sakai, S. Mizukami, K. Kameari, and M. Inutake, Proc. Asia-pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Tsukuba (Sept. 2013) pp. 73.
- [5] X. Wang, I. Sakagami, and A. Mase, Microw. Optical Technol. Letts., **56**, 2, 301-304 (Feb. 2014).
- [6] 間瀬、王、池地、近木、犬竹：平成25年度通研共同プロジェクト研究発表会(2014年3月5日).

6. 研究組織

間瀬 淳	九州大学産学連携センター	伊藤 直樹	宇部工業高等専門学校
近木祐一郎	福岡工業大学電子情報工学科	森山 敏文	長崎大学工学部
犬竹 正明	東北大学電気通信研究所	小田 誠	宮崎県工業技術センター
池地 弘行		徳次 李彦	核融合科学研究所
主 小龍	筑波大学プラズマ研究センター	出射 浩	九州大学応用力学研究所

25 特 3-3

光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発と
その応用に関する研究（研究集会）

九州大学 応用力学研究所 出射浩

1月に開催した研究集会のプログラムを以下に示す。

日 時： 平成26年1月28日（火）、29日（水）
場 所： 九州大学応用力学研究所本館中会議室

1月28日（火曜日）

- 13:00-13:30 ・研究集会主旨説明
(九州大学応用力学研 出射 浩)
- 13:30-14:30 ・高温高密度プラズマ中の加熱波動や揺動波動による
協同散乱計測 (核融合科学研究所 久保 伸)
- 14:40-15:25 ・LHDにおけるミリ波加熱性能向上のための課題
(核融合科学研究所 伊神 弘恵)
- 15:25-16:10 ・完全ストークス変数による偏波面発展の記述
(九州大学応用力学研 出射 浩)
- 16:20-17:05 ・Lバンドマイクロ波放射計による海面塩分の全球観測
(北大低温研 江淵直人・阿部泰人)
- 17:05-17:50 ・テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発
(核融合科学研究所 徳沢季彦)
- 17:50-18:35 ・超広帯域マイクロ波変調レーザレーダシステムの開発
(九州大学 間瀬 淳)

1月29日（水曜日）

- 9:00-9:45 ・LHDにおけるマイクロ波反射計を用いた波動計測
(東京大学 江尻 晶)
- 9:45-10:30 ・QUESTにおける輻射計計測
(九州大学応用力学研究所 出射 浩)
- 10:30-11:15 ・ウィンドプロライラレーダによる大気の流れ・乱れ
の計測 (京大大学生存圏研究所 山本真之)
- 11:25-12:25 ・全体討論
- 12:25-12:40 ・今後の進め方について

講演の要旨は以下の通り。

- ・ 「高温高密度プラズマ中の加熱波動や揺動波動による協同散乱計測」

(核融合科学研究所 久保 伸)

協同散乱についての一般的なレビューをした後、LHD での加熱用 77GHz/1MW 出力のジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱計測した結果を紹介し、LHD において背景輻射としての電子サイクロトロン放射が大きいと、入射ビームの振幅変調を用いて散乱成分を分離して、協同散乱スペクトルの取得に成功したこと、しかし、多重反射の影響と考えられる背景散乱信号も受信される場合があることも明らかになった。また、この協同散乱計測を用いて QUEST 装置での電子バーンシュタイン加熱波動の直接検出の可能性についての予備的検討を報告し、議論を行った。

- ・ 「LHD におけるミリ波加熱性能向上のための課題」

(核融合科学研究所 伊神弘恵／講演 久保 伸)

磁場閉じ込め型のプラズマ実験装置である大型ヘリカル装置(LHD)では、プラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱のために、ミリ波帯(77GHz, 154GHz)の電磁波を真空中の準光学アンテナからプラズマに照射している。照射された電磁波は高温高密度のプラズマが閉じ込められている閉磁気面内領域に達する前に、エルゴディック層と呼ばれる低密度の領域を通過する。従来、閉磁気面外の低密度領域では波動とプラズマの相互作用は弱く無視できるとされていた。しかし最近のミリ波入射実験では、エルゴディック層において磁気シアに起因するモード結合の効果により電磁波偏波が変化し、閉磁気面内の電子サイクロトロン共鳴層で強吸収される電磁波モードへの結合効率が変化していることを示唆する結果が得られている。エルゴディック層でのモード結合効果を考慮した入射偏波の最適化が、ミリ波加熱性能の向上には必要であり、実験的／理論的に最適偏波を調べるための手法の開発を進める必要がある。

- ・ 「完全ストークス変数による偏波面発展の記述」

(九州大学応用力学研究所 出射 浩)

入射電磁波のプラズマ中の偏波面変化を考える際、複屈折性と二色性がある。媒質中の偏波面変化は、古くから光の分野で調べられ、いくつかの偏光板は必要なものの、強度測定のみで偏波面を決定できるストークス変数を用いて、入射電磁波のプラズマ中の偏波面変化を考察した。入射電磁波の吸収がある場合は、光の分野で通常、用いられる簡易ストークス変数(3変数)を用いることができず、完全ストークス変数(4変数)を用いる必要がある。複屈折性に起因する2つの固有モード展開で考える場合、固有モードは簡易ストークス変数で表されるストークス球面に対向するベクトルで表現され、その直交性が担保されるが、吸収を考える場合その直交性が崩れる。実際の電子サイクロトロン共鳴吸収が起こる場合の固有モードの完全ストークス変数標記、モード展開、偏波面発展を表す方程式が示され、実験解析への適用が紹介された。

25 特 3-4

電子サイクロトロン周波数帯静電波の衝突減衰効果のモデリングに関する研究
核融合科学研究所 プラズマ加熱物理研究系 伊神 弘恵

本研究の目的

本研究では主に衝突減衰効果によるパワー損失も考慮にいたれた電磁波と電子バーンシュタイン波 (EBW) のモード変換領域付近の波動場の描像を、数値計算で得るための計算コードの開発を行うことを目的としている。

電磁波の伝播モードの一つである異常波モードは、高域混成共鳴層において静電波的性質を持つようになるため、磁場のあるプラズマ中を伝播する静電波の一つである電子バーンシュタイン波 (EBW) とモード結合する。この結合過程の描像は1方向にのみプラズマのパラメータが変化する系での平面波伝播(スラブモデル)を仮定した線形理論によって与えられてきた。しかし、衝突減衰や非線形過程であるパラメトリック崩壊波の励起が無視できない場合、これらの効果による波動のパワー損失も考慮する必要がある。また、波動加熱/計測実験に用いられるアンテナの放射パターンは平面波とは異なり、波動電場は有限の非一様な強度分布を持つため、波動場の広がり範囲内で磁場や密度が2次元的あるいは3次元的に変化する場合、スラブモデルでの線形理論を適用したモード変換に関する解析は不正確となる。

EBWによる高密度プラズマの加熱/電流駆動、ならびにEBWに由来する放射電磁波の計測は、QUEST装置における重要な研究課題である。波動場の広がりや衝突減衰の効果を考慮してなお十分なEBW加熱効率/EBW由来波の受信信号強度が期待できるかを数値的に検討することは、重要である。

研究の方法

以下に述べる二つの方法での数値解析を行い、結果を比較する。また、高密度プラズマでのEBW加熱/EBWに由来する放射電磁波計測を行い、理論予測結果と比較する。

- ・有限幅のビームを考慮したマルチレイ光線追跡計算を行い、各レイについてモード変換領域に再近接した点でのプラズマと波動パラメータを用いて、スラブモデルでの線形理論より与えられるモード変換効率を計算し、再近接点での密度勾配方向に沿ったエヴァネセント層の高密度側の点で光線追跡計算を再開させことで、エヴァネセント層を挟んだ領域での有限幅ビームの波動伝播描像を得る。また衝突減衰効果を分散式に加え、高域混成共鳴層付近での減衰効果を求める。

- ・Maxwell方程式を境界値問題として解くTASK/WF2Dコードを用いて、モード変換が起こるエヴァネセント領域近傍の波動伝播の描像を、衝突項の寄与も含めて得られるようにする。マルチレイの光線追跡計算を用いて、エヴァネセント近傍点での有限幅をもつ波動電場の屈折率の空間分布を与え、これを境界値とする。

経緯と結果

図1に大型ヘリカル装置(LHD)のパラメータを用いて計算した、ビーム照準点に対するモード変換効率の等高線プロットを示す。マルチレイ光線追跡計算を行い、ビームの広がりがあるが考慮されている。衝突減衰効果はまだ考慮されていない。また、モード変換領域での密度揺動が変換効率を低減させるとの理論的予測があるが、その効果は考慮されていない。50%以上の変換効率が期待される照準点にむけた入射でも実験的に見積もられた加熱効率は10%程度であり、数値計算による予測精度が現状では十分でない。予測精度を上げるには、衝突減衰効果や密度揺動効果を考慮するとともに、実験

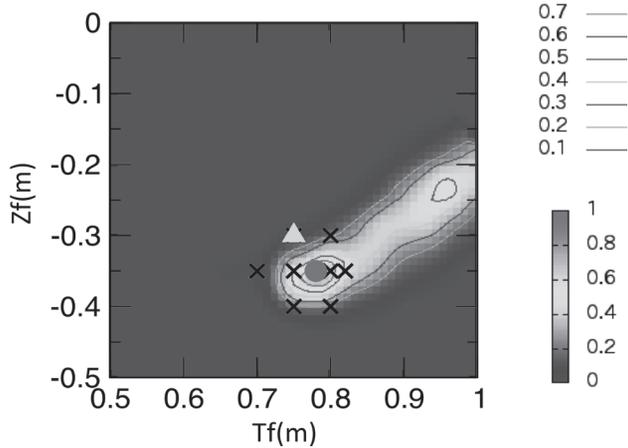


図. 1: 入射ビームの照準位置 (Tf, Zf) に対して予測された 0-X モード変換効率の等高線図。マルチレイ光線追跡を用いて計算したのでビームの広がりがあるが考慮されている。実験で入射した照準位置に印をつけた。

験での分布を精度良く再現した磁場と密度分布を与える必要がある。

TASK/WF2D コードを適用するには、2次元メッシュ空間において、磁場・密度・温度の分布と境界条件を与える必要がある。図2に示すように計算に用いる座標系を定義し、2次元的にパラメータが変化する計算領域を各メッシュ点で与えることができるようにした。座標系の原点は、ビーム中心のレイに関する光線追跡計算を行って、磁場に対して垂直方向の屈折率が一定値を下回った点としている。現在マルチレイ計算で各レイが図1

の $x=0$ 平面に達した際の波数ベクトルをそれぞれ求め、 $x=0$ のメッシュ点上での波数ベクトル各成分の分布を補間して求めることができるように、計算コードを整備中である。また、誘電率テンソルに衝突の効果を追加

するためのTASK/WF2Dコードの改良を行っている。

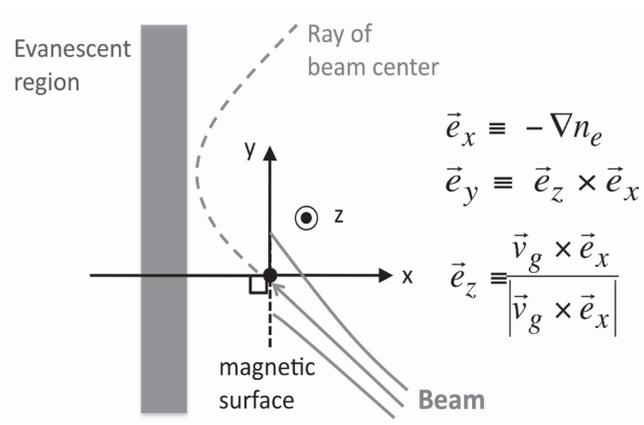


図2: TASK/WF2D コードでの計算に用いる座標系の定義

研究発表

H. Igami et al. "Electron Bernstein wave heating and emission measurement through the very narrow 0-X-B mode conversion window in the LHD" 20th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas 25th – 28th June, Sorrento, Italy

25 特 3-5

電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・熱化過程の検出

核融合科学研究所 久保 伸

目的と概要

QUEST においては、電子バーンシュタイン波 (EBW) による電流立ち上げと定常維持が計画の基幹となっている。しかしながら、これまで EBW の直接検出が困難であるため波動の励起、伝搬及び電流駆動の物理機構については理論的な予想、解析はあるが、実験的には必ずしも明確にはなっていない。この EBW の波動伝搬とその空間構造を直接検出し、その物理機構の検証と解明を行うことにより、電流立ち上げと定常維持を高効率・高性能化することが本研究課題の目的である。これまでの検討の結果、波動の直接検出にはミリ波からサブミリ波の散乱計測が有効であり、散乱断面積の小ささから大電力のプローブビームと高感度の受信システムを用意する必要がある。応用力学研究所においては 170 GHz 大電力ジャイロトロンおよび伝送入射システムを有効利用できる可能性があり、これを第一候補として検討を行ったが、予想される励起 EBW 波動の波長が伝搬とともに短くなり、170 GHz では、最も短波長の計測が可能な後方散乱 (180 度散乱) 条件でもモード変換直後の伝搬領域での測定に限られてしまうことが判明した。このため、より周波数の高いプローブビームと受信システムの検討を行うこととした。

研究の具体的方法

予想される EBW のパラメータに対してミリ波からサブミリ波をプローブビームとして使用することを想定して波動の直接計測の可能性を検討する。このために、

1. 予想される 8.2GHz の入射アンテナから励起される EBW 動による密度揺動強度及び波数の評価をおこなう。
2. 直接計測可能な EBW 動の波数範囲と電力密度を評価し、いくつかの可能性のあるミリ波からサブミリ波領域での最適かつ現実的な散乱計測のプローブビーム及び受信系配置を検討する。
3. 受信散乱波強度を評価して、必要な受信系の構成、受信素子の選択を行う。
4. 定常プラズマの特性を生かした、波動の位相検出を含めた伝搬構造の詳細計測の可能性を検討する。

を順次進め、この計測の実現可能性、有効性を見極めた上で、実際の計測準備を行う。

raytrace から予想される EBW の振舞と散乱計測

O-X-B モード変換による 8.2GHz EBW 加熱時の中心加熱・電流駆動が期待できる $N_{||}=0.56$ とした場合、O-mode で入射した電磁波がプラズマ遮断層において X-mode に変換され、X-mode として伝搬する過程で高域共鳴層に近づいて静電波である EBW に変換されることが ray trace コードで予想されている。この場合、EBW は半径方向に伝搬する過程で半径方向の波数が大きく変化し入射電磁波が EBW に変換され、伝搬、吸収される。この EBW に変換された後の伝搬、吸収の過程において、伝搬波動の半径方向の波数が伝搬に従って大きくなり、吸収される吸収され段階では $2 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 程度になることが予想される。この大きな波数を散乱観測によ

て計測するためには、当初考えていた 170GHz で周波数の高い 470 GHz 以上電磁波を用いる必要があることが解った。このサブミリ波領域の周波数においては考えられる発振源および、受信システムの組み合わせの選択肢は限られており、慎重に周波数を選択する必要がある。

EBW に伴う伝送電力と密度揺動と散乱効率の関係

密度揺動 \tilde{n} が存在する場合のプローブビームと散乱波の散乱効率 P_s/P_i は、有効散乱体積 V 中に一様に密度揺動 $\tilde{n}(\mathbf{k}, \omega)$ が存在する場合、 r_0 を古典電子半径、散乱体積中心から観測点までの距離を R とすると

$$P_s/P_i = 4\pi \frac{r_0^2}{R^2} [\tilde{n}(\mathbf{k}, \omega)]^2 V^2 \quad (1)$$

と表せる。したがって、プローブビームの周波数の選択は、直接散乱効率には影響せず、空間分解能を決定するビームサイズや散乱角によって決まる散乱体積 V を介して依存することになる。加熱波動の伝搬電力 P_H と振動電場の関係は

$$P_H = \omega \epsilon_0 \frac{\tilde{E}_H^2}{2} \quad (2)$$

と表されることがわかる。一方で、密度の揺動成分 \tilde{n} と加熱波動の振動電界の関係は、電荷の保存則 $\frac{\partial(\epsilon \tilde{n})}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ から

$$\tilde{n}(\mathbf{k}, \omega) = \frac{\mathbf{k}}{\omega e} \cdot \tilde{\mathbf{j}} \quad (3)$$

$$= -i \frac{\epsilon_0}{e} \mathbf{k} \cdot (\overleftarrow{\epsilon} - \overleftarrow{I}) \cdot \tilde{\mathbf{E}} \quad (4)$$

と表現され、したがって、EBW の場合、

$$[\tilde{n}(\mathbf{k}, \omega)]^2 = \frac{2\epsilon_0 k_D^4}{\omega e^2 k^2} \left\{ 1 - \Lambda_0(\beta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega} \left[1 - W\left(\frac{\omega - n\Omega}{|k_{\parallel}|(T/m)^{1/2}}\right) \right] \Lambda_n(\beta) \right\}^2 P_H \quad (5)$$

これを式 (1) に代入すると最終的に散乱効率は、

$$P_s/P_i = 8\pi \frac{r_0^2}{R^2} V^2 \left(\frac{e^2 n_e^2}{\epsilon_0 \omega k^2 T^2} \right) \left\{ 1 - \Lambda_0(\beta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega} \left[1 - W\left(\frac{\omega - n\Omega}{|k_{\parallel}|(T/m)^{1/2}}\right) \right] \Lambda_n(\beta) \right\}^2 P_H \quad (6)$$

と表される。ここで、 k_D はデバイ波数、 W や Λ_n, β は、参考文献 [1] の表式を用いた。したがって、プローブビームとして選択する周波数は、実際に測定が必要な励起波動が引き起こす密度揺動レベルとその波数によって最適値が求められることが解った。ただし、この選択は、入手可能なプローブビームの発振源とその帯域での検出システムの構成に大きな影響を及ぼす。具体的な配位、プラズマパラメータ等を用いた検討は今後の課題である。

参考文献

- [1] S. Ichimaru, "Basic Principles of Plasma Physics" Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1980.

テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

1. 目的

高温プラズマの生成による核融合発電を目指した研究において、閉じ込め性能の向上に伴い、高温高密度化が進んでいる。そのため従来マイクロ波帯の電磁波を用いていた反射法などのプラズマ計測手法へのテラヘルツ波帯への拡張が必要となってきた。例えば、核融合科学研究所で検討を行っているヘリカル型原型炉(FFHR-d1)で想定しているプラズマ内部の特性周波数の半径方向分布は図1のようになり、特性周波数はマイクロ波からテラヘルツ波(0.1-10THz)領域に広がっており、この空間および周波数領域を全てカバーする計測システムの構築が期待されている。しかしながら、プラズマ計測に適した光源がこれまで非常に限られていたことから、この分野の計測手法は開発がまだあまり進んでいない。そこで、近年新しく開発がなされてきたテラヘルツ波光源を用いた高温プラズマ計測法の早急な確立が期待されている。

本研究では、これまでに実績のあるマイクロ波計測法のテラヘルツ波領域への拡張を行うことを目指してその基盤を確立するための開発研究を行う。本研究の測定対象物体は、従来のテラヘルツ波計測では全く事例のない、メートル級の大型高温プラズマであるため、これへの適用を目的としたミラーやアンテナ等の伝送光学系や信号処理等の回路系を含めたシステムの設計および開発を行う。

2. 計画と実験方法

LHD装置には種々のマイクロ波帯の反射計、散乱計などを適用しプラズマ計測を行ってきた実績があるが、本研究では、100

～1000GHzの周波数帯で2つの種類の光源を用いた新しい計測システムの開発を行う。一つはマイクロ波帯発振器出力を過倍する方法、もう一つは時間領域分光法で用いられるテラヘルツ波パルスを活用する方法である。前者は周波数掃引を行うことで電子密度の空間分布情報を求めるためのシステム開発をW-bandを対象として行う。後者はパルスの持つ広帯域性を活用した計測を行うが、mm～cmサイズの物体の物性研究には実績があるが、大型の物体の研究に用いられた例は無いため、そのための開発研究を行う。本報告書では、この後者のテラヘルツ波パルス計測システムについて、以下に述べる。

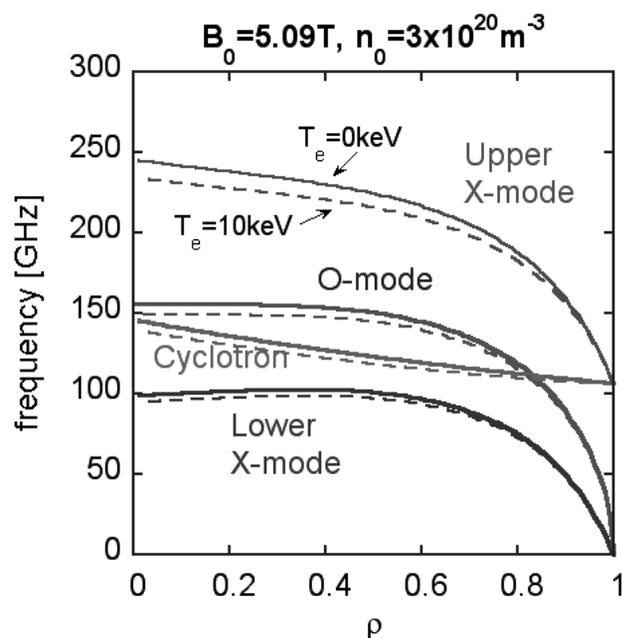


図1：ヘリカル型核融合炉(FFHR-d1)の炉心プラズマにおいて想定される特性周波数の半径方向分布。正常波カットオフ(O-mode)、異常波カットオフ(X-mode)およびサイクロトロン周波数を示している。また想定される電子温度(10keV)における相対論効果による周波数変化を点線で示している。

3. テラヘルツ波パルス計測システム

テラヘルツ波パルスをプラズマに入射し、プラズマ自身あるいは対向壁面から戻ってくる反射波を受光し、その飛行時間 τ_{pe} を計測すると、次式のようになる。

$$\tau_{pe} = \frac{2}{c} \int_{-a}^a \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2(x)}{\omega^2}}} - 1 dx \quad (1)$$

ここで、 a , c , ω , ω_{pe} はそれぞれプラズマ半径、光速、入射周波数、電子プラズマ周波数である。このテラヘルツ波パルスを図1の原型炉想定のパラメータで計算すると図2の赤線のような周波数特性が求められる。図より、ピークとなる周波数（この場合、約300GHz）よりも高い周波数成分から線平均電子密度の情報が、ピーク周波数から最大電子密度の値が、ピークよりも低い周波数成分から電子密度分布情報が、それぞれ求められることになり、非常に効率的かつ有意義な計測手法となり得る。

このようなテラヘルツ波パルス計測の試験開発を行うために、テラヘルツ波時間領域分光法 (THz-TDS) システムを構築中である(図3)。本システムは、光伝導アンテナからのテラヘルツ波発振を利用したシステムで、フェムト秒ファイバーレーザー (Menlo 社 T-Light 780) を励起光源としている。このレー

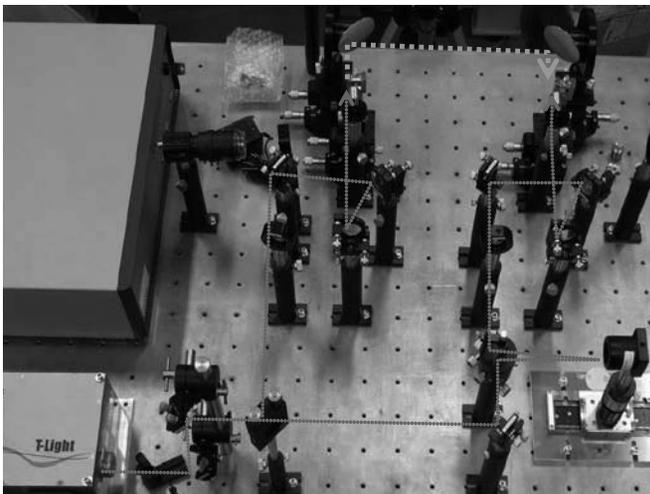


図3：テラヘルツ時間領域分光テストシステム。写真は透過型光学系のシステム例。赤線が励起フェムト秒レーザー光経路。緑線がテラヘルツ波経路。

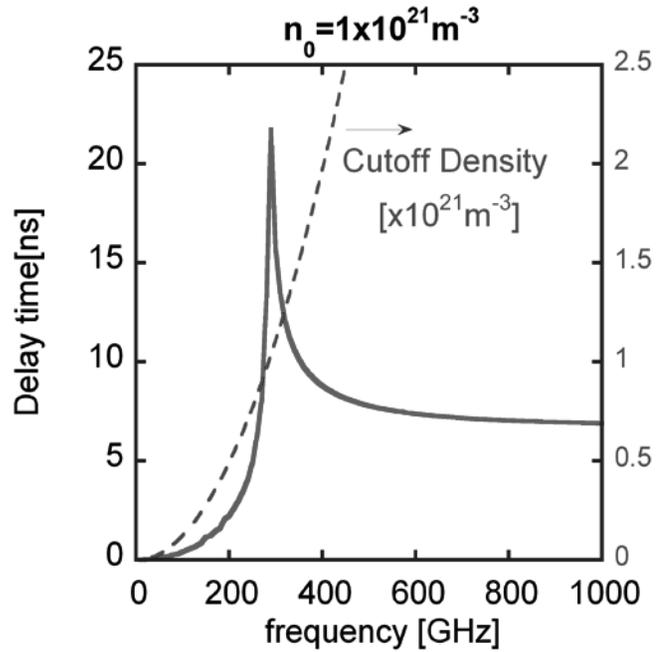


図2：核融合プラズマ原型炉（中心電子密度～ $1 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ ）における入射テラヘルツ波のプラズマ中の伝搬に伴う遅れ時間

ザーからの波長 780nm (パルス長 120fs, 出力 70mW) の出力光を、プラズマ計測に適した周波数領域 (~1THz) のテラヘルツ波を選択的に発生させるため、低温成長 GaAs 基盤ボウタイ型光伝導アンテナに入射し、テラヘルツ波パルスを発振させている。また、プラズマ計測への適用に必須な開発要素である信号検出系の高速化を達成するため、光サンプリング検出を行うためのディレイステージを高速に駆動することを目指し、毎秒 1000mm での移動が可能なりニアモーターステージを採用したシステムを構築した。本システムにおいて、現在、50MHz 繰り返しでの 0.1~2THz の周波数スペクトルをもつテラヘルツ波発生を確認できた。今後、プラズマ計測へ適用するための開発試験を進めていく。

・「L-バンドマイクロ波放射計による海面塩分の全球観測」

(北大低温研 江淵 直人・阿部 泰人)

NASA が開発した塩分観測センサ **Aquarius** を搭載したアルゼンチンの地球観測衛星 **SAC-D** が 2011 年 6 月 10 日に打ち上げられ、同年 8 月 25 日から現在まで観測が続いている。**Aquarius** は、海面塩分によって海面の誘電率が変化し、射出されるマイクロ波の放射輝度が変化する特性を利用して海面塩分を計測するものである。当初の目標精度としては、150 km, 1 ヶ月平均で 0.2 psu を掲げている。**Aquarius** によって観測された最新の海面塩分を、Argo フロートや係留ブイの現場観測データ、および客観解析データや海洋データ同化システム出力と比較して精度評価を行った結果と、観測データを用いた研究の展望について紹介する。現時点での最大の問題点は、銀河からのマイクロ波放射の反射の補正が不十分なため、主に南大洋で、ascending 軌道と descending 軌道の間で有意なバイアスを持つ点である。最新のアルゴリズムでは、水温 5degC 以上、風速 15 m/s 以下の条件で、緯度経度 1 度、月平均の比較で残差の標準偏差は 0.22 psu の一致を示しており、目標精度達成まであと少しと言える。

・「テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発」

(核融合科学研究所 徳沢季彦)

将来の核融合炉などへの実装を視野において、テラヘルツ波を用いたプラズマ計測器の開発を行っている。CWテラヘルツ波を用いた干渉・偏光計による電子密度、磁場観測の要素開発の状況、パルステラヘルツ波を用いた電子密度モニター計測システムの原理実証試験の現況に関して紹介した。

・「超広帯域マイクロ波変調レーザレーダシステムの開発」

(九州大学 間瀬 淳)

広帯域マイクロ波で変調されたレーザレーダについて報告された。特長としては、

- ① 波長 1.55 mm という目に優しいレーザを用い、既存のレーザレーダのように高強度レーザを使用しないため安全性に優れている
- ② マイクロ波レーダでは、電波法の規制から掃引周波数幅を ~ 2 GHz 以上にすることが難しく、10 cm 以下の空間分解を得ることが困難であるのに対し、本システムでは帯域幅 10-15 GHz を実現できるため、さらに優れた空間分解が期待される、などである。

現在までに、レーダ装置としての試験を行い、送信・受信光学系が一体化したモノスタティック方式、独立したバイスタティック方式、いずれの場合においてもレンジ方向の空間分解 ± 2 cm が検証されていること、合成開口レーダとしての実証試験を実験室で行った後、地上実験へと進める予定であることが報告された。

・「LHDにおけるマイクロ波反射計を用いた波動計測」

(東京大学 江尻 晶・核融合科学研究所 徳沢季彦)

LHDにおいて、ICRFアンテナ近傍の計測を行うために30.5 GHz マイクロ波反射計を設計し、3.5Uに設置し2012年度から実験を行った。波動由来の密度揺動は0.01%程度で電場は1 kV/mのオーダーであり、密度振動振幅の位置、少数イオン比、パワー依存性が見られた。波動電場と密度揺動は線形の関係にあり、入射パワーの平方根と密度揺動振幅には線形関係があると予想されるが、測定結果では、予想と異なる依存性を示す場合があった。この原因は不明である。線形性を仮定した場合の波動振幅の減衰長はある条件で4m程度であった。また、この手法による少数イオン比の計測の可能性について紹介した。

- ・ 「QUESTにおける輻射計計測」

(九州大学 出射 浩)

プラズマの加熱・電流駆動実験に向け、入射ビームの指向性制御のための位相配列アンテナが開発されている。EBW 実験ではモード変換のために有効な入射角度範囲は狭い。プラズマからの熱輻射は、加熱・電流駆動のための入射と逆過程を経て、狭い放射角範囲で観測されるため、EBW 実験でのモード変換機構解明には、熱輻射計測が重要となる。昨年度報告されたノイズソースを放射源に用いた実験室での低電力試験の解析に加え、QUEST 装置内の実験結果が紹介された。QUEST 装置内に異なる位置でノイズソースを設置し、ビームフォーミング法で、輻射源の位置同定を行った。

- ・ 「ウィンドプロファイラーレーダによる大気の流れ・乱れの計測」

(京大大学生存圏研究所 山本真之)

最初に、大気屈折率擾乱を利用して風速や乱流を計測するウィンドプロファイラーの観測原理を述べた。次に、気象庁が運用するウィンドプロファイラー観測網を紹介するとともに、雲・降水現象の解明におけるウィンドプロファイラー観測の有用性を示した。最後に、レーダーイメージング技術を活用した大気乱流の高解像観測の原理と観測結果を発表した。

全体討論・今後の進め方では、今年度の研究集会を踏まえて、来年度、どのように進めるか議論された。平成26年度核融合科学研究所の(研究会)一般共同研究「マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波の技術とそのプラズマ加熱・計測への応用」へ申請した旨、紹介された。本研究会では、天文観測を含めた研究紹介があり、本申請研究集会との連携開催で有意義な議論・展開が図れるか議論された。研究集会はあくまでも個別に行うが、連続開催で多くの参加者で議論することを考えることとした。

プラズマ物理におけるマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究

日本原子力研究開発機構 矢木雅敏

目的

プラズマ物理においては、時間尺度及び空間尺度の異なる諸現象(MHD、微視的乱流等)が定性的に異なる空間領域またがって相互作用し、その結果としてプラズマエネルギーの閉じ込め特性が決まる。それを総合的に理解し、予測・制御するためには、外部加熱を伴う、輸送、MHD、乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションが必要であると認識されつつある。本研究ではプラズマ周辺における非線形MHD 応答、L/H 遷移現象、ディスラプション、直線装置における乱流現象等、プラズマ実験で観測されているさまざまな複合・非線形現象を解明するためのシミュレーション研究を行う。これらの現象はマルチスケール・マルチフィジックスであるため、モデリングや数値スキームの開発も同時に必要となる。これまで九大で開発されてきたシミュレーションコードをもとにモデルの拡張やコードの改良を行う。

研究成果

LHDにおけるECRH印可実験ではマクロスケールの揺らぎが観測されており、非局所輸送の候補と考えられている。またペレット入射実験でも非局所輸送が観測されており、その物理機構の解明は過渡輸送現象を理解する上で重要であると考えられる。解析モデルとして積分型非局所フラックスモデルを用いた先行研究が存在するが、1次元モデルとして定式化されている。本研究では円柱座標系における4場簡約化MHDモデルを用いた非線形シミュレーションにより、定常状態に達した抵抗性バルーニング乱流中に周辺密度ソースを印可し、プラズマの応答を観測する。ある時間帯で周辺密度ソースを切り、その後の密度分布の時間発展を追跡する。これによりペレット入射実験を模擬し、密度発展方程式の対流微分項に起因する非局所輸送を解析する。モデルとして4場簡約化MHDモデルを用いる[1]。前回の報告では円柱ソースの場合の結果について報告したが[2]、今回は球状のソースの結果を報告する。ソースは $S_n = S_{AMP} \exp(-(r^2 + r_s^2 + 2rr_s \cos\theta + \zeta^2 / \varepsilon^2) / 2\Delta)$ で与えた ($r_s = 0.8, \Delta = 0.1, \varepsilon = 1/3$)。ソースは $T = 948$ で印加し、 $T = 1800$ で切る。図1の内部エネルギーの時間発展を示す。球状のソースを印加することで様々なモードへエネルギーが移送されている。前回報告した円柱状の場合は $n = 0$ モード (n :トロイダルモード数) へのみエネルギーが移送されており、非局所輸送はソースを切った後の過渡応答として観測されている。図2に磁気面平均された全密度分布の時間発展を示す。ソースを印加している期間に非局所輸送が $r = 0.4$ 付近に出現している。解析の結果、今回の場合も非局所輸送の担い手は(1,0)モードであることが判明した。図3に $T = 1500$ における(1,0)モードのみで構成された密度揺動のポロイダル断面における等高線 $p(r, \theta, \zeta = 0)$ を示す。円柱ソースの場合に観測されたスパイラル構造が同様に形成されている。図4に(1,0)モードのフーリエ係数の実部の径分布 $\text{Re}(p_{1,0}(r))$ の時間発展を合わせて示す。図4より(1,0)モードはソース印加とともにグローバルに変化しているためGAM振動ではないと考えられる。今後、シンクの場合についても考察する予定である。

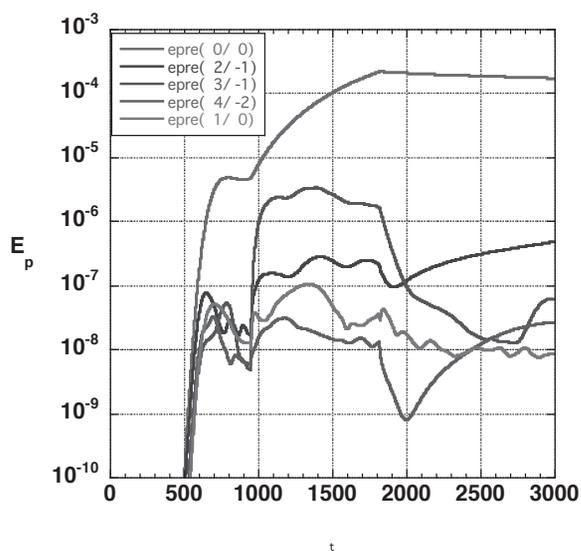


図1 内部エネルギーの時間発展

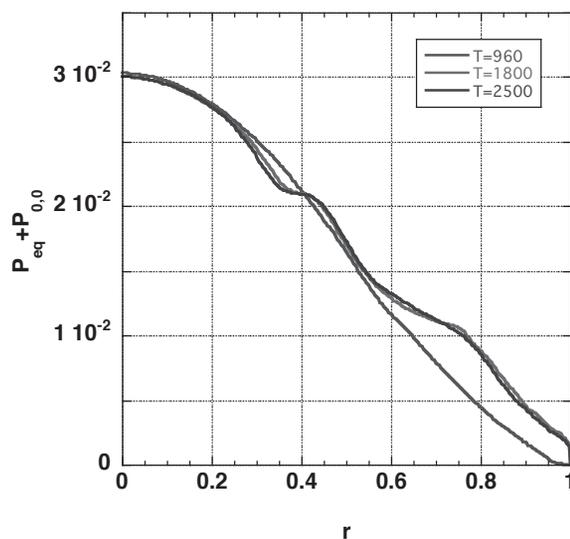


図2 磁気面平均された全密度分布の時間発展

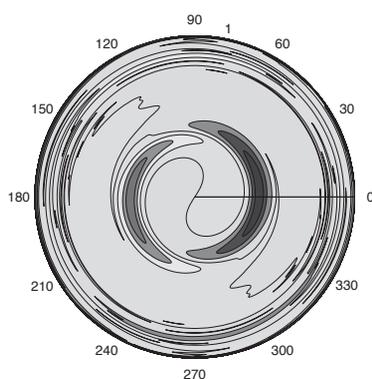


図3 T=1500 における(1,0)モードのみで構成された密度揺動のポロイダル断面における等高線図

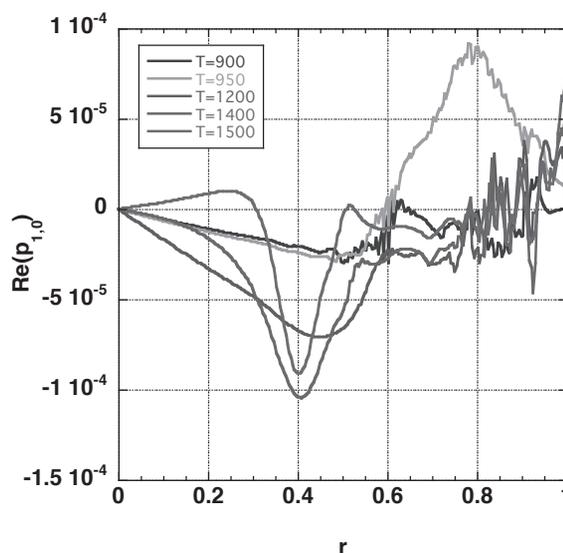


図4 (1,0)モードのフーリエ係数の実部の径分布の時間発展

参考文献

- [1] 矢木雅敏、平成 24 年度共同利用報告書 24FP-34
- [2] M. Yagi et al., "Simulation study of nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas," to appear in Contrib. Plasma Phys.

研究組織

矢木雅敏(原子力機構)、西村征也(核融合研)、松山顕之(原子力機構)、廣田真(東北大学)、糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(九大応力研)

プラズマ対向材料中の水素同位体交換に関する研究

研究代表者 日本原子力研究開発機構 山口正剛
 所内世話人 大澤一人

【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)ではダイバーターで激しいプラズマ粒子の照射を受ける設計になっている。ダイバーターは水素（水素同位体）をほとんど固溶しないタングステン(W)で被覆し保護する設計になるが、それでも水素が内部に侵入し貯蔵されることが問題になっている。特に、トリチウム(T)は放射同位体であるためにその残留量の上限が規制されている。そこで、タングステンと水素との相互作用や吸蔵、拡散移動に関する研究は盛んに行われている。その中で一旦は吸蔵されたトリチウムを材料から離脱し回収する方法の研究も行われている。その中の1つが同位体交換法である。水素同位体は化学的性質は同じであるが、原子核の質量が違うために零点振動エネルギーに違いがある。そのため空孔型欠陥との結合エネルギーに差ができ、その違いを利用して水素または重水素雰囲気中でトリチウムを材料内部から追い出すのが同位体交換法である。この方法は低温でのトリチウムの放出が起きることが期待されている。実際に同位体交換が起きていることを示唆する実験結果もあり、実験と理論計算の両面で研究の進展が見込まれている研究課題である。

【同位体交換法の原理】

図1には同位体交換法の原理を示す。タングステンでは水素が結晶格子中にある場合はエネルギー準位が高く不安定である。また、そこは狭い空間なので零点振動エネルギーも大きい。従って、トリチウムとその他の同位体との零点振動エネルギーの差も大きくなる。

$$\omega_T = \sqrt{\frac{m_H}{m_T}} \omega_H$$

この式はトリチウムと水素原子の零点振動数とそれぞれの質量の関係式である。ただし水素同位体は平衡点の周りを調和振動することを仮定している。空孔に水素同位体が捕獲された場合はエネルギー準位は低く安定である。また水素には十分広い空間なので振動数は小さくなる。その結果同位体間の振動エネルギーの差も小さくなる。そこで図1で示すようにトリチウムが空孔内に捕獲されている時はそれよりも軽い同位体と交換した方が総エネルギーは低くなる。

図2は同位体交換を観察した実験である。この場合は水素(H)と重水素(D)で観察した。重水素をタングステンに注入した試料(■)を用意した。それを真空中で400°C10時間加熱した試料(○)と水素ガス中で同様に処理した試料(●)を比較した。すると水素と一緒に処理した試料の方が重水素の残留量が著しく減ることを示している。

ただし、図2のような実験を説明するために別のメカニズムも提案されており今後の検討が必要である。

【第一原理計算】

本研究では第一原理計算の汎用コードであるVienna ab-initio simulation package (VASP)を使った。ポテンシャルは一般化勾配近似タイプ(GGA)のもの、K点の密度は5×5×5、原子緩和は各原子に働く力のが 0.003 eV/Å 以下になるまで緩和を繰り返した。スーパーセルはBCC格子の格子点が54個のものを使った。また、水素同位体の零点振動エネルギーを計算するために安定位置の周辺で仮想的に水素の位置をずらし、そのエネルギーの上昇を計算した。変位と復元力が比例する調和振動近似を仮定して振動数を計算した。

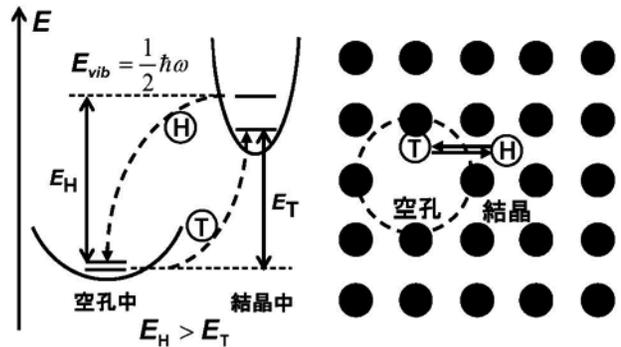


図1: 同位体交換法の模式図。零点振動エネルギーを考慮するとTとHは交換した方が安定。

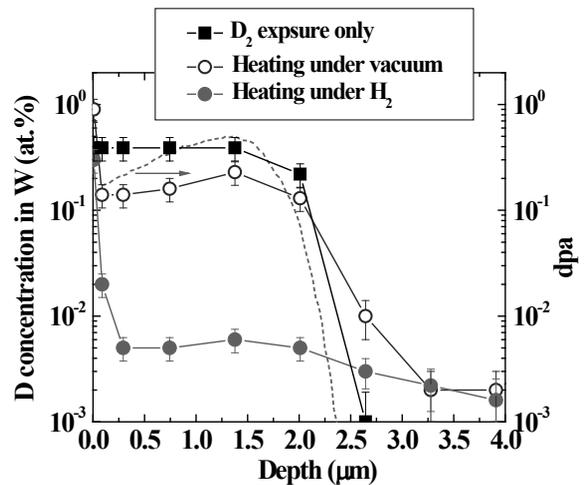


図2: (■)重水素に暴露したタングステン試料の重水素の深さ分布。(○)真空中で加熱処理。(●)水素と共に加熱処理。[1]

【タングステン空孔中の水素の構造と振動状態】

BCC金属の空孔には通常水素はO-site近傍が安定である。また、空孔内部にはO-siteが6個存在するので、図3(a)で示すように6個まで水素が捕獲されると考えられてきた。しかし、タングステン空孔は特殊で図3(b)で示すようにO-siteから格子定数の約18%もずれた位置が安定である。さらに、最高で12個まで水素原子は捕獲されることが計算上予測されている。[2-3]

水素の零点振動エネルギーを計算する場合正しい水素の基底状態を知っておくことは重要である。基底状態の水素とは模式図の図4(a)で示すように、平衡状態からどのような微小なずれに対しても復元力がはたらく。そのため振動が起こる。一方で平衡状態でも図4(b)で示すような不安定な構造では振動は起こらない。タングステン空孔中の水素は図3(a)の構造が不安定構造に対応している。しかしながら、多くの研究論文でこの構造が採用されており正しく零点振動エネルギーが計算されているか疑問がある。

【タングステン空孔と水素同位体の結合エネルギー】

図5はタングステン空孔と水素(H)およびトリチウム(T)の結合エネルギー(E_{bind})である。ただし、

$$E_{bind} = E[W_{n-1}V] - E[W_{n-1}VH_k] + k(E[W_nH^T] - E[W_n])$$

ここで、 E はスーパーセルの凝集エネルギー、 V は空孔、 H^T は固溶している水素同位体、 $n=54$ で格子点の個数、 k は水素同位体の個数。つまり上の式は、固溶している水素が空孔に捕獲された時の利得を表す。

図5によるとトリチウムより水素の方が空孔と強く結合している。有限温度の効果を考慮すると6個の水素同位体を捕獲した空孔水素複合体が広い温度と水素分圧の領域で圧倒的に多くなることが予測された。[4]そこで図5では特に空孔水素複合体 VH_6 と VT_6 についてその値を記した。水素の方が約0.20eVほど空孔との結合エネルギーが大きくなる。

【考察とまとめ】

タングステン空孔中の水素の正しい構造を第一原理計算に基づいて行った。そして、空孔と水素およびトリチウムの結合エネルギーを計算したところ図5で示すように軽い水素の方が結合エネルギーが大きい。従って、同位体交換法によってトリチウムをタングステンから解離し回収できる可能性がある。また、この計算結果は図2の実験結果を支持するものである。

参考文献

[1] Y. Hatano *et al.*, J. Nucl. Mater., 438(2013) S114.
 [2] K. Ohsawa *et al.*, Phys. Rev. B 82 (2010) 184117.
 [3] K. Ohsawa *et al.*, Phys. Rev. B 85 (2012) 094102.
 [4] K. Ohsawa, Reports Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University **143** (2012) 29.

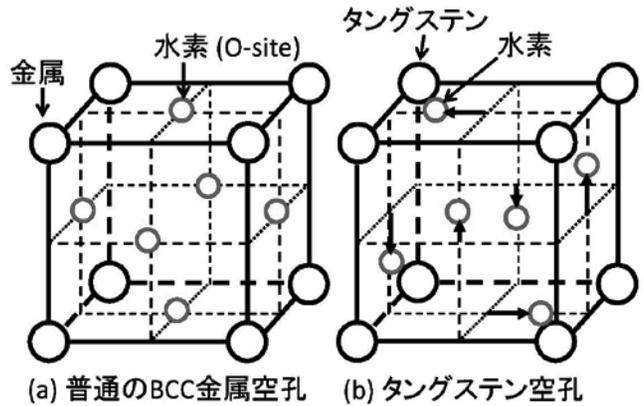


図3:(a)普通のBCC金属中の水素の構造。(b)タングステン空孔中の水素の構造。

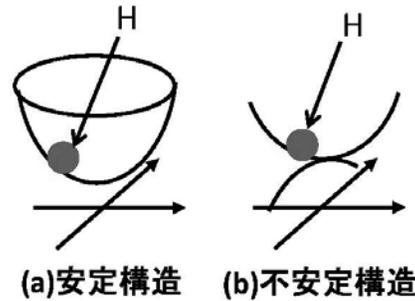


図4:水素の構造が平衡状態からずれた時の模式図。(a)基底状態(b)不安定な状態。

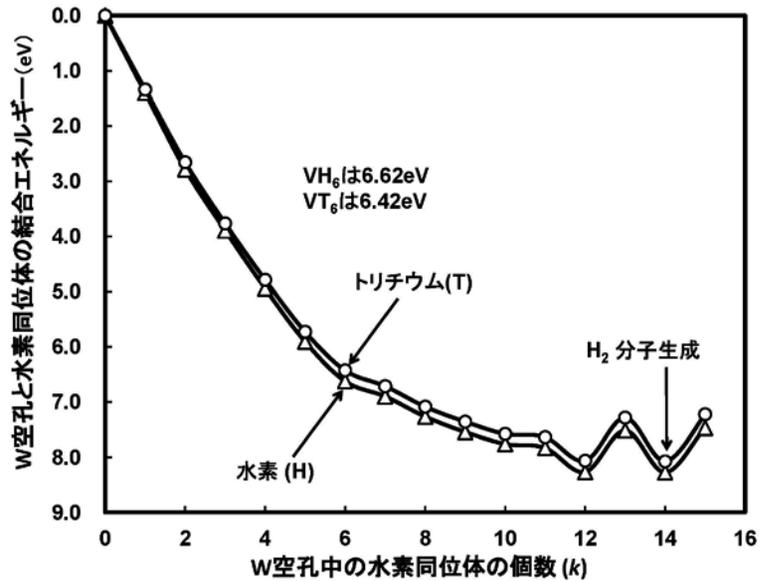


図5:タングステン空孔と水素同位体の結合エネルギーと空孔に捕獲された水素同位体の個数(k)との関係。

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 堀史説
 所内世話人 大澤一人

【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)はダイバーターに強いプラズマの照射を受ける設計になっている。そこで、ダイバーターには水素溶解度が低く耐摩耗性と耐熱特性に優れたタングステン系合金で被覆されることが計画されている。そこでタングステン系合金と水素との相互作用の研究が盛んに行われるようになった。タングステンは水素溶解度が最も低い金属なので結晶中に水素が貯留されることはない。しかし、空孔型の欠陥には相当な量の水素(水素同位体)が貯留されることが予想されている。特に、燃料のトリチウムは放射同位体であるために炉材料への残留量が問題になっている。さらに第一原理計算によるとタングステン(およびモリブデン)中の空孔に捕獲された水素は他のBCC金属では見られない特異な構造を持つことが明らかになっている。通常のBCC金属の空孔では水素はO-siteと呼ばれる点の近傍が安定で、最高で6個まで捕獲される。ところが、第一原理計算によるとタングステン空孔では複雑な水素の構造が予測されている。このような計算上予測される水素の特異な構造が実際に実現されるか、という疑問は残るが実験的に検証されていない。その原因の1つはタングステンは元々水素をほとんど溶解しないために、水素を吸収した試料を作ることが困難なためである。ところが、B2型と呼ばれる金属間化合物の中には水素をよく吸蔵するものがあり試料作製が比較的容易である。本年度の研究ではタングステンと幾何学的に同じ水素の構造になる金属間化合物が見つかったので報告する。

【BCC格子とB2格子】

図1に(a)BCC格子と(b)B2格子を示す。BCC格子(対心立方格子)は1種類の原子で構成されている。一方でB2格子は2種類の原子で構成されている。その2種類の原子を同一視すればB2格子はBCC格子と一致する。

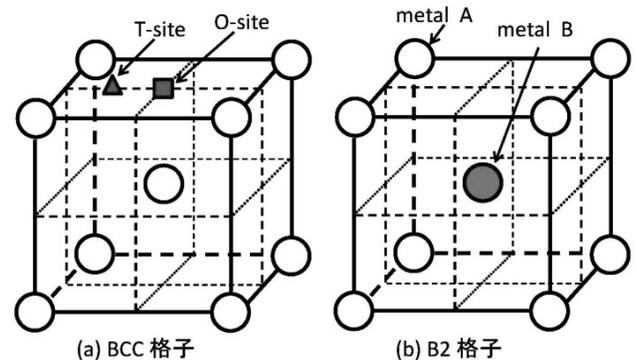


図1: (a)BCC格子と(b)B2格子。および結晶中のT-siteとO-site。

【第一原理計算】

本研究では第一原理計算の汎用コードであるVienna ab-initio simulation package (VASP)を使った。ポテンシャルは一般化勾配近似タイプ(GGA)のもの、K点の密度は $5 \times 5 \times 5$ 、原子緩和は総凝集エネルギーがほとんど変化しなくなるまで格子緩和を繰り返した。(0.01eV以下)計算に使ったスーパーセルは金属格子54個で構成されている。また水素の基底状態は図2のような手順で計算した。まず、水素の初期配置は乱数を使って空孔内表面に適当に分布させてから格子緩和を行った。このような方法では計算が計画時間内に収束しない、または準安定状態に到達する可能性もある。しかし想定外の基底状態があった場合でもその構造を見逃す可能性を小さくできる。また、準安定状態は水素が移動拡散する際の通り道(saddle point)になる可能性もあり、その情報を得ることができる。

【計算した金属間化合物】

B2型金属間化合物ではNi-Al、Co-Al、Fe-Alの3種類の空孔について計算した。Ni-Alは原子数比を1:1の化学量論的比率からずらすことで最高で8%程度の大量の空孔を含んだ試料が作成できるので期待していた。しかしながら、結論から言うと空孔中の水素のエネルギー準位は高く不安定である。このため水素を保持する見通しはなく、他の2つの金属間化合物についても計算することになった。Ni、Co、Feは周期表でも隣り合ったVIII族の遷移金属でありよく似た特徴を持つ。

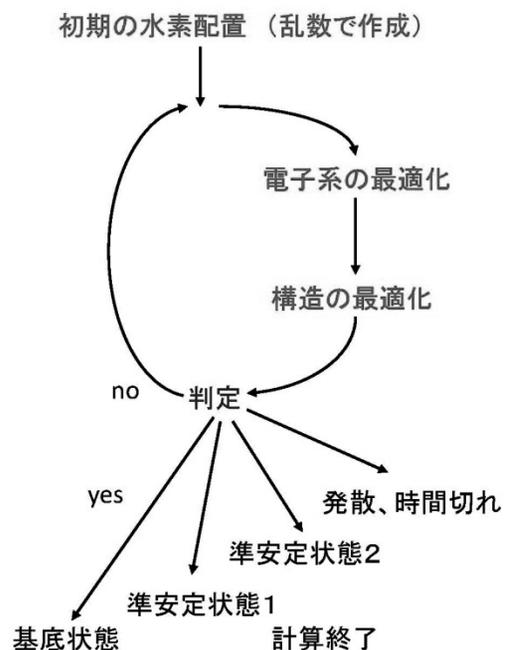


図2: 水素の基底状態を探索する手順。

【空孔中の水素の構造】

温度まで考慮した熱力学的モデルで計算すると空孔には6個の水素が捕獲される確率が圧倒的に大きい。そこで空孔中の6個の水素の構造について詳しく述べる。BCC格子の場合、空孔中の水素は図3(a)で示すようにO-siteの近傍が安定である。O-siteは空孔内に6個存在するので水素は正八面体構造をすと考えられてきた。しかし、タングステン(およびモリブデン)空孔中では(b)の特異な構造になり、水素はO-siteから格子定数の18%程度もずれる。このような金属空孔には絶対0度では最大で12個もの水素が捕獲される可能性がある。

【金属間化合物中の水素のエネルギー準位】

図4にNi-Al空孔中の水素のエネルギー準位を示す。空孔(Ni空孔)はNiとAlの組成比を1:1から変えるだけで簡単に導入できる。しかし、空孔中の水素は真空中の水素よりも不安定であり高压など特別な条件でもない限り水素の保持は難しいことがわかった。

図5にはFe-Al空孔(Al空孔)中の水素についての結果を示す。こちらは水素との結合力が強く複数個の水素でも捕獲することがわかった。また、水素は図3の(b)で示したようにタングステン空孔と対称性が同じ特異な構造になった。さらにFe-Al空孔にも最高で12個までの水素の捕獲が可能でありこの点もタングステン空孔と同じ結果になった。

Fe-AlのFe空孔についても計算した。Al空孔よりも水素との結合力は弱く、空孔内の水素の構造は図3(a)で示すようなO-site近傍が安定な通常の構造であった。ところが、こちらも変わった構造が見られた。通常は金属中の水素は電荷を帯びるので水素間にはある程度斥力が働く。そのため空孔内部に2個の水素が捕獲された場合は図6(a)で示すようになるべく距離をとる位置関係になる。しかしながら、Fe-AlのFe空孔中では(b)で示すような接近したO-siteを水素が占める方が安定になる。同様の結果はCo-Alの空孔にも見られた。

【まとめ】

タングステン空孔中の水素は特異な構造をとることが計算から予測されている。それと同じ対称性の構造がFe-Al空孔中でもみられることがわかった。こちらの方は水素を吸蔵しやすく容易に試料の作成が可能である。今後は陽電子寿命計算など実証に必要な計算機シミュレーションを行い、空孔内の水素の構造について検証してゆく予定である。また、タングステンとモリブデン以外の空孔でも特異な水素の構造が見つかったことは重要である。この水素の構造は従来考えられていたよりも多くの金属や合金中にみられる特徴である可能性がある。

参考文献

- [1] Reports Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University **143** (2012) 29.
- [2] Phys. Rev. B 85 (2012) 094102.

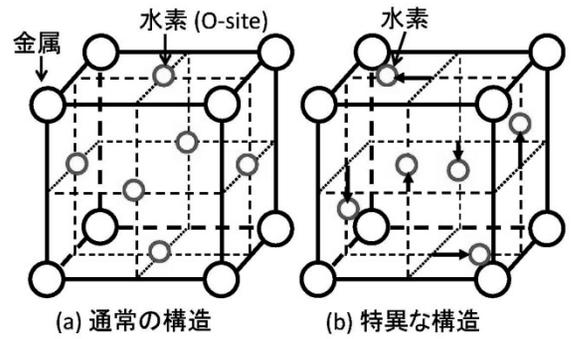


図3: (a)通常空孔中の水素の構造と (b)特異な構造。

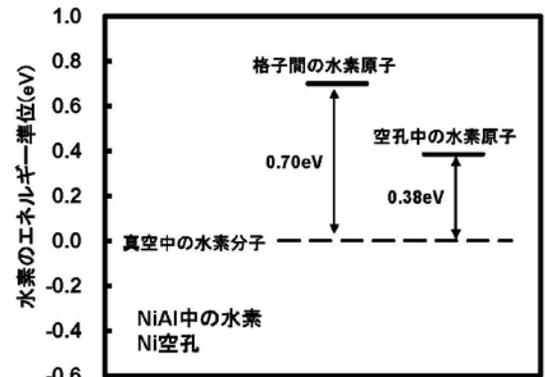


図4: Ni-Al空孔(Ni空孔)中の水素。

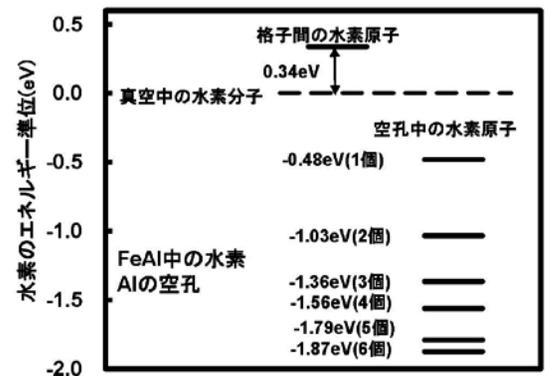


図5: Fe-Al空孔(Al空孔)中の水素。

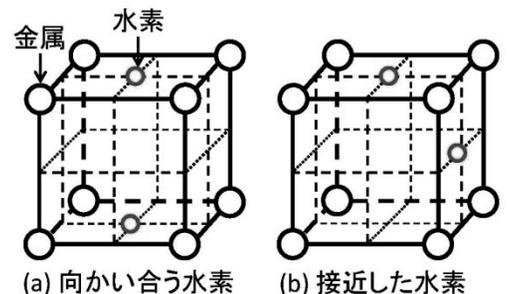


図6: 空孔中の2個の水素の構造。(a)斥力が働く場合と(b)引力が働く場合。

1. 目的

各種原子炉や高温プラントで使用される構造材の高温使用限界温度を決めるのは、多くの場合熱クリープ特性である。高温クリープ変形の抑制には、強化手段として用いる析出、粒子分散、加工転位などの変形過程における挙動の理解が不可欠である。申請者のグループではこれまで、Cr-W フェライト鋼及びバナジウム合金を中心に研究を進めてきたが、高温強度を上昇させる方法として、析出強化法とナノ粒子による分散強化法を検討している。本年度は、ナノ粒子分散により強化したCr-W 鉄鋼材料 (ODS 鋼) の組織観察と高温クリープ変形試験を行った。特に、ほぼ同じプロセスによって製作した 9Cr-ODS 鋼と 12Cr-ODS 鋼を比較することにより、Cr 量の効果を明らかにすることに重点を置いた。

2. 方法

図 1 に、9Cr- 及び 12Cr-ODS 鋼の製作プロセスを示す。アルゴンガスアトマイズ法により微粒化した合金粒子に Y_2O_3 ナノ粒子を添加し、MA 処理ののち高温押し出し、高温鍛造により製作した。両者の微細組織を応用力学研究所の透過電子顕微鏡により観察した。クリープ強度試験を核融合科学研究所の超高真空高温クリープ試験装置によって行い、微細組織と高温クリープ特性の関連を明らかにした。

3. 結果と考察

図 2 に 9Cr-ODS 鋼と 12Cr-ODS 鋼の微細組織を比較して示す。9Cr-ODS 鋼は比較的小さな結晶粒を有する焼き戻しマルテンサイト相を示し、12Cr-ODS 鋼は比較的大きな結晶粒を有するフェライト単相を示す。12Cr-ODS 鋼では、弱い歪と低密度の転位が一面に残っており (図 3)、これは、加工熱処理によって再結晶が起こらなかったことを示唆している。両者とも高密度のナノ粒子が一面に分散している。ナノ粒子のサイズは約 3nm、密度は約 $1 \times 10^{23}/m^3$ で、両合金に有意な差は認められなかった。

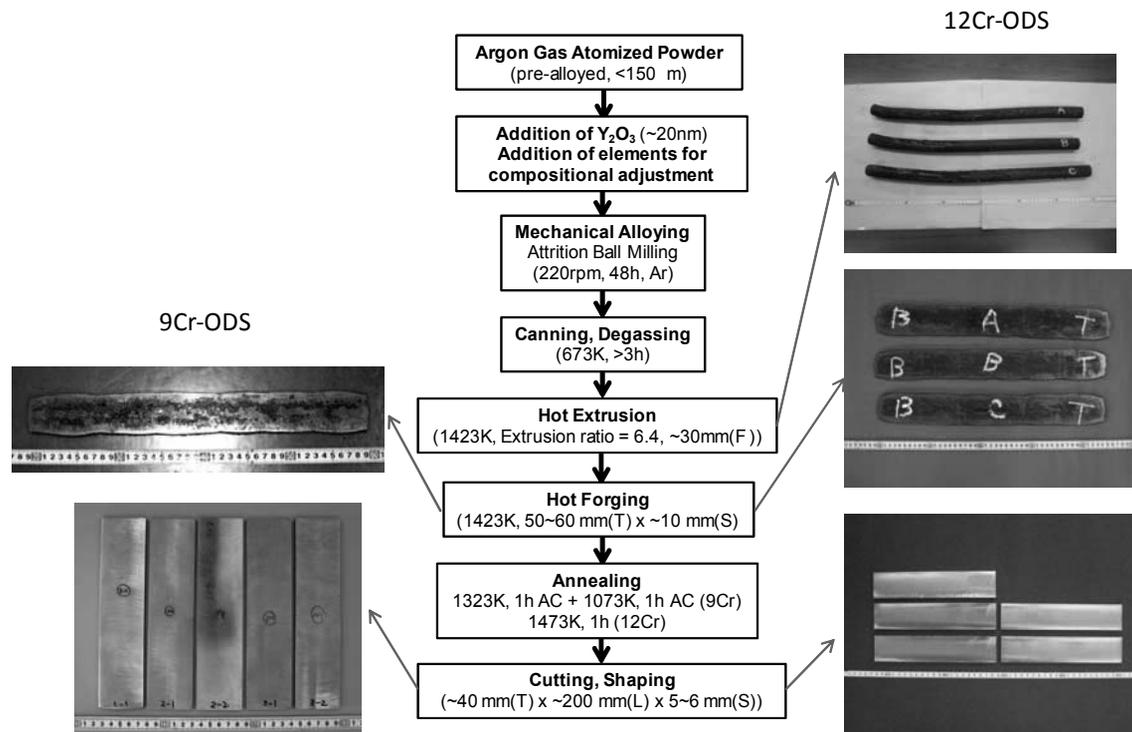
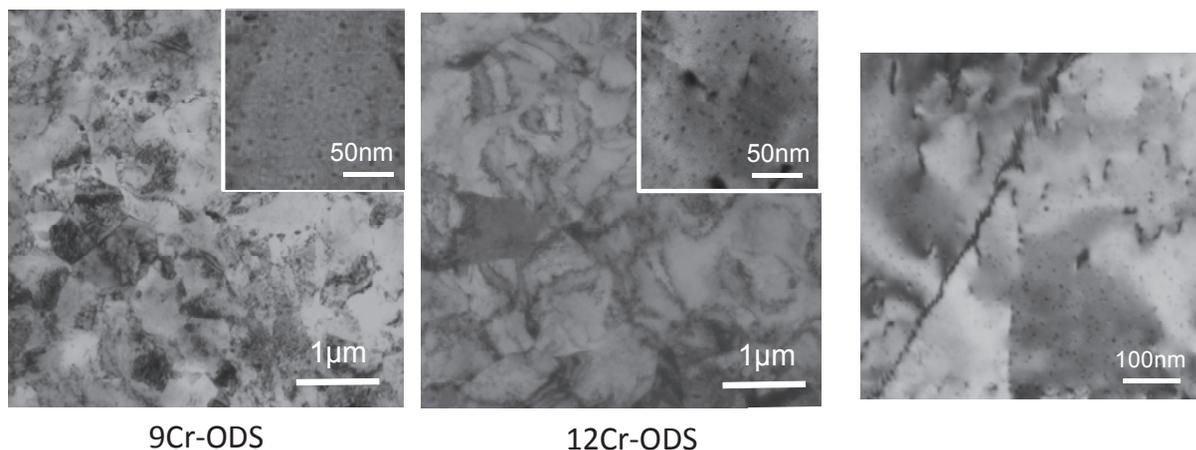


図 1. 9Cr- 及び 12Cr-ODS 鋼の製作プロセス



9Cr-ODS

12Cr-ODS

図2. 9Cr-、12Cr-ODS 鋼の微細組織

図3. 12Cr-ODS 鋼の粒界と転位

図4は、973Kにおける9Cr-及び12Cr-ODS鋼の高温クリープ変形を示す。200MPaの荷重では、9Cr-ODS鋼のほうがクリープ破断時間が長い、175-180MPaに荷重を下げると逆転する。

図5は、クリープ破断強度を比較したもので、破断時間が短いと9Cr-ODSのほうがクリープ強度が高いが、破断時間が長いと逆転し、その境界が20-40時間にあることがわかる。

構造部材の想定クリープ寿命は10万時間程度であり、従ってその条件でのクリープ強度は12Cr-ODS鋼の方が高いことが予想される。12Cr-ODS鋼は、結晶粒が大きい、特に低荷重領域で顕著になる粒界すべりによるクリープ変形が抑制されたものと考えられる。

4. 研究組織

室賀健夫、長坂琢也、菱沼良光（核融合科学研究所）、渡辺英雄、荒木邦明（九州大学応用化学研究所）

5. 発表論文

T. Muroga, T. Nagasaka, P.F. Zheng, Y.F. Li, H. Watanabe, "Dislocation evolution during thermal creep deformation in V-4Cr-4Ti with various thermal and mechanical treatments", Journal of Nuclear Materials, 442-S1 (2013) S354-359.

6. 国際会議での発表

T. Muroga, T. Nagasaka, Y. Li, H. Abe, S. Ukai, A. Kimura and T. Okuda, "Fabrication and Characterization of Reference 9Cr and 12Cr-ODS Low Activation Ferritic/Martensitic Steels", ISFNT-11 (Sept. 16-20, 2013, Barcelona)

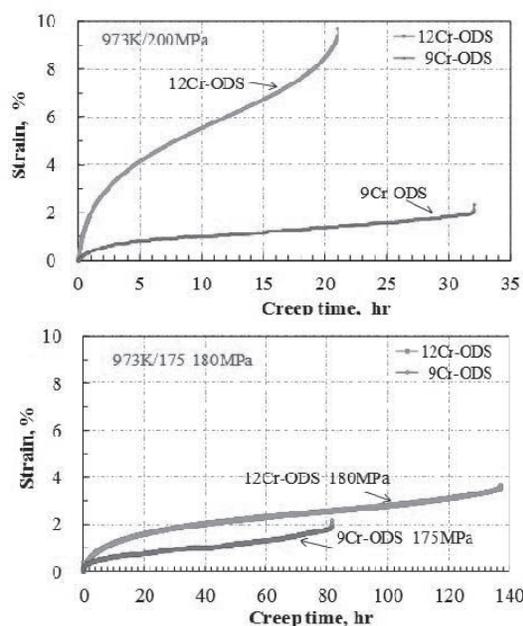


図4. 9Cr-、12Cr-ODS 鋼のクリープ変形

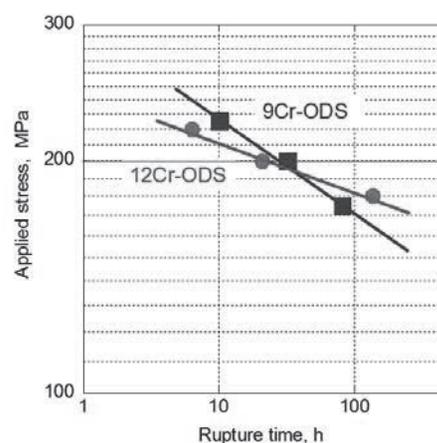


図5. 9Cr-、12Cr-ODS 鋼の973Kにおけるクリープ破断強度

乱流輸送は磁気核融合装置におけるプラズマ閉じ込めに最も重要な課題の一つである。なぜならトロイダルプラズマにおいて、乱流輸送は大量の粒子、熱損失を引き起こすからである。プラズマ性能改善には、プラズマ乱流輸送に関するさらなる研究が必要である。1次元(径方向の)輸送コードである、統合輸送コードTASK3Dでは、熱拡散係数にジャイロボームスケーリングがLarge Helical Device (LHD)において使われている。イオン温度勾配乱流の場合、式 $\chi_i \sim \rho_{ii}^2 v_{ii} f(\gamma, \hat{s}, \tau_{ZF})/R$ がイオン熱拡散係数に使われる。ここで f は γ 、 \hat{s} と τ_{ZF} の関数である。 γ はモードエネルギーの成長率、 \hat{s} は磁気シアパラメータであり、 τ_{ZF} はいわゆる帯状流の崩壊時間である。輸送コードで乱流輸送係数にどのモデルを用いるか決めるために、どの安定性モードが、不安定化しているかを研究する必要がある。GKV-Xコードはヘリカルプラズマにおいて乱流輸送に対するイオン温度勾配不安定性と帯状流の影響を調べるコードである。研究の最初として、GKV-Xは非線形解析ができるにもかかわらず、LHDの高イオン温度放電#88343での線形ジャイロ運動論解析を行った。なぜならGKV-Xコードによる線形解析におけるシミュレーションコストはその非線形解析と比べて非常に少ないからである。乱流拡散係数はおおまかにはジャイロ運動論解析から求められた線形成長率と波数から決められる。時間発展を追う輸送コードを解析する際に、ジャイロ運動論コードにより時間ステップごとに成長率を求める計算を行うことは困難である。時間発展を追う輸送コードで利用できるような、プラズマ不安定性に重要な物理パラメータに関するイオン熱拡散係数のモデリングが必要である。本研究では、イオン温度勾配不安定性における重要なパラメータは $L_{Ti} (= -T_i/T_i')$ であると考えられる。他のパラメータ $L_n (= -n/n')$ や安全係数は径方向の点で固定する。関数 f に対する帯状流の崩壊時間 τ_{ZF} の依存性は χ_i のモデリングの際にはここでは無視する。イオン熱拡散係数 χ_i のモデリングを行った。このモデリングした式は、輸送コードの中で使われ、LHD実験結果のイオン温度分布と、シミュレーション結果が比較される。

はじめに、GKV-Xコードを使った線形解析のシミュレーションを行った。ショットナンバー88343のLHDにおける高イオン温度モードでのイオン温度勾配不安定性を考察した。このシミュレーションは大半径が3.75mの時の3次元磁場平衡配位のと看に行われる。ここでは電子温度とイオン温度は等しいとした。静電ポテンシャル揺動の線形成長率に対する飽和レベルを計算した。イオン熱拡散係数 χ_i/χ_{GB} の値は混合長概算により、 $\chi_i/\chi_{GB} = C \sum_{k_y} \gamma/k_y^2$ で評価される。ここで $\chi_{GB} (= \rho_{ii}^2 v_{ii}/R)$ はジャイロボーム拡散係数、 k_y はポロイダル波数で、 γ はイオン温度勾配モードの線形成長率である。実験結果とシミュレーションの結果を合わせるために、数値因子 C を用い、ここでは $C=1$ とする。イオン温度勾配モードが不安定になるイオン温度勾配を求めるために、 χ_i/χ_{GB} の規格化されたイオン温度勾配に対する依存性を調べた。温度勾配以外のすべてのプラズマパラメータを固定し、(密度や安全係数のプロファイルを固定し、)50点の径方向の点で、 χ_i/χ_{GB} の R/L_{Ti} に対する依存

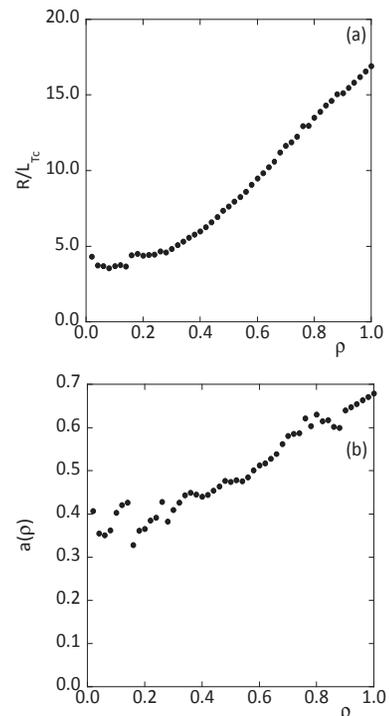


図1 モデル化されたイオン熱拡散係数における(a)イオン温度勾配モードが不安定になるイオン温度勾配 R/L_{Tc} と(b)傾き $a(\rho)$ の径方向依存性

性を調べた。イオン温度勾配不安定性モードでは、 L_{Ti} が重要な物理パラメーターであると考え、 χ_i/χ_{GB} を $\chi_i/\chi_{GB} = a(\rho)(R/L_{Ti} - R/L_{Tc})$ のようにモデル化した。ここで L_{Tc} は規格化した、イオン温度勾配モードが不安定化するイオン温度勾配であり、 $\rho = r/a$ である。径方向の点で変わる、規格化した密度勾配や安全係数の値に傾き $a(\rho)$ は依存する。図1はイオン温度勾配モードが不安定になるイオン温度勾配 R/L_{Tc} と R/L_{Ti} に関する傾き $a(\rho)$ を示す。図1のグラフにおける R/L_{Tc} と傾き $a(\rho)$ の値を用いて、イオン熱拡散係数 χ_i/χ_{GB} のモデリングを行った。

次に、これまでにモデル化したイオン乱流熱拡散係数を用いて、輸送コードを実行した時に、輸送ダイナミクスを考察した。低ベータ近似でのDGN/LHDデータベースから新古典輸送拡散係数を求めた。電場の径方向の分布は両極性条件から得られる。径方向の領域 $0.25 < \rho < 0.80$ で両極性条件を満たす電場の三根が存在する。その三根から正の電場を選ぶ。イオン温度を除くプラズマの径方向の分布、密度、電子温度、径電場や安全係数の分布は時間的に固定している。LHDにおけるショットナンバー#88343である放電で、時刻 $t=2.230s$ の実験結果を、密度、電子温度、安全係数の分布について使う。イオン温度の径方向の分布について、モデル化したイオン温度乱流係数を用いて、シミュレーションを行った。実験結果における電子温度分布が時間発展を追う輸送シミュレーションにおける初期値として使われる。イオン温度の時間発展のシミュレーションを行う際に、電子とイオン間の熱交換を取り入れている。また加熱入力分布については、FIT3Dというコードで計算したものをを用いている。図2(a)の実線で、シミュレーション結果として得られたイオン温度分布の定常状態を示す。破線はLHDにおけるショットナンバー#88343である放電で、時刻 $t=2.230s$ でのイオン温度の実験結果を示す。シミュレーション結果から得られた径方向のイオン温度分布はLHDの実験結果とある程度の一致を示す。乱流、新古典輸送拡散係数の、定常の径方向分布を示したものが図2(b)である。イオン温度勾配モードは二つの径方向の領域、 $0.0 < \rho < 0.25$ と $0.8 < \rho < 0.92$ で安定化されている。実線と破線はイオンの乱流と新古典輸送拡散係数と対応している。イオン乱流輸送は正電場が選ばれている領域では、新古典輸送と比べて優位である。

本研究では、特にLHDの高イオン放電(#88343)の場合について、輸送コードにイオン温度勾配乱流を導入するために、イオン温度勾配の特性長に関して、イオン熱拡散係数のモデル化を行った。時間発展を追う輸送コードを用いて、モデル化したイオン熱拡散係数を使って得られたシミュレーション結果とLHDの高イオン放電(#88343)のときの実験結果との比較を行った。今後、線形ジャイロ運動論解析によるシミュレーション結果と、非線形解析による結果との比較を行う。さらに帯状流の輸送に対する影響を調べる必要がある。その後、モデル化したイオン熱拡散係数を統合輸送コード(TASK3D-p)へ導入したい。また他の放電や、不安定性を考察した場合に、熱拡散係数のモデリングを行いたい。

学会発表

S. Toda et al., "Modelling of Heat Diffusivity for Ion Temperature Gradient Turbulence in Helical Plasmas", 14th International Workshop on H-mode, Physics and Transport Barriers, P01-10, Oct. 2-4, 2013, Kyushu University, Fukuoka, Japan

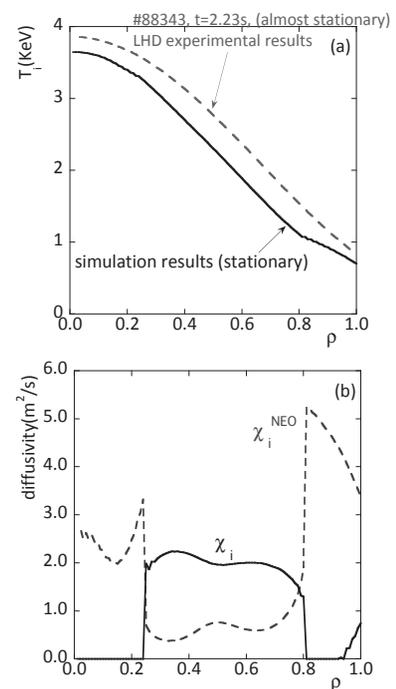


図2 (a)イオン温度と(b)イオン熱拡散係数の径方向分布

1. はじめに

核融合炉においては、レーザー計測に金属ミラーが用いられることが検討されている。金属ミラーは繰り返しのレーザーの負荷に耐える必要があり、金属ミラー材料に対するマルチパルスのレーザー誘起損傷閾値 (LIDT) を明らかにする必要がある。パルス数が上昇するにつれてマルチパルスLIDTは一般的に減少傾向を示すが、その現象のメカニズムは十分にわかっておらず、データも不十分な現状がある。また、ダイバータ材料は、ELM等に伴い、繰り返しのパルスの熱負荷にさらされることが分かっており、その結果、クラック等が形成されることがこれまでに分かっている。しかし、その初期的な材料表面の損傷のメカニズムは十分には理解されていない。本研究では、高いフラックス照射がされた金属材料の材料表面損傷メカニズムを解明することを目的とし、名古屋大学での材料照射実験を実施した後、九州大学にて表面分析を実施した。

2. 実験方法

名古屋大学において、マルチパルスレーザー照射実験を実施し、銅材料のマルチパルスLIDTを評価した。具体的には、Nd:YAGレーザー（波長：1064 nm、パルス幅5 ns）のレーザーを用いて、銅材料に繰り返しレーザー照射を行い、その試料からの反射レーザー強度を計測し、その減衰量を利用して、マルチパルスLIDTを評価した。まず大気中でLIDT計測を実施した後、真空中でのLIDT計測を実施した。大気中でレーザーを照射した試料を、九州大学の集束イオンビーム装置 (FIB) で100 nm程度の厚みに切り出し、透過型電子顕微鏡 (TEM) を利用し断面観察を実施した。表面の結晶構造や、結晶粒界において起こった変化を観察した。

3. 実験結果

図 1(a)に、レーザーパルス照射後の試料の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。表面にリップルが形成されているのが確認できる。図 1(b), (c)は TEM による断面観察結果である。レーザーパルス照射前は表面が平坦であったが、照射後には、表面の荒さは約 $0.5\text{-}1\ \mu\text{m}$ となった。表面近くの $4\text{-}5\ \mu\text{m}$ までの結晶サイズは、照射前に比べて著しく小さくなった。強い応力が発生し、結晶が小型化したものと考えられる。レーザーパルスに応答して温度上昇が起こり、表面に応力が発生し、その結果、結晶の大きさ及び表面荒さを変化させたと考えられる。興味深いことは、突起部の下部にスリップが形成されていることが観

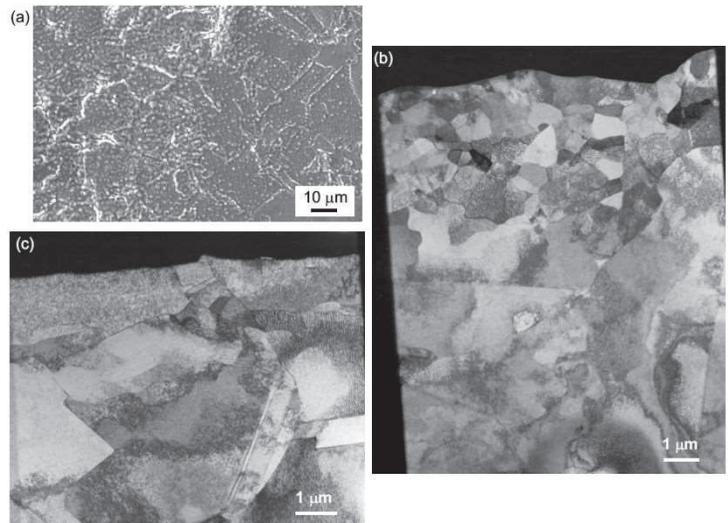


図 1: (a) A SEM micrograph of sample (ii) after the irradiation with laser pulses. (b) and (c) cross sectional views of the TEM micrographs of the sample. (b) corresponds to the central part the laser beam and (c) edge part of the laser beam.

察された点である。スリップ線に沿って、結晶のサイズは小さくなり、スリップ線は深い領域にまで到達し、表面から 4-5 μm の深さまですべり変形が発生したことが明らかになった。

図 2 は、大気と真空状態での OFHC-Cu に対するマルチパルス LIDT である。真空中でのマルチパルス LIDT は大気中より高くなることが分かる。両対数スケールプロットにおける傾きは直線的となり、パルス数の増加に伴って LIDT は指数関数的に減少していく。TEM 観察より、大気中では酸化が起きていることが分かったが²⁾、一旦酸化が起これば吸収率が著しく増加しダメージに至ることになる。真空中では酸化が起これないため、大気中での LIDT に比べて高い値を示したのではないかとと思われる。ここでは、LIDT とパルス数との関係は、指数関数的に表現できるとして、ITER での条件、すなわち $10^8 - 10^9$ パルスにおける LIDT を外挿して評価する。図 2 のデータから、大気中では $(3.76 \pm 0.32)N^{(-0.083 \pm 0.015)}$ 、真空中では $(3.73 \pm 0.97)N^{(-0.049 \pm 0.025)}$ と得られた。シングルショットでの外挿値は、互いに一致しており、別途計測した値と一致した¹⁾。ここから、例えば 10^9 パルスのときの予想される LIDT は $1.35(+1.50, -0.75)$ J となった。今後、この値を使って、ITER や DEMO 等におけるトムソン散乱用のレーザー伝送用ミラーの設計を実施していく必要がある。

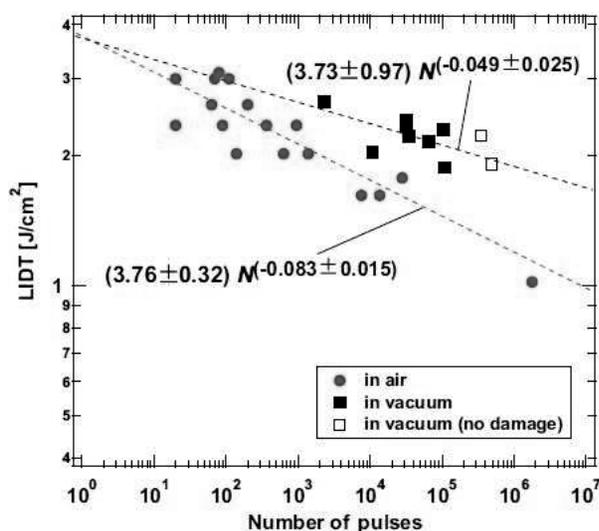


図 2: Multi-pulse LIDT for OFHC Cu mirrors in the air and vacuum conditions.

成果報告（論文，学会発表等）

- (1) Masaya Sato, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Noriyasu Ohno, Masayuki Tokitani, Naoki Yoshida, and Yuzuru Tawara "Assessment of multi-pulse laser-induced damage threshold of metallic mirrors for Thomson scattering system", Optics Express, Vol. 21 (2013) pp.9333-9342.
- (2) Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Masaya Sato, Noriyasu Ohno, Masayuki Tokitani, and Naoaki Yoshida, "Enhancement of multi-pulse laser induced damage threshold on Cu mirror under vacuum condition", Optics Express, Vol. 21 (2013) pp. 17275-17284.

25 FP-7

タングステン中の水素同位体保持特性に及ぼす照射欠陥の影響

富山大学 水素同位体科学研究センター 波多野雄治

1. はじめに

核融合炉プラズマ対向材料としてタングステン(W)が有望視されており、安全性の観点からトリチウム保持特性の解明が急務となっている。著者らは日米科学技術協力事業 TITAN 計画のもとで中性子照射により W 中の水素同位体保持量が著しく増大することを見出し、保持量低減とトリチウム除去法の開発に向けた研究の必要性を提言している。一方、中性子照射は照射条件の制約が大きく、試料の放射化などの問題もあり、実験精度には限界がある。また、照射キャプセル体積の制限から、試験できる材料種もおのずと限定される。そこで、並行したイオン照射による広範かつ精緻な実験が不可欠と考え、本共同研究を推進している。W が中性子照射を受けると欠陥のみならず Re 等の核変換元素も形成されることから、欠陥と Re の相乗効果を理解するため、昨年度より微量の Re 添加が W の水素同位体保持特性および微細組織に与える影響を調べており、これまでに Re 添加によりガス曝露下での重水素 (D) 保持量が減少することを見出している。今年度は、高フラックスプラズマ曝露下での D 保持特性を調べた。

2. 実験

試料にはアライドマテリアル社製の 4.6 質量%の Re を含む W 板材 (以下、W-5Re) および Goodfellow 社製の純 W 板材 (純度 99.95%) を用いた。これらの試料に室温で 20 MeV の W イオンを 0.5 dpa (損傷ピーク深さでの値) まで照射した。そののち、フラックス $10^{22} \text{ D m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の D プラズマに 443~743 K で $3 \times 10^{25} \text{ D m}^{-2}$ まで曝露し、D の深さ方向分布を核反応法 (NRA) で分析した。また、あらかじめ薄膜化した直径 3 mm のディスクに 2.4 MeV の Cu イオンを室温で 2 dpa 照射したのち、微細組織を透過電子顕微鏡 (TEM) で観察した。

3. 結果および考察

W イオン照射した試料中の D 濃度およびはじき出し損傷の深さ方向分布を、W-5Re の場合を例として図 1 に示す。表面から約 2 μm の領域まで照射損傷が導入されると共に、その領域中で D 濃度が著しく高くなっており、照射欠陥に D が捕獲されていることがわかる。純 W についても、同様の D 分布が得られた。はじき出し損傷量が最大となる深さ (約 1.4 μm) における D 濃度のプラズマ曝露温度依存性を図 2 に示す。試料温度が低い場合には純 W と W-5Re の間で顕著な差は見られないが、543 K 以上の温度では明らかに W-5Re 中の D 濃度が純 W に比べ低くなっている。TEM 観察においては、図 3 および図 4 に示すように、どちらの試料についても転位ループとボイドの形成が見られ、これらの欠陥が水素同位体の捕獲サイトとして働いたことがわかる。低温領域における純 W と W-5Re 中の D 濃度に差がなかったことから、W イオン照射で両試料中に形成された捕獲サイトの密度は同程度と考えられる。温度の上昇に伴い一方の試料中の D 濃度が他方と比べ大きく低下する原因として、一般的には、(1) 欠陥の回復が速い、(2) 照射欠陥による D 捕獲エネルギーが小さい (捕獲力が弱い)、などの原因が考えられる。先述のように、ガス曝露法で得た平衡状態における D 濃度も W-5Re の方が低い値を示していたので、この違いが表面状態に起因するものでないことは明らかである。W および W-Re 合金中の照射欠陥が 543 K において顕著に回復することはないので、Re 添加により照射欠陥の D 捕獲エネルギーが低下したと考えるのが自然ではあるが、詳細の解明にはさらなる研究が必要である。

なお、本研究の一部はドイツ・マックスプランクプラズマ物理研究所との共同研究（W イオン照射および NRA）ならびに幅広いアプローチ研究（プラズマ曝露）としても実施された。謝意を表す。

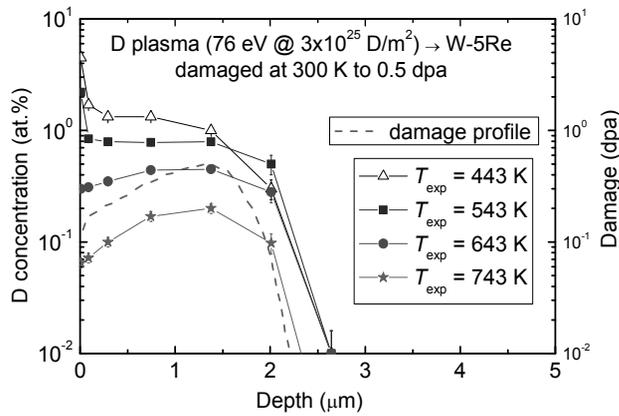


図 1 W イオンで照射したのち D プラズマに曝露した W-5Re 試料中の D の深さ方向分布 (左縦軸) およびはじき出し損傷分布 (右縦軸). T_{exp} はプラズマ曝露温度.

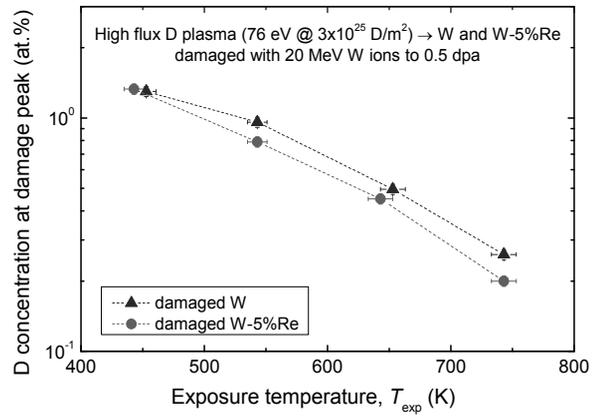


図 2 損傷ピーク (深さ 1.4 μm) における W および W-Re 中の D 濃度のプラズマ曝露温度依存性.

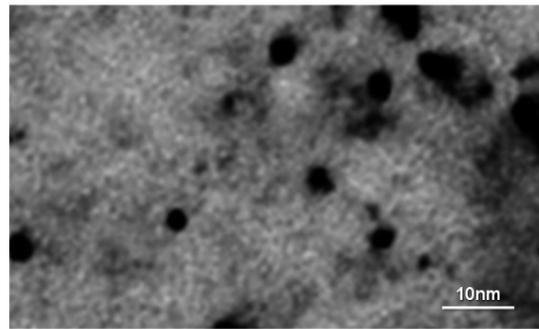
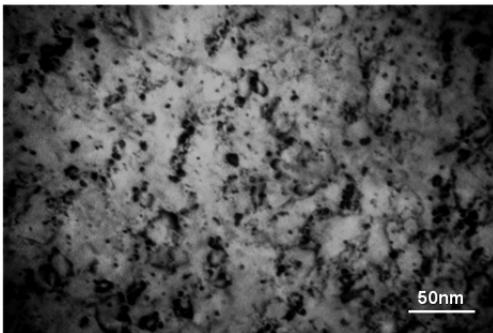


図 3 室温において 2.4 MeV の Cu イオンを 2 dpa まで照射した W 薄膜試料の TEM 写真. 左: 転位ループ像、右: ボイド像.

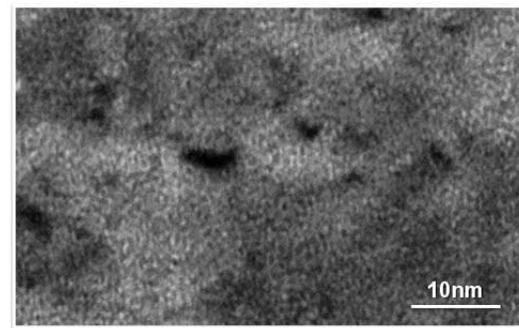
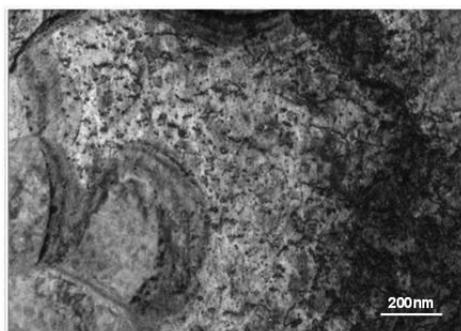


図 4 室温において 2.4 MeV の Cu イオンを 2 dpa まで照射した W-5Re 薄膜試料の TEM 写真. 左: 転位ループ像、右: ボイド像.

25 FP-8

QUEST 装置における VUV 分光法による粒子・不純物リサイクリングに関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

課題番号：25FP-8

研究課題：QUEST 装置における VUV 分光法による粒子・不純物リサイクリングに関する研究

研究期間：H25 年 4 月 1 日－H26 年 3 月 31 日

所内世話人：図子秀樹

協力者：4 名（図子秀樹，Santanu Banerjee，大石鉄太郎，董春鳳，王二輝，黄賢礼）

配分額：研究費（3 万円），旅費（10 万円）

目的：

磁場閉じ込め装置・QUEST の粒子リサイクリング・不純物挙動を VUV 分光計測法にて調べる。He ガスのリサイクリングについて知見を得ることにより，プラズマ制御に関する知見を与える。

実施方法：

QUEST 装置に背面照射型 CCD 検出器付 20cm 直入射真空紫外分光器を設置し，300-3000 Å 域に存在する不純物発光線を観測する。He ガスパフ後の粒子・不純物の振舞いを観測する。また，垂直磁場を掃引することにより，スラブプラズマと磁気面プラズマとの比較を行う。

実験結果：

He ガスパフ実験を行うため，まず分光器の波長設定を最適化した。中心波長を 760 Å に設定することで，短波長側に He⁺イオンスペクトル，長波長側に中性 H スペクトルが観測でき，その間に中性 He や炭素・酸素イオンスペクトルが位置する。垂直磁場を印加しないスラブプラズマ配位で観測した代表的なスペクトルを図 1 に示す。He ガスパフを行っているので通常放電では観測できない He スペクトルが現れている（図中赤字で示す）。QUEST の通常放電で不純物イオンの最大荷数は炭素では C³⁺ であるが，波長が 1550 Å と離れているためここでは議論しない。図 1 に示したスペクトル波長を固定して，以下に述べる実験を行った。

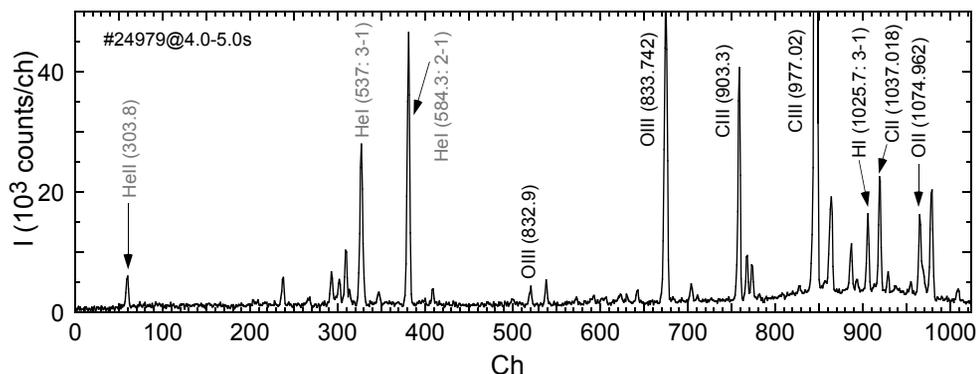


図 1 He パフ実験用に波長調整した VUV スペクトル（分光器中心波長：760 Å）。

スラブプラズマで He パフを行い不純物の時間変化を観測した. He パフを 4 秒までと 7 秒まで間欠的に行った例を図 1 に示す. 4 秒で He パフを停止しするとプラズマの温度が上昇し, より荷数の高い不純物イオンスペクトル線強度が増加する (5 秒以降の振舞いに注目). HeI はガスパフにより増大するが, パルス状のガスパフに対して非常に時定数の長い増大を示し, また, 一度増大すると 15 秒の放電時間内には減衰しない. 真空排気や壁の実効排気速度が He に対して小さいことが理由として挙げられる. 異なった価数間の強度比の一例を(g)に示すが, 強度比の増加は大雑把には電子温度の上昇を意味する. そこでこの強度比を中性 He 原子スペクトル強度に対して整理した結果を図 2 に示す. 図中, 黄色ハッチで示した領域が, 4s に He パフを停止した放電 (赤点で示す) の温度回復期における強度比を示す. 温度回復期の強度比も (黒で示す) 温度低下時の強度比も He 中性原子量に対して同じ振舞いを示すことが分かった. つまり, プラズマの状態 (温度) を決定しているのは He 分圧であり, 同じ He 分圧では異なった温度領域を形成できないことが分かる (磁気面がないので当然かもしれないが).

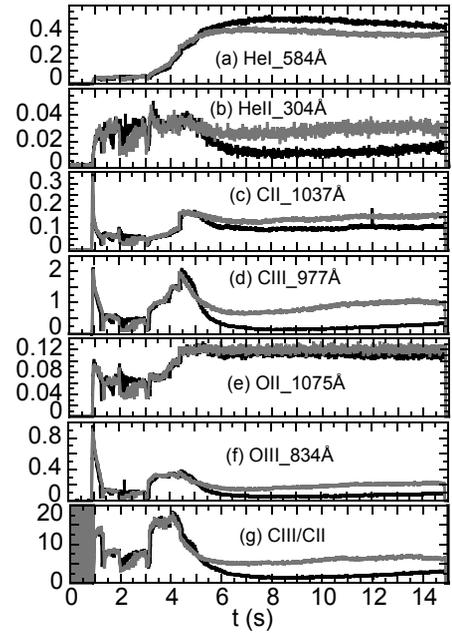


図 2. 不純物時間変化と強度比 (He パフ: 黒 ($t \leq 7s$) 赤 ($t \leq 4s$))

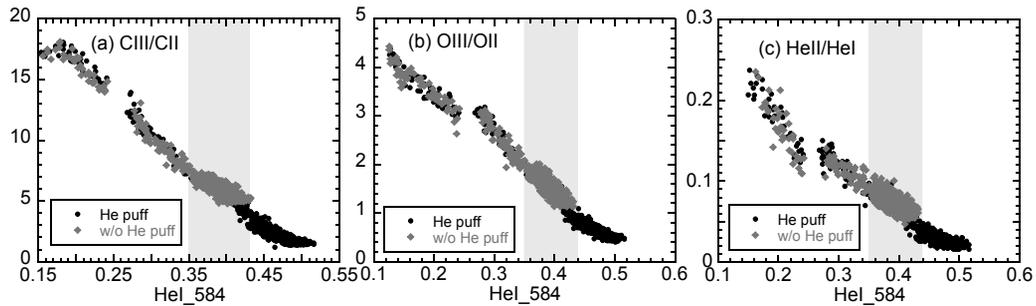


図 3 He パフの有無に対する異なった価数間のスペクトル線強度比 (横軸: HeI 強度比).

同様に不純物の強度比を B_z の関数として解析した. 結果を図 4 に示す. He 強度比は (HeI が中性なので) 単純に温度の関数として記述でき, B_z の上昇 (I_p の増大) と共に温度が上昇していることが示唆される. しかしながら, 炭素イオン強度比は B_z の増大と共に減少していく様子が観測され, He の振舞いとは異なっている. 磁気面の形成に伴って ECH プラズマの温度が上昇し, プラズマ内に正電場が形成され, それにより不純物イオンの遮蔽効果が表れているのかもしれない (CIII は CII よりもよりプラズマの内部に存在するはずなので). 磁気面形状が完ぺきではない可能性もあり, 磁力線に沿った方向の不純物輸送が結果として不純物遮蔽を誘起している可能性もある.

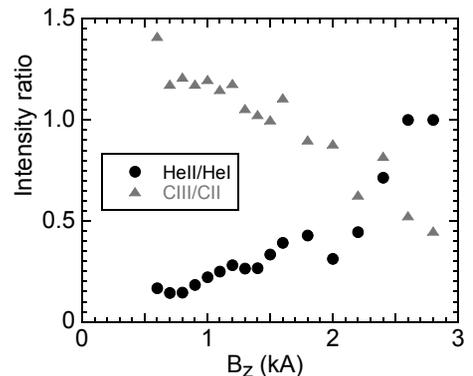


図 4 不純物強度比の B_z 依存性.

25 FP-9

タングステン混合堆積層における炭素・ヘリウムと照射欠陥分布と水素同位体滞留挙動の相関関係

静岡大学大学院理学研究科 大矢恭久

【目的】

D-T 核融合炉においてプラズマ対向材として使用されるタングステン(W)はプラズマに曝され、高エネルギーのトリチウム、ヘリウムや不純物粒子による照射損傷を受け、安定な水素同位体捕捉サイトとなる欠陥が材料中に導入される。そのため、核融合炉の運転と共に欠陥量の増加および構造変化が生じ、水素同位体滞留挙動に影響する。また、プラズマ中には不純物として炭素(C)が混入し、水素同位体と同時に第一壁に照射され、欠陥や W-C 混合層を形成することが予想される。これらの構造変化により第一壁中の水素同位体滞留挙動が変化し、核融合炉における燃料リサイクリングに影響をおよぼす。核融合炉の定常運転のためには、混合層中の欠陥形成量が及ぼす水素同位体滞留挙動への影響評価が重要である。そこで各フルエンスで鉄(Fe^{2+})イオン照射した W に重水素イオンを照射し、透過型電子顕微鏡(TEM)観察および昇温脱離(TDS)測定により形成した欠陥状態と重水素滞留挙動相関を明らかにすることとした。また、炭素照射 W に重水素照射をした際の重水素滞留挙動とを比較し、炭素照射 W 中の欠陥形成および水素同位体滞留と W-C 混合層形成との相関を明らかにすることとした。

【実験】

本研究には 1173 K にて歪取り処理を行ったアライドマテリアル社製の多結晶 W を使用した。試料を $3 \text{ mm}^{\circ} \times 0.1 \text{ mm}^1$ に加工した後、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射設備にて 6 MeV の Fe^{2+} を照射した。照射損傷量を $3.0 \times 10^{-4} \text{ dpa}$ から 1.0 dpa まで変化させて、室温にて照射を行った。その後、九州大学の TEM 装置を用いて試料中の照射損傷を観察した。また同様に照射損傷を導入した W に、静岡大学にてフラックス $1.0 \times 10^{18} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、フルエンス $1.0 \times 10^{22} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$ 、エネルギーを 1.0 keV D_2^+ として室温にて重水素照射を行った後、昇温速度 30 K/min、昇温領域 R. T. - 1173 K にて昇温脱離(TDS)実験を行い、重水素の放出挙動を測定した。また、炭素(C+)照射はエネルギーを 10 keV とし、フラックス $1.0 \times 10^{17} \text{ C}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、フルエンス $(1.0 - 5.0) \times 10^{17} \text{ C}^+ \text{ m}^{-2}$ として行った。これらの試料に対し重水素を Fe^{2+} 照射試料と同条件で照射し、TDS 実験を行った。

【結果および考察】

図 1 に、各照射損傷量まで Fe^{2+} 照射した W 試料からの D_2 放出スペクトルを示す。重水素の放出は Stage 1(400 K 付近)、Stage 2(600 K 付近)および Stage 3(700 K 付近)の 3 つの脱離ステージから構成されていた。Stage 1 の重水素放出は、文献より表面吸着[1]または転移ループ[2]に捕捉された重水素の放出であると帰属した。また、照射損傷を導入した試料では導入していない試料と比較し、Stage 1 の放出量が増加したが、照射損傷量増加に伴う放出量変化は見られなかった。このことから、重水素打ち込み深さ領域における転移ループは照射損傷

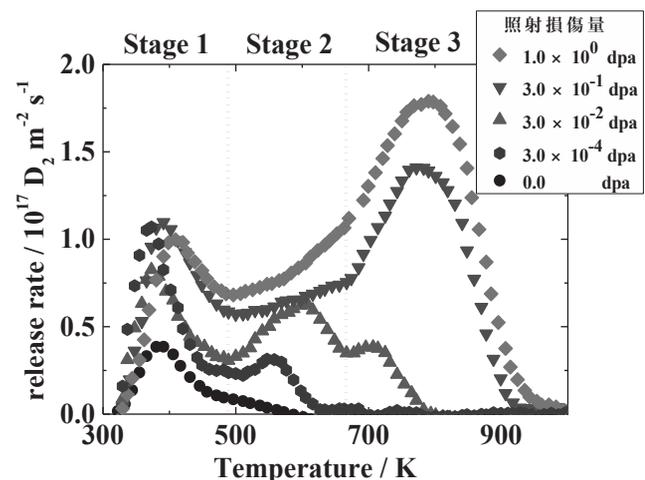


図 1 各照射損傷量まで Fe^{2+} 照射した W 試料における D_2 放出スペクトル

の導入により増加するが、 3.0×10^{-4} dpa までの照射損傷量において飽和することが示唆された。Stage 2 における重水素放出量は照射損傷量の増加に伴って増加し、放出温度領域も高温側へシフトした。これより、原子空孔形成量の増加により重水素捕捉サイトが増加したと考えられる。1つの原子空孔に入る水素数が多いと欠陥の水素に対する捕捉エネルギーが減少する[3]ことから、照射損傷量の少ない試料において、欠陥あたりの水素捕捉数が高くなり、欠陥数の多い試料と比較して低温で重水素が放出したと考えられる。一方、照射損傷量の多い試料では、欠陥が多数存在しており、重水素が捕捉-脱捕捉効果を受けることや、微小な欠陥集合体が形成するなどの複合的な要因で重水素放出温度が高温側にシフトしたと考えられる。さらに、照射損傷量が 3.0×10^{-2} dpa 以上の試料においては Stage 3 での重水素放出が見られ、高密度の欠陥が導入されたことによる新たな捕捉サイトの形成が示唆された。図 2 に各照射損傷量まで Fe^{2+} 照射した後 1073 K で焼鈍した試料の TEM 像を示す。照射損傷量の多い試料ではボイドの形成が見られ、照射損傷量の増加に伴いボイドサイズも増加していることがわかる。また、これまでの研究で重水素を 3 keV D_2^+ にて $1.0 \times 10^{23} \text{ D m}^{-2}$ のフルエンスまで照射し

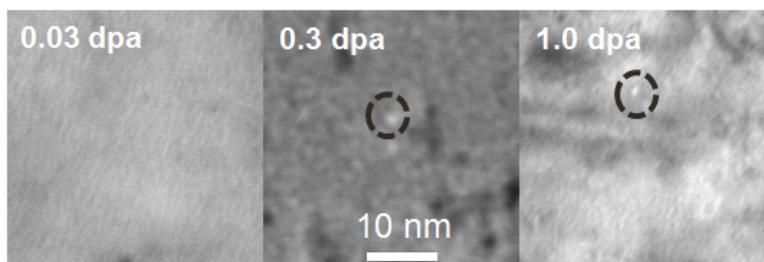


図 2 各 dpa まで Fe^{2+} 照射した W の TEM 観察像

た W にはボイドが形成し、捕捉された重水素は 700 K 付近で放出することがわかっており、Stage 3 での重水素放出は照射損傷量増加により形成したボイドに捕捉された重水素の放出だと考えた。

図 3 に、各フルエンスにて C^+ 照射した W からの重水素放出挙動を示す。各スペクトルは Peak 1(400 K 付近)、Peak 2(520 K 付近)、Peak 3(600 K 付近)の3つのピークに分けられた。Peak 1 および Peak 2 は Fe^{2+} 照射試料と同様にそれぞれ表面吸着または転位ループに捕捉された重水素の放出および原子空孔に捕捉された重水素の放出と帰属した。Peak 3 について、 C^+ 照射 W では低フルエンス照射時において約 30 dpa の欠陥が導入されており、TEM 観察でもボイドが確認

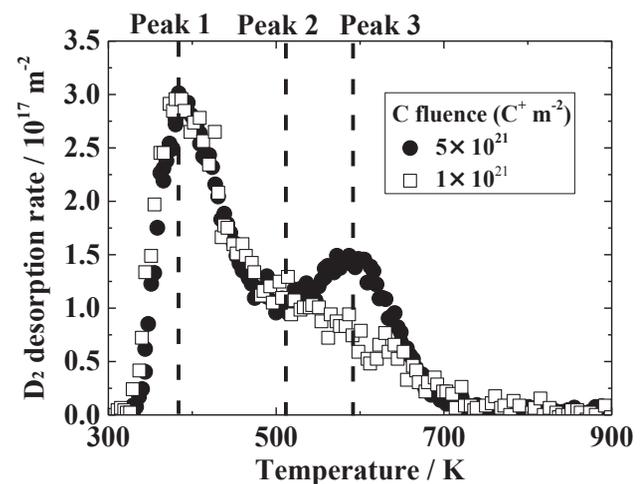


図 3 各フルエンスで炭素照射した W からの D_2 放出スペクトル

できることから、Stage 3 と同様にボイドからの重水素放出と考えられる。また高フルエンス照射では Peak 3 として重水素放出が増加することから、照射誘起拡散による欠陥の集合、ボイドサイズの増加が生じたことが考えられる。しかし、その放出温度は、 Fe^{2+} 照射試料と比較して 100 K 以上低かった低温側にシフトしていた。これは W-C 混合層において、炭素も重水素と同様に欠陥中に存在するためと考えられ、これにより欠陥中の重水素がエネルギー的に不安定な状態となり、低温で重水素が放出したと考えられる。

[1] H. Eleveld *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **191** (1992) 433

[2] O.V. Ogorodnikova *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **415** (2010) 661

[3] Zhu Shungyun *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **343** (2005) 330

平成 25 年度 応用力学研究所 共同研究

「プラズマ輸送理論」 成果報告書

代表者 核融合科学研究所 伊藤公孝

研究目的

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

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

実験観測の進展

「遠非平衡」という概念がしばしば用いられる。最近では Inagaki, et al.によって長波長揺動が発見される等[2]の研究進展が目覚ましい。非平衡性を特徴づけるには、励起強度の等分配からの逸脱とともに、スケールの分離不可能性も本質である。Inagaki らによる発見は、乱流揺動シグナルの大域的な相関を観測する事によって求められたものであり、局所的な熱平衡の破れや輸送現象での局所クロージャーの破れを議論するための典型的な例となる。

時間空間におけるスケール混合のなかで代表的な現象としては L-H 遷移があげられる。その問題について、遠非平衡系の物理の視点から研究した。そこでは、巨視的な径電場と急峻な勾配、メゾスケール揺動の帯状流 (GAMs を含む)、マイクロ揺動としてのドリフト波、等が共存している。遠非平衡系の物理の視点から解析を行った[3]。多種の電場について、(1)巨視的な径電場と急峻な勾配：H-mode では半値半幅約 7mm; (2)メゾスケール揺動の帯状流 (GAMs を含む)：L-mode で観測された GAMs は波長約 10cm; (3)マイクロ揺動としてのドリフト波: L-mode では相関長 1-2cm; という結果を得た。更に、

高周波マイクロ揺動の (低周波) 振幅変動が内部編伝播する現象が発見され、その伝播長は 10cm 程度に及ぶ事も確認された。

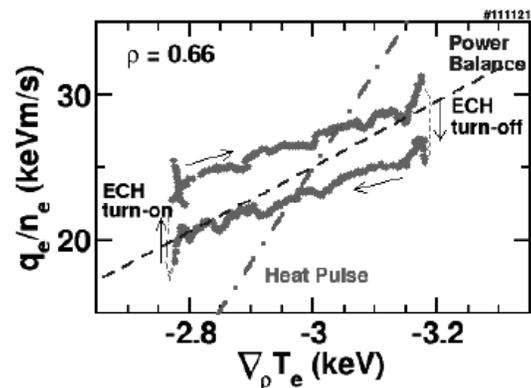
成果に立脚し、同様な L-H 遷移時の自律振動現象に関するアセスメントを取りまとめ (右表) レビュー

Device	Ref (year)	location	LCO freq.	Diagnos.	mean Er	zonal flows	phase relation in LCO
JFT-2M	[12] (91)	edge	0.5 kHz		perhaps	not measured	CCW
ASDEX-U	[33] (94)	edge	~ 1.5kHz		perhaps	not measured	CCW
NSTX	[23] (10)	edge SoL	~ 3 kHz	GPI	?	?	SoL density - Vp: anti correlation CCW?
ASDEX-U	[35] (11)	edge	~2.5kHz	DBS	Y	GAM	
EAST	[36] (11)	edge	4 kHz	Probe		ZF: energy balance	anti-correlation
DIID	[37] (12)	edge	~ 2kHz	DBS	Y	ZF: radial wave number	CW and variations
DIID	[38] (13)	edge	~2.5 kHz	Probe	maybe	ZF: energy balance	CW
HL-2A	[39] (13)	edge	2~3kHz	Probe	Y	perhaps No	CCW and CW
JFT-2M	[41](13)	edge	4.5 kHz	HIBP	Y	No	CCW
TJ-II	[43] (10)	r/a < 0.8	~ 2kHz	DBS		maybe	CW
CHS	[42](98)	r/a ~ 0.4	~ 0.5kHz	HIBP	leading bifurcation	not measured	
CHS	[49] (06)	r/a ~ 0.4	low freq.	HIBP	leading bifurcation	zonal flow	ZF-turb.: anti-corr.

を発表した[4]。

さらに、Inagakiらは、時間変動する熱源に対し、プラズマの温度勾配や熱流が動的に変動する現象を観測し、温度勾配 $\text{grad } T$ と熱流 q とが

$$q/n = -\chi \text{ grad } T$$



のような一意の関数（拡散的関係）を示すのではなく、ヒステリシスを持つ事を発見した[5]。（ n はプラズマ密度。）右上図に実験結果を引用する。従来、輸送関係がL-H遷移のような特異の場合[6]を除き一意の関係にあると信じられて来た。そして、その仮説のもと、輸送関係がどのようなものか探索されて来た。右上図で、実線は、Inagakiらの実測によるヒステリシスを含む輸送関係である。点線や一点鎖線は、一意関数としての当てはめを二つの方法で試みたものである。両者がかけ離れている事は何十年来の謎であった。しかしながら、Inagakiらの発見は、輸送の応答が更に高い次元に埋め込まれたものである事を明示し、こうした従来の謎を解消している[7]。従来の研究が本質的な問題を見逃していた事を示した。

新しい熱力学変数

このInagakiらの発見は、温度勾配や密度勾配等の、従来考えられていた熱力学変数の他に、輸送を司る新しい熱力学変数がある事を示している。

理論的にこの問題に取り組み、プラズマの位相空間まで乱流輸送の問題を拡張した。そして「分布関数を変形する力」に着目する事で、プラズマの加熱入力に直接に熱流を変化させる可能性を指摘した[8,9]。従来の解析は、分布関数の変化（マックスウエル分布からのずれ）を考察することはあったが、「分布関数を変形する力」に着目する事は無かった。分布関数を変形する力は、加熱入力に加わった時点で効果を持つが、分布関数の変化は変化に必要な時間遅れを持って起きるので、時間差が出て来る。Inagakiらの観測は、分布関数のマックスウエル分布からの顕著なずれを伴わずに上記のヒステリシスがうまれる事を示唆しており、新たな熱力学的な力の必要性を支持している。

プラズマの乱流輸送の問題にはいくつかの大きな謎が残されており、この成果は、大きな謎を解決する為の今後の研究の方向を示している。

引用文献

- [1] P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas*, (Cambridge University Press, 2010) 570 pages
- [2] S. Inagaki et. al., Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 115001
- [3] T. Kobayashi, et al.: Phys. Rev. Lett. **111**, 035002 (2013)
- [4] K. Itoh, et al.: Plasma and Fusion Research **8** (2913) 1102168 (review)
- [5] S. Inagaki, et al.: Nucl. Fus. **53** (2013) 113006
- [6] S.-I. Itoh and K. Itoh, Phys. Rev. Lett. **60**, 2276 (1988).
- [7] S. Inagaki, et al.: Plasma and Fusion Research **8** (2913) 1202172
- [8] Itoh, S.-I. and Itoh, K.: Sci. Rep. **2** (2012) 860
- [9] Sanae-I. Itoh, Kimitaka Itoh: Nucl. Fusion **53** (2013) 073035

有限自由度モデルを用いたプラズマ乱流の統計解析

Statistical analysis of plasma turbulence by a few degrees of freedom models

富山大学・人間発達科学部 成行 泰裕

研究目的：

プラズマ中に圧力・密度・温度勾配やビーム成分などが存在する時、それらを緩和する過程でドリフト波乱流などが励起される。プラズマが層流状態から乱流状態へ遷移する過程においては、乱流中の不安定モードは少数であると考えられるため、系から少数の不安定モードを抜き出した少数自由度モデルを用いた解析が可能である。ただし、少数自由度モデルにおいても個々のモードの時間発展はカオスになるため、統計的な性質の理解が不可欠である。本研究では、森の射影演算子法を用いたドリフト波乱流の少数自由度モデル(VZSC モデル)の研究を発展させ、これまでの共同研究で議論してきた拡張 VZSC モデルやパラメトリック不安定性の少数自由度モデルの統計的性質の議論を行う。

研究方法：

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

研究成果：

(1)射影演算子法を用いた周期成分の同定 (VZSC モデル)

VZSC モデルの時系列データを用いて、射影演算子法から導かれる時間相関スペクトルと記憶スペクトルの関係式[2]を用いて周期振動を同定する手法[3]の議論を行った。時系列データの時間相関関数を指数減衰する正弦波の重ね合わせで近似した式を用いて、記憶スペクトルに含まれる周期振動を求めた(図 1 右)。その結果、(1) 各モードの振幅を調整することで直接数値計算から求められる時系列のパワースペクトルのピークに大まかに対応した周期解が得られること、(2)求めた周期解が時系列と整合するものか否かは記憶スペクトルの実部(減衰率または成長率)の大きさによって判定できること、が明らかになった。また、1周期解の場合(図 1 左)には時間相関スペクトルから記憶スペクトルが一意的に求まることを確認した。

(2)有限温度比を含む VZSC モデルの拡張

反磁性ドリフトの対流項への寄与が前年度議論した有限温度比を含む VZSC モデルへ与える影響を議論した。その結果、温度比を用いて規格化したパラメータ(R')に対しては解の分岐は変化しないことが分かった。

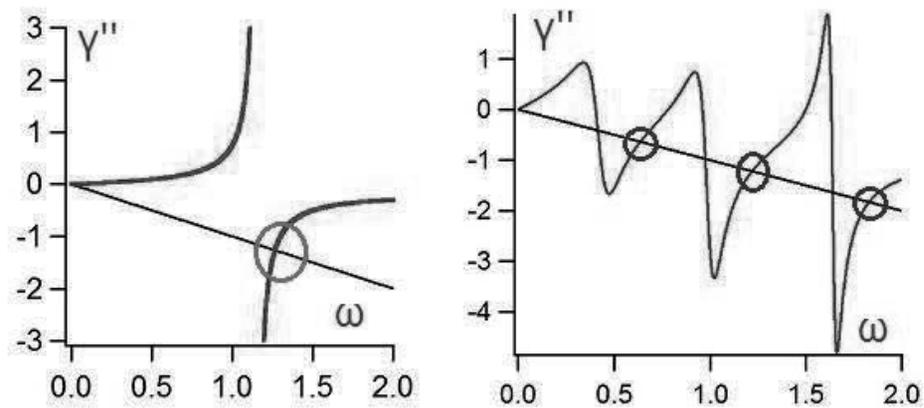


図1 (左)周期解($R=1.869$)、(右)カオス解($R=1.873$)の場合の記憶スペクトルの実部。直線と曲線の交点が周期解を表す。丸を付けた個所がパワースペクトルのピークに対応する解である。

(3)その他の小数自由度モデルの数値解析

簡約化 MHD モデルから導出された 5 変数のローレンツモデル[4]、およびアルヴェン波カオスの小数自由度モデル[5]の直接数値計算データを用いて、間欠性などが見られるパラメータの場合の時間相関関数を求めた。

引用文献: [1] A. A. Vasil'ev et al, Sov. J. Plasma Phys., 16(10), 1990. [2]H. Mori and M. Okamura, Phys. Rev. E, 80, 051124 (2009). [3] D. Hamada, Master's Thesis of Interdisciplinary Graduate school of Engineering Science, Kyushu University, 2007. [4]T. Aoyagi et al, J. Phys. Soc. J., 66(9), 2689 (1997). [5] T. Hada et al, Phys. Fluids B 2(11), 2581 (1990); A. C. -L. Chian et al, J. Geophys. Res., 11, A07S03 (2006).

公表状況:

なし

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)

謝辞:

有益なコメントを頂いた九大応力研の糟谷先生に謝意を表します。

25 FP-12

PdCu 透過薄膜を用いた水素原子束プローブの開発

京都大学・高木郁二

課題番号：25FP-12

研究課題：PdCu 透過薄膜を用いた水素原子束プローブの開発

研究期間：H25 年 4 月 1 日－H26 年 3 月 31 日

所内世話人：冨子秀樹

協力者：4 名（渡辺久之、南本敏宏、冨子秀樹, S.K.Sharma)

配分額：研究費（4 万円）、旅費（9 万円）

目的：

真空中での水素分子モニターは各種の電離真空計が多数存在するが、水素原子モニター機器は実用に耐える形では十分には確立していない。金属中に水素は分子としては存在せず、原子あるいは陽子として存在していると考えられている。本研究では水素原子束の実時間観測プローブを開発し、四重極ガス分析器と組み合わせることで金属中あるいは金属を透過する水素の定量評価装置の確立をめざす。このプローブシステムを複数個制作し QUEST 内の複数の位置に設置し、透過量を観測することで、壁への入射水素束の世界で初めての多点実時間計測をめざす。

QUEST 実験装置での定常プラズマや様々なプラズマ配位において、本システムで水素原子束を観測し、数値計算を用いて、壁への入射原子束を実時間で推定することを目指す。これにより 1) プラズマ実験において正確な壁入射フルエンスの実測、2) 局所壁吸蔵率と global 吸蔵率との関係を明らかにする。

実施方法：

PdCu を薄膜状 (22 μm) にし、真空中に耐えうるように両面を透過率 50%、厚さ 1 ミリのステンレス構造で支持する原子束計測プローブ (長さ約 80mm, 直径 30mm) を開発した。H24 年にこのプローブを QUEST 内の下側ダイバーター部に設置し、水素原子束モニタープローブ (検出下限 $1\text{E}15 \text{ H}_2/\text{m}^2\text{s}$) としての性能を 100-400 度の温度範囲で満たすことを確認した。H25 年度はこのプローブをさらに 2 個制作し、上下のダイバーター部、水平壁部に設置し、多点位置に置いての局所吸蔵率の推定が可能になる。この数値と gas balance (ガス注入量と排気量のバランス) 法で決定する装置全体の global 吸蔵率との比較を行う。可能であれば、ダイバーター部に強い磁場の下で使用可能な真空ゲージを設置し、水素分子並びに原子の挙動解明を行う。

実験結果：申請者らは、平成 21 年から 23 年にかけて QUEST に直径 16mm ϕ の透過プローブ (Ni, SUS, W, Pd 薄膜) を設置し、水素透過の実測を行ってきた。これにより、数 1000 ショットに及ぶ期間でもプローブが安定して動作すること、同一プラズマ条件での透過量の再現性が極めて優れていること、プローブは水素原子に対して感度が高いこと、約 3 桁の範囲にわたって透過量が測定できることなどを確認し、数値計算を採用して、Ni 中の物性値 (拡散係数の温度依存性等) を実測するなど、プローブとしての基本的な特性を明らかにした (発表論文: Takagi, JNM 2011 (S692-695), Sharma, JNM2012 (83-93), Sharma, FED 2012 (77-86) 等)。H24 年度には新たに PdCu 薄膜を用いたプローブを作成設置し、その性能と計測領域を飛躍的に向上させることに成功した。H25 年度には 3 か所にプローブを設置し、最新の成果を 2013 年のトリチウム関係の国際学会にて発表した。

新しいプローブは図1に示すように、上下の平板ダイバーター、および外側壁状に設置した。プローブへの入射束はこのプローブに垂直方向のみに限定しているため、いずれも磁力線を横切るイオン束、ならびに中性粒子束を検出している。

ガス摂動に関する壁排気の応答

ECR加熱により水素プラズマを生成し、パフ入射を粒子摂動源とした時の透過束の応答を調べ、プラズマ-壁システムの粒子循環を調べた。図2に外側 probe の結果をしめす。真空排気の時定数が3秒程度なのでパフ周期を5sから40sに変化させると、系内の圧力がさがる。それに伴い、観測透過束は減少するが、摂動振幅は明瞭に観測される。図3には摂動成分をガスパフに対する時刻を基準に平均化処理を施したものである。4秒ほどの時間遅れで信号が現れるが、それは膜厚20μmのPdCuを拡散するに要する時間でこれより拡散係数信号は1-5秒で減少に転じており、壁排気がこの時刻以降は減少することを示している。

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau_{pump}} + q_{gas}(t) + q_{th}(t, T_{wall}) + q_{ret}(t, P_H, \Gamma_{wall}) + q_{rel}(t, P_H, \Gamma_{wall})$$

$$P_{pdp}(t) = \int (q_{gas}(t-\tau)\eta_{pdp}(\tau)d\tau, \Rightarrow retention$$

上記の方式は壁排気・壁放出過程を含む粒子循環モデル方程式である。ガスパフを単位 impulse としてその応答関数を pdp に関して求める。比較を図3に示すが、定性的なよい一致が得られる。ここで用いたモデル応答関数は $\eta_{pdp} = t^2 \exp(-t/3\tau_d)$ と表すことができた。 τ_d はほぼ排気時定数であり、約3倍の成分と t^2 の早い成分の重ね合わせである。

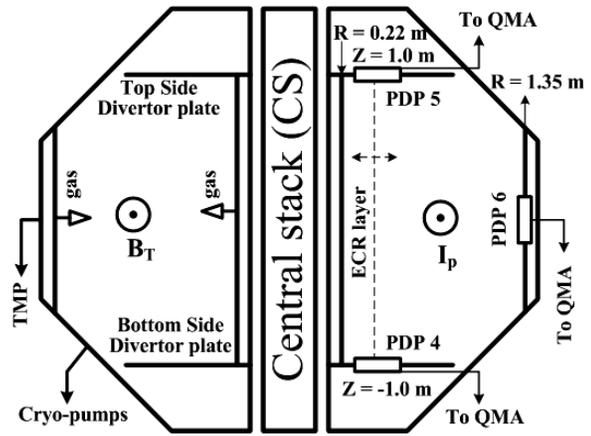


図1 Set up of PDP4-6 probes

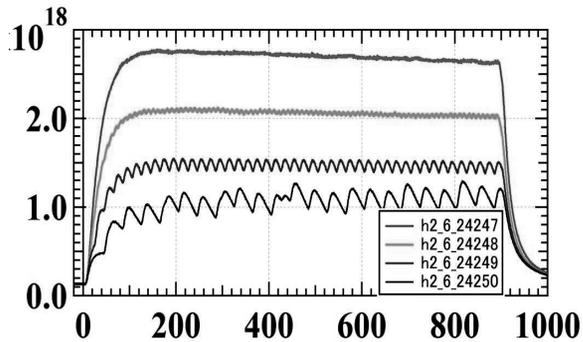


図2 900秒 ECRプラズマにおける透過束計測結果 H2 ガス puff 周期を 5s-40s と変えることにより、摂動振幅と平均信号レベルの変化を取得している。

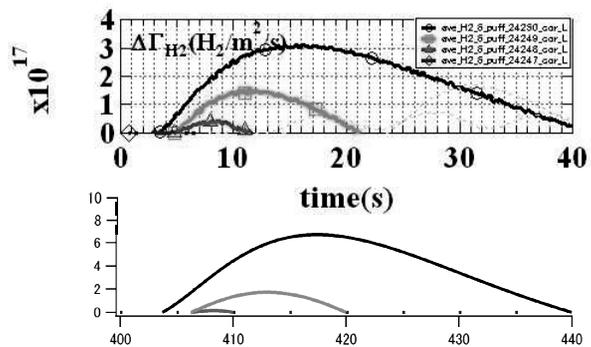


図3 a) 透過束の摂動成分の条件平均 5秒周期はこの図の縦軸スケールでは見えない。(b) 応答関数を求め、観測を再現した結果。

酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性 ～電子および重イオンの重畳照射に伴う微細組織変化～

九大工 川波 隼己(院), 桑原 健人(院), 山本 知一, 吉岡 聰, 安田 和弘, 松村 晶

1. 目的

酸化セリウム(CeO_2)は、軽水炉燃料として使用実績のある酸化ウラン(UO_2)と同一の蛍石型構造を呈しており、融点や熱伝導度などの物性も UO_2 に近い値を示す。このため、軽水炉燃料の模擬材料に適すると考えられ、これまでに様々な照射効果に関する研究が行われてきた。また、蛍石型酸化物セラミックスは、優れた耐照射損傷性を有することが報告されており、使用済み核燃料中に生成する長寿命核種の核変換処理や、余剰プルトニウムの削減を目的とした不活性母相の候補材料としても注目されている。これまでの研究により、 CeO_2 へ電子および重イオンを照射すると、Ce イオンと O イオンの質量差に起因して O イオン副格子の選択的、または優先的なはじき出し損傷が起こることが報告されている。しかしながら、電子および重イオンを重畳して照射した場合の微細組織変化については十分な知見が得られていない。

本研究では、 CeO_2 を対象として透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた電子照射およびイオン加速器を用いた重イオン照射を行った。電子照射後に重イオン照射を行い、酸素イオン副格子のはじき出し損傷に由来する欠陥が、両イオン副格子のはじき出し損傷を誘起する重イオン照射に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。また、重イオン照射後に電子照射を行い、両イオン副格子のはじき出し損傷に由来する欠陥が、酸素イオン副格子の選択的なはじき出し損傷を誘起する電子照射に及ぼす影響について知見を得ることを目的とした。

2. 実験方法

本研究で用いた試料は、レアメタリック社製の純度 99.99% の CeO_2 多結晶粉末から作製した焼結体である。焼結体から直径 3 mm の板状試料を打ち抜き、研磨・ディンプル加工を施した後、Ar イオンミリングにより TEM による観察に適する薄膜試料を作製した。

電子照射実験は超高压電子顕微鏡室の日本電子(JEOL)社製 JEM-2100HC を用いて行い、電子照射下において照射欠陥が形成、成長していく過程を「その場」観察した。電子線の入射方向は $B=\langle 011 \rangle$ 、加速電圧は 200 kV とし、照射および観察は全て室温で行った。また、電子線束密度は $1.7 \times 10^{23} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$ とした。

重イオン照射実験は九大応用力学研究所のタンデム型イオン加速器を用いて行った。照射は室温で行い、照射量 5×10^{17} および $1 \times 10^{18} \text{ ions}/\text{m}^2$ とした。電子顕微鏡観察は電子線の入射方向 $B=\langle 011 \rangle$ から、回折ベクトル $g=\langle 111 \rangle$ を用いて $g/3g$ の二波励起の条件を用い、明視野法および軸上暗視野法により行った。

3. 結果および考察

CeO_2 試料に対して照射強度 $1.7 \times 10^{23} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$ にて 200 keV 電子を照射しながら、微細組織変化の「その場」観察を行った。200 keV 電子の照射下では O イオンのみにはじき出し損傷が誘起され、最大照射時間でののはじき出し損傷量は 0.42 dpa と評価された。図 1(a)に電子照射開始から 420 s 後の明視野像を示す。このときの O イオンののはじき出し損傷量は 0.1 dpa である。照射時間の経過に伴い、照射欠陥集合体の核形成・成長が確認された。この照射欠陥は、これまでの報告から酸素イオンのみにより構成される $\{111\}$ 面に晶壁面を持つ転位ループであると考えられる。電子照射下において、これらの転位ループは可動性を示し、移動や合体、表面での消滅などが観察された。次に、2.4 MeV Cu^{2+} イオンを CeO_2 試料に

対して室温で照射を行った。図 1(b)は照射量 1×10^{18} ions/m² まで照射した際に形成された転位ループの明視野像である。このときの O イオンおよび Ce イオンののはじき出し損傷量は 0.1 dpa である。これまでの研究から、この転位ループは定比組成を保つ完全転位ループと考えられ、電子照射により形成された転位ループとは性状が異なるものである。また、電子照射により形成された転位ループと比較すると、大きさには顕著な差が見られないのに対し、密度は Cu²⁺イオン照射による転位ループのほうが高くなっていることがわかる。

Cu²⁺イオン照射により欠陥が導入された試料に対して照射強度 1.7×10^{23} e⁻/m²s で 200 keV の電子照射を行った。図 2 はイオン照射後に行った電子照射の時間経過に伴う欠陥集合体の形成、成長を示す明視野像である。追加の電子照射により新たな欠陥集合体が形成され、これらは照射時間に伴って成長および移動することが観察された。一方、重イオン照射により形成された転位ループは、電子照射を行っても成長・移動をしなかった。Cu²⁺イオン照射に電子照射後を行った試料では、電子照射のみを行った試料と比較して高密度の転位ループが形成されることもわかった。このことは、重イオン照射により導入された微小な”見えな”欠陥集合体が電子照射下での転位ループの核形成を助長していることを示唆している。

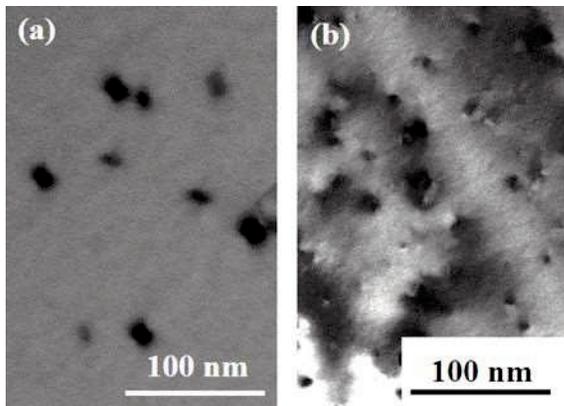


図1 (a)電子照射、(b)重イオン照射により形成された転位ループの明視野像

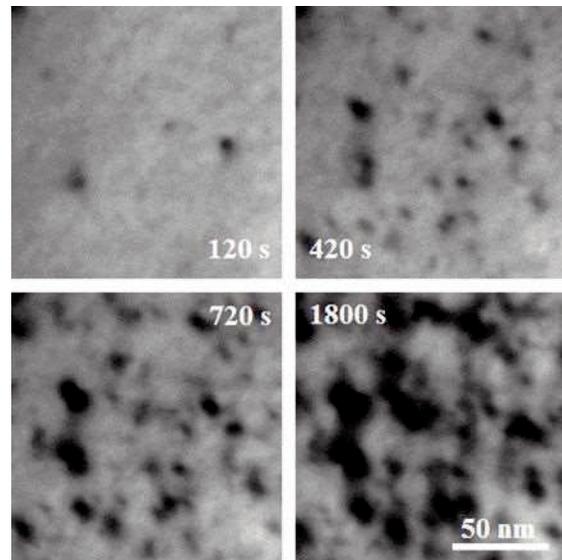


図2 2.4 MeV Cu²⁺イオン照射試料へ 200 keV 電子照射を行ったときの欠陥集合体の形成・成長を表す明視野像，時間は電子照射時間を表す，電子線束密度は 1.7×10^{23} e⁻/m²s.

多孔質金属膜への水素捕捉に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【目的】

環境負荷の小さな水素は、近年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向上のため、高機能材料開発及び様々な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が優れた水素吸蔵能を有するのに対して、白金やタングステンはほとんど水素を吸蔵しないことが知られている。しかし申請者らの研究により、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、高い水素保持特性を有することが明らかとなっている。応用力学研究所とのこれまでの共同研究により、50°C程度の基板温度にて重水素プラズマスパッタリングにより形成されたタングステン薄膜は、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り、捕捉された水素の多くは微結晶粒の粒界や空隙に捕捉されていると推定される。しかしながら、堆積時の基板温度による水素捕捉量や構造の変化については明らかとなっていない。堆積条件と水素捕捉量の関係をより詳しく調査するため、昨年度、誘導結合プラズマを利用した小型のスパッタリング装置を作製し、水素・アルゴン混合プラズマによる金属膜の作製を開始した。本装置では、導入ガス中の水素/アルゴン比を変えることで、広い範囲の水素フラックスでの実験が可能である。また小型であるため、リボンヒーター等によって容易に 500°C 程度までの加熱が可能である。本年度はタングステンを試料とし、より実験条件範囲を広げて、水素フラックス及び堆積温度と水素捕捉量との関係を明らかにすることを目的とする。

【実験方法】

Fig.1 にプラズマスパッタ薄膜作製装置の概略図を示す。内径 10mm、長さ 400mm の石英管内に幅 5mm、長さ 10mm、厚さ 1mm の石英基板を設置し、石英管中央の枝管から直径 3mm、長さ約 30mm のタングステン棒(ニラコ社製)を挿入した。石英管内をロータリーポンプで真空中に排気後、モレキュラーシーブを通して水分を除去した水素及びアルゴンガスをそれぞれマスフローコントローラーで流量制御し導入した。流量比により任意の水素濃度及び圧力に調整した後、石英管上流のサンプリングポートからガスを採取して、ガスクロマトグラフ(GC8A : SHIMAZU Co.)により水素濃度を測定した。コイルに 13.56MHz の高周波電力を印加しプラズマを点火した。プラズマを点火後、直流電源装置によってターゲット金属棒に負の電圧を印加した。この電圧印加によって、スパッタリングの促進を図った。石英管の基板設置領域外周にリボンヒーターあるいは冷媒を通したチューブを巻き、設定温度に調節しながら薄膜を形成させた。一定期間放電を継続した後、基板を取り出し質量変化をマイクロ天秤にて測定した。金属膜中に含まれる元素は、九州大学中央分析センターの EDX により分析した。石英基板とともに金属膜を破断し、その破断面を SEM 観察することで膜厚みを評価した。マスフローコントローラーの流量は、液膜流量計を用いて校正した。放電ガス圧は、プラズマ下流側に設置した隔膜式圧力計(Baratron 626B, MKS Ltd.)にて測定した。純水素プラズマ、純アルゴンプラズマ及び水素・アルゴン混合プラズマからの発光強度をプラズマプロセスモニター(PlasCalc-2000 : Mikropack)によって測定した。また、純水素プラズマ及び純アルゴンプラズマ中のイオン密度をダブルプローブ法により測定した。純水素プラズマ及び純アルゴンプラズマについての水素イオン密度及びアルゴンイオン密度とそれぞれの発光強度の関係から、水素・アルゴン混合プラズマ中での水素イオン密度及びアルゴンイオン密度を見積もった。ここで水素イオンは H_2^+ 、アルゴンイオンは Ar^+ が支配的であると仮定した。ターゲットに入射する水素イオンフラックスは、ターゲットに流れ込む電流値とプラズマ中の水素イオンとアルゴンイオンの密度比から求めた。

タングステン膜に捕捉された水素量はアルゴ

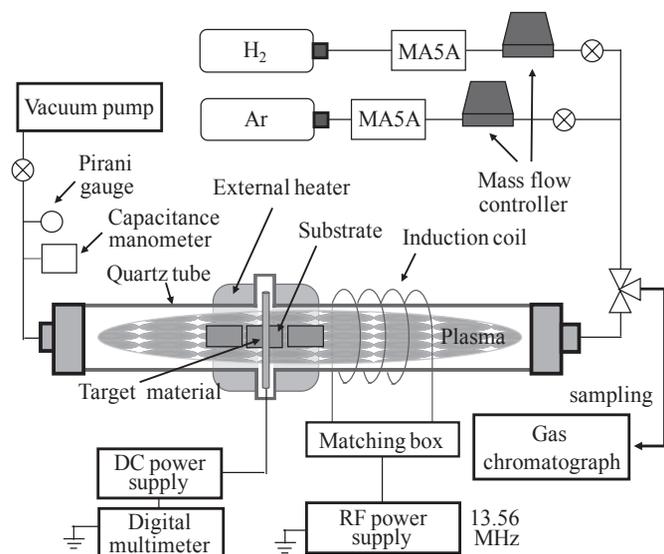


Fig.1 プラズマスパッタ薄膜作製装置概略図

ンガス中での昇温脱離により求めた。金属膜試料を基板ごと昇温加熱装置内に設置し Ar 雰囲気室温から 800℃まで 100℃ずつ段階的に昇温した。各温度とも水素放出が見られなくなるまで測定を続けた。タングステン膜から放出された水素はガスクロマトグラフを用いて測定した。

【結果及び考察】

水素濃度 20%、50%、80%の放電ガスを用いて比較的低温 (34℃、38℃、45℃) で作製されたタングステン堆積層からの水素放出結果を加熱温度に対する水素残留量として Fig.2 に示す。700℃では水素放出は検出限界以下であり、600℃までにほとんどの水素が放出されることがわかった。水素捕捉量は、放電ガス中の水素濃度に比例して増加しているものではないことがわかる。Fig.3 に水素濃度 80%の放電ガスを用いて、基板温度 45℃、300℃、500℃での水素放出結果を加熱温度に対する水素残留量として Fig.3 に示す。水素捕捉量は、堆積時の基板温度が低いほど大きいことがわかる。また、堆積過程での基板加熱と堆積後の基板加熱では、同じ温度でも水素捕捉量が異なることがわかる。例えば、基板温度 300℃と比較すると、45℃で堆積しその後 300℃に加熱した場合 0.047 H/W の水素が残留するが、300℃で堆積させた場合の水素捕捉量は、0.017 H/W と約 1/3 である。これは、堆積時の基板温度が高いほど、飛来するタングステン原子の表面拡散が促進され、堆積層の不規則構造が緩和されることにより堆積層中の水素トラップ密度が減少するためと考えられる。Fig.4 に堆積層成長表面に衝突する水素フラックスとタングステンフラックスの比に対する水素捕捉量を示す。水素フラックスには、ターゲットに入射する水素イオンフラックスと反射係数から求まる反跳水素フラックスを用いた。タングステンフラックスは、堆積速度から求めた。基板温度 307-429K では、全実験範囲において、フラックス比の増加に伴って捕捉量が増加している。573K では、フラックス比 2.8 から 10 では捕捉量の増加が見られるが、それ以上のフラックス比では 0.01 でほぼ一定である。773K では、全実験範囲において捕捉量は 0.003 でほぼ一定である。これら結果から、堆積過程での基板温度に依存して飽和捕捉量が決まり、水素/タングステンフラックス比が小さいと飽和値よりも小さな捕捉量になると言える。基板温度が 160℃程度より低い場合については、本実験条件範囲にて飽和値が得られておらず、その定量にはさらに水素/タングステンフラックス比の高い条件での実験が必要である。

【結論】

タングステン堆積過程での水素捕捉量の飽和値は、573K で 0.01 H/W、773K で 0.003K である。

【成果報告】

- [1] K. Katayama, Y. Ohnishi, T. Honda, et al, "Hydrogen incorporation into metal deposits forming from tungsten or stainless steel by sputtering under mixed hydrogen and argon plasma at elevated temperature", J. Nucl. Mater., 438 (2013) 1010-1013.
- [2] 上原敬一朗、片山一成、本田拓也ら、"水素プラズマスパッタリングにより形成されたタングステン堆積層における水素透過挙動"、日本原子力学会 2013 年秋の大会、平成 25 年 9 月 3 日-5 日、八戸工業大学

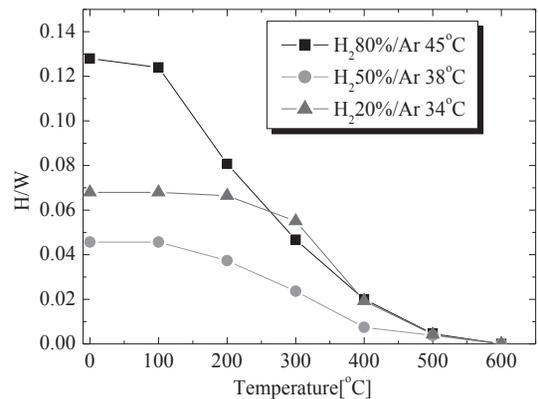


Fig.2 堆積後の基板加熱温度に対するタングステン堆積層中の水素残留量 (水素濃度依存性)

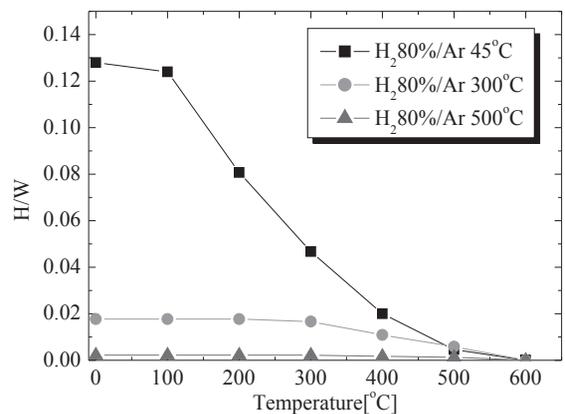


Fig.3 堆積後の基板加熱温度に対するタングステン堆積層中の水素残留量 (堆積時基板温度依存性)

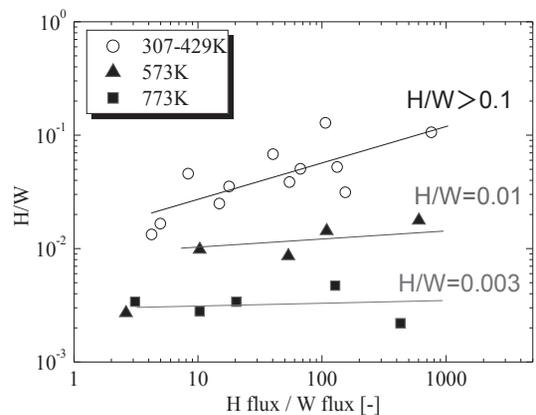


Fig.4 水素捕捉量と基板への水素/タングステンフラックス比の関係

1. はじめに

イオン照射された材料の表面特性変化の理解は、核融合プラズマ対向材料のみならず、プラズマプロセスや固体物性、真空工学の分野においても重要な課題である。我々はこれまでイオン照射された金属材料の劣化程度を非破壊で診断する手法の提案を目的として、照射下での金属ミラー材の光反射率変化を調べてきた。その結果、昨年度の共同研究において、ヘリウムイオン照射したモリブデン(Mo)の表面組織および光反射率に強い結晶方位依存性が認められた[1]。本年度はそのメカニズム解明のために方位の異なる3種類の単結晶試料を用いて微細組織やガス保持特性の方位依存性を調べた。

2. 実験方法

試料は(株)ニラコ社製の単結晶 Mo 試料(岡山理科大学理学応用物理学科平岡教授より御試供)を用いた。SEM-EBSDにより結晶方位を評価した後に、試料表面がそれぞれ(001)、(101)、(111)面と一致するように試料を切り出して実験に用いた。室温で3 keV-He⁺イオン照射を行い、照射後の表面組織をSEM、表面直下の内部損傷組織をFIB-TEMにより観察した。さらに、各試料において照射後の昇温脱離実験を合わせて行った。

3. 結果および考察

昨年度の光反射率測定の結果、(001)、(101)、(111)を試料表面にもつ単結晶試料の3 keV-He⁺イオン照射後の光反射率は、(110)、(111)試料において、(100)試料と比較して大きな反射率劣化が観察されている[1]。これらの試料においてSEMによる表面組織観察を行ったところ、(100)試料においてのみ表面の剥離に起因すると思われるクレーター状の窪みを伴った顕著な表面損傷が観察された(図1)。一方、(110)、(111)試料では、マイクロスケールの表面凹凸は観察されず、10nm以下の緻密なホールの形成が確認された。(100)試料においては、表面の剥離により、局所的に損傷の少ない滑らかな表面が出現するのに対し、(110)、(111)試料では表面直下に高密度のヘリウムバブルによる損傷組織が一樣に形成しており、これが光反射率の低下をもたらしたと考えられた。

このような顕著な結晶方位依存性は、照射後試料の昇温脱離実験からも確認された。図2には、各単結晶試料に3 keV-He⁺イオンを 1×10^{22} He/m²照射した後の昇温脱離ス

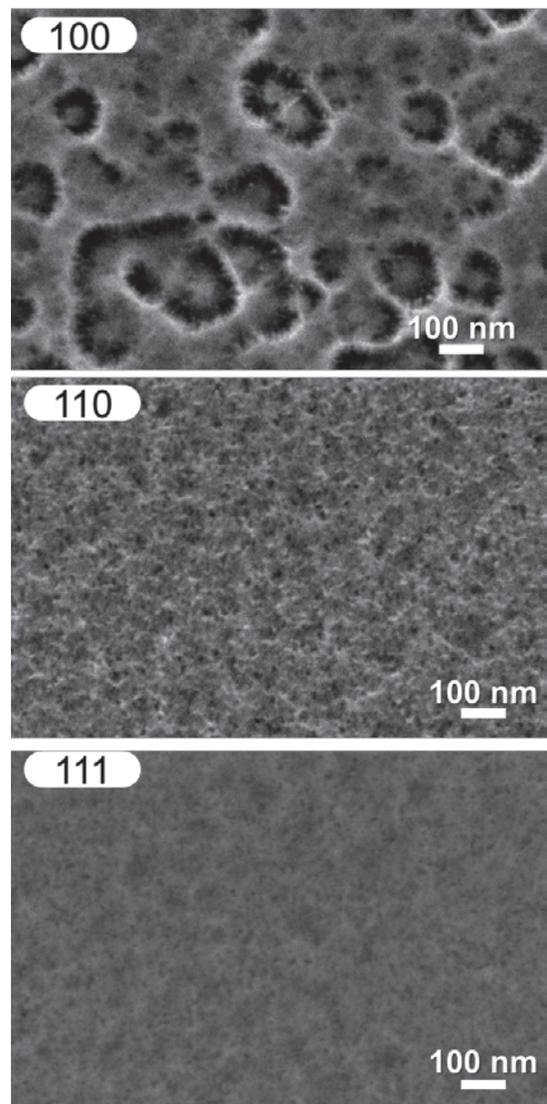


図1 室温で3keV-He⁺を 10^{22} He/m²照射した単結晶 Mo 試料の表面組織 (SEM 像)。

ペクトルを示す。(100)試料においては、900 K 以下の温度域に比較的小さな放出ピークのみが現れるのに対し、(110)や(111)試料では同温度域に大きな放出ピークが出現し、特に(110)試料においては 1400K を超える高温域まで続くヘリウム放出ピークが確認された。この結果、(110)試料は、(100)と比較して 3 倍程度大きいヘリウム総放出量を示した。したがって(110)試料には、ヘリウムの捕捉サイトとして機能する多量の損傷が形成していると考えられる。

光反射率やヘリウム保持特性の顕著な違いについて調べるために、(100)、および(110)試料の FIB 加工を行い、TEM による表面近傍の断面微細組織観察を実施した。図 3 に示す TEM 像から、両試料においてヘリウムバブルが表面直下から数 10nm の深さまで高密度に形成していることが確認できる。光反射率測定で用いた光のモリブデンに対する侵入長は 10nm 程度と見積もられることから、光反射率にこれらの損傷組織が大きく影響していると考えられる。また、両試料においては期待されたほどではないが、損傷組織の違いが確認された。(110)試料において、より大きなバブルの密度が高くなっている。高温下におけるヘリウムバブルの移動度はその直径の-4 乗に比例するため[2]、こうした大きなバブルが昇温脱離実験の高温まで続くヘリウム放出をもたらしたと考えられる。一方、(100)試料では、局所的な表面剥離の原因となるバブル間の破断が観察された。このバブル間の破断はヘリウムの容易な拡散経路として機能するため、剥離を生じることで照射中のヘリウム放出を促進し、結果的に低いヘリウム捕捉量を示したと考えられた。

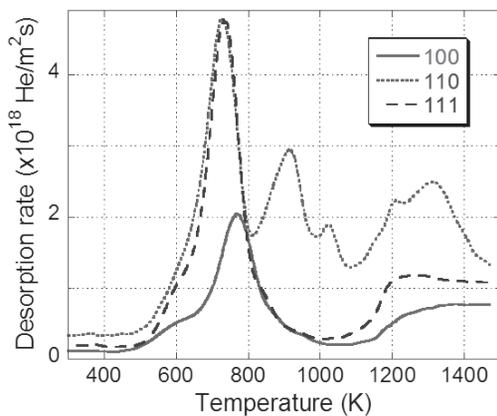


図 2 3keV-He⁺照射した各単結晶 Mo 試料からのヘリウム昇温脱離スペクトル。

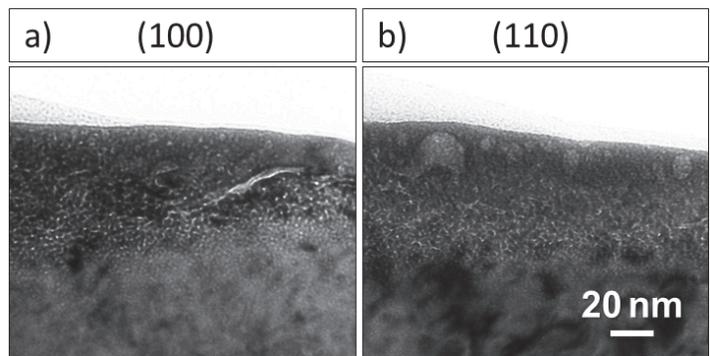


図 3 3keV-He⁺照射した単結晶 Mo 試料の断面微細組織観察 (TEM 像)。

- [1] 宮本光貴 平成 24 年度九州大学応用力学研究所共同研究成果報告書
 [2] E.E. Gruber, J. Appl. Phys. 38 (1967) 243

● 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： 山本将寛, 飯島信行 (島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程)

W ダイバータ構造体の健全性評価基準の策定および検証

Standardization and Verification of Lifetime Evaluation Method of W-Divertor Structural Component

韓 文妥¹、奥西良成²、谷口修一²、能登裕之²、橋富興宣¹、大村高正¹、木村晃彦¹¹京都大学エネルギー理工学研究所、²京都大学エネルギー科学研究科

背景と目的：ITER のダイバータ冷却ユニットとして、タングステン (W) プラズマ対向材料 (PFM) をモノブロック (MB) 型要素体として銅合金冷却管に組み込み、加圧水にて冷却する方式を適用することが検討されている。一方、原型炉仕様としては、W-MB の冷却ユニットのプラズマ照射下健全性や銅合金の耐中性子照射特性に問題が生じるとの懸念が示されているが、その限界についての詳細な検討がなされていない (図 1)。また、ダイバータの健全な運転のためには、ダイバータ冷却ユニットの製造時における冷却管の接合状態 (接合部の健全性) や運転中に W-MB に発生するき裂や溶融等の損傷の重篤さの評価技術開発が不可欠である。冷却ユニットの健全性評価に関しては、原型炉のダイバータにおいても ITER と同様な手法がとられると考えられるが、ITER においても製造時の検査方法や運転後の交換時期を定める評価方法、すなわち、健全性評価基準は定められていない。

本研究では、W-MBユニットの製造時における合格基準や運転中に損傷を受けたW-MBの交換時期を定めるための健全性評価基準を策定するため、W-MB製造に関する情報収集および検証試験を行い、それに基づいた健全性評価法の検討を行う。これらを基に、ITERおよび原型炉対応型ダイバータユニットへの健全性評価法の適用可能性について検討し、核融合炉ダイバータの設計および開発に寄与することを目的とする。

結果と考察：熱負荷試験 (20MW/m² で 1000 サイクル) 終了後の ITER 用 W モノブロック冷却要素体 (W モノブロック (30 mm×30 mm×12 mm) をクロムジルコニウム銅 (CuCrZr) 製の冷却管 (15 mmφ×1.5 mm t) に無酸素銅で接合したもの) を入手し、損傷の状況を把握するとともに、き裂導入経路を含め、組織観察及び硬さ測定を実施した。組織観察は 0.25 μm の砥粒でバフ研磨した後、腐食液 (K₃[Fe(CN)₆] : 2 g, NaOH : 2 g, H₂O : 20 ml) を用いてエッチングを行ったものを走査型電子顕微鏡 (SEM) により実施した。また、熱負荷に伴う組織変化が硬さに与える影響を調べるため、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて硬さを測定した。

1) W モノブロック冷却要素体

W モノブロックは 2 種類であり、加熱表面から冷却管までの距離がそれぞれ 3 および 6mm である。前者 (A : 図 1) は溶融は生じておらず、表面状態は良好であったが、W にき裂が認められた。一方、後者 (B : 図 2) では W 表面が溶融していたが、W にき裂は観察されなかった。

2) 熱負荷による組織変化

A ブロックにて観察されたき裂は、粒界に沿っており、再結晶 W に特有の粒界脆化によると考えられる。熱負荷試験終了時の冷却の過程において、表面近傍が先に冷却し、熱収縮が生じた際に、表面近傍に引っ張り応力が負荷された結果、き裂が生じたと推測できる。B ブロックにおいて、亀裂が発生しなかったのは、1) A においては表面と冷却管の距離が長く、温度勾配が B に比べ、小さかったことと、2) B では表面が溶融しており、冷却初期時において表面において引張応力が負荷されなかったことが原因としてあげられる。B モノブロックの断面 (冷却管の長手方向に垂直) における結晶粒径を及び硬さを測定した結果、断面は溶融部、再結晶部、回復部の 3 層に分類され、それぞれ、結晶粒径は、約 300、20、3 μm であり、硬さは、375、389、465 MPa であった。A モノブロックにおいては、結晶粒径は最大でも約 20 μm であり、W 冷却は適切に行われたことを示唆している。加熱面に最も近い部分は深さ 1.5 mm の部分まで平均結晶粒径が 300 μm、中間層は深さ 2.0 mm で粒径 20 μm、最も冷却管に近い部分は粒径 3 μm であった。ただし、図 3 の加熱面近傍の濃いグレーは、粗粒部を意味しており、銅管上部の W の厚さにより、粗大粒の領域が変化する。

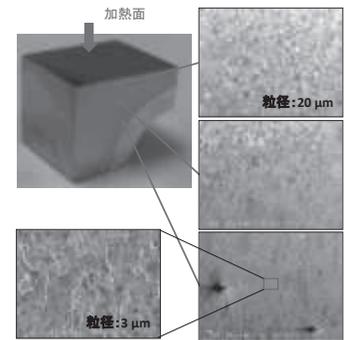


図 1 : W-モノブロック (A)

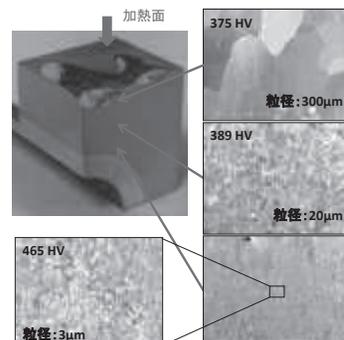


図 2 : W-モノブロック (B)

九州大学施設利用に係る報告書

「応力下における照射組織の発達過程に係る強度特性評価（その4）」

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
福島燃料材料試験部 材料試験課

井上 利彦

1. 緒言

日本原子力研究開発機構では、高速炉炉心用材料として耐スエリング性と高温強度に優れた改良 SUS316 鋼（PNC316 鋼）を開発し高速実験炉「常陽」等で実機燃料ピンとして実用するとともに、高速中性子による照射挙動を評価している。その結果、材料照射と燃料ピン照射において両者におけるスエリング挙動の明確な相違が認められている。材料照射は、材料試験片そのものを照射リグに装荷して照射しており、燃料ピン照射は実機燃料ピンでの照射を行っている。照射量と照射温度で評価した場合、両者の違いは明らかにされておらず、実機燃料ピンの環境効果が要因として推定される。具体的な要因として、温度勾配と温度変動及び内圧増加による周応力の変動等の照射環境の複合的な作用が考えられる。

本研究では、材料照射と燃料ピン照射におけるスエリング挙動の相違と要因を明らかにすることを目的とする。この複合的な環境効果の作用を評価する第1段階として、炉心用材料において応力場が組織変化に与える影響を明確にすることを目的とする。

また、機構では、PNC316 鋼と同じオーステナイト鋼であり耐スエリング特性に優れた高 Ni 鋼の研究開発を行っており、本研究で得られた知見を踏まえた開発を目指している。高 Ni 化や高温域でも安定な析出物の均一化等により耐スエリング特性が高められた高 Ni 鋼を用いて、応力を付加することにより更に照射損傷を加速させた照射試験を行い、耐スエリング特性に及ぼす高 Ni 化や析出物の影響評価を行う。

2. 実験方法

九州大学応用力学研究所設置のタンデム型イオン加速器ビームライン上に、荷重制御による小型引張試験機を設置されている動的効果観察ステーションを用いて、2.4-3.2 MeV Ni イオンの照射を行った。照射条件は室温から 600°C、負荷荷重は最大 100N とした。照射後に微細組織観察を行い応力が与える照射欠陥集合体の離合集散状態を応力無負荷の試料と比較した。供試材はオーステナイト鋼である JPCA2（焼鈍材）を用いた。

また、高 Ni 鋼（15Cr-43Ni、 γ/γ' 弱析出型）を供試材として、タンデム型イオン加速器を用いた 2.4MeV Cu イオンの照射を行った。照射条件は 700、800°C、200dpa として、今回は応力無負荷での微細組織観察試料とした。挙動評価の比較材として、Self イオンで

あるNiイオンを、照射温度500、600、700℃、照射量100dpaで照射した高Ni鋼(15Cr-35Ni、炭窒化物析出型)試料も観察試料とした。観察試料の作製にあたっては、九州大学応用力学研究所設置の収束イオンビーム加工観察装置を用いた。

3. 結果

応力無負荷及び応力負荷試料の両者の微細組織を比較した結果を図-1に示す。図-1の上段には応力無負荷試料を示し、下段には25Nで応力を負荷したまま照射温度400℃、照射量5dpaまで照射した試料を示す。応力なしの状態では、損傷ピークの近傍にのみ格子間原子型の転位ループが形成されるが、照射中に25Nの応力を負荷すると転位ループ密度が少ない領域においても高密度の転位が形成され、応力負荷の影響が広範囲にまで及ぶことが示された。

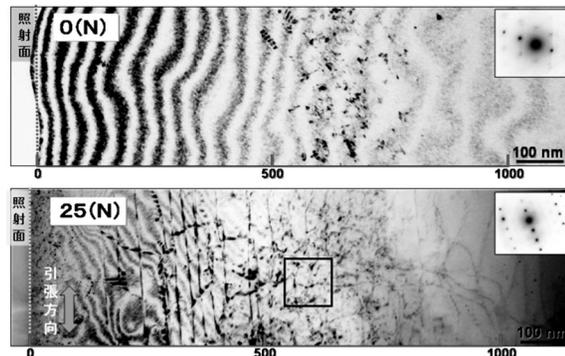


図1 照射試料断面の微細組織観察結果 (400℃, 5dpa)

応力無負荷における高Ni鋼(15Cr-43Ni、 γ'/γ 弱析出型)の700℃、200dpaにおける微細組織観察の結果を図-2に示す。高温及び高照射量の条件下において γ'/γ ($\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})/\text{Ni}_3\text{Nb}$)析出物は安定に存在していた。今後、応力負荷環境における照射試験を行い、損傷形態を比較することによって、耐スエリング特性に及ぼす高Ni化や析出物の影響評価を行う予定である。

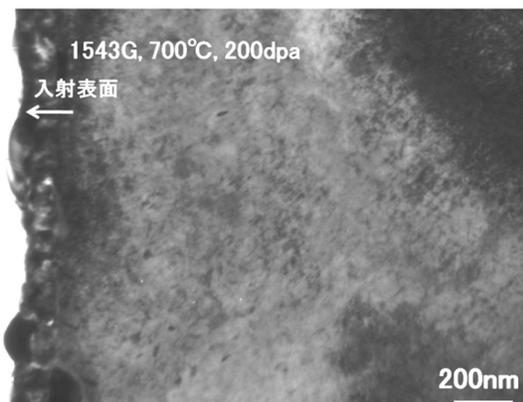


図2 照射した高Ni鋼試料断面の微細組織観察結果 (700℃, 200dpa)

また、応力無負荷における高 Ni 鋼（15Cr-35Ni、15Cr-43Ni）の 500～600℃、100dpa におけるスエリング挙動の結果を図-3 に示す。高 Ni 鋼のスエリングピーク温度は、600℃ 近傍であり、微細組織の観察結果からボイドが形成されていることを確認した。今後は、析出物分布状況の詳細を評価するとともに、冷間加工等を加えて更なる耐スエリング特性を改良した高 Ni 鋼材の損傷挙動を評価する。

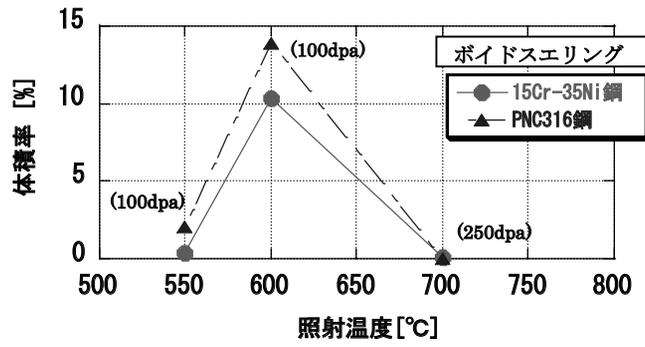


図3 照射した高Ni鋼のスエリング抑制の照射温度依存性(図中の括弧内は照射量を示す)

写真画像解析による QUEST プラズマの形状再構成

電気通信大学 竹田辰興

【目的】 トカマクプラズマを安定に維持する上でプラズマの位置および形状を精度よく計測することが必要である。今回は水平方向から撮影して得られた画像に適切な逆変換を行いポロイダル断面内のプラズマ形状を決定する方法を研究する。

【研究概要】 目的の項に記したように、トカマクプラズマを安定に長時間維持する為にはプラズマの位置・形状を精度よく測定する事が重要である。従来は電磁気計測の結果を用いてきたが、原理的に、十分期待される結果は得られない。光学的測定ならば、ノイズも少なく直接的に位置・形状を知る事ができるが、2次元平面上に撮影された画像はそのままではプラズマの位置・形状を表していない。トカマクプラズマは基本的に軸対称であるので、このことを利用すれば、撮影された画像を3次元空間のプラズマの位置・形状に変換する事が可能である。我々は、G. Hommen, et al. の方法に基づき、このような方法が現在の目的のために利用可能かどうか検討した。まず、下記変換式を実行する為のR-プログラム ITOpt.j.Rを作成した。次に、検討の為のテストデータとしては合肥トカマク EAST のムービー映像から1コマを切り出して PlotDigitizer により見かけのプラズマ表面位置を読み取る。これに入力してポロイダル断面内のプラズマ位置・形状を求めた。

変換式 変換式の詳細についてここに記すには紙面が足りないので要点だけ記す。対象とするプラズマ等の幾何学的な情報は図1に示す通りである。この方法の要点は、カメラからプラズマを見た時の視線がプラズマ表面の接線となる時その視線が作る像点が周囲より明るくなるという事である。図1において、カメラの位置 $C(u_C, v_C, w_C)$ を与えて、PlotDigitizer で得られた像点 E (Projected Edge Point) 座標 (u_E, v_E, w_E) を入力して、プラズマ表面の位置 T (Point of Tangency) 座標 (u_T, v_T, w_T) を求める事が当面の目的となる。異なる E 点に対応する T 点は、もちろん、同一ポロイダル面状にはないがプラズマが軸対称であるので、これら T 点を集めることによってポロイダル面内のプラズマ位置・形状が決定する。この変換を行う際には像面上の像点の描く曲線について数値微分 (du/dv) を計算する事を注意しなければならない。

入力データの準備 まず、ムービーの中からプラズマ表面が比較的是っきりと移っている数コマの写真を PlotDigitizer で数値化する。代表的な1コマを図2に示す。このようにして求めた数値を、第1図の $w=0$ 面上の (u, v) 座標に変換する為には、この面上にあって位置の特定できる点が3点以上写真に写っている必要がある。テスト計算では平面図(図3)および立面図(省略)から3点を決定し像点の位置を校正した。

変換計算 上記データを ITOpt.j.R に入力して、ポロイダル断面内でのプラズマの位置・形状を求める。計算結果の一例(出力データ: 黒いシンボル)を図4に示す。

まとめと今後の課題 Hommen et al. の再構成法はおおむね満足できる結果を与えたが、いくつかの課題や注意すべき点も判明した。(1) プラズマの状態によって入力データとなる E 点の軌跡が常に明確に得られる訳ではない。特に必要性の高い X 点近傍は背景光が強くてこのままではデータを得る事が困難なので対策が必要である。(2) 適切な画像処理によって E 点の軌跡をある程度明確にする可能性はある。RGB チャンネル分解して R チャンネル像を除いたり、トーンカーブを工夫するだけでも効果はあるが、一般的な対処法は不明である(3) 入力データ較正にあたって像面上に位置がはっきりした点が 3 点以上写っている事が極めて重要である。(4) 今後、オンラインでこの解析を行いフィードバック制御等に用いるときには画像処理ソフトと解析ソフトが滑らかにつながるシステムを使う必要がある。有望なのは JAVA ベースの Processing と C++ベースの openFrameworks であると考えられるので現在 Processing について検討中である。また、OpenCV を Python で使うのも有望と考えられる。

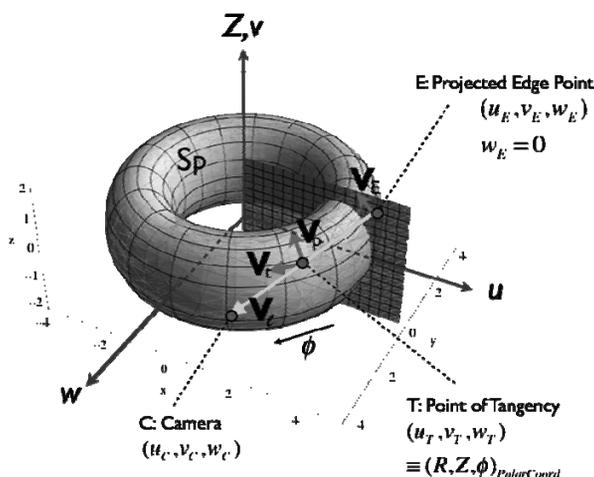


図 1



図 2

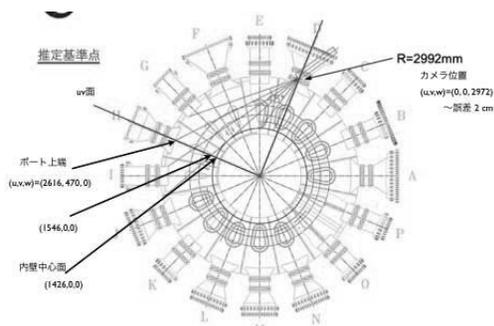


図 3

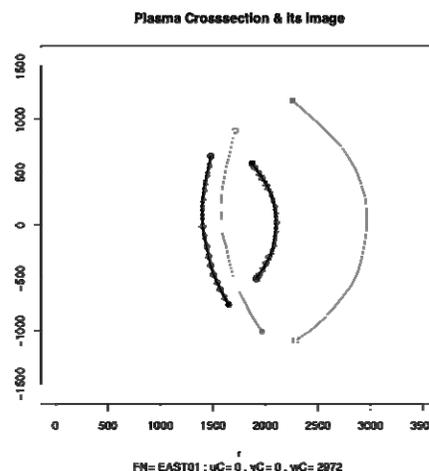


図 4

25 FP-19

研究課題名：酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院

エネルギー理工学部門

橋爪 健一

1. 目的

核融合システムにおいて生成するトリチウムを含むガスの濃度測定は、トリチウムの回収、漏洩評価の上で非常に重要である。トリチウムは多くの場合、軽水素や重水素あるいは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、ガス中のトリチウムを濃縮することによってトリチウム濃度の測定精度を向上させる方法が考案され、その効果が期待されている。この方法は、ガスを高温のまま処理でき、メモリー効果などは小さいと期待されるが、使用されるプロトン導電体酸化物は粉末焼結により作製されるため欠陥を多く含み、溶解したトリチウムが粒界、気孔、析出物などへトリチウムがトラップされる可能性がある。水素同位体のトラップは非常に重要であるにもかかわらず、これまでほとんど研究が進められていない。本研究では、上記水素トラップの影響解明を目指して、重水素あるいは重水を用い水素同位体の溶解・放出挙動に関する実験・解析を行う。

具体的には、プロトン導電体セラミックスとして、セレート系（例えば、 BaCeO_3 ）、ジルコネート系（ CaZrO_3 ）、インデート系（ $\text{BaInO}_{2.5}$ ）などの材料の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動を調べる。また、プロトン導電性セラミックスばかりでなく、水素難溶解性のセラミックス（例えばジルコニア）などについても比較実験を行う。本研究では、これらの試料に高温でのガス吸収法にて重水を均一に溶解させた試料を準備し、応用力学研究所の昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて、真空雰囲気中で昇温し、水素同位体放出挙動を観測する。それぞれの試料の水素放出挙動に、添加元素、結晶粒径、析出相の存在がどのような変化を与えるのかを明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

10%Y 添加 BaCeO_3 （原料粉末を（株）TYK より購入）について粉末焼成法（1873K, 20h）により試料を準備した。各焼結体試料を $0.4 \times 2 \times 8 \text{mm}^3$ に加工後、重水蒸気曝露（773K, 873, 973K, 3h, 22Torr）を行い、その試料からの重水素の TDS スペクトル（昇温速度 1K/sec）を測定した。

3. 実験結果と考察

773K、873K および 973K で重水蒸気曝露した Y 添加 BaCeO_3 の重水の TDS スペクトルを図 1 に示す。放出ピーク温度は重水蒸気曝露温度ごとに異なっており、放出量は曝露（吸収）温度の上昇とともに低下し、また、放出温度も上昇していることが分かった。この結果から、重水の放出が試料中の重水の拡散に律速されるモデルで、見かけの拡散の活性化エネルギーを評価した結果、表 1 に示すように拡散の活性化エネルギーが増加した。すなわち、重水素吸収量が低下すると、相対的にトラップされる水素の割合が増え結果として活性化エネルギーが増加していることを意味し、 BaCeO_3 中の水素のトラップサイトの存在を示唆する結果となった。また、放出重水量が水素溶解量に相当するものとして、単純なトラップモデルを用いて溶解水素量とトラップ（捕獲）水素量を評価した結果を図 2 に示す。いずれの曝露条件においても 20%程度の水素がトラップされているという結果を得た。

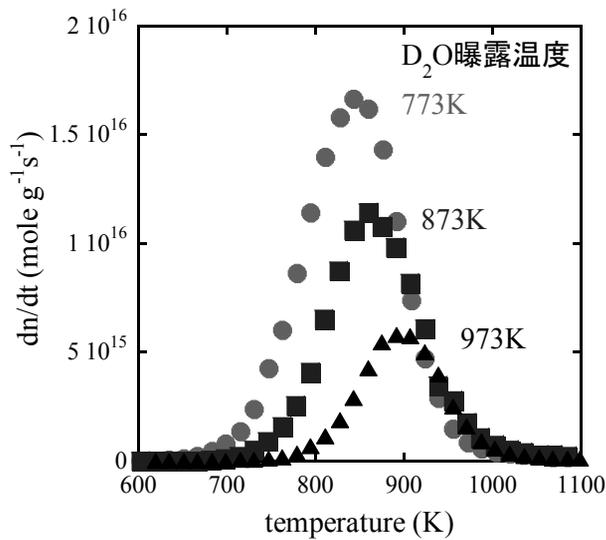


図1 Y添加BaCeO₃重水放出スペクトル
重水曝露温度：773, 873, 973K

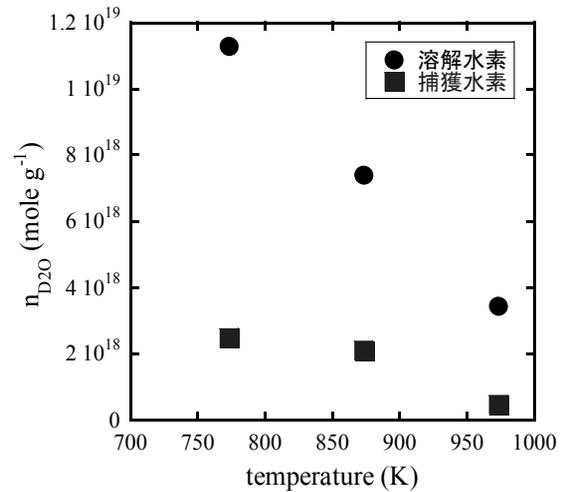


図2 重水曝露温度ごとの水素溶解量と捕獲水素量

表1 拡散律速モデルによって評価された活性化エネルギー

D ₂ O 曝露 (吸収) 温度 / K	773	873	973
見かけの拡散係数の 活性化エネルギー / eV	1.4	1.6	1.9

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中の水素吸収・放出挙動が内在するトラップのために水蒸気吸収条件によって大きく異なる可能性があることを示した。今後、最適試料調製条件の探索を含め、よりトラップの影響の少ない酸化物プロトン導電体探索のために、TDS 等の共同利用、共同研究を進めたい。

5. 研究組織

九大総理工：橋爪健一、大塚哲平 大学院生：伊藤篤史、松田浩輝、山下健太 学部生：山口諒真
九大応力研：渡辺英雄

6. 研究成果

- ・「酸化物材料の水素の吸収、放出挙動」橋爪健一、松田浩輝、波多野雄治、相良明男、日本原子力学会 2013 春の年会 (2013.3 口頭発表)
- ・K. Hashizume, K. Ogata, S. Akamaru, Y. Hatano “Solubility of hydrogen isotopes in zirconia ceramics”, J. Plasma Fusion Res. Series, 10 (2013) 33-35.

LHD 長時間放電に曝露された金属材料中のヘリウム粒子の吸蔵・放出挙動

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 時谷 政行

【目的】

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のプラズマ対向壁は、SUS 製第一壁(95%の面積率)と炭素製ダイバータタイル(5%の面積率)で構成されている。近年の定常放電では、~1MW の加熱入力で線平均電子密度 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のヘリウムプラズマを 47 分間にわたって維持することに成功しており、長時間放電に伴うプラズマ壁相互作用(PWI)の研究が加速してきている。しかしながら、典型的な放電では、放電開始後 10 分を経過するとこれまで壁に吸蔵されていた、つまり壁排気されていたヘリウム粒子が放出側に変化することで密度制御が困難となることが観測されている。また、対向壁表面から突如として炭素を主とする鉄を含む不純物の混入が発生し、プラズマ崩壊に至る現象が確認されている。これらの現象はプラズマ放電開始後 10 分というある程度の時間が経過しないと発現しないものであり、対向材料の照射やスパッタリング損耗・再堆積が時々刻々と変化を遂げていることを示唆するものである。そこで、本研究では、大面積を占める第一壁材料表面において、放電時間経過とともにどのような表面変質が発現し、ヘリウム粒子の捕捉特性が変化していくのかを捉えることを目的として、SUS 試料を~1000s、~3000s、~10000s と長時間放電に曝露する時間を変化させ、表面変質と粒子捕捉量を時間の関数としてとらえることを目的とした。

【実験方法】

図 1 に示すように、試料駆動装置を用いて、鏡面研磨および 1050°C で真空焼鈍した新品の SUS 試料を LHD 第一壁位置まで挿入し、~1MW の加熱入力で線平均電子密度 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のヘリウムプラズマ放電に 1000s、3389s、9980s それぞれ曝露した。取り出した試料を九州大学応用力学研究所に持参し、透過型電子顕微鏡(TEM)による微細構造解析、昇温脱離ガス分析実験(TDS)を行った。

【結果および考察】

図 2 に、1000s、3389s、9980s 曝露後の SUS 試料の TEM 像を示す。上段は主にバブル像であり、白く球場に見えるコントラストがヘリウムバブルである。全ての照射時間のデフラクションパターンでデバイリングが確認できる。過去の研究からこれらは炭素と鉄が混合した Mixed-material 堆積層であることがわかっている。下段は主に転位ループ像であり、黒色のコントラストが転位ループである。1000s の試料ではステンレス基盤へのバブルと転位ループのサイズが小さく密度も希薄なため、表面の堆積層が邪魔をしてバブルのコントラストをはっきりととらえることができないが、断面 TEM 観察により SUS 基板へのバブルの形成をはっきりと確認している。デバイリングのコントラストから、照射時間が 3389s になると 1000s と比較して明らかに厚い Mixed-material 堆積層が形成されているにもかかわらず、よりはっきりとしたバブルと転位ループのコントラストを捉えることができる。9980s になるとバブルのサイズと密度にさほど変化は見られないが、転位ループの密度とサイズはさらに増加していることがわかる。断面の TEM 観察から、9980s の試料は 3380s(15nm)よりもさらに厚い約 55nm の Mixed-material 堆積層が形成されていることがわかっている。LHD の長時間放電では数 keV 程度のエネルギーのヘリウムが第一壁表面に入射してきていることが示されているため、第一壁に入射してくるヘリウムの大部分は 55nm の Mixed-material 堆積層中を通過する間にエネルギーを失い、捕獲あるいは拡散後に放出されることが考えられる。

図 3 に、各照射時間曝露後の試料におけるヘリウムの TDS スペクトルと、その積分値(総捕捉量)を示す。全てのスペクトルにおいて 1000~1400K にかけて放出のピークが存在する。これは、SUS 基板に形成

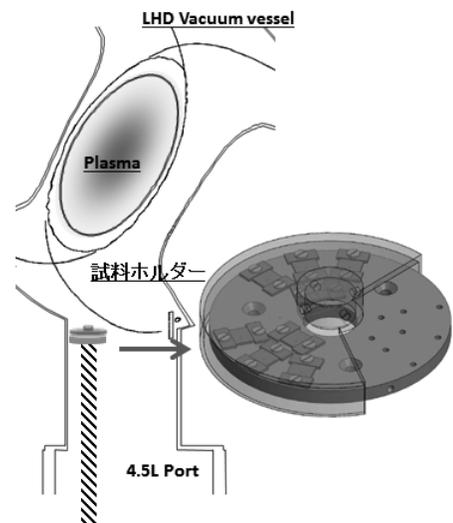


図 1 LHD 定常長時間放電用試料ホルダーと照射位置模式図

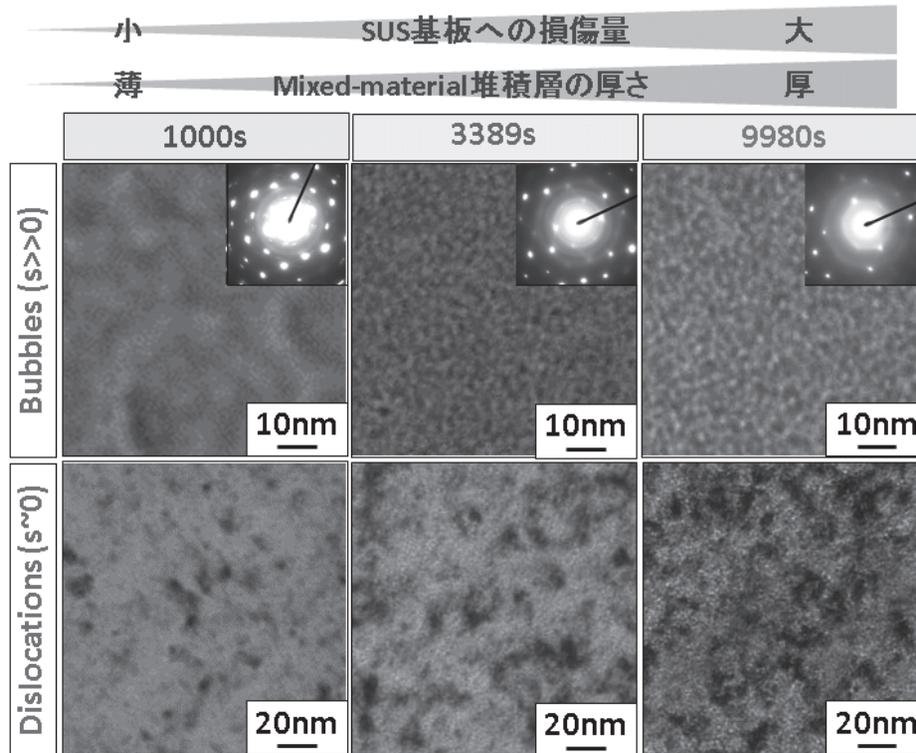


図2 各放電時間後の SUS 試料の TEM 像. 上段：主にバブル像で、小さなフレームはディフラクションパターン. 下段：主に転位ループ像

されているヘリウムバブルからの放出である。また、室温~600K にハッチをかけている領域では、各試料とも急激な放出率(ピーク)が見られるが、照射量時間(量)が増加するにつれて、その絶対値(放出率)が劇的に増加していることがわかる。これまで実施されてきた基礎研究の結果と比較して、この放出ピークは 2 種類の捕捉機構に起因していると考えられる。一つは SUS 基板内部のヘリウムバブル周辺の歪場に弱く捕捉されたヘリウム、もう一つは炭素メインの Mixed-material 堆積層に弱く捕捉されたヘリウムである。どちらがどのくらいこの放出ピークに寄与しているのかを定量的に把握することは極めて難しいが、3389s の時点で 15nm の厚さまで成長した Mixed-material 堆積層によって、それ以降入射する大部分ヘリウム粒子は SUS 基板に到達することが困難な状態であったと考えられる。それにもかかわらず、9980s 照射したのものでは一桁以上の放出率の増加がみられることから、大部分が Mixed-material 堆積層に弱く捕捉されたヘリウムの放出であると考えの方が自然である。本結果は、Mixed-material が形成され続ける限り、室温から急激に放出されるヘリウムが壁表面に滞留し続けることを裏付けるものである。このようなヘリウム捕捉機構が LHD 第一壁全体に存在することは、予期しないわずかな壁温上昇が定常長時間放電の密度制御に影響を及ぼす可能性を示唆するものである。これを抑制するには、対向材料から炭素材料を排除するなどの工夫が今後求められる。

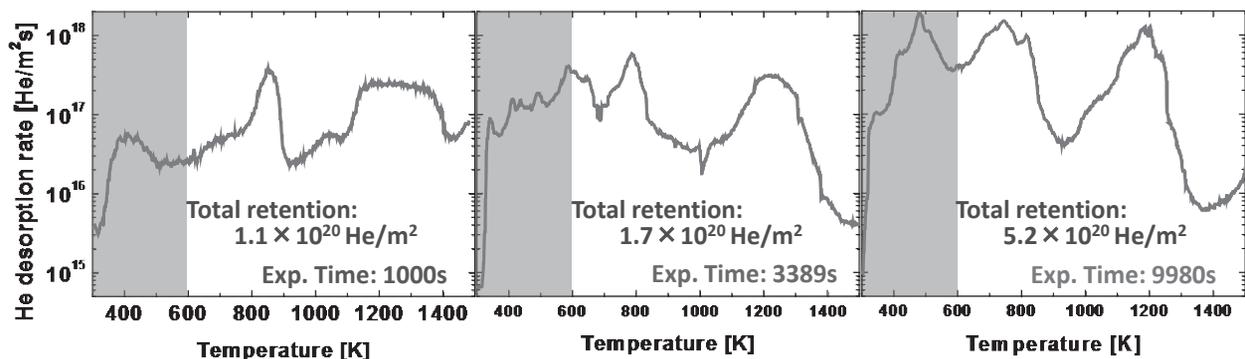


図3 定常放電に 1000s, 3389s, 9980s 曝露後の SUS 試料からのヘリウムの TDS スペクトル. 各スペクトルの積分値から得られた総捕捉量を図中に記載.

25 FP-21

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

応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所

糟谷 紘一

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、電子天秤を含む計測装置等により、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。例えば、熱負荷量（X座標）の関数として、損耗深さの最大値や、喪失総質量を（Y座標）表示し、データフィッティング線を描く。この線を座標原点方向に内挿することにより、熱負荷量の損耗開始閾値を評価する。粗さの影響が小さい、十分大きな変数量側から、粗さ程度の変数量に向かってデータ内挿を行うことにより、初期粗さ等が損耗閾値評価結果に及ぼす悪影響を除くことができる。種々のサンプル材料を照射して、閾値等の比較により、高熱負荷下における諸材料の表面強度（損耗耐力）を定量的に評価する。異なる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。

実験方法

電子ビーム照射ができるような SiC サンプル（5mm 厚 x20mm 角）を複数枚、外注により、大きな寸法の元板より切り出した。また、照射時サンプルの温度変化を測定するために、この内の1枚に、1mm 径の熱電対挿入用穴を、外注加工した。これらの用意ができた時点で、電子ビーム照射のためのマシンタイム設定をお願いしたが、電子ビーム装置排気装置（ターボポンプ制御部）の故障や、受け入れ教官の長期外国出張等が重なり、年度内に電子ビーム照射が不可能になった。そこで、以下では、本年度に並行して進めた、パルス繰り返しレーザー照射による予備実験の結果を述べる。

予備実験結果：レーザー照射による構造壁材料の耐力測定

各種の構造材料として有力なものは W と SiC であるので、最近我々が開発した材料表面耐力測定法により、レーザー照射・高強度熱入力下での両材料の耐力を測定した。図1に照射後の両サンプル表面状態撮影例を、左右に並べて示す。参考のために、物差しが下部に添えてある。照射条件は、ArF レーザー（波長 193nm）で、パルス幅 10ns、パルス繰り返し 10Hz、ビーム寸法が W の場合 0.40x1.5mm²、SiC の場合 0.44x1.35mm²、ビーム中心部でのフルエンスが W の場合 14J/cm²、SiC の場合 8.6J/cm²であった。各サンプル表面上におけるレーザー照射スポットとスポット毎の多重総照射回数（照射条件）を、図2と図3に示す。両サンプルの多重照射後の表面上のク

レーターを、レーザー変位計により測定すると、2

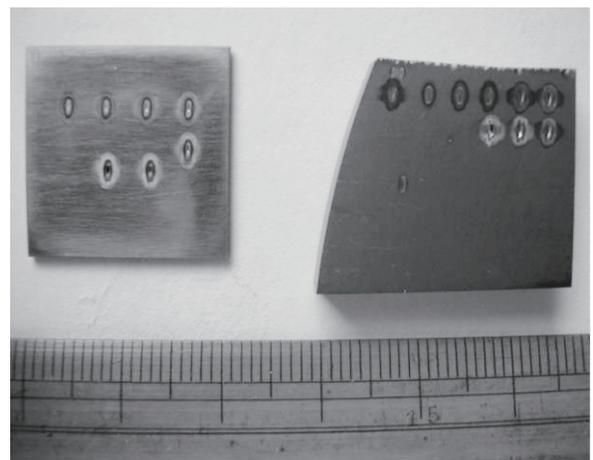


図1 W と SiC のレーザー照射後表面状態比較

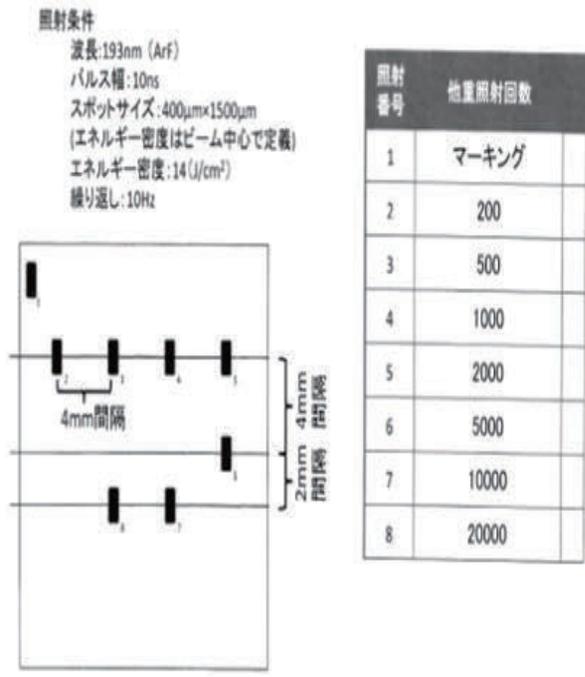


図2 Wの照射位置と位置毎の多重総照射回数

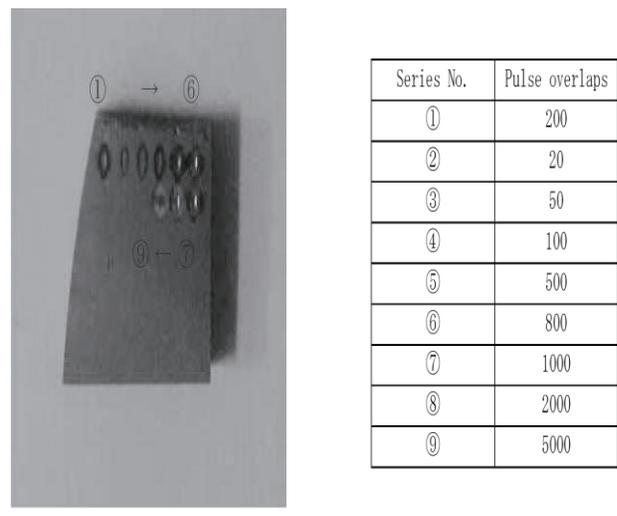


図3 SiCの照射位置と多重総照射回数

次元、3次元形状が得られた。これらの結果を用いて、深さの最大値を多重照射回数の関数として表示すると図4が得られた。

考察

図4を見る限りWとSiCの表面照射耐力に差は、ほとんどない。但し、レーザー照射強度がWの場合は、SiCの場合の約2倍弱になっているから、これから、WがSiCの約2倍弱の耐力を持つことがわか

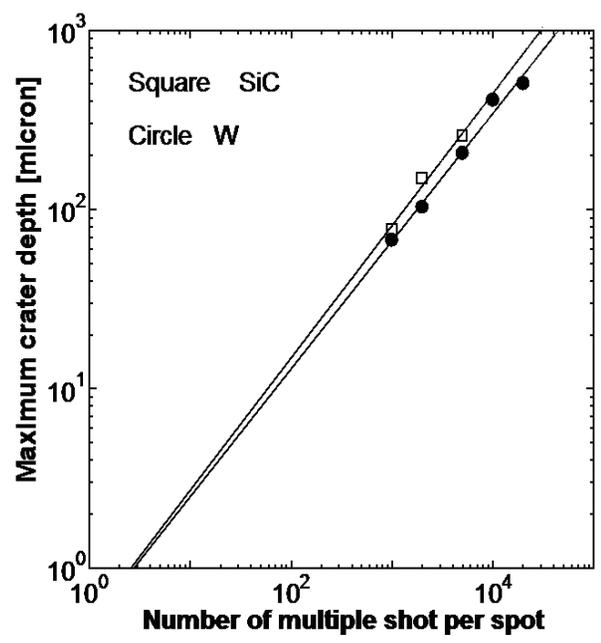


図4 クレーター最大深さによる表面耐力評価

る。次年度には、引き続き、当初目標の電子ビーム照射を実施し、表面耐力の評価と比較を行いたい。

謝辞

本研究の一部は、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、核融合科学研究所、九州大学応用力学研究所、ポーランド・オプトエレクトロニクス研究所、(株)キーエンス、(株)東海高熱工業などの支援を受けて行われた。

発表資料

[1]槽谷絢一ほか、異方性燃料ペレット入射法の改良と関連壁材料耐力の測定、レーザー学会第456回研究会「大エネルギー高出力レーザーを利用した科学研究」報告集、2014年1月8日、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター(2014)。

[2]K.Kasuya et al., Alternative Schemes to Realize Fast Ignition Inertial Fusions with Modifications of Target Injection Methods and Reactor Chamber Configurations, IAEA-TM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers, Nara, Japan, September 12, 2013, Book of Abstract, IAEA/F1-TM-43826, 23 (2013)。

多層構造材中の水素同位体拡散・透過挙動に関する研究
(酸化物分散強化型 F82H 鋼中の水素拡散挙動)

九州大学・総合理工学研究院 大塚 哲平

【目的】 核融合実証 (DEMO) 炉ではプラズマ対向材としてタングステンを溶射した低放射化フェライト・マルテンサイト鋼 (F82H) を利用することが検討されている。その基板材料である F82H 鋼では、高強度化のために内部に微小な酸化物を分散させた F82H 鋼が開発されている。鋼内部の酸化物は、鋼中の水素の蓄積および移行挙動に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、酸化物分散強化型 (ODS-) F82H 鋼にトリチウムを含んだ水素を 298K~473K の一定温度で内部深さ方向に拡散させ、その水素の深さ分布をトリチウムイメージングプレート (TIP) 法を用いて測定した。また、得られた水素深さ分布に拡散方程式の解をフィッティングすることにより水素拡散係数を決定するとともに、鋼内部の水素蓄積および移行挙動について考察した。

【実験】 試料として ODS-F82H 鋼の角柱試料 ($6\text{ mm}^2 \times 6\text{ mm}$) を用いた。鋼内部には、 Y_2O_3 粒子 (0.3 nm) が密度 $5 \times 10^{22}\text{ m}^{-3}$ で含まれている。比較として、F82H 鋼 (参照材) および表面に酸化膜 (膜厚約 $1\text{ }\mu\text{m}$) を形成させた F82H 鋼 (以後 Ox-F82H 鋼と呼ぶ) を用いた。すべての試料表面を鏡面仕上げとした。図 1 に示す直流グロー放電 (DCGD) プラズマ注入装置内で、トレーサーレベルのトリチウムを含んだ水素を注入した。この際、モリブデン製のマスクに空いた $5\text{ mm}\phi$ の穴から試料の一端面に $373\text{ K} \sim 673\text{ K}$ の一定温度で、15 分~1 時間注入した。DCGD については、62 Pa のガス圧で 400 V のバイアス電圧を負荷することにより行った。

水素注入後、トリチウムイメージングプレート (TIP) 法により、室温で 1 時間かけて注入面の水素分布を測定した。つぎに、試料を注入面に垂直に等分することにより、断面を切り出し、鏡面仕上げとした後に、TIP 法により水素の移動を防ぐため 203 K で 24 時間かけて断面の水素分布を測定した。

【結果および考察】 図 2 に試料の注入面および断面の水素分布を示す。図中、青色、緑色、黄色から赤色に近づくほど水素濃度が高いことを意味しており、注入表面では水素が $\phi 5\text{ mm}$ の注入領域に分布していることが示されている。参照材に比べ、Ox-F82H 鋼および ODS-F82H 鋼では、水素が均一に分布していた。断面では水素が内

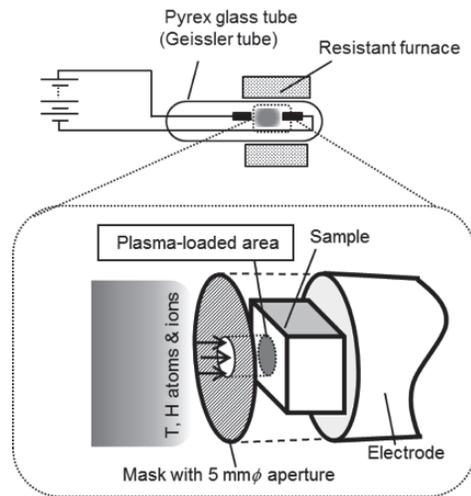


図 1 DCGD 法による水素注入実験の概念図

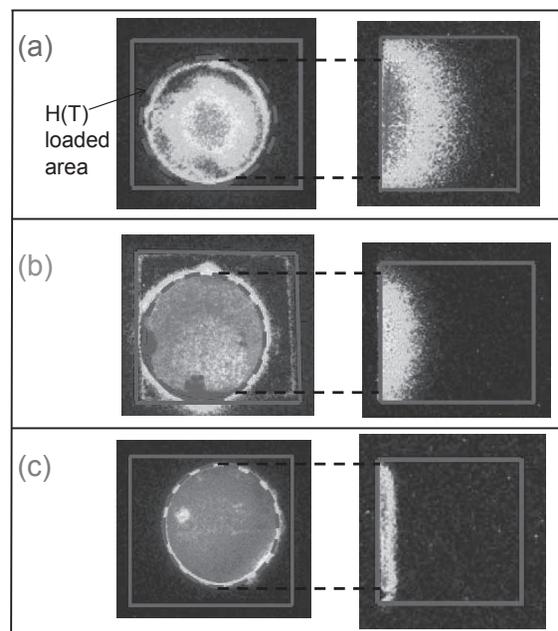


図 2 プラズマ注入面の水素分布 (a) F82H, (b) Ox-F82H and (c) ODS-F82H.

部に進入していたことがわかる。表面から深さ方向に水素濃度を数値化し、1次元の水素深さ分布としたものを図3に示す。図より、水素は、参照材では4 mm深さまで、Ox-F82H鋼では2 mm深さ、ODS-F82H鋼では0.8 mm深さまで侵入していたことがわかった。

プラズマ注入中に水素が表面水素濃度一定の条件で内部に拡散したと仮定し、フィックの拡散方程式の解析解を水素深さ分布にフィッティングすることにより各種F82H鋼中の見かけの水素拡散係数を決定した。

図5に、ODS-F82H鋼および、比較としてF82H鋼中の水素拡散係数の温度依存性を示す。F82H鋼中の水素拡散係数については、573 K以上の高温領域で得られたデータを低温領域に外挿した値に良く一致していた。一方、ODS-F82H鋼の水素拡散係数は、473 K近傍ではF82H鋼とほぼ同程度であったが、298 KではF82H鋼に比べ2桁程度小さくなることがわかった。本研究によって、F82H鋼中およびODS-F82H鋼中の（見かけの）水素拡散係数は、298 K～573 Kの温度範囲内で、
 F82H鋼: $D[\text{m}^2 \text{s}^{-1}] = 1.1 \times 10^{-7} \exp(-16[\text{kJ mol}^{-1}]/RT)$
 ODS-F82H鋼: $D[\text{m}^2 \text{s}^{-1}] = 2.2 \times 10^{-7} \exp(-30[\text{kJ mol}^{-1}]/RT)$
 と求められた。

本研究では、プラズマによって水素を注入すると、表面酸化膜および表面近傍に高濃度の水素が偏在することがわかった。また、この表面偏在水素とは別に、拡散性水素はさらに深い領域にまで拡散侵入していた。F82H鋼では、多量に注入された水素が鋼中に溶解し、格子間拡散により進入することがわかった。表面酸化膜のバリア効果や、内部の酸化物粒子による水素捕獲効果により、水素の侵入が抑制されることがわかった。

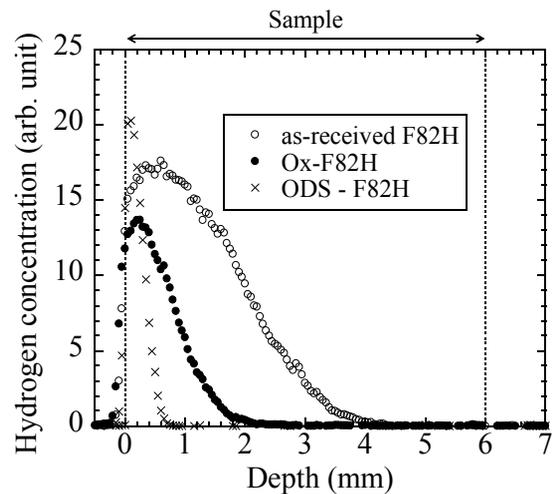


図3 F82H鋼, Ox-F82H鋼 and ODS-F82H鋼に373 Kで1 h注入した水素の深さ分布

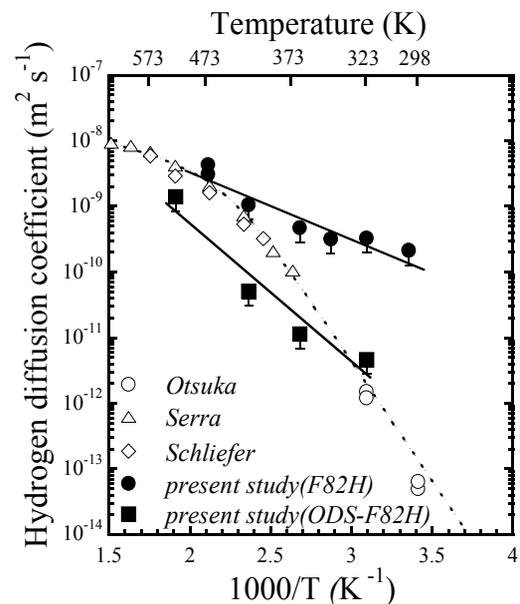


図4 F82H鋼（参照材）およびODS-F82H鋼中の水素拡散係数

耐熱構造機器の接合界面特性に及ぼす照射後熱処理の影響

茨城大学工学部 車田 亮

1. 研究目的

耐熱構造機器は、アーマ材とヒートシンク材との接合構造を有し、高性能化のために、アーマ材料には耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導性を有することが望まれ、ヒートシンク材料には強制冷却のための高熱伝導性を有するとともに、それらの接合技術の確立などが要求されている。一方、最近開発された無欠陥接合法 (NDB ; Non Defective Bonding) による耐熱構造機器の製作は、従来の熱応力緩和のための中間材 (Mo, Ni など) を挿入する必要がなく、その接合界面強度や熱伝達特性が著しく改善され、高性能を有する耐熱構造機器の簡単な製作が可能となっている。ただし、その接合界面の健全性や実用寿命の延長に関する研究が不十分であると言える。そこで、本研究は、今までの九大応力研との共同研究の実績を踏まえて、特に、NDB 法による耐熱構造機器の接合界面に注目し、その健全性評価および実用寿命の延長を目指して、接合界面の機械的特性と微細組織に及ぼす照射後熱処理の影響を究明することを目的とする。

2. 実験方法

本研究では、まず、タングステン (W) と無酸素銅 (OFC) を直接接合した NDB (Non Defective Bonding) 接合材料を制作した。タングステン材料は、日本タングステン (株) 製の純度 99.95 [%] の微細結晶粒純タングステン (JT-01W) および純度 99.99 [%] の粗大結晶粒純タングステン (JT-02W) を使用し、銅材料は、酸素量が 3ppm 以下と高純度材で高熱伝導性を有する OFC を使用した。

次いで、上記の W-Cu 接合材料に、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置を用いて、2.4MeV の銅イオン (Cu^{2+}) を、573 [K] において高温照射した。高温照射では、低照射損傷 LI (1.8dpa in Cu, 1.0dpa in W)、重照射損傷 HI (18dpa in Cu, 10dpa in W) を実施した。また、比較材としてアルミ合金の室温における銅イオン照射も実施した。

その後、超微小硬さ試験及び 3 点曲げ試験による機械的特性評価および SEM による微細組織観察を実施した。本研究におけるダイナミック硬さは、 $D_h = \alpha L/h^2$ で示される。ここで α は三角錐圧子の定数 ($\alpha = 3.8584$)、 L は試験荷重、 h は押し込み深さである。また、曲げ強度はまた、曲げ強度は、 $\sigma_{b3} = 3PL/2wt^2$ で示される。ここで、 P は試験荷重、 L は外スパンの距離、 w は試験片の幅、 t は試験片の高さである。さらに、光学顕微鏡を用いて、破面や微細組織の観察を行った。

最後に、イオン照射試験前後の機械的性質と微細組織の変化を測定した後、真空電気炉を用いて、673 [K] において 100 [min] 保持の熱処理 (HT) を行い、機械的特性と微細組織に及ぼすアニーリング効果を究明し、耐熱構造機器の健全性評価および実用寿命の延長について考察した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 は、照射後熱処理材の曲げ試験後の写真を示す。JT-01W/OFC 材および JT-02W/OFC は、共に接合界面での破断は観察されず、銅部分の著しい塑性変形を示している。この結果から、タングステンと銅との NDB 接合材料は、その接合界面強度に優れ、耐熱構造機器への応用が有効であることが分かった。

Fig. 2 は、未照射材、低照射後熱処理材および高照射後熱処理材の銅部分の微細組織を示す。その結果、銅の平均粒径は、照射後熱処理により、母材の約 3.5 倍に粒成長した。この熱処理による粒成長が、銅部分の軟化の原因であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究は、高性能を有する耐熱構造機器の開発を目的に、タングステンと銅との接合界面の機械的特性と微細組織に及ぼす照射後熱処理の影響を究明した。得られた結果を以下に要約して示す。

- (1) 高温照射後の硬さ試験により、タングステンは照射硬化が確認できたが、銅は熱の影響が大きく軟化した。また、照射後高温熱処理で、タングステン部分は硬さが回復したが、銅部分は照射温度と熱処理の影響により大きく軟化した。
- (2) 高温照射後の3点曲げ試験により、JT-01W/OFCとJT-02W/OFCの接合強度の増大が確認できた。照射後高温熱処理により、接合強度の低下が確認できた。その変化率を比較すると、微細組織を有するJT-01W/OFCは、高温照射や照射後熱処理による変化率が小さく、耐熱構造機器の材料に適していると考えられた。
- (3) 接合材の組織観察により、照射後熱処理材においても接合界面の破断は観察されず、十分な接合強度を有していることが分かった。また、銅部分の微細組織は照射後熱処理により、その平均粒径が約3.5倍に粒成長し、銅部分の軟化の原因であることが明らかとなった

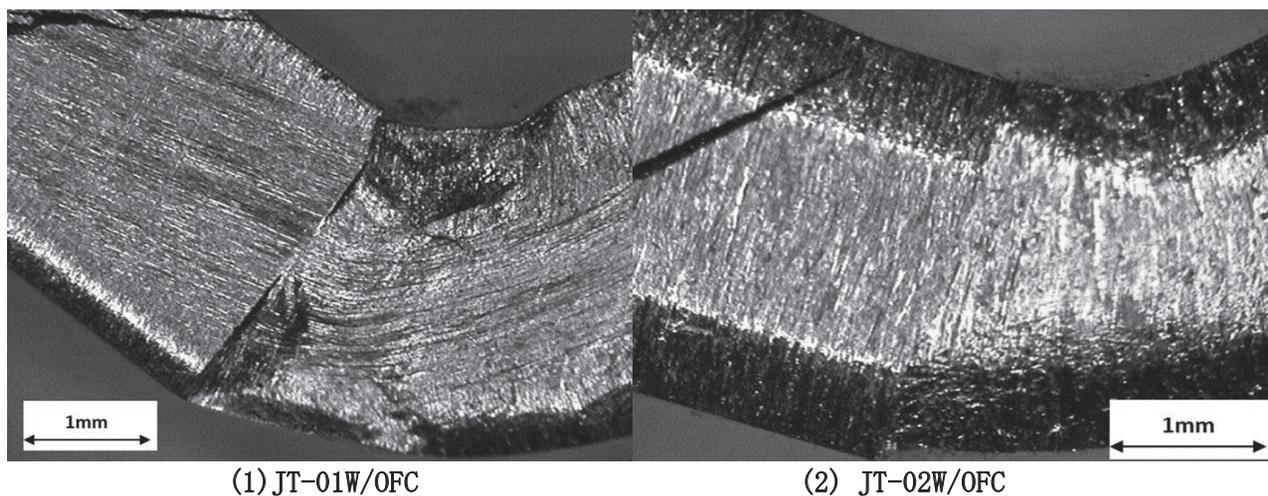


Fig.1 Bending deformation of heat treated joint materials after irradiation.

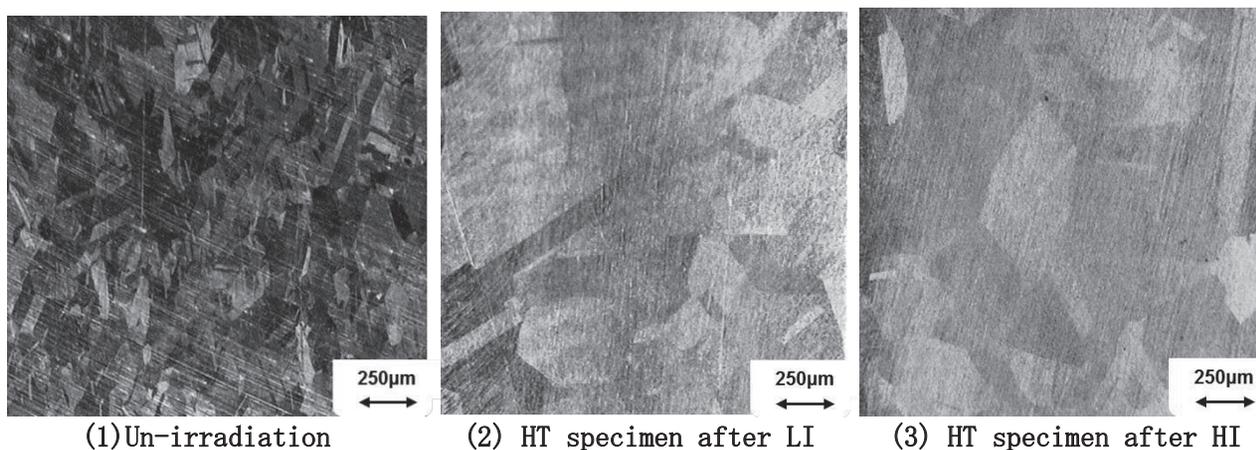


Fig.2 Microstructures of heat treated OFC after irradiation.

5. 研究組織

茨城大学工学部：車田 亮 大学院生：大和田祐輝
九州大学応用力学研究所：渡邊英雄

6. 研究成果報告

- 1) 大和田祐輝、車田 亮、他、日本機械学会関東支部第 21 回茨城講演会講演論文集、茨城大学、(2013. 9. 6), pp. 81-82.
- 2) 車田 亮、伊藤吾朗、杉田政道、佐久間隆昭、日本銅学会第 53 回講演大会講演概要集、関西大学、(2013. 11. 16-17), pp. 75-76.

圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果

岩手大学工学部マテリアル工学科 鎌田康寛

目的

Fe-Cr 合金は、機械特性、耐熱性、腐食特性に優れており、発電プラントなどの高温機器構造物として利用されている。しかし、高温域でのシグマ相形成による脆化や、350-500°Cの温度域での二相分離による熱脆化などの、熱環境下での劣化に注意が必要とされる。原子力・核融合分野ではさらに照射との複合効果が問題となり、その機構解明と非破壊評価法の検討が求められている。その基礎研究として我々は、①重イオン照射：中性子照射と似たカスケード損傷が生じる一方、放射化せず試料が扱い易い、②単結晶薄膜：試料全体が損傷し解析が容易、③磁気計測：非破壊評価への応用の可能性、の3つを組み合わせた研究を進めている。Fe-Cr合金の脆化挙動は、Cr濃度により異なると予想され、Cr濃度依存性を詳しく調べる必要がある。そのため、一度に多種類の試料を作製して特性評価を行う、コンビナトリアル型研究を提案している（科研費・基盤研究B、No23360418）。濃度が異なり非照射・照射領域を含む試料を一度に作製して、特性評価を一度に実施することで効率良く研究を進めることができる。このような考えに基づき、Cr濃度勾配を持つ単結晶Fe-Cr薄膜を作製してその一部を重イオン照射し、磁化過程に与える照射効果を調べた。

方法

図1に本研究で行った、コンビナトリアル型実験の模式図を示す。超高真空中で電子ビーム蒸着により試料を作製した。FeとFe-13%Crの2種類のターゲット材からの蒸着と直線駆動シャッターを組み合わせ、熱処理することで、MgO(001)基板の上にCr濃度に勾配をつけたFe-Cr(001)単結晶薄膜を成長させた（膜厚30nm、幅3.5mmでCr濃度0~13%の勾配）。その後、九大・応力研のタンデム型加速器を用いて、475°Cで2.4MeVのCu²⁺イオンを照射した（照射量：9.5×10¹⁸個/m²）。その際、穴の開いたメタルマスクを試料上に設置することで、非照射領域中に円形状（直径0.15mm）の照射域を作った。磁化過程を調べるために、磁気光学カー効果顕微鏡を用いて磁区観察を行った。

結果および考察

図2にCr濃度が3%の領域の磁区観察の結果を示す。点線で囲んだ円内部が照射領域で、その外部が非照射領域である。ここで図2の左右方向が磁化容易方向の<100>_{Fe-Cr}となっており、その方向に磁場を印加した。まず左方向に磁場を印加した単磁区状態（図2(a)）から、磁場を徐々に減少して反転すると磁場90eで逆磁区が発生して多磁区構造となった（図2(b)）。さらに磁場を印加し観察したところ右方向の磁区が成長し（図2(c)）、120eでは非照射・照射領域の境界でスパイク状の上向き磁区が残っていたが（図2(d)）、12.50eではすべての磁化が右方向の単磁区となった（図2(e)）。ここで、単磁区から多磁区になる臨界磁場をH₁、多磁区から単磁区になる臨界磁場をH₂と定義し、それらのCr濃度依存性を詳しく調べた。

測定された正負の臨界磁場の絶対値の平均値を、薄膜上の基準位置からの距離に対して整理した結果を図3に示す。Cr濃度が約9%以上では、臨界磁場を H_2 が大きくなっており、より強いピン止め効果が確認された。Fe-Cr2元合金の低温での固溶限について論争されており、最近、8-9%付近に固溶限があり、それ以上のCr濃度で二相分離が生じるという報告がなされている(参考文献)。本研究で得られた臨界磁場のCr濃度依存性の傾向と一致しており、イオン照射による二相分離の促進現象を磁氣的に捉えた可能性が考えられる。

参考文献：G.Bonny, et al, Scripta Materialia 59, (2008) pp.1193-1196.

成果報告：鎌田康寛, 兜森達彦, 小林悟, 菊池弘昭, 渡辺英雄, “Fe-Cr合金の照射損傷と磁性のコンビナトリアル型研究”, 日本AEM学会誌, (2014) *in press*.ほか

研究組織：鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟, 村上武：岩手大学工学部マテリアル工学科
渡辺英雄：九州大学応用力学研究所

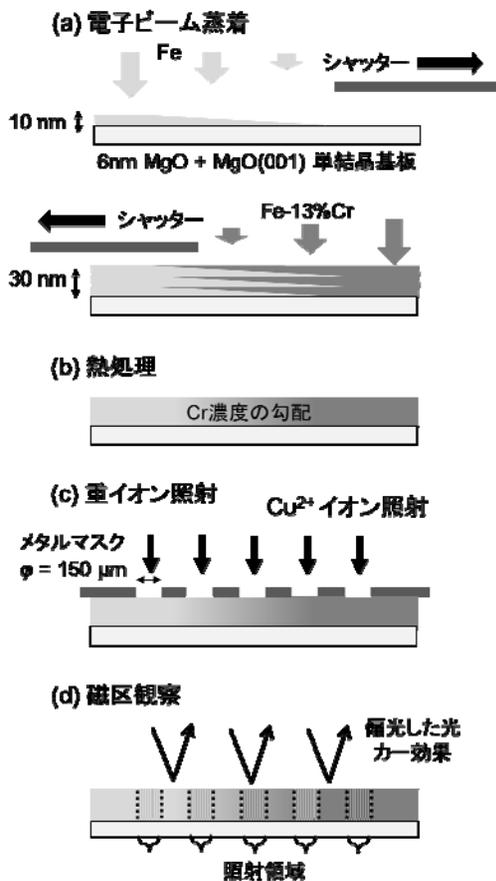


図1 コンビナトリアル型実験の模式図

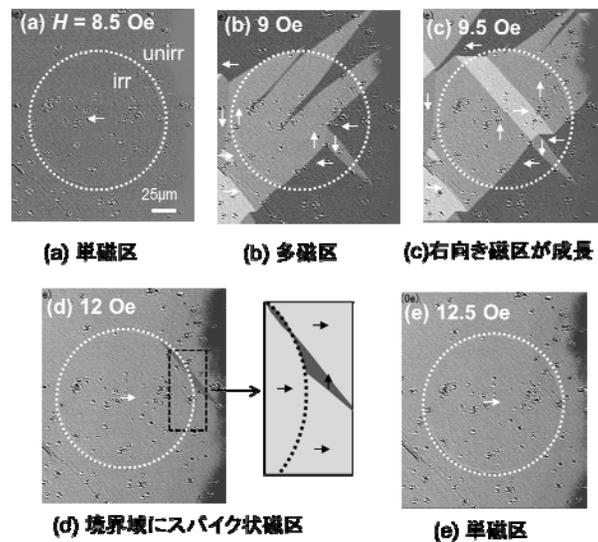


図2 Fe-3%Cr領域の磁区構造の変化

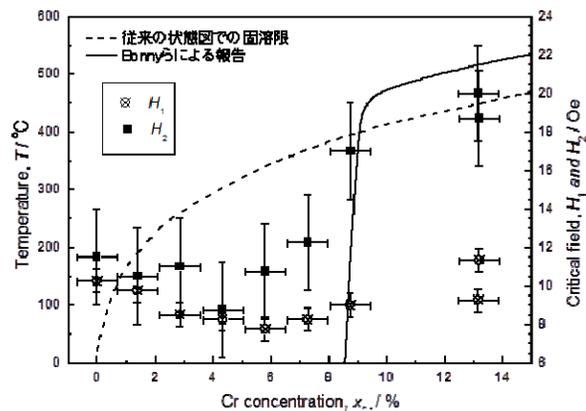


図3 固溶限と臨界磁場のCr濃度依存性

プラズマ中の多スケール・多プロセス現象の理論・シミュレーション研究

日本原子力研究開発機構 先進プラズマ研究開発ユニット プラズマ理論シミュレーショングループ
研究主幹 石井康友

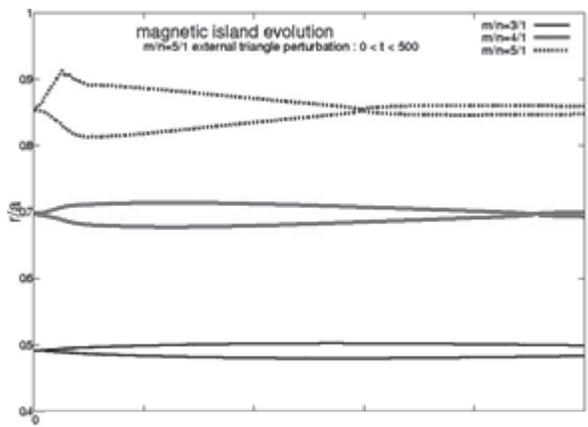
磁場に閉じ込められたプラズマに外部から磁場摂動が加わると摂動磁場に対応する共鳴面で強制磁場再結合が生じ、磁気島が形成され、閉じ込め磁場構造の変化を通じて、プラズマ閉じ込めに大きな影響を与える。この磁場再結合過程についてはMHD理論研究の対象としてこれまで多くの研究者によって調べられてきた。その多くは、再結合過程の基礎過程に関するもので、多くはスラブ形状、ないしは、円柱形状での現象を対象としている。核融合で対象とするプラズマはトロイダル形状であり、外部摂動が単一ヘリカルモードであったとしても、プラズマ中では、トロイダルモード間結合によって、多くのサイドバンド・モードが生成され、磁場構造の乱れに影響を与える。本研究では、軸対称トカマク・プラズマに対する外部摂動磁場の影響を数値シミュレーションによって調べた結果について報告する。

図1は、アスペクト比4の円形低ベータ・トカマク・プラズマに $m/n=5/1$ の摂動をプラズマ境界で与えた時のプラズマ中の磁気島の時間変化を示したもので、安全係数は軸上で2.01、プラズマ境界で6.11としている。プラズマはテアリング的に安定な配位で、プラズマ抵抗は 10^{-6} で、問題を簡単にするため、プラズマ中で均一としている。この配位では、 $m/n=5/1, 4/1, 3/1$ のモードが対象となる。摂動は次の三角形状として ($0 < t < 500$ の間だけに与えている) :

$$\begin{aligned} \psi(5/1) &= 10^{-4} t / 250 : 0 < t < 250 \\ &= 10^{-4} (500 - t) / 250 : 250 < t < 500 \\ &= 0 : 500 < t \end{aligned}$$

図が示す様に、 $m/n=5/1$ 磁気島の外辺は与えた摂動の時間変化に準じて変化している一方、内辺は、外部摂動が減少過程に入っても緩やかに増加しつづけ、その後、減少に転じている。これは、外部摂動増加時の、共鳴面での磁場の圧縮過程と外部摂動減少時の磁場の緩和過程の物理機構の差によるもので、一種の磁場エネルギーのポンプ効果を示している。さらに、外部摂動がゼロになった後も、さらに時定数の長い時間スケールで磁気島が残っている。トロイダルプラズマでは、 $5/1$ 磁気島とともに $4/1, 3/1$ の磁気島も生成されるが、生成過程も緩和過程も $5/1$ 磁気島よりもさらにゆっくりした時間スケールになっている。特に、外部摂動が消えた後の緩和過程は、プラズマ電気抵抗の低下とともに長時間にわたっており、このことは、外部摂動が消えても、その影響は長時間にわたりプラズマ閉じ込めに影響を与える事を示している。

次に外部揺動 ($5/1$) を連続パルス的に印加したところ、プラズマ中の電気抵抗値が低下する (高温プラズマになる) とともに、トロイダル結合により励起される磁気島 ($4/1, 3/1$) の振動数と印加された外部揺動の振動数・振幅の差異が拡大する事が分かった。その結果、トロイダル結合により励起される磁気島は、振動せず単調に成長するように見える事が分かった。これは、ELMや制御用磁場で強制的に励起される磁気島の性質が、ELMや制御用磁場の時間変動特性とは全く異なった成長特性を持つ可能性を示している。



25 FP-26

熱・粒子照射された微結晶粒タングステンの微細構造

大阪大学 大学院工学研究科 上田良夫

1. 目的

核融合炉プラズマ対向材料の第一候補材であるタングステンには、プラズマからの粒子負荷（水素同位体など）を受ける。特に ITER のダイバータは、非常に高い粒子負荷（フラックス $10^{24} / \text{m}^2 \text{s}$ 程度）を受け、タングステン中に侵入する水素同位体の密度が高くなることにより、応力が発生し、タングステン表面の結晶構造に影響を与えることが予想される。

そこで、本研究では、中性子照射影響が純 W 材料に比べて小さく、低温での靱性を強化した微結晶粒 W (TFRG-W) (東北大学、栗下先生製作) について、ダイバータ環境を模擬した重水素の照射を、オランダ基礎エネルギー研究所(FOM・DIFFER)所有の線形プラズマ装置 Pilot-PSI を用いて行った。照射後の TFGR W 試料について、応用力学研究所の透過型電子顕微鏡(TEM)を活用して、表面近傍の組織観察を行い、高フラックス照射環境下でのタングステン材料中の水素同位体の挙動と、材料の応答について理解を深める。

2. 実験方法・結果

本研究で使用した2種類のTFGR Wには、添加物として1.1wt%TiCと3.3wt%TiCが加えられている(以下、W-TiCとW-TaCと呼ぶ)。これらの材料は、東北大学の栗下先生が開発された材料であり、TFGR WにTiCやTaCを添加し、超組成加工を施すことにより、粒界を強化したタングステン材料であり、室温近傍でも延性があることが特徴である。結晶粒は1 μm 程度の大きさであるが、高温で処理することから結晶粒は再結晶化がすすみ粒の結晶方向はランダムである。

Pilot-PSI 照射実験では、重水素プラズマを、フラックス $10^{24} \text{ D}/\text{m}^2 \text{ s}$ で約 100 s 間照射した。表面温度は、最高で 400 $^{\circ}\text{C}$ に達した

3. 実験結果

重水素照射後の TFGR W 試料について重水素吸蔵量を測定した結果、表面近傍(100 nm まで)で非常に高い密度で重水素が吸蔵されていることが分かり、また、SEM 観察すると、1 μm 程度のブリスタが多数発生していることが分かっている。表面付近での材料組織の変化を調べるために断面を FIB で切断し、TEM 観察を行った。

以下にその結果を述べる。

図1に示したのは、プラズマ照射後の表面近傍の W-TiC 試料である。試料表面に薄い(10 nm 程度)の膜状の構造が観察された。膜とタングステンの表面の境界をはっきりと観察

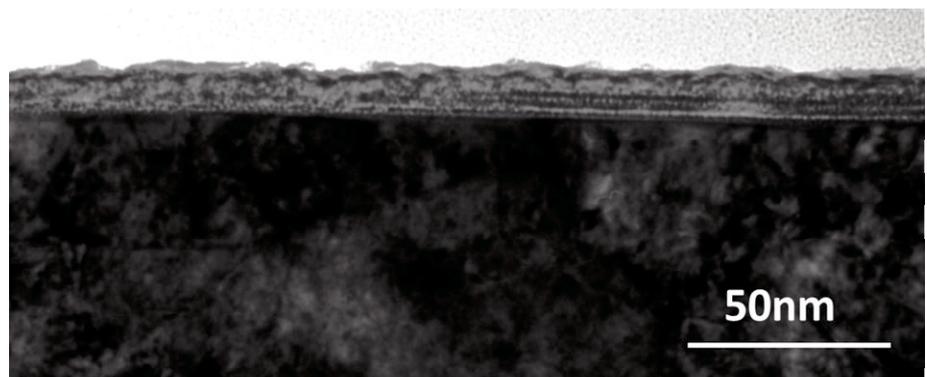


図1 高フラックス照射後のW-TiC試料

することができ、下地のタングステンが成長したものではなく、照射中に降り積もって形成されたものだと考えられる。また、空洞やクラックが観察され、複雑な形状をしていることが分かった。しかし、ブリスタの発生に起因するようなバブルやボイドは観察されず、重水素はタングステン中をバブルの形で滞留している訳ではないことを示唆していると思われる。重水素は膜中に共堆積というプロセスで吸蔵されている可能性が考えられるため、今後、元素分析等を行うことで、試料表面に存在する膜について詳しく調べる予定である。

図2に示したのは、プラズマ照射後の表面近傍のW-TaC試料である。(a)はブリスタの無い箇所での表面近傍の結晶構造を、(b)はブリスタの有る箇所での結晶構造をそれぞれ示している。図2(a)では、図1のW-TiCと同様に、表面に堆積膜を観察することができたが、その構造は異なっており、層状構造などは見られない。また、空洞やクラックの存在が確認される。図2(b)では、試料表面から深さ~200 nmの所に、粒界に沿った亀裂が確認された。この画像では、亀裂の上部にブリスタのような突起は観察され

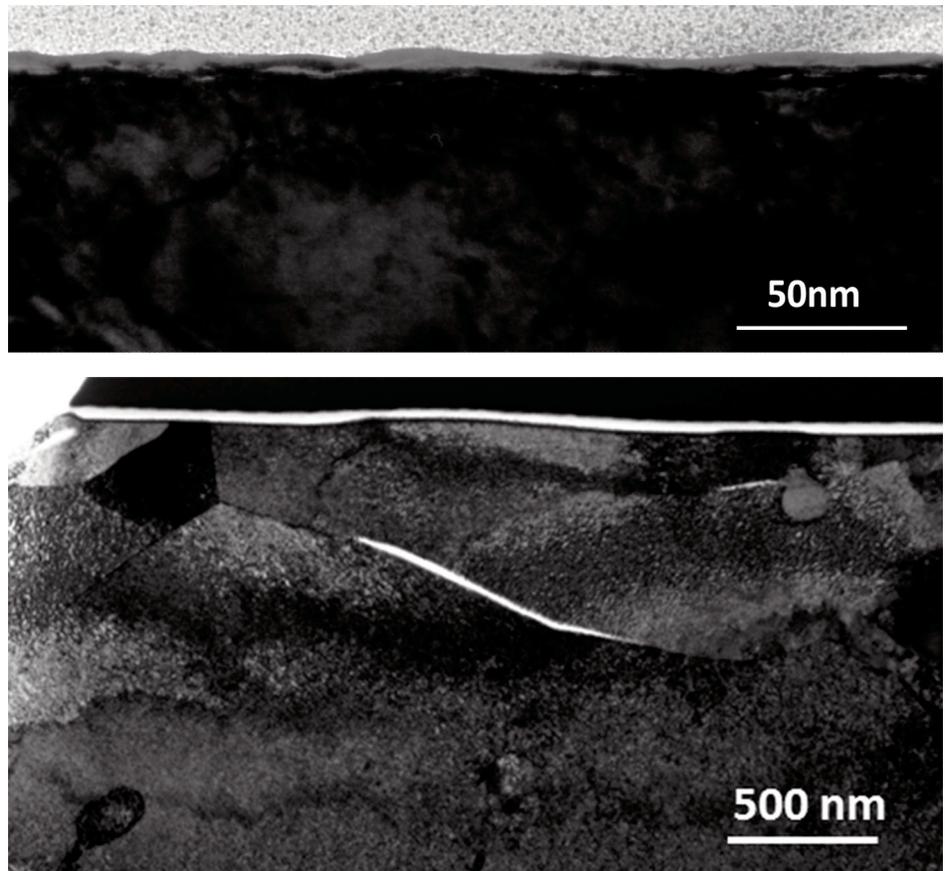


図2 高フラックス照射後のW-TaC試料

ないが、このほかに多数観察されることから、これに起因してブリスタが発生しているものと考えられる。この亀裂は、重水素照射中のW-TaCでは過飽和状態の溶解重水素がタングステン結晶に応力を及ぼし、それが緩和されるときにブリスタが発生したことの証拠である。重水素蓄積によって生成されるバブルやボイドの存在は確認されなかった。

今後の課題として、①堆積層の元素分析を行いその由来を探ること、②材料(W-TiCとW-TaC)による結晶構造の違いがなぜ発生したのかを、材料強度などの観点から明らかにしていく予定である。

4. 研究成果発表

1. 大宅他、”高フラックス照射環境下でのTFGRタングステン中の水素同位体挙動とその表面変化”。日本原子力学会 2014年春の年会、2014年3月、東京都市大学、東京都

1. はじめに

核融合装置の壁材料はプラズマとの相互作用により装置内で再堆積層およびダストを形成する。核融合燃料であるトリチウム（放射性物質）の堆積物への取り込みは放射性物質の炉内残留をもたらすばかりか、ダスト粒子飛散による放射性物質拡散の可能性があるため、安全面で大きな問題となっている。壁候補材の一つである炭素材料は低Z材で耐熱衝撃性に優れるため、核融合装置のプラズマ対向壁としてこれまで広く使用されてきたが、核融合燃料である水素同位体による損耗率が高いため多量の再堆積層およびダストが生成されること、またこれらの炭素系堆積物に多くの水素同位体を取り込まれることが問題視されている。一方で、次期プラズマ対向材として有力なタングステンも、水素・ヘリウム照射によるプリスタリングやバブル形成、高熱負荷時の破壊・溶融など多くの問題を有しており、すべてを満足する材料がないのが現状である。このような背景の下、本研究では SOL 領域を模擬した低温水素プラズマにおいて、壁との相互作用（炭素を含んだ壁材料を想定）によって生成されるダスト・再堆積膜生成の抑制とそのメカニズムの解明を目的としている。

2. 実験装置と方法

2.1. Heliotron-DR 装置

図1は Heliotron-DR 装置の写真と断面の概略図である。Heliotron-DR では 0.5 Pa 以下の低ガス圧でのプラズマ生成が可能である。トロイダル方向で異なるセクションに挿入された3つのアンテナから 2.3-3 kW の RF 電力を供給する。ヘリカル磁場は 200 G、トロイダル磁場は 40 G である。サンプルへの膜堆積実験で用いるガス種は H₂、CH₄、N₂ であり、流量はそれぞれ 20、1、1 sccm である。ここで、CH₄ は炭素不純物源として添加している。図1に示す照射台は温度制御可能であり、サンプルは Si である。また、Heliotron-DR 壁への堆積物評価実験には上記ガス種に加えて Ar 16.8 sccm, He 37.7 sccm を用いる。生成されるプラズマは QMS、分光計測によって評価した。また、Heliotron-DR を用いて照射されるプラズマの電子温度および電子密度を静電プローブで測定した結果、それぞれ 5-10 eV、(2.0-2.2)×10¹⁶ m⁻³ であった。次節から、今回報告する2つの実験方法について述べる。

3. 実験結果および考察

3.1. 試料表面の水素化炭素膜堆積に対する窒素導入の効果

図2に Si サンプルへの水素/メタンおよび水素/メタン/窒素プラズマ照射を行った際の炭素膜厚の表面温度依存性を示す。水素/メタンプラズマへの窒素添加により、400 K 以上の温度領域では膜堆積抑制効果がみられる。しかし、350 K 以下では窒素添加により膜堆積が促進さ

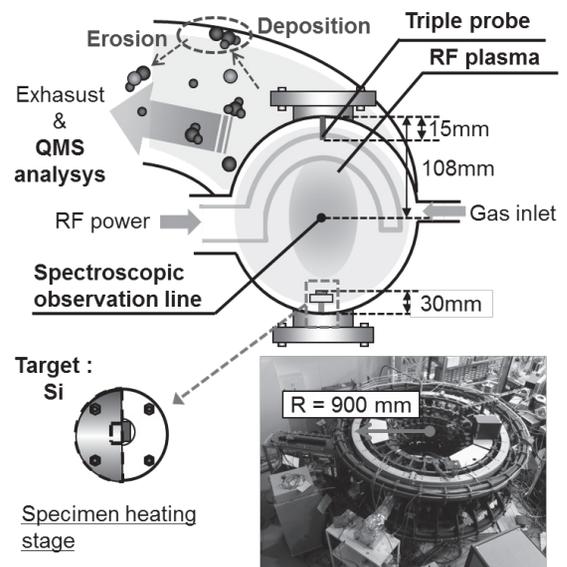


図1 Heliotron-DR 装置（写真と断面概略図）

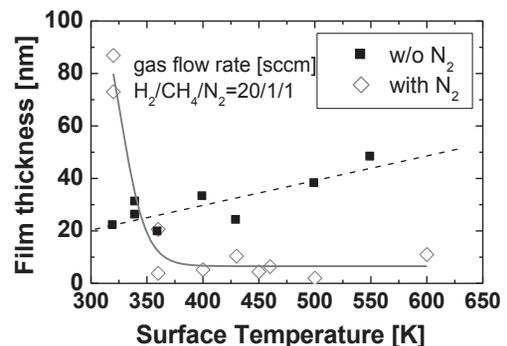


図2 Si サンプルの堆積膜の表面温度依存性

れている。図3には水晶振動式膜厚計 (QCM) によるプラズマ照射中の膜厚測定結果を示す。QCMは水冷されており、その水温から表面温度は約300 K程度と見積もられる。水素/メタンプラズマに窒素が添加されている場合は照射時間の経過とともに膜厚が増加していく傾向がみられ、低温領域 ($T_s < 350$ K) におけるSiサンプルへの膜堆積特性と一致する。また、水素/メタン/窒素プラズマ照射後 ($T_s = 320$ K) の堆積膜のXPS分析を行った。この結果を図4に示す。入射X線にはビーム径 $400 \mu\text{m}$ の $\text{Al K}\alpha$ 線を用いている。このサンプルから得られた C 1s ナローズペクトルは、 C-C/C=C 結合 (284.4 eV)、 C-N 結合 (285.5 eV) に対応する2つのピークに分離することができる。XPS分析結果から、比較的低温下 ($T_s \sim 320$ K) において水素/メタン/窒素プラズマ照射によって堆積する膜は C-C (C=C) また C-N 結合を含んでいることがわかった。プラズマの質量分析の結果、水素/メタンプラズマへの窒素添加によって N_2 ($m/z = 28$) だけでなく、 NH_3 ($m/z = 17$)、 HCN ($m/z = 27$) などのイオン電流値の増加がみられた。また、分光計測の結果、窒素を添加することで CN (388 nm) や NH (336 nm) といったN系粒子からの発光強度が増加した。

図5に、水素プラズマへメタン、窒素ガスを順次添加していった際の分圧時間変化を示す。図5では、メタン導入時に比べて窒素導入時の分圧値変化が非常に遅いことがわかる。この遅い変化はガス状態の場合にはみられず、プラズマ状態でのみみられるため、プラズマと壁の相互作用が影響していると考えられる。プラズマへの窒素導入時における N_2 ($m/z = 28$) などのN系粒子にかかわる時定数は、ガス状態のそれに比べて10倍近く大きい。また、図6には水素/メタンプラズマへ窒素を導入した際の発光強度変化を示す。窒素導入によって CH (431.3 nm) の発光強度は変化しないが、 CN (358.2 nm) や NH 、 N_2 (391.4 nm) は分圧値変化と同様ゆっくりとした発光強度の増加がみられる。 H-C-N 系においては $\text{C}\equiv\text{N}$ の三重結合がもっとも結合エネルギーが高く、一度 HCN が生成されると揮発性分子としてそのまま排気されやすい。また、図7に膜堆積/抑制の概念図を示す。窒素があり堆積温度が低い場合 ($T_s < 350$ K) には、活性な CN ラジカルが表面で生成されず、膜中に窒素原子を取り込んで膜が堆積していくものと思われる。一方、堆積温度が高い場合 ($T_s > 400$ K) には表面で HCN 分子が生成しやすく、 C 原子を取り去るため炭化水素膜が堆積しにくいと考えている。図5-6に示される、窒素導入に

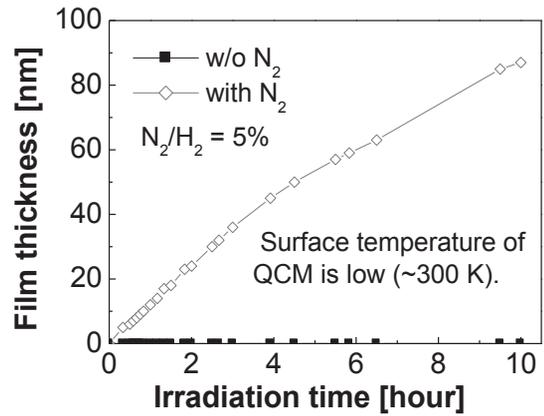


図3 プラズマ照射中の膜厚時間変化 (QCM: 水晶振動式膜厚計)

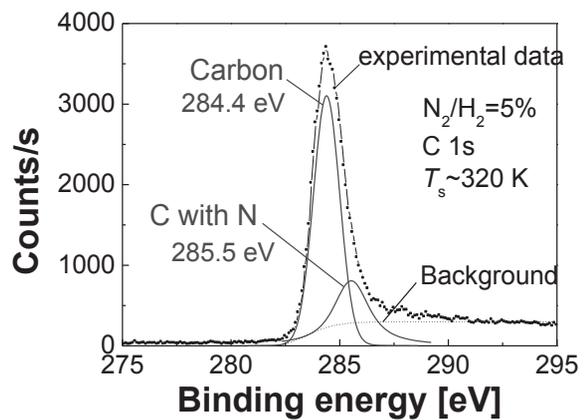


図5 水素/メタン/窒素照射後試料のXPS分析結果

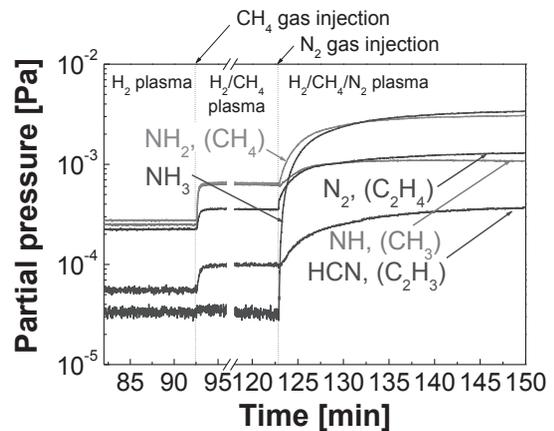


図4 水素プラズマへのメタン、窒素導入時の分圧時間変化

よる遅い分圧値および分光の時間変化は、CN, NH_x 系粒子の壁への付着、堆積物内部への侵入を示していると思われる。

3.2. Ar, He 放電による堆積物の評価および除去

Heliotron-DR 内壁を水素/メタンまたは水素/メタン/窒素プラズマでコーティングした後、Ar または He 放電による壁の堆積物脱離実験を行った。このときの実験条件を表2にまとめた。表には堆積フェーズでの窒素の有無、ベーキングの有無、また脱離プラズマの種類、そして脱離プラズマ放電中に検出された H₂ 分圧の積分値 (Ar または He 放電開始より 100 分間) を示している。ここでは、Ar、He 放電中に検出される各分圧の積分値を、壁の堆積物への吸蔵量とみなす。Heliotron-DR の壁温は、ベーキング無で~310 K、ベーキング有で~335 K となる。この値は Heliotron-DR 外壁 6 か所での温度測定結果を平均したものである。Ar 放電、また He 開始時には各分圧値の上昇がみられた。これらは水素/メタンプラズマで堆積していた炭化水素膜がアルゴンプラズマのスパッタリングによって放出されたものである。

図8に He 放電中における H₂ 分圧値の変化を示す。A-C のどの条件においても、時間の経過とともに H₂ 分圧値は減少していき約 100 分でほぼ飽和した。A と B を比較すると、A のほうが H₂ 分圧が大きく、窒素添加による水素吸蔵抑制効果がみられる。C の条件がもっとも H₂ 分圧が小さくなっており、窒素有で壁温が高い場合に、より水素吸蔵が抑制される傾向がみられる。

4. まとめ

本研究では SOL 領域を模擬した低温水素プラズマにおいて、壁との相互作用 (炭素を含んだ壁材料を想定) によって生成される再堆積膜生成の抑制とそのメカニズムの解明を目的として Heliotron-DR 装置を用いた①試料表面への膜堆積実験、②Ar または He 放電による脱離実験を行った。以下にそれぞれの結果についてまとめた。

- ① Si サンプルへの膜堆積に対する窒素導入の効果はサンプルの表面温度に強く依存する。堆積温度が~400 K 以上の場合には窒素導入による膜堆積抑制効果が得られた。一方、堆積温度が~320 K の場合には窒素導入によって膜堆積が促進された。このサンプルを XPS 分析した結果、C-C や C-N 結合を含んだ膜が生成されていることがわかった。窒素導入による N 系粒子に関わる粒子の分圧値および分光の遅い時間変化は、NH_x 系粒子の壁への付着、堆積物内部への侵入を示していると思われる。
- ② 水素/メタンおよび水素/メタン/窒素放電後の Ar、He 放電において脱離する水素量は窒素有のほうが少なく、窒素添加による水素吸蔵抑制効果がみられた。堆積フェーズに窒素を添加することで、揮発性の HCN、NH 分子が生成され、膜中への水素残留を抑制すると考えられる。

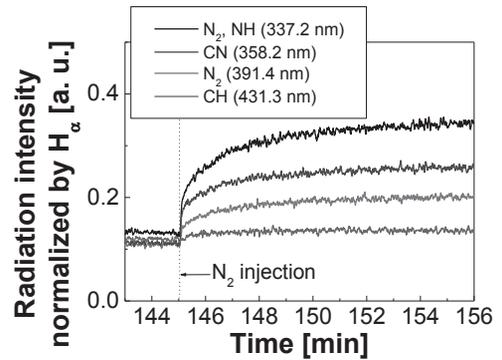


図6 水素/メタンプラズマへの窒素導入時の分光時間変化

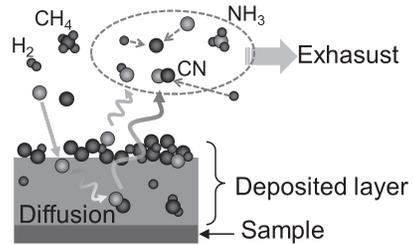


図7 膜堆積/抑制の概念図

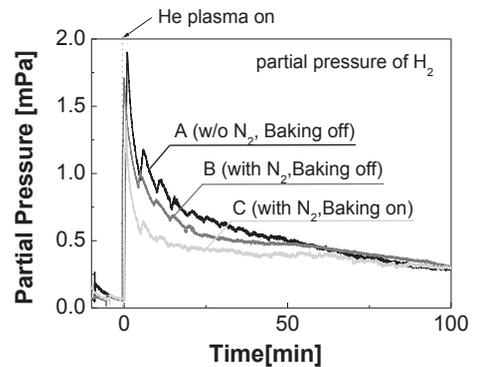


図8 He 放電中の H₂ 分圧値変化

SiO₂ 中におけるヘリウムイオン照射効果

琉球大学教育学部 岩切宏友, 村吉範彦, 狩俣佑妃

九州大学応用力学研究所 渡邊英雄, 吉田直亮

京都大学エネルギー理工学研究所 森下和功

【研究の目的】

アモルファス SiO₂ (石英ガラス) は, その汎用性や機能性などから, 物理, 化学, 物質科学, 地球科学を始めとする科学技術の諸分野において極めて重要な物質である。また, 物質中におけるヘリウムの挙動は, 核融合研究や, 地殻・マントルや海水などの地球物質の循環を探る上で重要である。特に核融合炉で使用する材料とヘリウムとの相互作用については研究が進んでおり, 結晶中における振る舞いについてはよく理解されるようになってきたが, アモルファス材料中におけるヘリウムの挙動については未知の部分が多い。平成 24 年度までの応用力学研究所共同利用研究により, 結晶性 SiO₂ にヘリウムを照射すると照射領域がアモルファス化し, その領域においてヘリウムバブルの形成が行われれないという結果が得られている。金属や炭素, 無機化合物における従来の研究では, ある程度のエネルギーを有したヘリウムを照射すると, 材料中には必ずヘリウムバブルが形成される傾向にあるため, SiO₂ 中におけるヘリウムの挙動は独特であり興味深い。

そこで, 本研究では分子動力学法を中心としたコンピュータシミュレーションにより, アモルファス SiO₂ 中におけるヘリウムの基礎的な挙動を解明することを目的とする。

【研究方法】

分子動力学法は 2 体 (あるいはそれ以上) の原子間ポテンシャル関数の下に, 古典力学における運動方程式を解いて, 系の静的, 動的安定構造や, 動的過程を解析する手法である。固体物質が熱平衡状態 (安定して実現している状態) にある場合には, ヘルムホルツの自由エネルギーが最小になる。適切な条件を設定して分子動力学計算を行うと, ヘルムホルツの自由エネルギーが最小となる条件 (原子配置) を導出することができる。本研究では NTV アンサンブル法 (粒子数, 温度, 体積が一定) および NTP アンサンブル法 (粒子数, 温度, 圧力が一定) を用いることで最適な構造を求めた。

本研究ではアモルファスおよび結晶性の SiO₂ 中におけるヘリウムの挙動についての分子動力学計算を行った。Si-Si 間および O-O 間, Si-O 間については Muneto (2007) による改良された Tersoff 型の多体ポテンシャルを, He-O 間および He-Si 間については Lennard-Jones の 2 体ポテンシャルを用いた。

【研究結果】

まず, 結晶数 576 個のクリストバライト SiO₂ 結晶を NTV アンサンブル法の下で 5000 K まで加熱し, 液体の SiO₂ を作成した。その後 2000K まで冷却し, 今度は 1atm (大気圧) の条件を用いた NTP アンサンブル法により 10ps 程度保持し, アモルファス SiO₂ を作成した。その後 300K ま

で冷却し、安定したアモルファス相が形成されていることを確認した（2体相関関数とボロノイ多面体解析による）。作成したアモルファス SiO_2 およびクリストバライト結晶を図1に示す。

次に、この構造中に He 原子を1個加え、 1.0 fs ($1.0 \times 10^{-15} \text{ sec}$) 間隔で500万ステップの計算を行い、He 原子の軌跡および平均二乗変位を得た。同様の計算をその他の結晶性 SiO_2 （クリストバライト、low-quartz、スティショバイト）についても行った。その結果、結晶性を有するクリストバライト中では一般的な結晶材料と類似した拡散挙動を示すが、アモルファス SiO_2 中では通常の結晶性材料と大きく異なる「偏在的な」拡散挙動を示すことが明らかになった。このような特殊な拡散挙動がヘリウムバブルの形成を阻害している可能性がある。また low-quartz（密度 2.65 g/cm^3 ）においては Z 軸方向に優先的な拡散が行われ、X 軸および Y 軸方向への拡散はまれであった。その際、実験温度の上昇（ $1000 \sim 2400 \text{ K}$ ）にともないジャンプ頻度はしだいに高くなっていった。一方、スティショバイトにおいては、きわめて高い温度（ 7000 K ）下においてもヘリウム原子の拡散は見られなかった。これはスティショバイトが高圧下で形成される結晶のため、密度が高く（ 4.51 g/cm^3 ）、格子間に空間的余裕がないためだと考えられる。このように、 SiO_2 においては結晶構造によってヘリウムの挙動が大きく異なり、ヘリウム照射効果の研究対象として興味深い材料である。

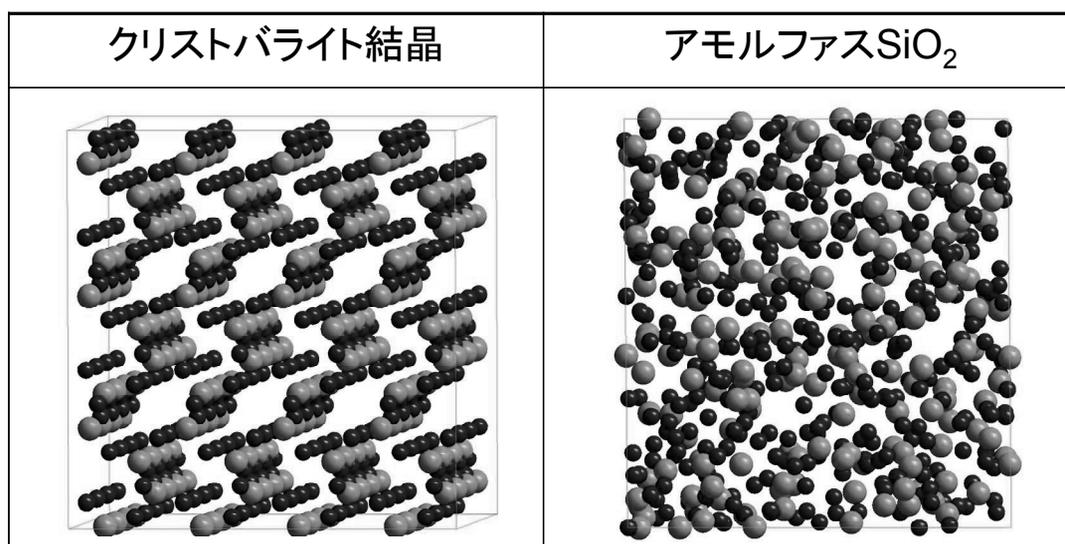


図 1 クリストバライトと、本研究で計算したアモルファス SiO_2 の結晶構造

(成果発表)

- 岩切宏友, 仲盛令, 吉田直亮, 加藤太治, 「ヘリウムイオン照射された CaF_2 単結晶における光吸収特性」, 2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会
- H. Iwakiri, M. Tani, Y. Watanabe, N. Yoshida, “Radiation damage and deuterium trapping in deuterium-ion-irradiated Fe-9Cr alloy”, J. Nucl. Mater., 444 (2014) 138-141

【目的】 タングステン (W) は周期律表VIA 族に属し、他の材料の追随を許さない多くの優れた特性を有する。例えば、金属で最も高い融点 (3410°C)、最も低い熱膨張率や蒸気圧、純鉄の3倍もの高熱伝導率、優れた粒子耐損耗性、極めて低い水素インベントリ等である。しかしながら、W材料は、熱負荷に晒されると容易に再結晶・粒成長を生じて著しく脆化する (再結晶脆化)。合金元素や分散粒子を含まず、加工組織をもつ純W板材の再結晶温度は 1200~1300°Cと低く、Wの融点の1/3程度にすぎない。したがって、純W板材は再結晶が生じる 1200°C以上では使用できず、Wのもつ多くの優れた高温特性がほとんど活用されていない。また、純W板材は、通常、素材形状と素材サイズに制約を受ける。小さな円柱やブロック等の小型単純形状品は、その製法上比較的容易に製作が可能である。しかし、大型品になると製造上使用する焼結や鍛造等の設備に限界があるため、大型素材の製作が難しく、また複雑形状品では、難削材である純W材を円柱やブロックから加工しなければならず、膨大な加工コストが必要となってしまう。そのため、実質的に純W材においては大型複雑形状品の製作は困難である。そこで、これらの問題を解決するために、粉末冶金技術を結集し、焼結後、熱間等方圧加圧法(HIP)を使用することによる新たな製法による純W新材料 (純タングステン(W)焼結体) が開発された。この製法によれば、従来の製法に比べて大型で複雑形状品の製作が可能で、また、圧延鍛造を行っていないため、再結晶のドライビングフォースとなるひずみも少ないと予想されるため、再結晶による脆化も少ないことが期待される。本研究では、この純W焼結体の材料評価の一環として、特に、高温特性を評価することを目的として、熱負荷実験を行った。

【実験】 本年度は、熱間等方圧加圧法(HIP)を使用することにより作製した2種類の純タングステン(W)焼結体を無欠陥接合法(NDB: Non Defective Bonding)により内径 7mm φの冷却管付の無酸素銅 (OFHC) に接合することによりテスト用のモックアップ試験体を作製し、熱負荷実験を行った。この接合法で作製した接合材は、従来の冶金接合法で作製したものと比較し、Wと銅の接合強度や熱伝達特性が著しく改善されていることが明らかになっている、また、接合界面におけるイオン照射による界面組織変化等が調べられている。使用した純タングステン(W)焼結体は、微細粒純W材(ST-01)及び粗大粒純W材(ST-02)の2種類を用いた。5 mm x 5 mm x 19 mmの棒材を4本、冷却管付の無酸素銅の表面にNDB法により接合した。このW/OFHC接合試験体を強制水冷却の下で電子ビーム照射加熱による熱負荷を与え、熱応答実験を行うと共に、繰り返し熱負荷実験を行った。加熱は、立ち上げ 20s、定常 40s、立ち下げ 0s、休止状態 40 sで行った。冷却水の流速は 18.8 m/s、入り口温度 23 °C、圧力 0.7 MPaである。照射中、表面温度を放射温度計で測定すると共に、W材とOFHCの界面部から 1.5 mmのOFHC側の深さ 7mmの部分の温度を熱電対で測定した。また、熱流束は、試験体にバイアス電圧を印加することにより、2次電子及び熱電子の放出を抑えた状態で電流測定することから評価した。図1に試作した試験体を示した。

【結果】 図2には、W(ST-01)/OFHCに対して熱流束を変化させた時のビーム電流、表面及びOFHCの温度の時間変化を示した。20 sの熱負荷に対して表面及びOFHCの温度は定常状態に達していることがわかる。図3(a)及び(b)にW(ST-01)/OFHC及びW(ST-02)/OFHCの表面及びOFHCの温度の熱流束依存性を示した。立ち上げ 20s、定常 40sの加熱で、温度は定常となり、一定の定常時の温度を示している。表面及び無酸素銅の温度は、熱流束が大きくなるにつれて直線的に増加することがわかる。また、

W(ST-01)/OFHC の表面温度は低熱流束側で直線より大きな温度となっているが、これは、表面の凹凸によりポットスポットが発生し、この影響によるものと考えられる。また、これまでの熱負荷実験の結果と比較して、W(ST-01)/OFHC は温度上昇が低く、W 材の特性及び接合が極めて良好であることがわかる。一方、W(ST-01)/OFHC の場合は、W(ST-01)/OFHC と比較して、同じ熱流束でも無酸素銅の温度が高くなっているが、これは、非等方的な温度分布となっているためであると考えられる。図 4 には、W(ST-01)/OFHC の試験体について、14.6 MW/m² の熱流束で、50 回の繰り返し熱負荷を行った際のピーク電流、表面及び OFHC の温度の時間変化を示した。繰り返し熱負荷中の最高到達温度等の温度変化はなく、健全性が保たれることがわかった。

【まとめ】 熱間等方圧加圧法(HIP)を使用することにより作製した 2 種類の純タングステン(W)焼結体を無欠陥接合法(NDB: Non Defective Bonding)により無酸素銅 (OFHC) に接合することによりテスト用の試験体を作製し、熱負荷実験を行った。純タングステン(W)焼結体の内、微細粒純 W 材(ST-01)は、熱負荷による温度上昇が少なく、また、繰り返し熱負荷実験による熱疲労にも健全性が保たれており、優れた熱特性を持つことが明らかとなった。また、純タングステン(W)焼結体の内、粗大粒純 W 材(ST-02)に関しては、表面温度上昇が大きく、素材及び界面の接合状態を含め、今後検討する必要がある。

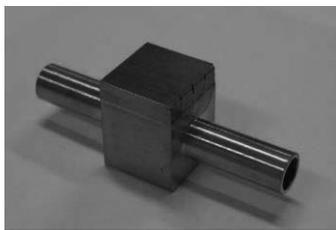


図 1 W 試験体

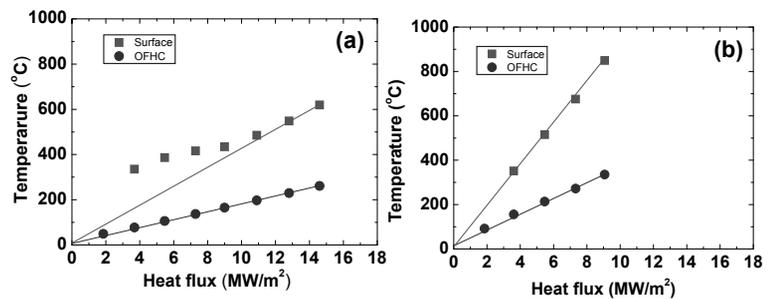


図 3 W(ST-01)/OFHC(a)及び W(ST-02)/OFHC(b) の表面及び OFHC 温度の熱流束依存性

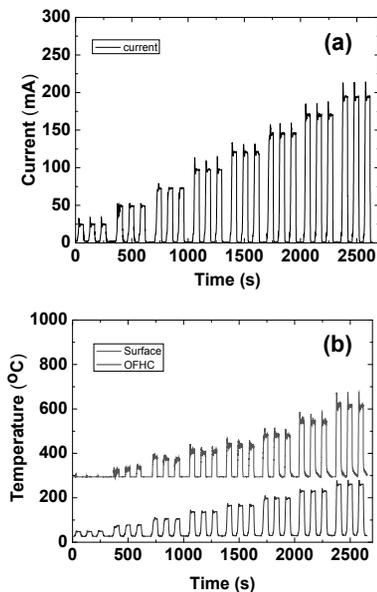


図 2 W(ST-01)/OFHC の熱応答 (a)試料電流、(b)表面及び OFHC の温度

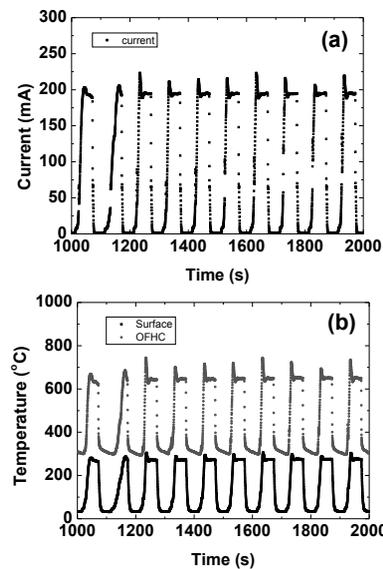


図 4 W(ST-01)/OFHC の繰り返し熱負荷実験中の熱応答 (a)試料電流、(b)表面及び OFHC の温度

1. 目的

核融合科学研究所では、低放射化バナジウム合金の高温強度と耐照射脆化特性をさらに改善するため、微量 Y 添加をした先進的なバナジウム合金の試作開発を行っている。これまでに、Y 添加で酸素不純物による固溶硬化を低減できることが分かっている。酸素は照射欠陥と相互作用して照射硬化を促進させる元素であるため、これを微量 Y 添加で制御できれば照射硬化を軽減できると期待される。

材料の使用温度下限を定めるのは比較的低温(400~500°C)での中性子照射脆化であり、上記の新合金についても従来のバナジウム合金と比較するために照射データを取得するのが急務である。中性子照射試験は試験体積が限られ、また照射の機会も少ないために、照射量や照射温度等の照射条件を系統的に変化させた試験が困難である。一方、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置は、短時間で大きな材料損傷量を与えることができるために、試験条件を系統的に変化させた照射試験が可能となる。ただし、材料損傷が試料表面の1 μm以下に限られること、短時間で大きな損傷を与えるために照射損傷組織発達が変化するため、得られた照射データからバルク材の中性子照射特性を予測するには、系統的な実験とモデリングによって照射損傷メカニズムを理解する必要がある。

本研究では、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置を用いて、微量 Y 添加バナジウム合金に重イオン照射実験を行い、低温での照射脆化の主因となる照射硬化とそのメカニズムを、微小押込みと電子顕微鏡観察による照射損傷組織観察から明らかにする。

2. 実験方法

大学共通材料である V-4Cr-4Ti-0.019O (NIFS-HEAT-2)及び、これに微量 Y 添加した V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.0090O に対し、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置を用いて0.76~7.6 dpa の3MeV Cu イオン照射を行った。照射温度は200°Cである。照射後の試料について、核融合研の微小押込み試験機で表面の照射硬化を測定した。有限要素法解析(FEM)により、微小押込み試験を模擬し、中性子照射試験で得られた照射硬化データを入力して、イオン照射による硬化を模擬することを試みた。中性子照射はベルギーのBR-IIで行った。照射温度は60°C、照射量は 9×10^{23} n/m² (E > 1 MeV)であり、これは0.18 dpaにあたる。

3. 結果と考察

図1に、イオン照射後の押込硬さの押込み深さ依存性から推定した、バルク相当硬さを示す。Y 添加にかかわらず、照射量とともに照射硬化が大きくなり、やがて飽和する傾向を示した。照射硬化量に違いは見られず、200°CのCu イオン照射では、Y 添加効果が無いことが明らかになった。一方、図2には60°Cでの中性子照射後の引張曲線を示す。照射にY 添加の有無にかかわらず、一樣伸びが著しく減少し、ここでもY 添加の効果は確認されなかった。これまで、400°C中性子照射において、Y 添加による照射硬化の軽減と、延性の改善が報告されていたが、より低温域である200°C以下ではその効果が無いことが明らかとなった。

中性子照射硬化のデータを用いて照射後の真応力-真歪曲線を推定し FEM 解析に組み

入れて、イオン照射後の押し込み試験における荷重-深さ曲線を模擬した結果を図3に示す。計算結果は実験結果より小さく、すなわち同じ照射損傷量ではイオン照射の方が照射硬化が大きいことを意味する。イオン照射では損傷速度が大きいいため、照射欠陥（転移ループ）の核生成が促進されるためと理解することもできるが、FEM解析に組み入れた真応力-真歪曲線の妥当性、イオン照射と中性子照射では照射温度が異なること等に問題があり、今後さらに照射実験データを充実させる、例えば中性子照射後の押し込み試験や圧縮試験を行って真応力-真歪曲線を正確に求めること、そしてFEM解析の改良が必要である。

4. 成果報告

(1) Takeshi Miyazawa, Takuya Nagasaka, Ryuta Kasada, Yoshimitsu Hishinuma, Takeo Muroga, Hideo Watanabe, Takuya Yamamoto, Shuhei Nogami and Masahiko Hatakeyama, *Evaluation of irradiation hardening of ion-irradiated V-4Cr-4Ti-0.15Y alloys by nano-indentation techniques*, Journal of Nuclear Materials, 投稿済み査読中

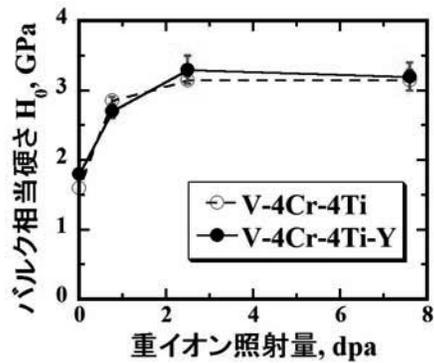


図1 200°C、Cu イオン照射後の押し込み硬さ

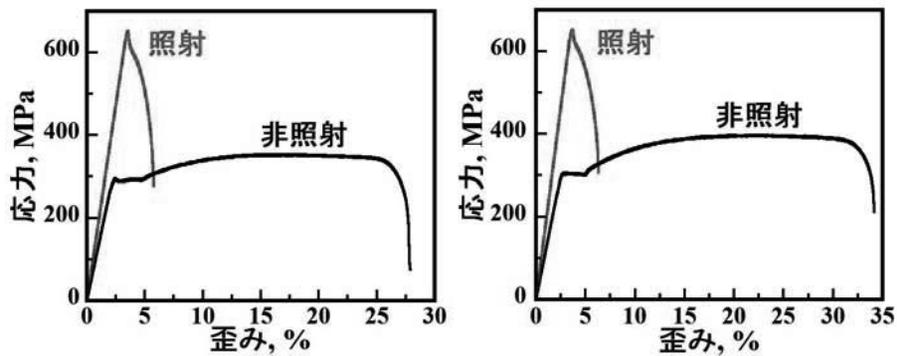


図2 60°C、0.18 dpa 中性子照射後の引張曲線 (左: Y 無添加合金、右: Y 添加合金)

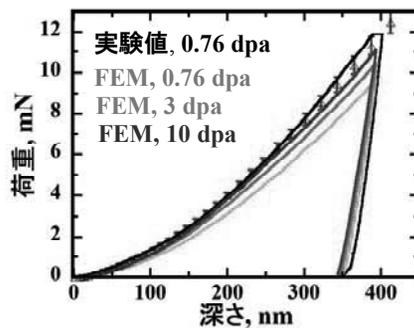


図3 有限要素法による押し込み荷重-深さ曲線の模擬結果 (Y 無添加合金)

研究会「各種磁場配位での周辺揺動研究」

広島大学大学院工学研究院 西野信博

1. 本研究集会の目的と概要

コストパフォーマンスの高い核融合炉を実現するうえで、高閉じ込め性能を有するプラズマを作ることは必要不可欠である。これを達成するためには、閉じ込め性能を決めている周辺乱流を抑制、制御することが必須である。約 15 年前に発見された、所謂、Blob(形状からは Filament)と呼ばれる周辺乱流が閉じ込め性能を決める支配的要因であることは、現在、常識となっている。従来から周辺乱流研究は多くの実験装置で精力的に研究されてはいるが、装置毎の磁場配位の相違などから、物理的な特徴などを共通の土俵で議論する機会は多くはない。

幸い日本には、Tokamak 以外の種々の磁場配位を持つ装置がまだ活動を続けている。応用力学研究所の QUEST もその一つで、ST 磁場配位(アスペクト比が小さい Tokamak 装置であるが、これを Tokamak と認識する研究者と、そうでない研究者が存在するため、あえて、Tokamak 以外と上述した)の有数の装置である。この意味において、日本は世界有数の核融合研究大国である。そこで、研究会として“準公式”に今回のような周辺揺動という物理をテーマとして装置間比較を行う研究会を定期的で開催することは、今後の核融合研究の幅を広げる機会を与えるものに成り得る。当初は少人数での開催が予想されることと、QUEST 装置での活動が活発であることなどを踏まえ、昨年度から、九州大学応用力学研究所の小研究会開催の機会を得て、2 年続けて、各種磁場配位の研究成果を発表していただき、それぞれの磁場配位における乱流研究、実験結果の共通点、相違点を明らかにして、乱流と磁場配位の関係を考える機会を得ることができている。

2. 日程とプログラム

日時：平成 26 年 1 月 7 日 (火)

会場：九州大学 QUEST 実験棟 2F 会議室

代表者：西野信博 (広島大学大学院工学研究院、准教授)

所内世話人：岡子秀樹

トピックス：各装置における周辺乱流計測結果の紹介

プログラム (Program)

Chair: Nobuhiro Nishino (Hiroshima University)

13 : 30 – 13 : 35 Opening address

Nobuhiro Nishino (Hiroshima University)

13 : 35 – 14 : 00 Characteristics of filamentary structures in Heliotron J edge plasma observed with a fast camera

Keijun Kasajima (Kyoto University)

13 : 00–14 : 25 Investigation of the edge turbulence with the combination of a camera and a Langmuir probe cluster in Heliotron J

Linge Zang (Kyoto University)

14 : 25–14 : 50 Fluctuation study using Langmuir probes and Beam emission spectroscopy in Heliotron J

Shunsuke Ohshima (Kyoto University)

14 : 50–15 : 20 (Coffee Break)

15 : 20–15 : 45 大型ヘリカル装置 LHD における多点静電揺動計測

Hiroshiko Tanaka (NIFS)

15 : 45–16 : 00 PANTA におけるトモグラフィーを目指した多チャンネル分光計測の開発

藤野君 (Kyushu University)

16 : 00–16 : 25 カメラ及びプローブを用いたプラズマ揺動計測 (仮)

Nobuhiro Nishino (Hiroshima University) (代理)

16 : 25–17 : 00 Closing Address

Nobuhiro Nishino (Hiroshima University)

3. 参加者名簿

西野 信博 (広大院・工学研究院・准教授)

中嶋 洋輔 (筑波大・数理物質系・教授) (都合により、西野代理、別日程で打ち合わせ)

木暮 諭 (筑波大・数理物質科学研究科・M1) (都合により、西野代理、別日程で打ち合わせ)

水内 亨 (京大・エネルギー理工学研究所・教授)

大島 慎介 (京大・エネルギー理工学研究所・助教)

Linge Zang (京大・エネルギー科学研究科・D3)

笠嶋 慶純 (京大・エネルギー科学研究科・M1)

永島 芳彦 (九大・応用力学研究所・准教授)

田中 宏彦 (核融合科学研究所・助教)

恩地 拓己 (九大・応用力学研究所・助教)

藤野 博充 (九大・応用力学研究所・助教)

以下に、発表の概要を示す。

共同利用研究集会

第 11 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

11th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

研究代表者 京都大学 福山淳
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 11 回目となるが、そのうち、第 2 回~第 8 回まで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。今回は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：2013 年 12 月 19 日（木）－ 20 日（金）

開催場所：九州大学応用力学研究所 2 階大会議室

講演数：24 件、参加者数：31 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 24 件を内容別に分類するとトカマク 10 件（うち統合コード 6 件、MHD 1 件、乱流 3 件）、ヘリカル 8 件（うち統合コード 6 件、MHD 1 件、乱流 1 件）、ITER/BA 2 件、基礎 4 件であった。どれも質の高い研究成果報告であった。ヘリカルに関する講演数がトカマクのものに匹敵してきたことが、大型ヘリカル装置 LHD における統合コード開発の進展を示している。また、若手研究者による講演が 10 件以上あり、当該分野の若手育成も進んでいることをうかがわせた。以下に講演内容を抜粋して説明する。

研究会の冒頭に若狭より統合輸送シミュレーションコード TASK および TASK3D の開発経過のレビューを含む講演がなされた。そして新古典輸送データベースを用いた熱輸送シミュレーションで LHD における実験結果を再現できることが報告された。LHD をはじめとするヘリカルプラズマの輸送シミュレーションは数多くなされており、村上からは高イ

オン温度放電における NBI 加熱と複数種イオンの役割が報告された。また、横山からは実験解析のためのコードセットの開発状況が報告された。ペレットをはじめとする粒子供給や加熱のシミュレーションも盛んになされており、林からは JT-60U および ITER におけるペレット入射条件について報告された。本多からは統合コード TOPICS に新古典トロイダル粘性を計算するドリフト運動論コードを組み合わせてトロイダル回転を評価する取り組みの進展について報告がなされた。滝塚からは MHD モードによる非軸対称的な変形が、トカマクハイブリッドシナリオにおける電流分布を説明できる可能性が示された。藤堂からは高速粒子のダイナミクスと MHD を組み合わせるハイブリッドシミュレーションによってアルフベン固有モード出現時の振る舞いの実験との比較が報告された。宮戸、矢木、糟谷からはトカマクおよびヘリカルプラズマにおいて流体モデルを用いた、揺動がもたらす非局所輸送現象のシミュレーション結果が報告された。小菅からはプラズマ端で生成される hole と blob がコア領域の輸送にもたらす新たな役割について提言がなされた。Lesur からは位相空間乱流のための各種シミュレーションにおける保存則について議論がなされた。基礎研究も進展をしている。大澤からは壁材料の水素吸蔵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。佐々木からは基礎実験装置においても多様な乱流構造が形成され、核融合プラズマの構造形成と関連付けた研究が行えることが示された。福山からは ITER 統合モデリングのためのフレームワークと EU の取り組みについて、小関からは遠隔実験センターの概要について紹介があり、ITER 時代が近づいていることを感じさせた。

来年度も第 12 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を決定し、閉会した。

4. 研究集会プログラム

(20 min talk+5 min discuss or 15min talk+5min discuss)

12 月 19 日(木)

9:00 – 9:10 はじめに 福山 (京大)

(座長：福山)

9:10 – 9:35 講演 1-1 若狭 (RIST)

Heat Transport Simulation in LHD Plasmas Using the TASK3D code

9:35 – 10:00 講演 1-2 本多 (原子力機構)

JT-60U における新古典トロイダル粘性の影響

10:00 – 10:25 講演 1-3 宮戸 (原子力機構)

トカマクプラズマにおける I T G 乱流とコールドパルスのシミュレーション

10:25 – 10:40 休憩

(座長：宮戸)

10:40 – 11:05 講演 1-4 矢木 (原子力機構)

Simulation study of nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas

11:05 – 11:30 講演 1-5 村上 (京大)

LHD における高 Ti プラズマの統合シミュレーション

11:30 – 11:55 講演 1-6 登田 (核融合研)

ヘリカルプラズマでのイオン温度勾配乱流における熱拡散係数のモデリング

- 11:55 – 12:15 講演 1-7 西岡 (京大)
ヘリオトロン J の NBI プラズマにおける新古典イオンフローのモーメント法を用いた数値解析
- 12:15 – 13:15 昼休み
(座長：糟谷)
- 13:15 – 13:40 講演 2-1 林 (原子力機構)
ペレットによる ELM 制御の統合シミュレーション
- 13:40 – 14:05 講演 2-2 松山 (原子力機構)
ペレット入射プラズモイドのドリフト機構のモデリングと実験との比較
- 14:05 – 14:30 講演 2-3 河野 (九工大)
イオンサイクロトロン加熱におけるプラズマ波と RF シースの相互作用
- 14:30 – 14:50 講演 2-4 羽田 (京大)
One-Dimensional Transport Analysis of ECRH Assisted Plasma Start-up in JT-60SA
- 14:50 – 15:05 休憩
(座長：林)
- 15:05 – 15:30 講演 2-5 滝塚 (阪大)
Enhanced neo-classical resistivity due to the $m/n = 1/1$ MHD-mode deformation for tokamak hybrid scenario
- 15:30 – 15:55 講演 2-6 佐藤 (核融合研)
陰的時間積分法を用いた MHD コードの開発
- 15:55 – 16:15 講演 2-7 糟谷 (九大)
乱流計測シミュレータを用いた非拡散輸送過程の数値診断
- 16:15 – 16:35 講演 2-8 佐々木 (九大)
直線型装置における乱流構造形成シミュレーション
- 16:35 – 16:50 休憩
(座長：滝塚)
- 16:50 – 17:10 講演 2-9 小菅 (九大)
炉心一周辺結合領域における輸送モデリング
- 17:10 – 17:30 講演 2-10 大澤 (九大)
タングステン空孔中の水素の特異構造とその材料への応用
- 17:30 – 17:50 講演 2-11 東 (京大)
PARASOL コードによるトカマク周辺プラズマの粒子シミュレーション
- 17:50 散会
- 19:30 – 22:00 懇親会

12月20日(金)

- 9:00 – 9:05 事務連絡
(座長：矢木)
- 9:05 – 9:30 講演 3-1 福山 (京大)
ITER 統合モデリング活動の進展

- 9:30 – 9:55 講演 3-2 横山 (核融合研)
 統合輸送解析スイート TASK3D (a,p) 開発と LHD 実験適用の進展
- 9:55 – 10:15 講演 3-3 金森 (京大)
 TASK/TX によるトカマク粒子輸送シミュレーション
- 10:15 – 10:30 休憩
 (座長：横山)
- 10:30 – 10:55 講演 3-4 藤堂 (核融合研)
 DIII-D におけるアルフベン固有モードと高速イオン輸送のシミュレーション
- 10:55 – 11:20 講演 3-5 Lesur (九大)
 Scheme-independent error in entropy conservation in turbulent kinetic simulations
- 11:20 – 11:45 講演 3-6 小関 (原子力機構)
 ITER 遠隔実験センター
- 11:45 – 12:00 まとめ 矢木
- 12:00 – 13:00 昼休み
- 13:00 – 17:00 核融合エネルギーフォーラムサブクラスター会合
- 17:00 散会

5. 参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属
井手俊介	原子力機構	登田慎一郎	核融合研
小関隆久	原子力機構	横山雅之	核融合研
林伸彦	原子力機構	滝塚知典	阪大工
本多充	原子力機構	成田絵美	阪大工
松山顕之	原子力機構	河野晴彦	九州工業大学
宮戸直亮	原子力機構	大澤一人	九大応力研
矢木雅敏	原子力機構	糟谷直宏	九大応力研
若狭有光	RIST	佐々木真	九大応力研
東 修平	京大工	渡邊理	九大応力研
金森涼介	京大工	小菅佑輔	九大高等研
福山 淳	京大工	Maxime Lesur	九大伊藤セ
村上定義	京大工	小林達哉	九大総理工
西岡賢二	京大エネ	服部元隆	九大総理工
羽田和慶	京大エネ	福永航平	九大総理工
佐藤雅彦	核融合研	三輪祐大	九大総理工
藤堂 泰	核融合研		