平成24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、プラズマ乱流実験をはじめ多くの科学技術分野で大容量のデータ処理が一般 化している。これらの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。最も基本となるのは相関を持つ変数を発見する事である。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

理論モデルをベースにした実験・解析手法の開発が行われた。プラズマ中の波動伝搬を基に した磁力線構造の観測法を開発し、磁力線構造が突発的に遷移する現象の発見につながっ た(居田)。プラズマ乱流構造に関しては、ストリーマ形成時のドリフト波の二次元断面構 造の理論との比較(山田)、電子温度勾配モードと低周波数モードとの非線形結合の観測 (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 確率論的手法の導入(田村)も試みられた。新たな計測器の開発に伴う実験・解析手法の開 発も進展した。多チャンネルプローブ及び位相差の瞬時値解析が始まった(大島)。近年 のマイクロ波技術の進歩により、先進反射計(徳沢)及びディジタル相関 ECE(土屋)の開発 が進展し、信号からのプラズマ乱流揺動の抽出が議論された。PANTA において初めて乱流 の高速度カメラ計測が行われた(大館)。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)が進められている。

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。

国際的学術拠点の形成報告書 「磁場閉じ込めプラズマ中の乱流、磁気島及び磁力線の研究」

高速度軟 X 線/VUV 光望遠鏡

ヘリオトロンタイプの核融合炉を成立させるためには、MHD 不安定な配位でプラズマを 高ベータ化することが鍵となる。大型ヘリカル装置の磁場配位においては周辺プラズマは 常に磁気丘であり、そこでの圧力駆動型の MHD 不安定性の振る舞いを調べる必要がある。 この目的でプラズマ周辺部からの放射から周辺プラズマの揺動を2次元的に計測する高速 度接線 VUV カメラを開発してきた。本カメラは多層膜反射鏡を使ってプラズマから放射さ れる VUV 光を結像し MCP を使って増倍したのちに高速度カメラで計測するものである。こ れまでの開発で、周波数 2KHz までの揺動計測が可能となったが[1]、プラズマからの放射 強度の不足からそれ以上の高速の計測はできなかった。昨年度より反射鏡の半径を1.5 倍 に大型化し、計測機器のプラズマへの距離も近づけることと合わせて 10kHz までの揺動計 測をめざした改良を行ったが、MCP の故障で LHD の実験期間内で揺動計測を行うことがで きなかった。本報告では本年度に集中的に研究を行った、揺動計測以外の二つの応用例に ついて報告を行う。

(1) 炭素ペレットの侵入長推定[2]

大型ヘリカル装置では不純物輸送研究 のために炭素ペレットの入射が行われ ている。炭素の輸送を詳しく調べるため には炭素の初期分布の推定が不可欠で ある。現在は炭素ペレットアブレーショ ンクラウドからの Hαの放射時間と、ペ レットの速度から侵入長が推定されて いる。しかし、ペレットの軌道が曲がる 場合などには推定誤差が大きくなる問 題があり、クロスチェックのための計測 手法の開発が必要とされている。高速度 VUV カメラは炭素の水素様イオンからの 放射を選択的に検出でき、ペレット入射 直後の像から初期分布の推定が可能で ある。現在のLHDの輸送係数からすると、 プラズマの輸送のタイムスケールより



図1 ペレット入射直後の CVI イメージ(G), (H) と侵入長を仮定したモデルイメージ(E), (F)の比較

も炭素原子が水素様まで電離する時間の方 が十分はやいため、炭素様イオンの放射強度 分布を推定できれば、入射した炭素の初期分 布を推定することができる。実際には侵入長 をパラメータとして、電離・輸送のシミュレ ーションを行ったうえで接線像のシミュレ ーションを行い、観測像との比較を行ってい る(図1)。本推定法と、Hα光の放射時間 から推定したものの比較を図2に示すが、誤 差の範囲内でよく一致している。



図 2 炭素ペレットの侵入長の VUV カメラ による推定値と、Hα計測による推定の比較

(2) 電子温度摂動の2次元分布の推定手法の開発

大型ヘリカル装置では、電子サイクロト ロン加熱のモジュレーションから作られる ヒートパルスの伝搬特性を計測することで、 磁場垂直方向の輸送を推定している。磁場 がストキャスティック化した領域で輸送が 大きくなることを利用して、ストキャステ ィック領域の検出を逆に行うことができる。 接線 VUV カメラは基本的には密度揺動の計 測ではあるが、温度揺動に対しても若干の 感度がある。それは電子温度変化に対して 炭素イオンの電離度が変化するためであり、 図3に示すように、プラズマのほとんどの 領域で電子温度摂動に対して負の相関をも ち、イオン化エネルギーに近い 100eV 付近 では特に感度が良い。イオンの電離時間か ら考えると、数 ms 程度のタイムスケールの 電子温度摂動の検出は十分可能であって、 プラズマ周辺領域の磁場構造の変化を調べ るツールとして使える可能性がある。実験 でも電子温度摂動と逆位相の振動が検出さ れている。実験時に検出された揺動の振幅 とその位相差を図4に示す。振幅が視野下 部で大きくなることは、図3に示すように、



図3 電子温度摂動に対する放射強度の変化を電子 温度の関数で示す。



図4 熱パルス伝搬実験で観測される CVI イメージ (上段)、摂動の振幅(中段)、摂動の位相(下段)を示 す。左列のデータは m/n = 1/1 の磁気島を生成してい た状態で取得した。

100eV 付近で電子温度摂動への感度が大きくなることと矛盾しないが、位相分布は大型へ リカル装置の磁気面形状が複雑であるため、現在はうまく再構成することができていない。 より単純な磁場配位を持つトカマク装置においては2次元位相分布が求められる可能性が ある。また大型へリカル装置で位相情報を再構成できるような視野が可能かどうかを今後 検討していく予定である。

論文リスト

[1] Ming, T.F., Ohdachi, S., Sakakibara, S., Suzuki, Y., 2012. "High speed vacuum ultraviolet telescope system for edge fluctuation measurement in the large helical device." Review of Scientific Instruments 83, 10E513–10E513–3.

[2] Ming. T. F. S. Ohdachi. S., Suzuki. Y. LHD Experiment Group "Estimate of the deposition profile of carbon pellet using a high speed VUV imaging system in LHD", Submitted to Plasma Sci. Tech.

[3] DU, X., OHDACHI, S., TOI, K., others, 2012. "Development of an Array System of Soft X-ray Detectors with Large Sensitive Area on the Large Helical Device". Plasma and Fusion Research 7, 2401088.

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、乱流物理研究は現在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。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、ハードウエアとして新しく開発を進めている 空間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最終目的とする。

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

周波数コムを用いた ka-band マイクロ波反射計をLHD装置に設置しプラズマ実験に適用した結果の 一例を図1に示す。この時送受信アンテナの角度を調整することによって、プラズマ周辺部からの波数 約10cm⁻¹の密度揺動による後方散乱波を観測している。図はコム発振している各周波数成分のプラズ マからの散乱波スペクトルを表示しているが、密度揺動によるスペクトルの拡がり、およびプラズマ回



図 1.Comb ドップラー反射波の周波数スペクトル(1MHz/div;重ね表示)

転によるドップラーシフトが生じていること が見て取れる。このデータはサンプリングレ ート 20GS/s 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全散乱波波動を直接 取得した大容量データを処理したものである が、図のように其々の成分毎に問題なく弁別 して処理できることが分かった。これは世界 初の実証結果であり、論文化の準備を進めて いる。一方、フィルタバンクを用いて、周波 数コム毎に個別にデータを収集するシステム も同時に開発して稼働させた。図2に示すの は、各周波数成分毎(すなわち異なる空間位 置を意味する)の密度揺動成分のドップラー シフトの時間変化である。このドップラーシ フト量fbはポロイダル速度 $v_{\perp} \ge f_{D} \approx -k_{\perp}v_{\perp}$ という関係性を持つ。このデータは半径方向 電場を制御することを目的とした実験で取得 したものであるが、時間的にポロイダル速度 の大きさ及びその位置が変動している様子を 観測することに成功した。

また、データ処理に関して、図3に示すよ うに、信号に含まれる密度揺動成分を揺動周 波数成分毎に弁別し、かつそのエンベロープ



 図 3: エンベロープ解析と Conditional averaging の技法を適用した密度揺動の周波
 数成分毎の周波数スペクトル



図2:各周波数成分のドップラーシフト(ポロイダル 速度に比例)の時間変化。

の周波数スペクトルをS/N比を高めて取得するこ とを目指した Conditional averaging 技法の適用な ども実施した。図のように変調した 25Hz の周期を 明確にとらえることが出来た。今後より詳細にこれ らの技法の確立を目指して研究を進める。

デジタルコリレーションECEの開発

核融合科学研究所 土屋 隼人

1.背景と目的

磁化プラズマ中において乱流は輸送において大きな影響があることは広く認識されているが、乱 流そのものの構造を理論的実験的に理解することは極めて重要な課題である。装置サイズ程度の大 きな構造の研究については実験的に近年報告があるが、イオンラーマー半径の数倍の乱流について の実験研究は構造や輸送を議論できるほどの計測が乏しいために十分でない。小さな乱流構造を捉 えることができる計測を充実させ、ミクロ、メゾ、マクロスケールの乱流の非線形結合の理解を実 験的に行うことが望まれている。

そこで、本研究の目的は、メゾスケール乱流計測に対応しうる高時間分解能かつ高空間分解能を 持つ計測のデジタルコリレーションECEを提案し、その手法の検証とした。

2. デジタルコリレーションECEのコンセプト

磁化プラズマにおいて、マイクロ波計測の一つである電子サイクロトロン放射(ECE)計測はプ ラズマを乱さず電子温度の局所計測ができる有用な計測手法である。しかしながら背景ノイズや機 器に由来するノイズが多いのが難点であり、原理的にも局所的な高周波揺動は感度限界が存在する。 そこで、近年、ノイズ低減の手法として、2点間の温度揺動の相関をとることでプラズマ由来の信 号を取り出すコリレーション ECE (CECE)が広まりつつあるが、従来以上の多チャンネル計測に なりデータ解析の煩雑性が増している。

一方、電子デバイスの進歩によりデータ取集装置の高速化が目覚ましく、ECEの周波数帯(R F:~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 ジタイジングすることが可能となった。そこで、従来のマルチチャンネル型のCECEをIFのデ ジタイジングデータで再現する手法を「デジタルコリレーション ECE」(DCECE)として提案す る。この手法の最大の利点は、観測対象の構造の大きさ、周波数、揺動強度に応じて、解析する段 階で計測パラメータを設定できる点にある。従来のCECEでは空間分解能はハードウェアの周波

数フィルターの設定に依存するため、空間 分解能を変更することは容易ではないが、 DCECEでは数値計算で行うため可能であ る。また、図1にDCECEのハードウェア のブロック図を示ように取得データ自体 は単一チャンネルとなるのでハードウェ アが容易になることも利点としてあげら れる。





3. DCECE 解析手法

図2に DCECE の解析フローチャートを示す。図では 100kHz の電子揺動にノイズを加えた模擬 データを例にしている。解析手順はまず、IF 信号 x(t) (図2 (a)) に対してフーリエ解析を行う。 そのパワースペクトルは電子温度に比例する。FFT を時間軸に対して、多数回行い、電子温度発展 を得る (b)。(b) の縦軸の周波数はプラズマ計測としては大半径方向 R に相当する。離散化フー リエ変換の誤差の影響を減らすため、ある幅をもった周波数領域で平均操作を行う必要がある (c)。 この周波数幅が径方向の空間分解能を決めるが、ECE の感度限界と関係するため極端な小さな幅 をとることはできないが、計測対象の現象に応じて任意の空間分解能を選ぶことができる。平均操 作をすることによってマルチチャンネルの電子揺動データを得たので、FFT 操作により各チャンネ ルの電子温度のスペクトルを得る。さらにノイズ低減のために、あるチャンネルを基準点としたク ロススペクトル S^{Te}(tw,R,f)を時間領域で平均した<S^{Te}(R,f)> (e)を得る。<S^{Te}>の位相より伝搬速度や、 <S^{Te}>のフーリエ逆変換の行うことでコリレーション C(R,tau)を算出し、相関長などを得ることが できる。



4. LHD データ解析

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、試験的に77~82 GHzのECE信号を77GHz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 (NI-PXIe 5186, National Instruments 社製, バンド幅 5GHz, サンプリングレート 12.5GHz, デー タ取得時間 40msec) にて取得した。 図3に示すように、IF 信号のスペクト ル解析より6mm 離れた2点間の温度 揺動を再構成することができた。



図3. 実データの電子温度再構成

波動伝搬を用いた磁力線構造観測法の開発

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 居田克巳

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統計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提案し、開発を進 める。本手法を更に発展させ、磁力線構造変化のダイナミクスの観測と統計化推定の精度を向上す る。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

加熱パワーをモジュレーションする ことでプラズマ中に熱波動を伝搬させ た実験を行った。その時の電子温度と モジュレーション振幅の2乗の時間変 化を図1に示す。時刻t=4.3s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 シアが弱くなる。磁気シアが0.5程度 まで減少した時に電子温度の平坦化が 起こる。この時にモジュレーション振 幅の2乗の時間変化をみると、中心部 で振幅が減少、周辺部で振幅が増加し ている。

図2は磁気シアの変化量を変えたプラ



図1電子温度とモジュレーション振幅の2乗の時間変化

ズマにおける熱波動伝搬の位相の 遅れの空間分布であるが、位相の遅 れの空間分布に2つのパターンが 観測された。磁気シアを速く減少さ せた場合には、山形の位相の遅れの 空間分布が得られ、プラズマ内部に 磁気島ができている事を示してい る。一方の磁気シアを遅く減少させ た場合には、位相の遅れの空間分布 に平坦部が現れ、プラズマ内部にス トキャスティック領域ができてい る事を示している。



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た。こ

図2 磁気シアの変化量を変えた時の熱波動伝搬の位相の遅れの 空間分布

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にも応用が可能で、今後の発展が期 待される。

研究成果報告

本研究で開発した手法により磁力線構造を推定し、構造間の分岐現象を発見した。本成果は既に以 下の共著論文として出版した。

K.Ida, S.Inagaki, Y.Suzuki, S.Sakakibara, T.Kobayashi, K.Itoh, H.Tsuchiya, C.Suzuki,

M.Yoshinuma, Y.Narushima, M.Yokoyama, A.Shimizu, S-I.Itoh and the LHD Experiment Group,

"Topology bifurcation of a magnetic flux surface in magnetized plasmas", New Journal of

Physics 15 (2013) 013061

さらに分岐現象に伴いプラズマの流れが変化する事を見出し、以下の学会発表を行った。

居田克巳、永岡賢一、吉沼幹朗「ストキャスティック磁場領域におけるイオンの熱と運動量の輸送」プラズマ・核融合学会第29回年会、クローバープラザ、福岡県春日市、
2012年11月27日(火)~30日(金)

研究組織

- 居田克巳 核融合科学研究所
- 稲垣滋 九州大学応用力学研究所
- 小林達也 九州大学·総合理工学部

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

2013 年 1 月 29 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

技術論:データ解析を行う際、ノイズによる偽相関には注意する必要がある。バイスペク トル解析等では値の収束を観測する事が慣習となっている。今回はそれに加えてディジタ ル的にノイズを落とす処理である適応ディジタルフィルタについての紹介があった。

統合化:今年度の個別テーマは以下のように3つにカテゴリー分けする事ができる。

1. 理論モデルをベースにした実験・解析手法の開発

・磁力線構造の観測と磁力線構造遷移の理論モデルとの比較

・帯状流理論を基にした帯状流検出法の開発

- ・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
- ・ドリフト波の非線形理論を基にした電子温度勾配モードと低周波数モードとの非線形
 結合の観測
- ・電子熱輸送の状態評価のための確率論的手法の導入
- 2. 新たな計測器の開発に伴う実験・解析手法の開発
 - ·多チャンネルプローブ開発及びそのデータ解析法(Hilvert 変換)
 - ・先進マイクロ波反射計の開発とその信号からのプラズマ乱流揺動信号の抽出
 - ・ディジタル相関 ECE の開発
 - ・高速度カメラ計測データの処理
- 3. シミュレーションとの連携
 - ・プラズマ乱流の過渡応答シミュレーション
 - ・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

今回は研究課題間の相互理解がはかられた。特にプラズマ乱流解析ではバイスペクトル解 析等共通のツールを使っているが適用する問題によりノウハウが異なる。これらの情報を 交換できた事は大きな成果である。また、近年のマイクロ波技術の進展により、伝統的な の反射計が大きく進化している。これら計測器の進展をふまえ、シミュレーションによる 計測機器の模擬のターゲットとして反射計を選択した。次回からは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と期待される。

議論:ディジタル相関 ECE の開発に関して、ビッグデータの並列計算について報告された。 通常の時系列解析ツールである FFT では計算時間が膨大になり、実験へのフィードバック が不可能になる。そこで 並列計算の必要性が議論され、更に将来的には FPGA(field programmable gate array)等により、ハードウェア的に計算する事も視野に入れる事が提 案された。

今後の予定

個別課題間の統合を更に進める。ノイズや偽相関の除去に関して、統計の専門家に研究協力者として参加してもらうと共に、FPGAの導入等についても研究協力者を開拓する。

シミュレーションデータを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析法の研究

九州大学応用力学研究所 糟谷直宏

時間的、空間的に分解能の高い揺動計測法が確立してきた現在、大容量のデータを効率的に処理 し、知識を獲得する事が必須である。乱流シミュレーションで得られる3次元時系列データに対し て数値解析を行うことで、実験データ解析に活用できる手法の開発を行うことができる[1]。そこで 本研究では円筒形直線型プラズマにおけるドリフト波乱流の数値シミュレーションを通じて、プラ ズマ乱流の時空間構造解析手法の成熟を図ることを目的とする。シミュレーションで形成される構 造をダイナミクスも含めて数値計測し、その時間的空間的構造がいかに実験で観測され得るかを提 示する。具体的な解析対象は応用力学研究所の直線型装置 PANTA であり、本年度は以下の2つの 課題に取り組んだ。ひとつは抵抗性ドリフト波乱流の長時間データを用いた乱流駆動粒子束等の乱 雑成分の確率統計的振る舞いの解析で、もうひとつは PANTA 装置でのイオン温度勾配(ITG)モード 励起条件の評価である。

まず抵抗性ドリフト波乱流の長時間データを用いた乱流駆動粒子束等の乱雑成分の確率統計的 振る舞いの解析について述べる。乱流状態にあるプラズマでは大自由度のダイナミクスが発達して いる。1つのフーリエ成分は、多数の成分の非線形結合により非線形力を受ける。非線形力は、乱 雑な成分を持ち、その効果を取り入れたプラズマ乱流統計理論が進展を見せている[2]。揺動の乱雑 成分に関する確率密度分布(PDF)の詳細な実験観測も始まっている[3]。そこで、本研究では、乱流 シミュレーションを行い、得られた乱流場データの揺動や乱流駆動粒子束等の高次モーメントにお ける乱雑成分の確率統計的振る舞いを解析した[4]。Numerical Linear Device (NLD) は円筒形直線型 プラズマにおける抵抗性ドリフト波乱流を模擬する計算コードである[5]。定常的な粒子ソース項を 与えたシミュレーションで乱流構造形成を伴う非線形飽和状態を得ている。その3次元乱流場の長 時間データを用い、乱流揺動の統計性を解析した。イオン-中性粒子衝突周波数が小さい場合に帯 状流が形成される。そのような飽和状態においてイオンサイクロトロン周期の60000倍以上、特徴 的ドリフト波周期の 1000 倍以上の時間にわたる時系列データの解析を行った。統計量の収束を得 るためには十分多くのサンプル数が必要となり、今回用いたデータ数で物理量の収束が見られた。 粒子や運動量のダイナミックな釣り合いを評価するために、乱流粒子束やレイノルズ応力の半径方 向分布を計算した。PDF のバルク部で半径位置によって差は小さく、テール部で形状に差がみられ るが、それらが有意なものかは今後の解析が必要である。モデルの釣り合いの式中に複数の非線形

項が含まれる。渦度の釣り合いにおいて、レイノル ズ応力項と磁力線方向非線形項の二項が、同等の大 きさを持つが、渦度の時間変化との相関はレイノル ズ応力とのみ大きいことが分かった。複数の非線形 項の中でも変動のダイナミクスを規定しているも のが存在していることを示す。さらに粒子束と運動 量束の時間的相互関係を見た。粒子束の変化は運動 量束の変化に対して、典型的ドリフト波周期の 0.4 倍の時間先行していた。その時間遅れを考慮してプ ロットした結合 PDF が図1であり、等高線が楕円形 に引き伸ばされた様子が両者の相関関係を表して いる。このように乱流シミュレーションデータを用 いてダイナミックな構造形成機構の検定手法の開 発を進めた。



図 1: 粒子東Γ_r とレイノルズ応力Πの結合 PDF。

次に直線装置 PANTA での ITG モード励起条件の評価について述べる。イオンエネルギーの異常 輸送を引き起こす ITG 乱流の特性を理解することは核融合炉実現のために重要である[6]。PANTA ではこれまで前述のような抵抗性ドリフト波乱流の研究が精力的になされてきた。Ion Sensitive Probe を用いたイオン温度測定も進展してきたことからイオンの運動性によって生じる不安定性 である ITG モードの観測を計画している。その第一段階として、流体モデルを用いた数値解析に よる ITG モードの線形成長率の評価を行った[7]。ここでは軸方向一定の成分のみを持つ磁場中の 円筒プラズマを取り扱う。解析に用いるモデル流体方程式は、イオンの連続の式と運動量保存の式、 エネルギー保存の式から成る Hamaguchi-Horton 方程式[8]を拡張したもので、衝突の影響を考慮し てイオンと中性粒子の衝突項と粘性項を取り入れている。径方向の境界条件としては円筒プラズマ の中心と端で波の振幅が 0 とする。また背景密度、温度の径方向分布は $N(r) = N_0 \exp[-(r/L_N)^2], T_i(r)$ = $T_{i0} \exp[-(r/L_{Ti})^2]$ とする。PANTA ではヘリコン波によるアルゴン放電で高密度プラズマを得てい る。典型的なパラメータは電子温度 T_e = 3eV, イオン温度 T_i = 0.3eV, 密度 n_{i0} = 10 × 19m⁻³, 磁場 B = 0.04T, 装置長 λ = 4m, プラズマ半径a = 50mm, 密度勾配長 L_N = 50mm, 温度勾配長 L_{Ti} = 250mm であ る。PANTA プラズマのパラメータ領域で方位角方向と軸方向のモード数(m, n)に対する線形成長率 の依存性を見ると(m, n) = (2, 2)モードが最も不安定となり, モード数が大きい場合または(m, n) = (1, 2)

1)の場合は安定となった。さらにパラメータ(磁場 B, 装置長ん, 勾配長 L_N, L_{Ti}, 温度 T_i, T_e) に対する 線形成長率の依存性を調べた。図2は勾配長に対 する線形成長率の依存性を示している。×印は PANTA 実験における典型的なパラメータである。 不安定になる勾配長のパラメータ領域は限定的 で,密度勾配に対する依存性が強いことがわかっ た。また磁場に関する依存性を見ると、 磁場が 弱いときは方位角方向のモード数が小さいモー ド、 磁場が強いときはモード数が大きいモード が不安定化している。このような数値解析の結果、 PANTA の典型的なパラメータで ITG モードが 励起される可能性があることがわかった。今後実 験との比較とともに乱流シミュレーションを行 い、乱流構造形成に果たす役割について研究を進 める。



図 2: 温度勾配長 *L*_{Ti}、密度勾配長 *L*_N に対す る線形成長率の依存性

これら初期的な結果を発展させ、さらに実験結果との比較を行うことで、乱流構造形成のダイナ ミクス検定手法の確立を進める。さらにはこの手法を用いてプラズマ乱流における構造形成機構の 物理的理解につなげる。

参考文献

[1] N. Kasuya, et al., J. Plasma Fusion Res. 88, 322 (2012)

[2] A. Yoshizawa, et al., Plasma and Fluid Turbulence: Thory and Modelling (IoP, Bristol, 2002)

[3] Y. Nagashima, et. al., Phys. Plasmas 18, 070701 (2011)

[4] M. Sasaki, et al., Int. Toki Conf. 22 (2012, Toki, Japan) P2-8

[5] N. Kasuya, et. al., Phys. Plasmas 15, 052302 (2008)

[6] W. Horton, Rev. Mod. Phys. 71, 735 (1999)

[7] Y. Miwa, et al., Int. Toki Conf. 22 (2012, Toki, Japan) P4-23

[8] S. Hamaguchi and W. Horton, Phys. Fluids B 2, 1833 (1990)

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. 背景と目的

簡便、安価でありながら高時空間分解能を有する静電プローブ計測器は、プラズマの乱流研究におい て大きな役割を果たしてきた。直線型装置(例えば PANTA 等)では、多点プローブ計測によりプラズ マ乱流の時空間構造の観測に用いられ、乱流による自発的な構造形成の発見などの成功している。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為には、目的に応じ て最適なプローブ設計を進める必要がある。

京都大学のヘリオトロンJ装置においては、周辺の乱流と輸送の関係を明らかにするべく、静電プロ ーブを用いて周辺プラズマの実験的研究が進められてきた。最近、高速イオン励起不安定性が周辺部に 存在する揺動やポテンシャル構造に対して影響を与えていることが見出された。高速イオンとプラズマ の相互作用によって励起される高速イオン励起不安定性は、高速イオン損失によるプラズマ閉じ込め特 性の悪化、或いは壁への損傷を与えるという観点からこれまで研究されてきたが、それに加え乱流やポ テンシャル構造に影響を与えることでバルクのプラズマの閉じ込め特性に影響を与えるという観点を 今後導入し実験的に検証を進めていくことが重要である。

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、トーラス装置であるヘリ オトロンJ装置に適用可能、且つ乱流研究に適したコンパクトなプローブ構造について検討を進める。 また、予期される取得データの解析手法についても検討を進める。これは、プローブ計測器のノウハウ から、大規模データ取得、スペクトル解析といった多方面の研究アプローチを統合することで初めて可 能になるものであり、応用力学研究所の共同研究として遂行することによって、プラズマ乱流研究や核 融合プラズマ研究に新たな展開がもたらされることが期待できる。また、実際に開発したプローブをヘ リオトロンJ装置に適用し、高速イオン励起不安定性の発現時の周辺プラズマの構造、揺動特性、高速 イオン損失について明らかにする。最近導入された Beam Emission Spectroscopy (BES)計測器など のプラズマ内部揺動が検出可能な計測器を併用し、内部と周辺部の構造変化を同時に解明する。

2. 実験と結果

ヘリオトロンJ装置では、現在異なるトロイダルセ クションに四組の周辺計測用静電プローブを有して いる。本研究では、搖動の構造・特性を詳細に調べる 為、径方向アレイプローブ(図1(a)),磁気プローブ 内臓プローブ(図1(b))、ポロイダルアレイプローブ(図 1(c))の三種のプローブを周辺揺動計測に用いた。今回、 径方向アレイプローブを新たに設計・導入している。 プローブのヘッド部は、高温プラズマからの熱負荷に 備えるために熱負荷・熱衝撃性に強いボロンナイトラ イドとカーボンから基本的に構成されているが、新規 導入した径方向アレイプローブに関しては、堅牢化の 為に金属(Mo)で基本的に支持し、熱負荷に耐えるた めカーボン、モリブデン、ボロンナイトライドから構 成している。

実験は、線平均密度1×10¹⁹ m⁻³の比較的低密度の 中性粒子ビーム加熱プラズマをターゲットとして、上 述したプローブを用いて最外殻磁気面周辺の揺動計 測を行った。この時、60-80kHzに高調波を伴う高速



図1. 実験に用いた(a)#8.5 、(b) #14.5、(c) #11.5 セクションの位置に設置されたプローブ ヘッドの写真。

イオン励起不安定性MHDバーストが観測された。このモードは、ヘリオトロンJにおけるNBI加熱プラ



図 2(a)磁気信号で観測されるバースト信号と(b)バーストに同期したポテンシャル応答。(c) 典型的なバースト 時の典型的浮遊電位(Vf)分布変化と(d) 電位の変動成分(δVf)分布図

ズマにおいて観測される高周波を伴う高速イオン励起によるアルヴェン固有モードの一種である。

プローブ計測によってこのバースト現象と同期して周辺プラズマの電位構造が変化する現象が見出 された。電位変動の大きさは、バーストの磁場揺動強度に明らかに比例し、図1(a)と(c)のプローブを用 いた相関計測によってToroidal/Poloidal方向に対称な構造を持っていることがわかっている。径方向ア レイプローブによって得られた周辺部のポテンシャルのレスポンスを図2に示す。LCFS内側で電位は ドロップし、外側で上昇している(図2(a-b))。尚、径方向にレスポンスのディレイは明確には観測さて いない。典型的なポテンシャル分布の変化を図2(c-d)に示す。径方向にポテンシャル変動の大きさが違 うことから、バースト時に電場構造が変化していることを多チャンネルプローブによって確認ができた。 尚、浮遊電位の計測ではあるがトリプルプローブでの電子温度計測から、この変動は空間電位の応答に ほぼ相当している。一方、ECE、およびBES信号にはバースト時の大きな応答は見えていないことから、 密度/温度分布のレスポンスは小さく電場の変化を説明できない。更には、バースト時にはプローブ計測 でのイオン飽和電流のレスポンスにおいて径方向への遅れが確認された。同様のイオン飽和電流の挙動 はCHSでも確認できており、これは高速イオンの径方向輸送であると解釈できる。つまり、バースト時 においてプラズマ内部の高速イオン分布が変動していることを示唆する。

また、BES計測によってバースト時のプラズマ内部の搖動構造の変化を観測した。揺動の径方向の位 相構造を明らかにするため、Hilbert変換を用いた瞬時位相の評価法を考案し、実験結果に適用した。 50-100kHzのバーストに相当する周波数領域の揺動をバンドパスフィルタで取り出し、Hilbert変換によ って瞬時位相と瞬時強度を評価した。MHD現象のような背景乱流に対して強度が強い揺動の場合には、 支配的揺動の強度と位相をこの手法を用いて評価が可能である。さらに何周期かのバースト時の振る舞 いについてConditional average法を使うことで平均的な揺動強度と位相の振る舞いを抽出した。その結 果バーストー周期の間で揺動の空間構造が変化していることが確認した。この不安定性がバースト的で はなく連続的に発生している場合には空間構造の時間的変化は見られなかった。高速イオン励起不安定 性の空間構造が変動していることは、その不安定性を駆動している高速イオンの分布が変化してことを 示唆する。

4. まとめと今後の展望

本研究では、ヘリオトロンJ装置において、コンパクト、且つ多チャンネルを有する径方向プローブ を開発し、実際の揺動計測に適用した。高速イオン励起不安定性時に起因して周辺ポテンシャルおよび 電場構造が変化していること確認した。またイオン飽和電流の応答とBES計測器の結果から、高速イオ ンの径方向輸送に起因するレスポンスを確認できた。高速イオン励起不安定性が、高速イオン輸送過程 を通じて径電場構造に影響を与え得ることを直接実験的に示すことに成功した。

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

自然科学研究機構 核融合科学研究所 田村直樹

研究の目的

最近になって研究代表者らは、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し、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した。これにより、例えば、非局所輸送現象と呼ばれるプラズマ周辺部を冷 却するとほぼ同時にプラズマ中心部の電子温度が上昇する現象が、従来考えられていたプラズ マ中心部において輸送が改善する遷移が発生したためではなく、1)プラズマ周辺部において輸 送が改善する遷移が発生し、2)そのプラズマ周辺部が輸送の変化に対して裕度の高い状態にな っているプラズマ中心部と相互作用を起こしたためであることを明らかにした。

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

本年度は、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的手法の高度化を目指して、同手法で取り扱っている実験データに対して雑音成分の低減技術の適用を試みた。具体的には、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(Large Helical Device: LHD)で測定された電子サイクロトロン放射(Electron Cyclotron Emission: ECE)信号に対して、適応デジタルフィルタ(Adaptive Digital Filter: ADF)による雑音成分除去を試みた。

結果

LHD で測定された ECE 信号の時間発展の一例を図1(a) に示す。ここで示したのは、サンプリン グ周波数 10 kHz で測定されたのち、500 Hz のローパスフィルターを通過した後の信号である。そ の周波数スペクトルを見ると、60 Hz を基本波とし、その3倍、

5倍、7倍高調波が信号に重畳されていることが分かる。これ は明らかに交流電源由来の誘導雑音である。そこで、雑音 の時系列を短時間の逐次学習で推定できる適応デジタルフ ィルタ(ADF)を用いて除去することを試みた。その結果を図 2に示す。図2(b)より、ADF 適用後の信号にも、60Hz の基 本波とその2倍高調波が依然として強く残っているのが分か る。ADF とは、推定すべき信号を参照信号のフィルタ係数に よって重みを付けたフィルタ出力で推定する有限インパルス 応答フィルタである。ADF は、本来、時間平均が0の信号に 対して効果的に働くように設計されている。つまり、適応操作 によりフィルタの残差が0に近づくことでフィルタ係数更新量 が0に近づき、フィルタ係数が安定に収束する。しかし、ここ で取り扱っている ECE 信号の平均は常に0以上である。この ため、ECE 信号に従来の ADF(以下、従来型 ADF と呼ぶ) を適用すると、雑音をフィルタ出力で推定できたとしてもフィ ルタの残差には一定の値が残ることになる。この時、係数更 新量にも同様に一定の値が残り、0に収束しない。その結果、 図2(c, d)が示すようにフィルタ係数の更新は周期的となる。 これらのことから、ECE 信号に対する従来型 ADF の適応推 定能力は低下してしまっていると考えられる。



図1. (a)LHD で測定された ECE 信 号の時間発展の一例。(b)(a)で示し た信号の周波数スペクトル。



図2. (a)従来型 ADF を適用する前後の時間発展。(b)(a)で示した信号それぞれの周波数スペクトル。(c) 振幅及び(d)位相に対するフィルタ係数の時間発展。



図3. (a)差分型 ADF を適用する前後の時間発展。(b)(a)で示した信号それぞれの周波数スペクトル。(c) 振幅及び(d)位相に対するフィルタ係数の時間発展。

均は元の信号に比べて0に近くなる。そこで次に、この時間差分された信号に対して ADF の適用 を試みた(以下、時間差分された信号に対して適用する ADF のことを差分型 ADF と呼ぶ)。その 結果を図3に示す。図3(b)より、従来型 ADF では十分に除去することができなかった 60Hz の基 本波とその2倍高調波も差分型 ADF では良好に除去できていることが分かる。また、図3(c, d)に 示すように、従来型 ADF では周期的に振動していたフィルタ係数も、一部を除いて安定に推移し ている。このように、差分型 ADF を用いることで、従来型 ADF よりも高い除去性能で ECE 信号に 重畳している誘導雑音の除去に成功することができた。ただし、ECE 信号が急激に変化した直後 は、図3(c, d) が示すようにフィルタ係数の適応がうまく機能しておらず、図3(a) が示すように ADF 適用後の信号は元信号から大きく逸脱してしまった。

今後の予定

ECE 信号の時間変化が急激な場合においても、ADF による誘導雑音除去性能が劣化しないようにさらなる改善を進める予定である。

研究成果報告

なし

謝辞

適応デジタルフィルタによる雑音成分除去に関して助力頂いた、寺西大准教授(広島工業大学) 及び岩間尚文特任教授(自然科学研究機構)に対してここに感謝の意を表します。

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)

直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 山田 琢磨

目的

低温度で近接性に優れた乱流直線プラズマ実験装置(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、二次元バイ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、ミクロ構造であるドリフト波乱流との詳細な非線形結合 関係や、ストリーマーを形成する上で重要な役割を果たす媒介波の空間構造など、未だに解明されてい ない事象が多い。そこで LMD-U の実験データをより詳細に解析すること、および数値計算シミュレー ションコード (NLD)を用いて LMD-U の放電条件に近い状態で直線プラズマの乱流をシミュレートす ることで、更なるストリーマー研究の進展を目指す。

実験方法

LMD-U を用いてストリーマー実験を行い、ストリーマー(周方向に揺動が局在した構造)や媒介波の空間構造を解析した。LMD-U は軸方向の長さが 3.74 m、内径 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 0.095 m 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 2–1.5 mTorr まで下げると、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 10¹⁹ m⁻³程度、電子温度は平坦で 3±0.5 eV である。軸方向 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 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 1.375 m の位置にはプラズマ断面を 2 次元スキャンすることのできる静電プローブが設置されているが、周方向プローブと併用することで、径方向スキャンのみでプラズマ断面全ての情報を得ることが出来る。

次に、NLD を用いた抵抗性ドリフト波シミュレーションについて述べる。NLD コードは 3 場の簡約 流体コードであり、円筒プラズマのドリフト波を模擬するコードである[3]。使用した主なパラメーター は、プラズマ半径 a = 70 mm、装置長 $\lambda = 4$ m、密度 $n_0 = 1 \times 10^{19}$ m⁻³、温度 $T_e = 3$ eV である。中性粒子 とイオンとの衝突周波数を $v_{in} = 0.03 \Omega_{ci}$ としている。ここで、中性粒子の衝突周波数は不安定性のコン トロールパラメーターとなり、構造分岐をもたらすパラメーターであり、いまストリーマー状態となる 値を用いている。粒子ソース分布は $S_N(r)$ は、 $S_N(r) = S_0/L_N^{-2} [1 - (r/L_N)^2] \exp[-(r/L_N)^2]$ のように与えられてお り、それぞれのパラメーターを $S_0 = 0.2$ 、 $L_N = 67$ mm の様に選んでいる。

実験結果

ストリーマーが発生している状態での周方向 64 チャンネルプローブで測定したイオン飽和電流の揺 動(密度揺動)[図1(a)]を2次元フーリエ解析すると、図1(b)に示されるように周方向波数-周波数(*m*,*f*) =(1,-1.2 kHz)のイオン反磁性ドリフト方向に伝播するモード(1)と、(*m*,*f*)=(2,7.8 kHz),(3,6.6 kHz),(1, 9.0 kHz),(4,5.4 kHz)の電子反磁性ドリフト方向に伝播するモード(2-5)が観測された。周方向角・周波数 は電子反磁性方向を正に選んでいる。つまり図1(a)の正に向かう細かい揺動成分がモード(2-5)などから 成り、それらが周方向に自己収束して局在している。局在構造は*m*=1の構造を持ちながらゆっくりと イオン反磁性方向に伝播し、それはモード(1)の周波数(-1.2 kHz)に一致する。局在構造がスペクトル中 のモード(1)として現れるわけではなく、図1(a)下に示すように、局在構造とモード(1)が同時に存在する。 これはモード(1)が(1,2,3),(1,4,2),(1,3,5)の組み合わせのように非線形結合をしているために局在構造 がモード(1)と同じ構造となって現れるためである。次に、これらの組み合わせのバイフェーズを計算し た。バイフェーズは、モード(1)と局在構造の包絡線の位相差を示す。そこで周方向プローブで測定した モード(1)と、径方向プローブで測定したモード(2-5)を用い、各組み合わせのバイフェーズの径方向分布 を計算した(単チャンネル測定なので mの測定はできないが、図 1(b)より周波数のみの測定で充分モー ドが分離できているとみなす)。結果、(1,2,3),(1,4,2),(1,3,5)の全ての組み合わせにおいて、径方向に 平坦なバイフェーズ分布が観測された。これは、局在構造が径方向にほぼ同位相で連なり、径方向に伸 びた構造、つまりストリーマー構造であることを明快に示している。また、図 1(c)はモード(1)の周方向 プローブと径方向プローブ間のクロススペクトルの実部を表し、位相構造を示す。径方向に伸びたスト リーマー構造と異なり、媒介波は r=30 mm あたりに節を持ち、位相が突然飛ぶことが分かった。

NLD を用いた数値シミュレーションでは、支配的なドリフト波のモード数、周波数は($m, n, \Omega_{m,n}$) = (2, 1, 0.007 Ω_{ci}), (3, -1, 0.005 Ω_{ci})となり、これらの結合により($m, n, \Omega_{m,n}$) = (1, -2, -0.002 Ω_{ci})という媒介波を 駆動する。図1の(d)は密度揺動の周方向分布の時間発展(r/a = 0.8)、(e)はその2次元スペクトル、(f)は 媒介波(1, -2)のポロイダル断面のスナップショットを示す。図1(d)より揺動は電子反磁性方向へ伝播し、 揺動の変調はイオン反磁性方向へゆっくり伝播していることが分かる。図1(e)の2次元スペクトル図も 実験と非常に似たものになっている。図1(f)は媒介波の空間構造であるが、これはイオン反磁性方向へ 伝播し、径方向に1つ節を持っている。この媒介波の特徴は、前述の実験結果の空間構造と類似してい る。数値シミュレーションでこのような径方向に節を持つ媒介波構造が観測されたのは初めてである。

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] N. Kasuya et al., J. Phys. Soc. Jpn. 76, 044501 (2007).



図 1: LMD-U および NLD で観測された(a,d) 揺動の時空間構造、(b,e) その 2 次元スペクトル、(c,f) ストリ ーマー構造の媒介波の位相構造。

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目指す.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 QT-Upgrade 装置を用いて行う. アルゴン(Ar) を作動ガスとした 電子サイクロトロン共鳴(ECR)放電によって磁気ミラー領域(共鳴磁場強度 2.14 kG)で高電子 温度(3-4 eV)のプラズマを生成し、グリッドを通して実験領域に流入させる.一方、装置右端に 配置したタングステン電極を 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に注目する.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, 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.図 2 に ETG によって励起された ETG モードよび DW モードの (a) 規格化振幅 強度($\tilde{I}_{es}/\bar{I}_{es}$)と (b) バイコヒーレンスの電子温度勾配(∇T_{e})依存性を示す. ∇T_{e} が増加すること で ETG モードの強度が大きくなるが, ∇T_{e} が 0.7 eV/cm を超えると次第に飽和していくことが分か



図 2: 高・低周波密度揺動における(a)規格化振幅強度と (b)バイコヒーレンスの電子温度勾配(∇*T*a)依存性.

った. 一方, DW モードの場合には, $\nabla T_e > 0.7 \text{ eV/cm}$ において揺動 強度が増大する傾向を示した. さらに, 図 2(b)より, $\nabla T_e \sim 0.7 \text{ eV/cm}$ eV/cm 以上で ETG モードと DW モードのバイコヒーレンスが急 激に大きくなることが明らかになった. これらの結果から, DW モ ードは ETG モードとの非線形結合によって増幅されたと考えられ る.

図3に ETG モードの揺動強度に対する DW モードの揺動強度の 依存性を示す. ETG モード強度が 0.4% ($\nabla T_e \sim 0.7 \text{ eV/cm}$)を超えた とき, DW モード強度の急激な増大が観測された. この結果より, ETG モードの揺動強度が閾値を超えることで DW モードとの非線 形結合が助長され, エネルギーが移送されることで DW モードが 増幅されたと考えられる.

図4に,急峻な ETG が形成されている $\nabla T_{e} \sim 2 \text{ eV/cm}$ の場合に おける高・低周波密度揺動間のバイコヒーレンスの(a) $f_{a} = ~0.4$ MHz 及び (b) $f_{a} = ~7 \text{ kHz}$ に沿ったスライスを示す. 0.4 MHz (ETG モード) と 7 kHz (DW モード)の揺動間で特異的にバイ コヒーレンスが大きくなっていることが観測され, ETG モードが DW モードと選択的に非線形結合していることが明らかになった.



図 3: ETG モードと DW モード との揺動強度の相関性.



図 4: 高・低周波密度揺動にお けるバイコヒーレンスの (a) $f_{3} = ~0.4 \text{ MHz}$ 及び (b) $f_{3} = ~7 \text{ kHz}$ に沿ったスライス.

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] 金子 俊郎, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部第 16 回支部大会論文集, (2012. 12. 23), pp. 51-52.
- C. Moon, R. Hatakeyama, and T. Kaneko, Abstracts of 11th Asia-Pacific Conference on Plasma Science and Technology and 25th Symposium on Plasma Science for Materials, (2012. 10. 3), p. 374.
- 3) 文 贊鎬, 畠山 力三, 金子 俊郎, 第 29 回 プラズマ・核融合学会年会予稿集, (2012.11.28), p. 28aC03.

「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。

実験方法

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)において高速イオン励起 GAM の計測が 行われており、今年度はこの空間構造及び GAM とイオンとの相互作用を定量的に調べるた めの実験及びその解析を行うこととした。

これまでの実験で GAM 励起時に高速イオン(~170keV)と GAM の相互作用を示すエネル ギースペクトルの変化を観測し、同時に数 keV のバルクプラズマのエネルギー領域におけ るエネルギースペクトルの変化も測定されている。これらの現象を M. Sasaki et al. Plasma Phys. Control. Fusion 53, 085017 (2011)で提案された理論に基づいて定量的に議論するた めに、重イオンビームプローブ (HIBP) を用いて GAM に伴う電位揺動を計測した。

また、GAM の空間構造に関しては M.Sasaki, et al., Plasma Fusion Res. **3**, 009 (2008) に見られるような非対称性の検証も試みる実験を行った。

実験結果

GAM の発生を再現することができ、HIBP による電位揺動データの取得が行えた。その 結果、これまで時間分解能の不足で測定できていなかった GAM の高次高調波に伴う電位揺 動を検出することができた。この高次高調波の発生は電位揺動波形が正弦波から鋸歯状波 形になることに対応していることが明らかとなった。

通常の GAM のように単一周波数モードであれば、その位相速度は単一であるため、エネ ルギーの大きく異なる高エネルギー粒子とバルクプラズマとに同時に相互作用することは 考えにくい。これまでに観測されているイオンのエネルギースペクトルの変化を理解する には、上述の M. Sasaki (2011)の理論に加え、波動一粒子の共鳴条件を説明する物理機構 の検討が必要である。今回観測された高次高調波が発生する物理機構は、波動一粒子共鳴 が発生する物理機構解明の手掛かりとなる可能性がある。

しかしながら、LHD本体のトラブルのため、十分な数のデータを取得することができず、 当初本共同研究で行う予定であった空間構造の同定と理論モデルとの比較や、実験の目的 であった GAM が持つパワーの定量的な評価は行えなかった。結論を得るには至らなかった が、実験条件の絞り込みが進み、また物理機構解明の手掛かりの可能性の一つが得られた ことは、次年度以降の実験立案、共同研究でのデータ解析・議論の進め方の指針になる成 果である。

· 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	受
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

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:

- 代表的な相関解析である Bispectral analysis の高速化については、FFT の高速化が 本質的であるため、まずその定量化を行った.並列化 FFT ライブラリである FFTW をインストールし、通常版、OpenMP による共有メモリ型並列処理版、MPI による分 散メモリ型並列処理版のそれぞれについて、FFT 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(Intel Fortran, PGI Fortran, GNU Fortran)の比較 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 による処理の検討を行い, 並 列処理の評価を行った.

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

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ッ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。キーワードとなる現象の一つは「散乱」である。プラズマでの散 乱では、非協同、協同散乱現象があり、本特定研究では主に協同散乱現象が取り上げられ、 散乱断面積の理論的評価と実験結果の比較検討が進められている。本研究課題では、散乱 現象としては、海表面散乱、ライダ計測など対象となっている。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、可能な「他分野を横断する共同研究テーマ」を模索した。特に観 測領域での計測技術では、共通化される問題が多く、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。散乱計測が中心課題である。解析理論・モデリングでも、 同じく問題となっている点に関し、多岐に渡る分野からの視点から、議論された。プラズ マで励起された波動の直接検出や非コヒーレント波の検出にも触れ、これらの計測技術の 新たな適用を模索した。次年度は、個別に採択されている研究課題の進捗に応じて、共通 となる課題を取り上げ、各分野、異なる視野からのアプローチで問題解決を図る予定であ 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

京都大学生存圈研究所 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 (Cloud Profiling Radar; CPR)・ライダ等を用いた雲・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。特に、EC 衛 星用 CPR で計測するドップラ速度を用いた雲微物理量リトリーバルにおいて、鉛直流は最もリトリーバルさ れた物理量の不確定性を生む要因である。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が必要とされている。

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・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、 鉛直流・雲物理量・降水物理量の測定データを作成することを目的としている。

2. 鉛直流のデータ処理手法開発

2.1 降水領域における 50MHz 帯 WPR の鉛直流推定手法の開発

50MHz 帯 WPR は、屈折率擾乱に起因する晴天乱流エコーと降水粒子からの散乱エコー(降水粒子エ コー)に対する感度が同程度であり、かつ降水粒子落下速度が鉛直流と比較して十分大きいため、晴天乱 流エコーと降水粒子エコーを分離可能である。しかし、晴天乱流エコーと降水粒子エコーを分離し、さらに 晴天乱流エコーのドップラースペクトルから鉛直流計測データを得る上で必要なデータ処理は人手に頼る 部分が多いため、鉛直流のデータセット作成に膨大なデータ処理時間(1日間のデータ処理に数日)を要 していた。そのため、少なくとも半自動で晴天乱流エコーの存在範囲を決定することで、鉛直流計測データ を効率的に得るための手法の開発に取り組んだ。開発した手法の概要は以下の通りである。

- 晴天大気エコーと降水粒子エコーの分離が特に困難であるのは落下速度が1.5 m s⁻¹程度と小さい固体相の降水粒子エコー(氷晶・雪片)である。そのため、固体相の降水粒子エコーを想定した検討を実施した。
- 50MHz帯WPRの観測結果をもとに、鉛直流を0.1 m s⁻¹の上昇(スペクトル幅0.2 m s⁻¹)、降水粒子落 下速度を1.3 m s⁻¹(スペクトル幅0.2 m s⁻¹)とした。時系列データにカイ2乗分布を持たせることで、鉛 直流及び降水粒子落下速度の統計的揺らぎを表現した。信号対雑音比(SNR)を変化させることで、 鉛直流の計算精度を評価した。
- ・ 晴天エコーの存在範囲を決定するため、以下の工夫を行った。
 - ▶ 晴天乱流エコーのピーク位置検出時に、高度方向における鉛直流の計算結果の連続性を考慮 することで、降水粒子エコーの誤検出を防いだ。
 - ▶ 晴天乱流エコーのピークから下降方向に 1.0 m s⁻¹の範囲で受信エコーの極小を検出し、エコーの極小位置より上昇方向のみを晴天乱流エコーの領域とみなすことで、降水粒子エコーの混入による鉛直流の計測誤差を減少させた。

図に、計算機シミュレーションによる鉛直流の測定精度の検討結果を示す。鉛直流のピーク存在範囲 などの最低限の初期パラメータを与えるだけで、鉛直流を精度よく得ることに成功している。開発した手法 が実測定データに適用可能であることを、50MHz帯大気レーダであるMUレーダの測定データを用いて確 認済みである。

2.2 鉛直流の高鉛直分解能観測手法の開発

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 の高レンジ分解能(30-50 m)の高分解 能鉛直流計測を達成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。研究代表者が開発したソフトウェア受信機を1.3GHz帯WPRに用 いることで、1.3GHz帯WPR によるレンジイメージング測定を実現した。

1.3GHz帯WPRによるレンジイメージング測定の実現により、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が可能となった。

3. 今後の展開

今年度に得られた成果(鉛直流計測データを効率的に得る手法の開発)を活用した、50MHz 帯 WPR・ 気象レーダ・CPR等の観測データセット作成を実施する。引き続き、観測データを用いた雲・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ーバルアルゴリズムの開発に貢献する。加えて、1.3GHz 帯 WPR のレ ンジイメージング観測を活用することではじめて可能となる、大気下層(高度 2 km以下)における鉛直流及 び雲の同時計測を実現するための活動に取り組みたい。

4. 研究成果

査読なし論文

山本真之・妻鹿友昭・柴田泰邦・阿保真・橋口浩之・山本衛・山中大学・岡本創,50MHz 帯大気レーダーと偏光ライ ダーによる層状性降水内の鉛直流・降水粒子落下速度・偏光解消度の同時観測,信学技報,査読なし, SANE2012-111,7-10,2012.

<u>学会発表</u>

Yamamoto, M. K., M. Abo, Y. Shibata, T. Mega, H. Hashiguchi, N. Nishi, H. Okamoto, K. Sato, T. Shimomai, M. D. Yamanaka M. Yamamoto, and Timbul Manik, Syafrijon, Measurement of vertical air velocity and hydrometeors in stratiform precipitation by the 47–MHz wind profiler radar and 532–nm polarization lidar, SPIE Asia–Pacific Remote Sensing 2012, 29 October–1 November 2012, Kyoto, Japan.

・山本真之・妻鹿友昭・柴田泰邦・阿保真・橋口浩之・山本衛・山中大学・岡本創,50MHz 帯大気レーダーと偏光ラ イダーによる層状性降水内の鉛直流・降水粒子落下速度・偏光解消度の同時観測,電子情報通信学会宇宙・航行 エレクトロニクス研究会(SANE),2012年11月30日,千葉大学.



図:計算機シミュレーションによる鉛直流計測精度の評価結果。太実線は新たに開発した手法における 鉛直流の計測誤差を、細実線は晴天乱流エコーと降水粒子エコーを分離しない場合の鉛直流の計測誤 差をそれぞれ示す。

リアルタイム画像生成のための合成開口レーダ解析とその応用

九州大学産学連携センター 間瀬 淳

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 レーダなど、リモートセンシングの分野でも有用である。

レーザ計測等と比較したマイクロ波計測の問題点に空間分解の悪さがあり、その改善のため種々の工 夫がなされてきた。レンジ方向の空間分解向上に適用されているのが周波数の広帯域化で、FM-CW レ ーダの変調周波数拡大、パルスレーダの短パルス化が主な手法である。一方、アジマス方向に適用され ているのが、アンテナ開口を実効的に大きくとる合成開口処理である。本研究はこれら手法を生体イメ ージング、航空機搭載レーダの分野に適用し、リアルタイム画像生成の実現を図ることを目的とした。

2. マイクロ波生体イメージングの研究

2.1 目的および方法

マイクロ波生体イメージングは、マイクロ波の減衰が比較的小さい胸部の測定(乳がん検出)が中心 となっている。現在、乳がん治癒に重要となる腫瘍の早期発見を目的として、X線マンモグラフィを用 いた検診が行われているが、正常な胸部組織と腫瘍とのコントラストが小さいことに起因する偽陰性、 偽陽性の問題が報告されている。本グループでは、マイクロ波領域では胸部組織と腫瘍との誘電率の差 が比較的大きいことを利用し、マイクロ波帯の超短パルスレーダ(USPR)を使用した乳がん検知のモ デル実験を実施している。

測定システムの概略を図1に示す。パルス幅65 ps、振幅8Vをもつインパルス発生器(PPL社3500D) を使用し、その信号をアンテナに給電する。USPRに適用するアンテナは、特に広帯域特性が要求され、 本実験では周波数2-10 GHzのVivaldiアンテナを使用した。照射されたマイクロ波は誘電体内部を伝搬 し、誘電率の不連続面において散乱・反射される。受信アンテナで検出された反射信号はサンプリング スコープ(Agilent 86100A/B)で収集される。胸部ファントムには、実際の乳房を模擬して作成された CRIS 社製バイオプシー・ファントムを用いた。送受信アンテナは、ステッピングモータ使用の回転ス テージに設置されており、胸部ファントムの周囲を0°から180°まで5°ずつ回転する。反射信号は計 37点の各アンテナ位置で受信、記録され、得られたデータからファントム内部の探査画像を再構成する。

2.2 ファントムを用いた実験結果

マイクロ波生体イメージングの測定で最も大きな課題として、表面反射波成分による SN 比の劣化が ある。本実験では、ファントムを押さえるテンプレート(型枠)を使用することにより、反射波成分の 再現性を維持し、実際の測定から差し引くことを行った。これにより表面反射波成分を約1桁減少させ ることができた。画像再構成には、合成開口イメージング(Confocal Microwave Imaging)を用いた。こ れは、胸部ファントムが微小ピクセルに分割された状態を想定し、測定データからそれぞれのピクセル ごとに強度を決定することで実現する。各アンテナ位置から注目するピクセルまでのパルスの飛行時間 を計算し、各位置での受信信号の飛行時間に対応したデータを重畳する。図2にこのようにして得られ た再構成画像を示した。ファントム表面から20mmの深さにある6mmの異物検出を行うことができた。



図1. 超短パルスレーダシステムの概略.

図 2. ファントムを用いた画像再構成例.

3. スポットライト方式合成開口レーダの研究

3.1 目的および方法

現在日本で稼働中の航空機等搭載合成開口レーダ(SAR)はLバンド(周波数 1.1-1.7 GHz)およびX バンド(8.2-12.4 GHz)を使用し、空間分解はそれぞれ 300 cm、150 cm である。最近、X バンドで分解 能 50 cm、Ku バンド(12.4-18.0 GHz)で 10 cm が達成された。しかし、両者とも航空機内におけるリア ルタイム画像処理はできず、地上に帰りデータ処理して初めて画像が見られる。また、航空機の進行方 向に対しほぼ垂直方向の画像しか撮れないストリップマップ SAR で、災害時の初動対応や、災害地点 の詳細調査には不向きである。本グループは、任意の方角の SAR 画像を機上でリアルタイムに処理す ることが可能な「スポットライト SAR」("Live SAR"と呼称)の開発製作を平成 21 年度より進めている。

図3にマイクロ波システム、図4に外観図を示す。波形シンセサイザで生成されたチャープ信号は、 Kuバンドに変換され増幅された後、アンテナから地上の設定点(MCP)に照射される。反射波は参照 波信号と混合されデチャープ信号となったのちディジタル回路でサンプリングされ、I/Q データとして 取り込まれ画像化される。スポットライト SAR では、マイクロ波を任意の領域に照射できるようアン テナをジンバルに搭載、慣性センサと GPS も搭載され、飛行に伴う MCP と SAR 本体の相対位置の変化 に対応し常に MCP に照射できるようになっている。また、慣性センサの位置情報を用いて参照波信号 の発生時間が制御され、画像処理に適した信号の生成が可能となるためリアルタイム性が出てくる。

3.2 地上試験

"Live SAR"本体及びソフトウエアはほぼ完成しており、今年度、屋上での試験、車輛を利用した地 上試験を実施している。この試験で得られた結果は、レンジ方向およびクロスレンジ(アジマス)方向 の解像度が、それぞれ 10 cm、25 cm であった。プラットホームの移動距離を増すことができればクロ スレンジ方向の分解を向上させることができると考えている。



図 3. SARマイクロ波システム.





(b) アンテナ・ジンバル系 図 4. "Live SAR"本体の外観写真.

4. まとめ

マイクロ波計測の欠点である空間分解の悪さを改善するべく合成開口処理あるいは広帯域の適用を行い、得られた結果について報告した。次年度はリアルタイム性をさらに追究していく。

5. 研究成果報告

[1] S. K. Padhi, A. Mase et al., Proc. Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Appl., Cape Town (2012) 33-1.

[2] 犬竹、山鹿 他: JA2012 国際航空宇宙展出展、ポートメッセなごや/中部国際空港 (2012年10月).

[3] D. Zhang and A. Mase, Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2012, Kaohsiung (Dec. 2012) pp.271-273.

[4] A. Mase et al., Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2012, Kaohsiung (Dec. 2012) pp.625-627.

[5] 犬竹、池地、間瀬、近木 他:平成 24 年度通研共同プロジェクト研究発表会 (2013 年 2 月 28 日).

[6] 近木、池地、間瀬、犬竹 他: 2013 電子情報通信学会総合大会、岐阜大学 (2013 年 3 月 19-22 日).

[7] D. Zhang and A. Mase, Biomedical Engineering (in press).

[8] A. Mase, N. Ito, Y. Kogi, H. Ikezi, M. Inutake et al., URSI-EMTS (May 20-24, 2013) 招待講演・発表予定.

6. 研究組織

, , , <u> </u>	•			
間瀬 🏻 🏻	享 九州大学産学連携センター	伊藤	直樹	九州大学産学連携センター
近木祐一郎	8 福岡工業大学工学部	森山	敏文	長崎大学工学部
大竹 正明	1 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 弘祥	〒 九州大学産学連携センター	徳沢	李彦	核融合科学研究所
王 小育	[]九州大学産学連携センター	出射	浩	[九州大学応用力学研究所]

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

本研究は、一般的なプラズマ波動の励起・減衰過程をそれに伴うプラズマの電子揺動を詳細に 計測することにより、明らかにすることにある。その計測手段として、電磁波の散乱法を取り上 げ、手法を開発するのが最終的な目的である。電子バーンシュタイン波(EBW)により、定常フラ スマの維持を目指している九州大学応用力学研究所の QUEST 装置を例として取り上げ、散乱計 測によって、いかに EBW 波動の直接検出を行い、波動構造を決定し、加熱波動の励起、構造、熱 化過程を明らかにする手法を開発するのが本研究の当面の目標であり、大電力、定常での EBW を 計画し、その直接検出を必要としている装置は、QUEST 以外にはなく、応用力学研究所の共同研 究として実施する意義が大きい。また、本研究は、広い意味での散乱計測を手段として用いた被 散乱媒質の物性解析手法の開発であり、特定研究としての目的に適ったものである.

電磁波の散乱、特に協同散乱は、プラズマ中の波動の周波数、波数および振幅を、測定対象に 擾乱を与えず、空間的、時間的に高分解能で計測する強力な手段として認識されてきた[1]。一方、 波動加熱、とりわけ、電子サイクロトロン共鳴を用いた波動加熱は核融合フラスマの生成、加熱、 制御において有力な手段であり、近年の大電力ミリ波源の進展や伝送、入射手法の高性能、高精 度化も相まって、益々その重要性、有効性が認識されて来ている。しかし、今後必要になると予 想される核融合フラスマの高ヘータ化に際して、電磁波モードとしての電子サイクロトロン波加 熱はその伝搬において遮断密度が存在することから、電磁波のままでは、プラズマ中心部の加熱 ができなくなってしまう。そこで、入射した電磁波をフラスマ中の静電波である電子バーンシュ タイン波(EBW)に変換し、遮断密度を越えた加熱を実現する手法が提案され、実機においても EBW によると考えられる明確なプラズマ加熱の効果が確認された[2]。EBW を用いた加熱手法の 開発においては、電磁波から EBW への変換過程、EBW の伝搬特性、減衰加熱過程を調べ、最適 化を行う必要があり、そのためには、実際の EBW の振る舞いを実験的に計測することが重要であ る。しかし、これまで、理論的、数値的な解析は多くなされているものの、EBW を波動として直 接計測しているのは小型低温プラズマにおいてプローブによって計測された例が報告されている のみである。これまで、プラズマの加熱波動の直接検出と言う意味でも、イオンサイクロトロン 周波数帯でのイオンバーンシュタインモードの遠赤外レーザーを用いた協同散乱計測[3]や CO, レ ーザーを用いた位相コントラスト計測[4]、低域混成波の CO。レーザーを用いた協同散乱計測数少 ない例があるのみである[5]。一方、TEXTOR[6], ASDEXU[7], LHD[8]などの加熱ジャイロトロン を備えた装置において、ジャイロトロンからの大電力ミリ波の協同散乱計測を試み、イオンの熱 揺動に伴って集団的に運動する電子による協同散乱スペクトルの受信に成功し、ジャイロトロン 周波数に対して上下数 GHz での散乱スペクトルの観測を行っている。熱的揺動レベルの小ささに 起因する散乱断面積の小ささを補うために、1MW レベルのプローブビームを使用したことがその 計測が可能になった大きな要因である。数 GHz 帯のイオンの熱揺動に付随した電子密度揺動レベ ルに対して、加熱波動に付随する電子密度揺動レベルは桁違いに大きく、特に静電波である EBW の場合には、伝搬する波動の持つエネルギーが直接密度揺動となって現れるため、プローブビー ムとして適当な周波数を選べば、散乱断面積を大きくすることが可能であると考えられる。

電磁波の散乱計測を適用して、EBW を直接検出し、モード変換、伝搬、減衰過程を調べること ができれば、EBW を用いた加熱、電流駆動の最適化と、広いプラズマパラメータに対する適用性 が期待できる。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・高性能化するのが本研究の最 終目標である。当面必要な検討課題は、このために必要とされるプローブビームの性能と具体的


図 1. raytrace の一例 中心加熱・電流駆 動に最適と考えられる N || =0.56 で入射 した場合のray 軌道を示す。



図 2. 図 1 に示した ray に沿った波数 (k_R, k_{ϕ})の変化の様子。170GHz の電磁波が受ける散乱角 (60, 90, 180[°])に 対応する波数を実直線で示した

な散乱波検出配位、検出器構成を検討することで ある。

図1は、QUEST の赤道面断面図と raytrace コ ードで予想される 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 とした場合の軌道を重ねたものである。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 に変換される様子が示されている。この時の図1 に示した x 軸方向に沿った 主 半径方向とトロイダル方向の波数の変化を示したのが図 2 である。この図で解るように、 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ており、170GHz を散乱計測の プローブビームとして用いた場合に、観測できる散乱角 ($60\circ$, $90\circ$, $180\circ$) に対応する波数を 実線で示した。入射電磁波が EBW に変換され、伝搬する過程の主要部分が 170GHz の散乱計測 によ り計測可能であることが解る。しかしまた、散乱角 180° は、後方散乱を示しており、 170GHz を使用する限りこれよりも高い波数の観測は不可能で、吸収過程を含めての観測はさら に周波 数の高い電磁波の散乱を用いる必要があることも示している。 このように、現在考えられ 計測 ではランチャー前面に近い領域での後方散乱を観測する必要があることが解った。

参考文献

- [1] J. Sheffield, "Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation" Academic Press.
- [2] H. Laqua, Plasma Phys. Control. Fusion 49 (2007) R1-R42.
- [3] H.Park et al., Rev . Sci. Instrum., 56 (1985) 922.
- [4] C. M. Surko, et al., Phys. Rev . Lett. 43, (1979) 1016.
- [5] E. Nelson-Melby et al., Phys. Rev . Lett., 90 (2003)155004.
- [6] H.Bindslev et al., Phys. Rev . Lett., 97 (2006) 205005.

[7] F Meo et al., Porc. 36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA \lambda 1.33E, P-1.155 (2009).

[8] S. Kubo et al., Rev . Sci. Instrum., 81, (2010) 10D535.

光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測

Ocean Surface Sensing using Light, Millimeter and Micro-wave

独立行政法人 情報通信研究機構 統合データシステム研究開発室 灘井章嗣

・目的

光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測は、測定対象に擾乱を与えずに測定することができるため、 多くの分野で重要な計測手法となっている。最近では物理的に存在する対象を利用するだけでなく、 屈折率の変化による散乱の利用や、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 おり、遠隔計測の分野において主要な技術となっている。

現在、光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測対象は、雲やエアロゾルの計測、海洋波浪や海上風 等の海表面の計測、地形や土地被覆分類等の地表面の計測、プラズマでの散乱計測等多岐に及んで いる。一方、これまで計測手法にかかわる情報交換は、海表面の観測分野に限っても、あまり活発 ではなかった。

本研究では、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海面計測にかかわる全国の研究者が集い、対象分 野を超えて知識や疑問を共有することにより、光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測に関する理解 を深めるとともに、新たな方法論の模索、応用対象の発掘を目指す。

・研究の具体的方法

年に一回程度、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測にかかわる研究者が会し、研究打ち 合わせを開催する。計測対象に関する議論よりも、計測手段について、自由な雰囲気のもと、知識 の共有や、コミュニティの形成に力点を置く。これにより、計測の技術面を土台とした研究者間の つながりが形成できるように努める。

・今年度の活動

今年度は研究者代表者・分担者のスケジュール調整に手間取り、研究会の開催は出来なかったが、 3月12日に研究者代表者・分担者で研究打合せを行う予定である。

参加予定者

灘井章嗣 情報通信研究機構 主任研究員 江淵直人 北海道大学低温科学研究所 教授 林昌奎 東京大学生産技術研究所 教授 吉川裕 九州大学応用力学研究所 准教授 3月11日、12日に開催される「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集会」で行われる発表のタイトルは以下のとおり。

・(仮題)シュトゥットガルト大学プラズマ研究所でのマイクロ波・ミリ波研究

- ・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
- ・LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展
- ・スポットライトモード SAR"Live SAR"を用いた地表画像取得実験
- ・海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用
- ・ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラーによる、雲物理特性と鉛直流の研究
- ・マイクロ波パルスドップラーレーダによる海面観測
- ・海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測
- ・LHD におけるマイクロ波反射計を用いた波動計測
- ・LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較
- ・位相配列アンテナによる熱輻射波計測

研究者代表者・分担者以外からも、海面からのマイクロ波後方散乱のシミュレーションなど、海 表面計測に関係するテーマが予定されており、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測手法の 物理的な意味づけ、計測量から物理量への変換の高精度化への貢献が期待されている。

また、海洋との類似性が高い大気科学分野での発表も予定されており、海洋科学分野との強調も 期待される。 マイクロ波反射計・干渉計によるプラズマ中の高周波波動計測

東京大学大学院新領域創成科学研究科 江尻晶

研究の背景と目的

プラズマ中の高周波波動電場は、電子の運動に影響を及ぼし、その結果、電子密度が変動する。一方、マ イクロ波反射計は特定の密度(カットオフ密度)で反射される性質があり、プラズマの密度揺動を測定する 手段として使用されてきた。これらを組み合わせることにより、高周波波動の電場測定が可能となる。これ まで、いくつかの装置で適用されているが、定量的な測定の実績は少ない。一方、プラズマ中の波動電場を 計測する手段は限られており、本手法は波動物理の解明と制御に非常に有用だと考えられる。そこで、本課 題では、マイクロ波反射計を用いた波動測定手法を確立すること目標とした。本年度の具体的な研究目的と して、LHD 装置においてイオン加熱用の高周波波動電場を測定するためのマイクロ波反射計の設計製作設置 と実験を目的とした。

マイクロ波反射計

LHD プラズマは複雑な形状を持ち、 送信した反射波が受信できる配位を探 す必要がある。一方、送受信アンテナの 位置は、種々の事情から自由度があまり ない。そこで、鏡の向きをパラメータに して光線追跡を行いながら、想定するプ ラズマの配位群に対して反射波が期待 出来る鏡の配位を決めた。図1に光線追 跡の様子と設計製作後に真空容器内に 設置した送受信アンテナの写真を示す。

真空窓からアンテナまでは、放射パタ ーンがガウシアンビームで近似できる コルゲート導波管を用いるので、ガウシ アンビームの伝送公式を用いて、ハード ウェア上の制約の範囲でスポットサイ ズが比較的小さくなる鏡の位置や曲率 を吟味した。

図2にシステム全体の構成を示す。マ イクロ波部は二つのガン発振器と二つ



図1:LHD プラズマの磁気面と光線の様子(a), (b), (c)。LHD の3.5U ポートの真空側に設置された送受信コルゲート導波管 と鏡の写真(d)。写真中の矢印はマイクロ波の伝搬方向を示す。

のミキサーからなるヘテロダイン方式であり、差周波数は約 900 MHz に設定される。プラズマへは 30.5 GHz のマイクロ波を二つのミラーを経由して正常波モードで入射し、約 1 x 10¹⁹ m⁻³の密度層からの反射を同様に 受信する。ミキシングしたのちの参照信号(プラズマを通らない成分)とプローブ信号(プラズマ中で反射 された成分)を高速オシロスコープでデジタイズする。さらに、計算機上で数値ミキシングを行い、反射マ イクロ波の Cosine 成分と Sine 成分を抽出し、解析に用いる。

波動測定結果

マイクロ波反射計で測定される位相はプラ ズマの密度分布の変化を反映している。そこ で、別の測定器(トムソン散乱装置、ミリ波 干渉計)で得られた密度分布から反射計の信 号を予想し比較したところ、比較的よい一致 が得られ、反射計として機能していることが 確かめられた。ただし、反射波の出現条件(出 現時刻)が予想とずれていることが分かった。 これは、屈折の効果により、実効的な反射面 がわずかにずれることが原因であると考えら れる。

LHD プラズマに数百 kW の高周波波動 ICRF
 (周波数 38.47 MHz)を入射した時の信号を以
 下のように解析し高周波波動の電場を求めた。

測定位置近傍のアンテナから数百 kW の高周波波動が放 射されている場合は、反射計で測定した高周波成分

(38.47 MHz)の位相振動は、rms で 0.01 rad.程度であ る。この時、反射波振幅の低周波揺動による変動の影響 を抑制するために、ある程度の時間(約6ms)で平均し た反射波振幅と高周波振動成分の振幅比から高周波位相 振動を求めた。トムソン散乱装置等で求めた密度分布で の反射波の位相を WKB 近似で求めて、位相振動の大き さを密度揺動の相対値に変換する。得られた相対密度揺 動は 0.01 % 程度である。さらに、波動の分散関係等を 用いてアンテナループ方向の高周波電場を評価した。こ の時、高周波波動の平行方向波数として6 m⁻¹を仮定し た。図3にいくつかのプラズマ放電での測定結果を示す。



図2:3.5Uポートに設置したマイクロ波反射計システ

ムの構成。



図3:小半径と高周波電場の関係。

図から測定小半径が増すに従って、高周波電場が大きくなることが分かる(反射計の周波数は単一なので、 密度分布が変化して測定小半径が変わることに注意)。

まとめと今後の課題

マイクロ波反射計を組み上げて実験を行い、高周波電場を求めることに成功した。今後、様々な条件での 測定を行うとともに、より多くのデータを取得できるようデータ取得系を改善する必要がある。

発表論文や学会発表

無し

24 特 3-6

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

3月に開催した研究集会のプログラムを以下に示す。

- 3月11日(月曜日)
 - 13:00-13:15 ・研究集会開催にあたって(九州大学応用力学研 副所長 花田和明)
 - 13:15-13:30 ・研究集会主旨説明(九州大学応用力学研 出射 浩)
 - 13:30-14:30 ・High-power resonant diplexers: Development, tests and first applications on ASDEX Upgrade. (シュトゥットガルト大学プラズマ研 究所 Walter Kasparek)
 - 14:40-15:25 ・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)
 - 15:25-16:10 ・LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展

(核融合科学研究所 西浦正樹)

16:20-17:05 ・スポットライトモード SAR" Live SAR"を用いた地表画像取得実験

(福岡工業大学 近木裕一郎)

- 17:05-17:50 ・海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用 (東京大学 吉田毅郎)
- 17:50-18:35 ・マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測とその応用

(九州大学 間瀬 淳)

3月12日(火曜日)

- 10:00-10:45 ・ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラー による、雲物理特性と鉛直流の研究(九州大学 岡本 創)
 10:45-11:30 ・マイクロ波パルスドップラーレーダによる海面観測
 - (東京大学林昌奎)
- 11:30-12:15 ・海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測

(北海道大学 江渕直人)

- 13:30-14:15 ・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)
- 14:15-15:00 ・LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較

(核融合科学研 伊神弘恵)

- 15:00-15:45 ・位相配列アンテナによる熱輻射波計測(九州大学 出射 浩)
- 16:00-17:00 · 全体討論
- 17:00-17:30 ・今後の進め方について

講演の主な要旨は以下の通り。

・「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)

電磁波のコヒーレントな散乱を用いたプラズマ中の波動の励起・伝搬・吸収を直接検出す る手法を紹介し、QUEST 装置の電子バーシュタイン波動(EBW)を例に議論した。当初、170GHz ジャイロトロンをプローブビームとして検討を開始したが、8.2GHz のレイトレースから予 想される EBW の波数が非常に大きくなるため、後方散乱でも伝搬過程の途中までしか検出 できず、CO2 レーザーでは逆にほとんど前方散乱の領域で吸収が起こり、空間分解ができ なくなることが分かった。今後、検出器システムの周波数応答や出力の得やすさを考慮し て、プローブビームの選択をする必要がある。

・「LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展」(核融合科学研究所 西浦正樹) 核融合プラズマ中の閉じ込められた高エネルギーイオンを計測するために,協同トムソン 散乱計測装置の開発を行っている.メガワット級 77GHzジャイロトロンをプローブビーム とし,その散乱スペクトルからイオン速度分布関数を得ることが可能になる.協同トムソ ン散乱の受信 系のアップグレード,プローブビーム品質の改善,得られたスペクトルの解 析,今年度得られた実験結果について報告した.

「海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用」

(東京大学 吉田毅郎)

マイクロ波レーダを用いた海面観測のために、海面のマイクロ波後方散乱を時 間領域で求めるシミュレーションツールの開発を行った。マイクロ波レーダを用いた水槽 実験と比較することで、本シミュレーションの有効性を確認した。また、シミュレーショ ンの応用として、パルスドップラーレーダを用いたレーダ画像や合成開ロレーダ(SAR) 画像へとシミュレーションを発展させた。今後はSARを用いた海面高度計測における波浪 の影響を評価するためにシミュレーションを活用する予定である。

・「マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測とその応用」(九州大学 間瀬 淳) マイクロ波を用いたアクティブな生体計測について報告した。アクティブな計測法で は、被験体に入射波を照射し、透過波、反射波、あるいは散乱波を測定するが、生体 測定という特性から、反射波の測定を中心として記述した。反射波信号は交流成分と 直流成分に分類され、前者はバイタル信号など生体の動的な活動に基づいた情報を提 供する。バイタル信号の揺らぎは被験者の様々な状態を反映し、健康管理、ストレス 評価などへの適用が期待される。一方、直流成分は、マイクロ波の透過特性を利用し た、生体内部イメージングとして発展し、乳がん検出を目的とした胸部イメージング への実用化が期待されている。

・「ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラーによる、雲物理特性と鉛直流の研究」 (九州大学 岡本 創) ミリ波レーダとライダの雲観測の歴史、特に初期から現在までの国内外の各研究機関にお ける状況について簡単に振り返った。次ぎに、理論的背景として、レーダ方程式、ライダ 方程式と、そこに現れる雲やエアロゾルの微物理特性との関係について、実験室データや、 航空機による現場観測データを紹介しながら、解説した。地上と船舶におけるミリ波レー ダとライダによる雲同時観測と解析の結果を紹介した。それらを発展させた形で、人工衛 星に搭載されたこれらの測器のそのデータの解析の現状について紹介した。さらに、雲度 プロファイラを、ミリ波レーダによるドップラー速度、ライダ観測との同時観測データと 解析の状況、期待される事などについても述べた。また、解析に必要な電磁波の散乱理論 についても解説を行った。

・「海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測」(北海道大学 江渕直人)

海面からのマイクロ波後方散乱のメカニズムおよび,その応用として,衛星搭載マイク ロ波散乱計によって海上風速・風向を観測する原理について紹介した。海面におけるマイ クロ波の後方散乱については,マックスウェル方程式の近似解と海面形状の統計的性質を 結びつけた概念モデルがいくつか提案されており,室内実験,航空機実験,衛星観測など によって得られた海面からのマイクロ波後方散乱の特性を定性的にはよく説明することが 知られている。しかしながら,観測値を定量的に説明できるモデルはなく,実際の風速・ 風向算出には,経験的手法によって導出されたモデル関数が用いられているのが現状であ る。

・「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)

マイクロ波反射計で高周波波動の誘起する密度振動を測定し、波動電場を求めることがで きる。そのためには、反射計で位相振動を測定するとともに、密度分布、分散関係を精度 よく求める必要がある。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に設置し実験を行った。光線追跡、ビーム伝搬設計を行い、 反射計として正常に動作することを確認した。波動由来の密度揺動レベルは0.01%程度で 電場は1 kV/mのオーダーである。反射面が外側に行くほど電場が強くなる傾向があり、 3.5U反射計は7.5-ICRFよりも測定点近傍の3.5-ICRFアンテナのパワーに強く依存する。

・「LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較」

(核融合科学研 伊神弘恵)

電磁波モードの伝播密度限界を越えた高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱に、伝播 密度限界の無い磁化プラズマ中の静電波モード(電子バーンシュタイン波:EBW)を用いる ため、EBW と電磁波モード間のモード変換過程を含んだ波動伝播を数値計算するためのモ デリング手法を研究している。大型ヘリカル装置の EBW 加熱実験結果と数値計算による 予測には高モード変換効率が得られる入射角度に関して約4度の乖離があり、その要因の 解明が課題となっている。

・ 「位相配列アンテナによる熱輻射波計測」(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。熱輻射 は連続な周波数スペクトラムを持ち、非コヒーレント波であるため、応力研での位相配列 アンテナによる受信例が紹介された。SAT に類似した他の方式による英国の他研究機関で の試みも報告された。

全体討論では、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。 議論の中では、

1. まだ、十分に話を聞けていないので、同じ形式の研究会を続けてはどうか

2. 共通な課題等を取り上げて、課題を議論するような研究会は設定できないか

3. 設備や実験の様子を知りたいので、九大以外で研究会が持てないか

などといった意見があった。まず、各々の研究課題で、周波数や、モデリング、解析手法、 課題等を表にまとめることから始め、参加者に今回の研究会で興味を持った内容や、話を 聞きたい内容なども含めて意見集約することとした。項目2を考えながら、項目1、3を 進めることとし、共同研究者以外からも講演いただくことを考え、メイルベースで来年度 の研究集会の進め方を模索することとした。

24 FP-1

QUEST 装置における VUV 分光法によるオーミック放電での不純物の振舞いに関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

課題番号:24FP-1

研究課題:QUEST 装置における VUV 分光法によるオーミック放電での不純物の振舞いに関する研究
研究期間:H24年4月1日-H25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,董春鳳,王二輝)
配分額:研究費(5万円),旅費(10万円)

目的:

磁場閉じ込め装置・QUEST の不純物挙動を VUV 分光計測法を用いて調べる.特に希ガス(ネオン) 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.計測に支障のない硬 X線の少ない放電を見つけ,ネオンをパフし実施する.

実験結果:

不純物の時間変化を調べるために,硬X線の除去を目的として低プラズマ電流の非誘導プラズマ生成を行った.結果として垂直磁場(Bz)を減少させると比較的エネルギーの高い電子の捕捉軌道が悪くなり,硬X線を発生させる前にプラズマから完全に散逸し,ほぼ完全な形での分光計測が可能となることが分かった.図1にその結果の一例を示す.上図が高Bz磁場(R=0.5m付近で160G),下図が低Bz磁場(10G)放電時のVUVスペクトルを示す.高Bz磁場の場合にはスペクトルが硬X線からのCCD



図1 R=0.5m 付近での Bz 磁場 160G(上)及び 10G(下)での VUV スペクトル比較.

ノイズでほぼ隠れており、時間変化を観測することは不可能であった. Bz を低磁場にすると完全にノ イズを消去することが可能になり、不純物の振舞いを観測できる準備が整った.



図2 ネオンパフ(4.0s)前後でのVUV スペクトル変化(赤:ネオンパフ後).

ネオンを放電途中にパフし, リサイクリングを観測する実験を行った. ネオンは t=4s に数 ms 程度の間パフしており, I_p=5kA, P_{ECH}=40kWx2 であった. ネオンパフの前後でのスペクトルの変化を図2 に示す. これらスペクトル線を解析することにより NeII, III 及び IV のネオンスペクトルと思われる スペクトル波長と遷移を特定した. 残念ながら NeV (Ne⁴⁺) 以上の価数は観測されなかった. NeIV の

電離エネルギーは 77.5eV であり、これまでに観測している他の 不純物価数から推測して妥当な結果である.また、スペクトル線 の価数分布も Bz の大小によらず大きくは変化しなかった.少な くともバルクの電子温度は Bz に鈍感であることが推測できる.

この種の放電を用いて不純物スペクトルの時間変化を QUEST で始めて計測することができた.結果の一例を図3に示 す.上図は分光器の中心波長を 1600Åに,下図は 800Åに設定 し観測した.水素の振舞いを代表する Ly α線は 4s でのネオンパ フの有無に関わらず全く変化しない.また,炭素,酸素及び鉄等 の不純物もネオンパフと同時に少し増加するが大きな変化では ない.しかしながら,数 ms 間のネオンパフ後,ネオンは放電時 間の経過と共に増加し続け,おおよそパフ後 2-3 秒後に定常値 を取る.しかし,定常に到達した後も減少する気配はない.t=7s 辺りで突然不純物スペクトル強度が増大しているが,現在のとこ ろ原因は定かではなく詳しい解析を必要とする.

今後の課題と予定:

低 Bz 放電を使用して初めて不純物の時間変化を観測することが でき、今後の共同研究に向け大きな進展となった. 次回はヘリウ ム等、異なったガスを用いてリサイクリングの研究を行い、水素 放電との比較を行う予定にしている. 放電の定常維持に向け、プ ラズマ壁相互作用等に関する知見が得られることを期待してい る.



図3 ネオンハン (48) 時の各種 不純物の振舞い(上:#20189, 下:#20201).

透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発

京都大学工学研究科・高木郁二

課題番号:24FP-1 研究課題:透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発 研究期間:H24年4月1日-H25年3月31日 所内世話人:図子秀樹 協力者:5名(古田美憲、図子秀樹, Sanjeev Kumar Sharma, A. Rusinov, 井上雄貴) 配分額:校費(5万円),旅費(15万円)

目的:

QUEST の水素リサイクリングモニタの構築と粒子バランスの局所・定量評価法の確立を目指す。特 に壁粒子吸蔵と放出の遷移条件の背景物理を調べるために、透過束の実測と拡散・再結合方程式の数値 解により、壁への水素束モニターの開発を行う。これまでの Ni, Pd 薄膜での透過計測に加えて、新た に PdCu 合金を用いた水素プローブを試作し、高感度検出器の開発を目指す。

実施方法:

QUEST 装置並びにプラズマのリサイクリングの研究のために高感度プローブを試作する。これまで は固定位置に設置した Ni, Pd メンブレム透過プローブ(直径 16 ¢)を用いて水素束の絶対評価と時間 応答計測を行ってきた。しかし、設置場所が壁より奥まっていたこともあり、通常実験中の中性粒子が 少ない状態では感度が十分ではなかった。本年度は水素ガス純化装置に用いられている PdCu 薄膜を真 空中で使用可能なプローブ(直径 30 ¢、長さ 80mm)として新たに開発し、それを下部ダイバーター板上 のプライベート領域に設置し、透過 probe 部から直径 13mm 長さ 60mm のベローズパイプで放電管外部に 引き出し、長さ約6mの延長パイプ、四重極残留ガス分析器、真空ポンプからなる分析部で分析する。 感度は He 標準リークを用いて校正する。

実験結果:

1) PdCu 透過プローブの試作

真空容器内壁に入射する局所水素原子束を評価するた め図1に示すPdCu薄膜(厚さ22μm 直径30mm 長さ82 mm)のPDP probeを試作した。これは水素ガス純化装 置に用いられるものであり、真空中で利用可能なように 薄膜の内外両面を穴あきステンレス(透過率49% 穴径 1.5mm)で保護している。内部にヒーターを内蔵するが ヒーター線は大気のままベローズパイプで放電管外部 に引き出している。真空トラブルの場合は全体を粗挽き し作動排気が行える構造である。使用温度は放電管が 100度で baking されており、それが下限であり、上限 は 400度である。ヒーター温度は熱電対でモニターし PID 制御により1度以下に保持される。ただし、実験中



図 1 下部ダイバーター板に設置した PdCu 透過プローブ

の PdCu 表面温度はモニターしていない。PdCu 薄膜を透過した H2 ガスは 3/8 パイプにて同じく真空 容器外にベローズパイプで取り出し、バルブ、絶縁管を経てガス分析部に導かれる。この位置に校正用

He 標準リークが置かれている。下流側に約 6m の配管の のち水素透過量を QMA (Quadrupole mass analyzer: 四重極型質量分析計)で測定する。

図2に ECR 放電洗浄プラズマにおける透過東計測結 果(青色曲線)を示す。放電時間は 30 分であり約 100 秒で飽和し、定常状態となる。放電後はほぼ同じ時定数 で減少する。定常状態で観測される上下の揺らぎは放電 中にトロイダル磁場を掃引したことによるプラズマから の Ha 強度の振動に対応している。PdCu は再結合律速の 金蔵であり水素濃度 *C(t)*は上流、下流の再結合係数をそ れぞれ *Ku,Kd*、入射束を *Fin* とすると

$$L\frac{dC}{dt} = F_{in} - (K_u + K_d)C^2$$

の解として与えられる。定常状態では透過束は簡単に

$$F_{pdp} = F_{in} \frac{K_d}{(K_u + K_d)}$$

と与えられる。ここで $K_u = K_d$ の場合には約半数が透過束 として検出できる。図中の赤線は初期境界条件として再 結合律速を与え拡散方程式を解いた場合の解を示してい る。ここで Ku,D は T=500 度の文献値を用い、Kd は定 常状態の近似解から与えた。

2) 定常プラズマにおけるダイバーター部の H 原子透過 計測

QUEST で行っている高周波による電流駆動と定常運転 プラズマにおいて水素原子透過束を計測した。図3にそ の結果とリサイクリングの指標として利用する Ha 強度 の時間発展を示す。この量はガス注入量とリサイクリン グによって決まるが、この放電の場合は約100秒からリ サイクリングが増大し、駆動電流が減少する。100秒ま では、入射束を Ha(t)として1~1.8x10¹⁷ H/m²/s を与える と図の赤曲線(0.2 x10¹⁷ H/m²/s)のようによく一致した。 しかしながら100秒後は大幅に増大し、パルス終了時に は1.7 x10¹⁷ H/m²/s に達した。入射束を Ha とすると



図 2 放電洗浄プラズマにおける PdCu プ ローブの H 透過曲線(青色)。拡散方程式 を再結合律速の初期境界条件で解いた解 (赤色)を同時に示す。*Ku,D* は文献値を 用いた。



図3 3分間プラズマにおける(上) 水 素発光強度の時間変化、(下)水素透過曲 線(青色)および数値計算結果(赤色) 入射フラックスとして水素発光強度の時 間変化を用いている。

5x10¹⁷ H/m²/s でもこの値は 0.7 x10¹⁷ H/m²/s にしか達しなかった。この理由として1) Ha がダイバー ター部を見ているのではないこと、2) ダイバーター板や PDP プローブ表面温度の上昇が考えられる。 参考文献

[1] S.K.Sharma, I. Takagi: JNM 420 (2012) 83-93[2] 井上雄貴,高木郁二他、P核学会九州支部会 2012 12

高温構造材料の組織制御による変形抑制の微視的機構

核融合科学研究所 室賀健夫

1. 目的

各種原子炉や高温プラントで使用される構造材高温使用限界温度を決めるのは、多くの場合熱クリー プ特性であると考えられている。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、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。本研究では、Cr-Wフェライト鋼、バナジウム合金に おいてナノ粒子分散により強化した材料の高温クリープ変形試験を行い、試験後の透過電子顕微鏡によ る組織観察により、変形過程における分散粒子の発達、結晶や転位構造の変化を求め、強化法の有効性 と一層の特性向上に向けての指針を得ることを目的とする。平成24年度はバナジウム合金について重 点的に研究を進めた。

2. 方法

V, Cr, Ti, Y, TiC, SiC, Ti₃SiC₂ のそれぞれ粉末を V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3XC となるよう調整し、遊星 ボールミルにより WC/Co ボールを用いメカニカルアロイング(MA)を行った。ボールと材料の重量比は 約5:1 であった。管封入の後、1000℃3時間、アルゴン雰囲気で HIP 処理し、その後1200℃,1時間 の熱処理を施した。試料を九州大学応用力学研究所の透過電子顕微鏡(TEM)により観察するとともに、 SEM, EDS, XRD により塑性・構造評価を行い、さらに高温引張り、クリープ試験を実施した。

3. 結果と考察

図1に V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の MA の進行による SEM-EDS 組成面分析結果を示す。時間の経過とと もに、Cr の溶解が進みその後 Ti が溶解する様子が分かる。これに対応して格子定数を測定した結果を 図2に示す。V(原子半径: 0.132nm)のマトリックスにおいて、Ti (原子半径: 0.143nm)は格子定数の 増加、Cr (原子半径: 0.125nm) は格子定数の減少をもたらす。図2において格子定数が一旦減少して から増加に転ずるのは、図1で示した元素別の段階的な溶解と対応している。



図 1. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の MA の進行による SEM-EDS 組成面分析結果



図 2. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCの MA の進行に よる格子定数の変化

図3は、各試作合金の硬度を比較した ものである。V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCに ついては、図2で格子定数が増加する 10時間以上において硬度が増加し、Ti の溶解により強化が進んでいることが 分かる。他の添加合金の硬度はこれより も低い値にとどまっている。

図4は、V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCの (a) HIPのみ、(b) HIP後1200℃、1時 間熱処理のTEM 組織の比較を示す。熱処 理により、分散粒子の密度が高まった様 子が分かる。

本研究より、V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC

が有望な組成であること、MAはCrの溶解、Tiの溶解の順に進み、Tiの溶解により強度が増加すること、 HIP後熱処理によりナノ粒子密度を高められることなど、V-4Cr-4TiのMAによる強化の可能性とその機構が明らかになった。高温引張り、クリープ試験については引き続け研究を進める。

4. 研究組織

室賀健夫、長坂琢也(核融合科学研究所)、鄭鵬飛(総合研究大学院大学) 渡辺英雄、荒木邦明(九州大学応用力学研究所)

- 5. 国際会議での発表
- Development of nano-particle dispersion strengthened vanadium alloys Zheng Pengfei, Nagasaka Takuya, Muroga Takeo, Chen Jiming 11th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, Sep 10-14 2012, Chengdu Sichuan, China



図3. 各試作合金の硬度



図 4. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCの (a) HIP のみ、(b) HIP 後 1200°C、1 時間熱処理の TEM 組織比較

LHD 第一壁トロイダルアレイ試料による対向材料の損耗/損傷 および水素同位体捕捉量分布の評価

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 時谷 政行

【目的】

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のプ ラズマ対向壁は、SUS 製第一壁と炭素製ダイバータ タイルで構成されている. LHD は 3 次元ヘリカル構 造であるため、対向壁の構造も複雑であり、それ故、 材料の損耗・再堆積の物理特性も、場所によって大 きく異なることが以前より考えられてきた. 昨年度の 実験では、第一壁上に連続したトロイダルアレイ試料 (SUS と Si)を設置し、表面分析実験を実施したところ、 第一壁損耗の主要因はグロー放電洗浄であり、トー ラス外側第一壁ではそのスパッタリング損耗率が、 Fe、Cを主成分とする不純物元素の堆積率を凌いで いるために、本来の金属表面がほぼ維持され続けて いることが明らかになった.

このような背景の下,2011 年度の LHD 実験終了 後,閉ダイバータドーム下(9-1 セクション)を観察した ところ,多量の堆積層がフレーク状に形成されている ことが確認された.LHD の閉ダイバータ排気システ



図 1 LHD 閉ダイバータ構造 CAD 図 黄色部:ダイバータ受熱板,緑色部:ドーム構造

ムは、図1に示すダイバータ受熱板とドーム構造で構成される.ドーム下にはクライオポンプが設置されダイバ ータ排気を行うこととなっている.9-I構造部には未だクライオポンプが設置されておらず、ドーム下における PWI特性の研究が継続して実施されている.フレーク状堆積物は図1の赤い四角で囲んだ領域で確認さ れた.このような堆積物がクライオポンプの排気口に蓄積され続けると、排気効率の現象をもたらすこ とが考えられる.また、堆積物は剥離し易い構造のため、ダストとなってプラズマ中に混入する可能性 もある.今年度は、昨年度に明らかになった外側第一壁のPWI特性と比較を行うために、ドーム下のフ レーク状堆積物の材料物性を明らかにすることを目的とした.

【実験方法】

堆積物の物理特性を調べる目的で,2011年度 実験サイクル後に、フレーク状堆積層を九州大 学応用力学研究所に運び、その微細構造を集束 イオンビーム加工観察装置(FIB)と透過型電子 顕微鏡(TEM)を用いて観察した.FIBによるナノ 加工と TEM による微細構造観察を組み合わせ ることで、フレーク状堆積層の断面の詳細な構 造解析を行うことができる.表面構造について は、走査型電子顕微鏡(SEM)とそれに付設され ているエネルギー分散型 X 線分析装置(EDX)を 用いて評価した.

【結果および考察】

図 2(a), (b)に, 実験サイクル後にドーム下で 確認された堆積物の場所と写真を示す. 図 3(a)



図 2 2011 年度実験サイクル後に 9-I 閉ダイバータ 構造ドーム下に形成されたフレーク状堆積物



図3 図2(b)に示したフレーク状堆積物の写真(a)と、その断面 TEM 像(b)

に、採取したフレークの拡大写真、図 3(b)にその断面 TEM 像を示す.図 3(b)において明るく見える部 分は炭素が主成分、暗く見える部分は Fe が主成分の層であり、組成の異なる堆積層の形成が無数に繰 り返された Mixed-material 構造であることがわかる. Fe を含む Mixed-material 堆積層は機械的に脆い ため、数多くのフレークがこの場所で形成されたと考えられる.ドーム下においてなぜこのような構造 となるのかについては今後のさらなる解析が必要である.図 3(b)を見てわかるように、大部分の層は炭 素を主とした構造である.この場所のダイバータ受熱板が受ける熱/粒子負荷は、閉構造ダイバータ受熱 板の中で最も高く、炭素製受熱板のスパッタリング損耗率が他の受熱板よりも高いことがわかっている. したがって、炭素材料のスパッタリング損耗量を抑制しなければ、堆積物の形成、フレークの発生は抑 えられないことが示唆された.そこで、2012 年度のサイクルでは、図 2(a)赤枠内の 3 枚のダイバータ 受熱板をタングステン被覆炭素タイルに交換し、1 実験サイクル間プラズマ実験に曝露した.その結果、 図 4 に示すように、ドーム下へのフレークの形成を完全に抑えることができた.しかしながら、タング

ステン被覆層は、ダイバータストライクポイント に沿って激しく溶融および損耗しており、下地の 黒鉛基盤まで激しく損耗を受けていた.また、溶 融層の周辺部では幅 0.1mm 以下の緻密なクラッ ク網の形成が確認された.次期実験サイクルはこ のままの状態で使用できないほどの損傷を受け ていたが、黒鉛基盤が見えている程の損耗を受け ていたにもかかわらず、ドーム下への Mixed-material 堆積層(フレーク)の形成は抑制さ れていたことから、ストライクポイント以外の健 全なタングステン被覆層の存在がフレークの抑 制に重要な役割を果たしていると考えられる.今 後は、溶融層の構造解析、タイル表面の堆積層分 布及び捕捉水素量の分布について解析を進める.



図 4 2011 年度実験サイクル後の 9-1 閉ダイバータ 構造ドーム下の状態.

24 FP-6

核融合プラズマ中における熱流束と渦度流束の時空間的非局所性に関する研究

原子力研究開発機構 徳永晋介

1. 目的

核融合プラズマのマージナルな閉じ込め性能を決定する乱流輸送機構は、核融合炉の効率向上を目指 し改善閉じ込めを活用した先進オペレーションシナリオを構築してゆく上で、その理解が求められる最 重要テーマの一つと言える。本研究はプラズマ中に励起されるドリフト波乱流と、それが駆動する(1) 温度分布の緩和および(2)帯状流の励起の"二つ"が、競合しながらそれぞれ別チャネルから乱流にフィー ドバックする点にフォーカスし、プラズマのマージナルな輸送を決定するグローバルな構造に上記三者 の関係が与える影響を調査するものである。

2. 方法

1. 渦度流束・熱流束の時間的非局所性

Flux driven のグローバル ITG シミュレーション結果を用いて、渦度流束、熱流束の自己相関に関す る解析を行う。長い相関時間を持つ帯状流や輸送とのマルチスケール相互作用が、乱流輸送に記憶効果 を持ち込み、乱流輸送を質的に変化させる可能性に関して検討を行う。また Collisionality など、帯状 流の減衰や分布緩和の時定数を変化させるパラメータへの依存性を調査する。また、帯状流-乱流もしく は温度分布緩和-乱流の相互作用の一方を人為的に切る数値実験を行い、結果の比較研究を行う。記憶効 果を取り入れた非線形マルコフ過程やマルコフチェインモデルに当てはめた物理モデリングの可能性 を検討する。

2. 渦度流速・熱流束の相互相関と空間的非局所性

渦度流束と熱流束の相互相関、静電ポテンシャル・渦度・温度揺動間の位相差に関する解析を行う。 特に ExB staircase と呼ばれる、中間スケールの多重セル構造の形成が見られる結果を得て、その構造 と渦度流束との関連などについて調査を行う。定常な散逸構造としての ExB staircase と熱・渦度流束 の関係を、potential vorticity の均一化という文脈から議論することで、核融合プラズマ中で帯状流シ アが一部に集中して効率的に形成されるための本質的な条件を模索する。

3. 結果

共同研究採択後の著者の異動により、九州大学応用力学研究所計算機へのリモートアクセスが大幅に 制限される状況(職場からのアクセスが不可能)となったため、共同研究を応募当初の計画に則って進 めることは極めて困難となった。

上記の理由により、グローバル乱流輸送コードおよび解析コードの整理・近代化改修・改良作業まで しか及ばず、期限内に学術的結果を得るに至らなかった。コード修正作業は進捗したものの、前節まで に述べた計算・解析作業は今後の課題として繰り越さざるを得ない。本報告書では主に応力研計算機シ ステムの助力を得て今年度に行うことが出来た乱流輸送コード・解析コード開発の進展の概略について 述べ、物理研究の進捗については現在進行中の作業に言及するにとどめる。

コード開発の進捗、研究の現状

本共同研究では旅費等の採択は無く、また前述した事情により SINET 等の高速回線も利用できなか ったため、一般回線経由で遠隔作業を効率的に行うには計算・解析結果の作図・閲覧に伴う通信を軽量 化する必要があった。従来用いていた Fortran から呼び出すグラフィックライブラリに替えて、Fortran が出力したバイナリデータを読み込んでローカルで処理を行う解析・作図コードを Python で開発した。 また、それに合わせた輸送コード側の出力変更と、Fortran90 化作業も行った。Fortran90 で記述され た輸送コードと Python による解析コードを用いた遠隔での作業手法確立は、今後のコードの保守性と 研究効率を大きく高める結果となった。

これまで主にベクタ計算機である応力研のSX-9F上で並列計算を行って来た乱流輸送コードを、京や IFERC CSC の Helios 等に代表される大規模並列スカラ計算機の時代に合わせてゆくコード改修・最適 化が必要なため、応力研のCray XT4上でのコードチューニング作業に着手した。メモリを共有するノ ード内での OpenMP を用いた並列化を行った。線形計算の結果は良好に得られたが現状ではまだ計算 効率に大きな改善は見られず非線形計算は荷が重い。現在行っている3次元ループの組み換え作業を継 続する必要がある。また流体モデルに基づく現状の乱流輸送コードでは、スペクトル法を用いているた めモード数や並列プロセス数の増加によって通信量が大幅に増大する傾向があり、スケーラビリティに 制限があることも原因と考えられる。擬スペクトル法を採用して通信量の増大を抑制する改良が今後必 要である。

本共同研究の眼目であった熱流束・渦度流束の解析には、冪上則に従う広い周波数帯域の振る舞いを 見るために高い時間解像度かつ長時間の時系列データが必要となるため、その算出とデータ圧縮・出力 を行う輸送コードの修正と解析コードの開発を行った。しかしながら当該データは数ギガバイトの容量 となり現状では転送が困難なため、解析作業の実行には今後こちら側の接続環境の改善を待つ必要があ る。当初の関心事であった熱流束・渦度流束の関係を検討する上で帯状電場と帯状圧力場の変動を結び 付ける Geodesic Acoustic Mode (GAM)の影響を吟味する必要があるが、従来のモデルではエネルギ ー方程式における磁場曲率・勾配ドリフトとの結合項が欠けていることから GAM が強く励起され過ぎ る傾向があったため、コード上でのモデルの入れ替えを行った。

4. 研究成果報告

なし

金属材料の光学特性および電気伝導特性に与える低エネルギーイオン照射の影響

島根大学大学院総合理工学研究科 宮本光貴

1. はじめに

イオン照射された材料の表面特性変化は,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り,現象の理解に関する多様な研究がなされてい る.我々は,これまでイオン照射された材料の劣化程度を非破壊で簡便にその場診断する手法の最適化 を最終目的として,照射下での金属ミラー材の光反射率変化を,損傷組織発達程度と比較しながら調べ てきた.本年度の共同研究においては,低エネルギーイオン照射したモリブデン(Mo)ミラー材の光反射 率変化の結晶方位依存性の評価を行った.

2. 実験方法

試料は㈱ニラコ社製の粉末焼結材,および単結晶材(岡山理科大学理学応用物理学科平岡教授より御 試供)の Mo 試料を用いた.単結晶材については,SEM-EBSD により結晶方位を評価した後に,試料 表面の法線方向がそれぞれ<001>,<101>,<111>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 のヘリウムイオン照射を行い,照射後の表面組織変化と結晶方位の関係を調べるために SEM-EBSD を用いた表面観察,結晶方位解析を行った.また,照射後の光反射率変化を分光エリプソ メトリーにより測定した.

3. 結果および考察

鏡面研磨仕上げした多結晶 Mo 試料に室温で 3keV-He+を 10²² He/m² 照射した結果, 試料 表面には,結晶粒ごとに異なっ た表面形態が観察された. 照射 前の EBSD による結晶評価と の対応から,表面組織には明ら かな方位依存性がある事が明 らかになった. 図1は照射後の 表面損傷組織と結晶方位の関 係を示している. 試料表面の法 線方向が<001>に近い結晶粒で はクレーター状の窪みを含む 激しい凹凸が観察され, <101>, <111>の結晶粒では、比較的滑 らかな表面が維持されていた. ただし、高倍率の SEM 観察結 果では<101>や<111>の結晶粒 においても、 ヘリウムバブルに



図1 室温で 3keV-He+を 10²² He/m² 照射した多結晶 Mo 試料の表 面組織の結晶方位依存性 (SEM 像). 観察した各々の結晶粒 表面の法線方向を逆極点図上に示している.

起因すると考えられる緻密なホールを伴う微細な凹凸が観察されている.さらに、表面スパッタリング による損耗は、激しい凹凸を示す<001>の結晶粒で小さく、スパッタ率の高い結晶粒において滑らかな 表面が維持されることが明らかになった.同様な観察結果は、(001)、(101)、(111)を試料表面にもつ 単結晶試料においても得られた.

一方,光学特性評価においては,表面組織観察から 予想される結果とは逆の結晶方位の依存性がみられ た.図2は,それぞれの単結晶試料に3keV-He⁺,10²² He/m²照射した後の光反射率を示している.光反射率 は,照射前の値で規格化している.(100)の試料と比 較して,(110)及び(111)試料において大きな反射率劣 化が観察される.この結果は,反射率が表面形態だけ でなく表面直下の損傷組織にも強く依存するためだ と考えられる.今後,照射済み単結晶試料のFIBを 用いた断面微細組織観察を行い,内部の損傷組織との 関連を評価する予定である.

本研究結果は、イオン照射下で金属ミラーを用いる 場合、結晶方位制御がミラー材の高寿命化につながる 可能性を示唆するものである.照射試料の電気抵抗率 変化の測定にも着手しており、来年度は、照射による 構造の乱れが、電気伝導特性に与える影響もあわせて 評価していく予定である.



図 2 イオン照射(3keV-He⁺,10²² He/m², R.T.) した単結晶 Mo 試料の相対光反射率.

● 学術論文

1. Y. Sakoi, M. Miyamoto, K. Ono, M. Sakamoto "Helium irradiation effects on deuterium retention in tungsten", Journal of Nuclear Materials, in Press

● 学会発表等

- 1. <u>山本将寛</u>,<u>宮本光貴</u>,吉田直亮,時谷政行,相良明男,波多野雄治「LHD 実機プラズマに曝した 対向材料の光学特性評価」,プラズマ・核融合学会第 29 回年会,福岡,2012 年 11 月
- 2. <u>高岡宏光</u>,<u>宮本光貴</u>,森戸茂一,小野興太郎「ヘリウムイオン照射した Mo ミラー材料の表面損傷 及び反射率変化の結晶方位依存」,プラズマ・核融合学会第 29 回年会,福岡,2012 年 11 月

● 研究組織

研究代表者: 宫本光貴(島根大学大学院総合理工学研究科助教) 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: 高岡宏光,山本将寛(島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程)

24 FP-8

第一原理計算によるタングステン中のガス元素吸蔵および拡散の研究

研究代表者 日本原子力研究開発機構 山口正剛

【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)では激しいプラズマ照射をダイバーターが受ける設計になっている。 また、燃料であるトリチウムは放射同位体であるために炉材料への残留が問題になっている。そこで、特にダイバーターは水素溶解度が低く、耐摩耗性、耐熱特性、に優れたタングステン系の 材料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。本研究ではBCC金属空孔に捕獲される水素(水素同位体)のシミュ レーション研究を行ってきた。その結果、BCC構造の遷移金属(V、Nb、Ta、Cr、Mo、W、Fe)は7種 類あるものの、タングステンとモリブデンは水素との相互作用という点では大きく他の金属と異な ることが明らかになった。通常はBCC金属の空孔には水素は6個まで捕獲されると言われてきたが、 タングステンとモリブデンは12個まで捕獲する。さらに、水素の安定な位置は空孔中のOサイト ではなく、捕獲数が多くなるほどTサイト近傍にまで移動することが分ってきた。今年度は特にタ ングステン結晶およびタングステン空孔内部の水素の移動拡散について計算した。特に活性化エ ネルギーを計算した。それをもとに、熱平衡状態を仮定してタングステン中の空孔濃度を計算し た。水素雰囲気下では空孔水素複合体が生成されるが、複合体の方が生成エネルギーが著しく低 いために空孔の超多量生成が起こると言われている。そこで本研究では有限温度における水素濃 度と空孔濃度の関係を計算した。

【第一原理計算】

本研究では第一原理計算の汎用コードである Vienna ab-initio simulation package (VASP) を使った。ポテンシャルは一般化勾配近似タイ プ(GGA)のもの、K点の密度は5×5×5、原子 緩和は各原子に働く力のが 0.003 eV/Å以下 になるまで緩和を繰り返した。スーパーセルは BCC格子で原子54個のものを使った。また、水 素の移動に対する活性化エネルギーを計算す るために遷移経路に沿って10個のレプリカを置 いた。そしてnudged elastic band法を使って計 算した。この方法は遷移経路上の最高点(鞍部 点)を計算する方法として優秀である。

【タングステン中の水素の移動エネルギー】

図1(a)のようにタングステンのようなBCC結晶 中の水素はTサイトが安定である。また、図1(b) のように隣のTサイトに移るために必要なエネ ルギーは0.197eVである。多くの実験および計 算でもこの程度の値が得られている。一方、図2 のように空孔中の水素はOサイトが安定である。 空孔に捕獲された水素が隣のOサイトに移動す る際には0.208eV必要である。偶然であるが、 両方の活性化エネルギーはほぼ等しい。さらに、 図3には水素が3個捕獲された場合の例が示し てある。この場合は1つの基底状態から別の基 底状態に移るために必要なエネルギーは 0.213eVだった。空孔中の水素が5個以下の構 造について同様の計算をした。その結果、水素 が結晶内を拡散する、または空孔内で構造を 変化させるための活性化エネルギーはどれも 0.19から0.21eV程度である。この値はタングス テン中の水素の移動を考える場合の特徴的な エネルギーになる。



ところが、空孔に6個以上の水素が捕獲 された場合は事情がかなり違ってくる。た とえば、図4は水素が6個捕獲された状態 である。構造(A)と構造(C)はともに基底状 態で、水素はOサイトから格子定数の 15%程度ずれた位置が安定である。構造 (A)から構造(C)に変化する過程で構造 (B)を経由すると図5のように活性化エネ ルギーは通常の0.2eVと較べて極めて小 さな0.035eVになる。

基底状態の構造(A)と(C)の間は室温程度(300K)の活 性化エネルギーでお互いに行き来できる。このような場 合は1つの状態として数える方が合理的であろうと考え た。タングステン空孔には水素は最高で12個まで捕獲さ れるために、基底状態が何重にも重複しているように見 える場合がある。しかし、本研究では0.05eVに一応の区 切りをつけ、お互いに簡単に遷移できる状態は1つの状 態とみなすことにした。

【熱平衡状態での空孔濃度計算】

熱平衡状態での空孔(空孔水素複合体)濃度を計算する。必要な変数は以下のように定義する。また、空孔の 生成エネルギーなど必要な数値はRef[1-2]を参照のこと。 分配関数は次のようになる。

$$Z = {}_{N_0+N} C_{N \cdot 6N_0-18N} C_{N_H-M} \frac{N!}{n_0! n_1! \cdots} \omega_0^{n_0} \omega_1^{n_1} \cdots \exp \left(-\frac{\sum L_m}{k_B T}\right)$$

N₀: 全タングステン原子数

N_u:全水素数

n...:m個の水素を捕獲した空孔数

$$N:$$
全空孔数 $N = \sum_{m=0}^{\infty} n_m$

$$M:$$
空孔に捕獲された全水素数 $M = \sum mn_{n}$

ω_m:空孔中の水素m個の状態多重度

E_m:空孔水素複合体の生成エネルギー

分配関数より自由エネルギーや空孔濃度が計算できる。

$$F = -k_{\rm B}T\ln Z$$
 $\partial F / \partial n_m = 0$



図4:空孔内の水素6個の基底状態(A)と(C)、および準安定状態(B)



図6:有限温度での水素と空孔濃度の関係 (熱平衡)

【空孔濃度の温度および水素濃度依存性】

図6が有限温度での空孔濃度である。水素濃度が低い場合は、温度が高いほど空孔濃度は大きくなる。 これは通常の熱平衡空孔濃度と一致する。一方で、水素濃度が高いほど空孔濃度も上昇する。これは 水素により空孔生成エネルギーが著しく低下することが原因である。いわゆる空孔の超多量生成を反映 している。タングステン空孔に水素は12個まで捕獲される可能性がある。しかしながら、熱平衡を仮定し た場合は6個の水素を捕獲した空孔水素複合体の数が圧倒的に多い。それはE₁₂=-4.245eVなのに対し てE₆=-2.742eVであるから、1つの空孔に12個の水素が集まるよりも、2つの空孔に水素を6個ずつ振り 分けた方が自由エネルギーを低くできるからと考えられる。

【まとめ】

タングステン結晶の拡散に対する活性化エネルギーは0.197eV、空孔中の水素の構造変化に対しても 同じ程度(0.19から0.21eV)であった。熱平衡状態を仮定して空孔(空孔水素複合体)濃度を計算したと ころ、水素濃度が高い場合は空孔の超多量生成が起こる。

参考文献

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

-11ys. Rev. B 65 (2012) 094102.

巨視的運動論的 MHD 現象解析用の トロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発

山口大学大学院理工学研究科 内藤裕志

目的

現在、トカマクプラズマ中の巨視的 MHD 現象では、従来の理想 MHD や抵抗性 MHD モデルでは説 明できない場合が数多く観測されている。このため拡張 MHD(または運動論的 MHD)モデルの重要 性が増している。ただし、MHD 現象を解明するために流体系のモデルを用いる場合には、流体モデ ルの近似の妥当性、高次のモーメントを低次のモーメントで近似するモデルの妥当性(いわゆるク ロージャーの問題)の問題があり、モデルの validation と verification をきちんとする必要があ る。このため、より第一原理に近いモデルであるジャイロ運動論をもとにしたジャイロ運動論的粒 子コードを開発し、拡張 MHD モデルに基づく流体コードとの詳細な比較を行うことが重要である。

報告者等は、巨視的かつ運動論的 MHD 現象の解明を目指してジャイロ運動論的粒子コード Gpic-MHD を開発してきた。現在の版は零次のトロイダル効果に対応した円柱版のコードである。本 研究では、Gpic-MHD のトロイダル版の作成を目的としている。長期的目標としては、ITER 等の高 温・高密度の核燃焼を含むトカマクプラズマの運動論的 MHD 現象の解明、輸送現象と MHD 現象の競 合する物理の解明がある。

シミュレーションモデル

円柱版 Gpic-MHD の概要は以下のとおりである。デルタエフ法を用いたジャイロ運動論的 PIC コード。半径方向は差分法を用い、非一様メッシュに対応している。ポロイダル方向とトロイダル 方向は高速フーリエ変換を用いてモード展開している。擬スペクトル法を用いる。フーリエ空間で 不必要なモードを消去することにより、時間ステップ幅を大きくとることができる。スレッド並列 (自動並列コンパイラまたは OpenMP を使用)とプロセス並列(MPI 使用)を併用したハイブリ ッド並列コードになっている。プロセス並列は、領域分割と粒子分割(場の量のレプリカを用いる) を併用する。

研究成果の概要

A. 現在までの研究成果

標準的な Gpic-MHD により、鋸歯状振動の崩壊過程に関連する運動論的内部キンクモードの線 形・非線形のシミュレーションが可能であることを示した. Gpic-MHD は「クロージャー」の問題 がないため、流体コードの結果の正当性・健全性をチェックするためにも有用である。

3次元版 3D-Gpic-MHD は、場の量の計算が増大するため、並列化のため領域分割を利用している。トロイダル方向のみの1次元領域分割の場合、トロイダル方向と半径方向の2次元領域分割の場合に対して良好な並列化スケーリングを得た。

標準的なジャイロ運動論的 PIC コードは、大規模・高ベータのプラズマを取り扱う場合、電流 密度から磁場を求める際に大きな誤差が生じることが知られている(「キャンセレーション」の問 題)。この問題の解決法として split-weight-scheme があるが、我々は場の量の計算に渦方程式と磁 力線方向の一般化オームの法則を用いる先進的アルゴリズムを提唱し、この方法による新しい 2D-Gpic-MHD を作成した。また、新しい 2D-Gpic-MHD を用いて大規模・高ベータの領域でも精 度良く運動論的内部キンクモードがシミュレーション可能であることを実証した。

先進的アルゴリズムに対応するトロイダル版 Gpic-MHD コードの定式化を完成した。これらの 成果を基盤にしてトロイダル版のコードを作成する研究フェィズに入った。

B. 本年度の研究成果

円柱版の Gpic-MHD では、非線形計算を行う際、コードが発散する事例がある。これは、磁 気軸近傍での粒子や場の量の取り扱い、半径方向非等間隔メッシュの半径方向密度分布の取り方、 ハイパーレジスティビティの与え方等を適切に選択することにより改善される。これらの方法を併 用しながらより長時間の非線形計算が可能なノウハウを取得した。これらの経験はトロイダル版 Gpic-MHD での非線形計算に適用可能である。

SR16000のアップグレードに伴い、円柱版3次元 Gpic-MHD の並列化性能を再検証した。ア ップグレード前と比較して1.5倍程度の高速化が達成されていることを確認した。合わせて、スレ ッド数やコピー数を変化させた場合の高速化率の論理コア数依存性のスケーリングの検証等を行 い、更なる並列化の最適化のための基礎データを集積した。また並列コンピュータとして HELIOS を用いた場合のスケーリングとの比較を行った。なお HELIOS では32768コアまでの並列化 性能を検証した。

本研究の主目的のトロイダル版の作成については、現在パーツ毎の作成を目指して進行中であ る。今後は、統合されたコードの完成を目指す予定である。

成果報告

口頭発表

[1] 内藤裕志、「巨視的運動論的 MHD 現象解析用トロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発」、RIAM フ オーラム 2012、2012 年 6 月 5 日、C キューブ筑紫ホール(福岡県春日市)

[2] H. Naitou, K. Itoh, M. Yagi, S. Tokuda, "Foumulation of gyrokinetic MHD model for tokamak simulation", 7th Japan-Korea Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, 26 July 2012, Nami Island, Chuncheon, Gangwondo, Korea.

[3] 内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、中島徳嘉、「Gpic-MHD コードの開発と並列化の現状」、プラズマシミ コレータシンポジウム 2012、2012 年 9 月 11 日、核融合科学研究所(岐阜県土岐市)

[4] 松田大、西山達也、田内康、内藤裕志、「Gpic-MHD コードのハイブリッド並列による高速化」、平成 24 年度(第 36 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会、2012 年 10 月 20 日、島根大学(島根県松江市) 低エネルギーヘリウムイオン照射された絶縁体における光学特性

琉球大学教育学部 岩切宏友,仲松一星,古堅辰明 九州大学応用力学研究所 渡邊英雄,吉田直亮 京都大学エネルギー理工学研究所 森下和功

【研究の目的】

イオンビーム照射法とは、真空中で目的とする粒子をイオン化し、数 keV~数 MeV のエネルギーに加速して固体や薄膜の表層(深さ数 nm~数 µm)に打ち込み、その物性を制御する技術である。 この手法では、溶解度に関わらず非熱平衡状態で原子を注入することができるため、自然界には存 在しない新しい構造や特性をもった物質の形成が可能である。

固体物質中の光学的特性は、物質中の電子状態によって決まっている。イオンビームを固体物質 中に照射すると、物質結晶中に格子欠陥(点欠陥)が形成されるために、物質中の電子状態が大き く変化するので、固体物質中で新たなバンド構造を形成する。その結果、イオンビーム照射された 固体物質の光学的特性が変化し、無色透明だった物質が色味を帯びることが知られている。

本研究では結晶性 SiO₂を主な対象とした。石英(SiO₂)は大きく結晶性石英と合成石英に分け られるが、合成石英では照射による光吸収率の変化がほとんど見られない。これは表面領域がアモ ルファス化している事が原因であると考えられる。そこで、本研究では、最表面まで結晶化した SiO₂(東京電波製)を使用し、可視光の透過率・反射率の測定を行うことで、照射によって形成さ れた格子欠陥が与える光学特性変化を調べた。

【研究方法】

結晶性 SiO₂に様々な条件下でイオンビームを照射し、紫外可視光領域における光透過及び光反 射スペクトルを測定した。試料のバンドギャップは 9.0keV である。照射実験は軽イオンビーム照 射装置(琉球大学)及び制御イオンビーム照射装置(九州大学応用力学研究所)を用いた。照射イ オン種はHe⁺、照射エネルギーは 7.0keV、照射温度はRT~873K、照射量は1×10²⁰~1×10²²He⁺/m² である。また光透過率測定には V-650 型紫外可視光分光光度計(琉球大学)を、光反射率測定には V-670 型紫外可視光分光光度計(九州大学応用力学研究所)を用いた。

【研究結果】

まず、室温下における光透過率の変化を調べるために、 1×10^{20} He⁺/m² および 3×10^{21} He⁺/m² の照射を行った。 1×10^{20} He⁺/m² では 200~360 nm の波長領域において未照射領域より透過率が低下し、360 nm~800 nm では逆に透過率は上昇した。また,照射量 3×10^{21} He⁺/m² では測定した全波長領域において透過率が低下しており、波長 360 nm 付近において未照射領域と比べ最大 5.5 ポイントの低下が見られた。さらに,波長 240 nm 以下の短波長側では急激な透過率の減少が確認された。続いて、時効による光学特性変化についての知見を得るため,室温および 473 K で照射された試料を-20℃で冷凍保存した場合と常温保存した場合に分けて光透過率を測定した。照射量は

全て 3×10²¹He⁺/m² である。室温照射の場合、冷凍保存された試料は全波長領域で透過率が減少し、 特に低波長側での減少幅が大きかった。また、わずかながら波長 380 nm 付近に吸収ピークも見ら れた。その後常温で保存された試料の光透過率は全波長領域において未照射領域を上回った。473 K の場合、冷凍保存した試料の光透過率は測定した全波長領域で減少し、特に短波長領域でより低下 していた。また,波長350 nm では4.7 ポイントのピーク低下が見られた。一方,常温保存の場合 は驚くべきことに高波長領域では未照射領域より光透過率は上昇し, 短波長領域では光透過率は減 少していた。さらに,波長270 nmより短い波長に関しては光透過率の減少が顕著で,波長200 nm では冷凍保存とほぼ同じ光透過率となった。また、照射によって生じた着色も徐々に消失していっ た。次に照射温度依存性における光透過率を測定した。照射量は3×10²¹He⁺/m²に固定し、照射温度 はそれぞれ 473 K, 673 K, 773 K である。473 K と 673 K は全波長領域において未照射領域よりも 透過率が低下しているが、この2つを比較すると波長370nmより短波長側では673Kが、一方で 高波長側では 473 K が透過率は低かった。また、照射温度が 773 K になると他の 2 つと比べ透過 率の顕著な低下は見られなかったが、波長 510 nm より短波長側では未照射領域より透過率は低下 し、高波長側ではそれよりわずかに上昇した。続いて、照射量依存性における光透過率の変化を検 証した。照射温度は 873K であり, 照射量は 3×10²⁰,3×10²¹,1×10²² He+/m²である。照射量が大 きくなるほど光透過率の減少が進行していることが確認できた。1×10²² He+/m² では波長 360 nm 付近で 90.0 %から 85.3 %と約 4.7 ポイントの光透過率の低下が起こり, わずかに吸収ピークが見 られた。3×10²⁰ He⁺/m² では波長 430 nm 付近を境にやはり低波長側では透過率が未照射領域より も減少し、高波長側ではそれより上昇した。また、波長 200 nm 付近ではいずれも急激な透過率の 減少を示した。

本研究では光反射率を測定したが、試料の表面反射のみを測定するために裏面をダイヤシートで 研磨する作業を行った。その後、照射前の試料の光反射率における研磨前と研磨後の差異を測定し た。研磨を行うことにより、3ポイント程度(研磨前の試料と比較すると30%程度)反射率が減 少した。また波長 220 nm より短波長側では4~5ポイント程度の反射率の低下が確認された。続 いて照射量 3×10²¹ He⁺/m² で 473 K に加熱照射後の光反射率を測定した。測定の際には試料の裏 面を研磨してある。波長 200 nm 以下の極低波長側を除いて、反射率が減少した波長とほとんど変 わらない波長が出現した。前者は反射時における光吸収が生じていると考えられる。また後者は波 長 350 nm 付近に確認できた。続いて、照射量1×10²² He⁺/m² で 873 K に加熱照射された光反射 率を測定した結果、こちらも 473 K の場合と同様の結果が得られた。

(成果発表)

● 仲松一星:SiO₂中におけるヘリウム原子の挙動,平成24年度琉球大学教育学部自然環境科 学教育コース 課題研究発表会(2013年2月)

環状プラズマ実験装置第一壁の水素透過挙動に関する研究

核融合科学研究所 廣岡慶彦

課題番号: 24FP-4

研究課題:環状プラズマ実験装置第一壁の水素透過挙動に関する研究 研究期間:H24年4月1日-H25年3月31日 所内世話人:図子秀樹 協力者:5名(芦川直子、周 海山[Zhou Haishan]、図子秀樹,井上雄貴) 配分額:校費(4万円),旅費(5万円)

目的:

高温・高密度水素プラズマの定常放電を行うQUESTのような環状装置では、水素の動的保持量 (ダイナミック・インベントリー)が閉じ込め性能と施設安全性に関連して重要なパラメーターとなる。 ところが、環状装置の真空を保持するための壁(一般に『第一壁』と呼ばれる)は、周辺水素プラズマ に直接曝されるためその運転温度によっては、水素を装置外部に透過させてしまう可能性がある。この ような第一壁の水素透過挙動は、特に、定常プラズマ運転時に第一壁が高温状態になる場合、燃料供給 量の制御及び実験施設の安全上重要な問題となる。本研究では、このような観点からQUEST装置を 用いて鉄系合金(SUS304・F82H等)の水素透過挙動を測定し基礎的知見を得ることを目的と するものである。

実施方法:

QUESTの周辺部分に上記材料を用いて作成した透過試料を組み込んだ透過実験セットアップ を設置し透過膜試料の下流側(プラズマ側を上流として)に質量分析計(QMS)を以て気体水素の分 圧測定から水素の透過量を算定する。定常プラズマとしては、放電洗浄用の低温・低密度のECH水素 プラズマと高温・高密度の閉じ込め実験プラズマとがあるので、これら2種類のプラズマに曝した場合 の透過挙動を測定・解析する。なお、水素透過挙動のモデリングに関しては、DIFFUSE-コード [参考文献-1]を用いる予定である。

実験結果:

1) 可動透過プローブの試作

可動透過プローブを試作し、これを水平ポートに 設置した。将来の核融合炉で問題となる SUS 系、 F82H 壁に及ぼすトリチウム インベントリーの 評価を目的として SUS(厚さ 0.2mm, 直径 16 ϕ)お よび H82H(厚さ 0.2mm, 直径 16 ϕ)フランジを婦 ローブ先端部に取り付けこれを透過する水素ガ スを計測するシステムを構築した。下流側には QMS と D2 標準リークがありH2ガスの検出と校 正が行える。膜の加熱は配管内にもうけたランプ で行い通常 250 度で計測した。このシステムは図



図1 (上)水平図(QUEST 中心は右側)(下)可動透過プローブ(先端部の ICF34 フランジが透

1に示すように本体ポートに挿入可能であり、 壁から約130mmまで挿入可能である。長時間運 転では膜温度は周辺プラズマ曝露により若干 上昇する傾向がある。

2) 定常プラズマにおけるH原子透過計測

鉄系合金 (SUS304, F82H) の定常水素プラズマ 照射による透過挙動を比較するために、核融合 科学研究所に設置された直線型定常プラズマ 装置VIHECLE-1[2]を用いて照射実験 を行った。その結果を図2に示す。厚さは同じく 1mm であり、約220℃で透過挙動を観測したとこ ろ、F82H で $3x10^{17}H_2/m^2s$ 、SUS304で2 $x10^{16}H_2/m^2s$ の定常透過束を実測した。一般に、定



図2 厚さ 1mm の SUS304 および F82H の透過 曲線(2.45GHz で生成した連続プラズマを直接照 射)温度はプラズマ照射によって昇温している。同 じ厚さでは F82H は 1-2 桁以上透過束が大きい。

常透過束の解析には拡散-拡散(DD)、拡散-再結合(DR)、および再結合(RR)律速モデル等が適用でき、 100V での入射飛程が非常に浅い点(~10nm)を考慮すると、可能性として RD および RR タイプが残る。

前者は拡散係数に比例し厚さに反比例する。今回 の透過東実験データが膜厚に依存することから RD モデルで説明できることを明らかにした[3]。 SUS304 を用いて QUEST の ECRDC プラズマでの透 過を調べた。QUEST の真空容器は SUS316L/304 を 用いており、水素の吸蔵特性の把握のためにはこ の知見は有用である。図3に示すように ECR プラ ズマの放電時間は15分であるが、短パルスでは 応答しないが、定常プラズマでは十分な感度で透 過することがわかった。定常での透過量は厚さを 下げれば増加が期待できる。図2のVIHECL E-1での SUS304 の結果は定常までにおおよそ 10000 秒を要しており、QUEST での壁への入射束 を模擬した実験結果は矛盾しない。放電洗浄時に トロイダル磁場を変化させ共鳴位置を変えてい るが、図3(下)にはその変化をとらえており、



図3 (上) ECRDC プラズマにおける SUS 透過 曲線。透過曲線の単位は 10⁻⁶ Pa 時間は全体で 2000 秒、図中右軸は赤で示した放電パルス幅に対応(下) は 1 shot のみの拡大図 透過曲線の変動はトロイ ダル磁場の変化による PW I 領域の変化に対応

この程度の厚さにおいてもプラズマ・壁相互作用の状況を把握可能なことがわかった。今後 F82H に先端を変えることにより、フェライト系金属での透過物性値、透過特性が得られると思われる。 参考文献

 M. I. Baskes, "DIFFUSE83" Sandia Rep. SAND83-8231. [2] Y. Hirooka et al., J. Nucl. Mater.
 337-339(2005)585-589. [3]H. Zhou et al., "Hydrogen plasma-driven permeation through a ferritic alloy F82H", Paper presented at the Joint conf. of 9th Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2012) and 3rd Int. Wkp on Plasma-Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF2012), Tsukuba, Aug. 27th -31st, 2012. タングステン被覆した低放射化材料の接合界面における微細組織と強度特性の相関

京都大学エネルギー理工学研究所 木村 晃彦

1. 目的

本研究では、低放射化構造材料のW被覆の製作および性能評価試験を実施し、最適な被覆プロセス・条件の探索を行うと共に、被覆・接合のメカニズムを解明し、より優れたW被覆作製のための材料科学的基礎知見を得る事を目的とする。

2. 研究成果の概要

ODS 鋼、V 合金および低放射化フェライト鋼(F82H、JLF-1)に対するW 被覆に関しては、真空プラズ マスプレー(VPS)法および液相拡散接合法(TLPB)が適していることを確認し、それらの技術開発に向 けた研究を実施した。東北大学において開発された高靱性W-TiCと京都大学において開発された高耐熱性フ ェライト系 ODS 鋼との接合技術開発研究を進めた。

真空プラズマスプレー(VPS)法

高密度で高い熱伝導率を示す VPS-W を製作するための VPS 条件の検討を行った。検討した VPS 条件は、 原料粉末の粒度、噴射ノズル・基板間距離、走査速度および基板厚さである。各種 VPS 処理後の特性評価お よび金属組織観察の結果、優れた特性を発現させるためには VPS-W が空隙(ポア)の少ない柱状晶組織で あり、噴出された W 粉末が十分に溶融して連続的な粒成長を通じて凝固することが高性能の W アーマー材 を製作するための必要条件となることが判明した。VPS-W の断面組織において柱状晶の占める面積率が増大 すると、40%までは密度および熱拡散率が上昇するが、それ以上では一定の値であることが報告されている。

また、VPS-Wの熱伝導率はWバルク材 に比べ、かなり低い値を示しているが、 初年度(青)に比べ、今年度作製した VPS-W(赤)では顕著な増大が認められ る。電子線後方散乱回折(EBSD)法を 用いて、VPS-W の結晶粒組織を観察す ると、熱伝導率の大きな VPS-W におい ては、柱状晶が成長し、空隙(ポア)の 小さいことが判明した。VPS-W の性状 は、柱状晶の面積率および空隙(ポア) によって、定性的に評価が可能であるこ とが判った。作製した VPS-W (F82H: 板厚 5mm)の熱負荷実験を実施した結 果、電子ビーム加熱による定常熱負荷実 験(熱負荷: 7.5 MW/m²、立ち上げ: 30s、 定常:180s、照射時間:3min)では、 VPS-W 表面および基板である F82H 鋼 の温度がそれぞれ 700℃および 600℃に

表1:液相拡散接合条件および材料

	組成	接合温度	接合圧力	接合時間	真空度
W	Pure tungsten (99.95%) 30×30×2t [mm]				
ODS鋼	Fe-15Cr-2W-0.2Ti–0.35Y ₂ O ₃ 30×30×5t [mm]	1240°C	10MPa	1h	4 × 10⁻³ Pa
インサート 材	Fe–3B–5Si Amorphous 30 × 30 × 0.025t [mm]				



図 1:W/ODSS 液相拡散接合 (TLPB) 後の接合界面近傍組織及び構成元 素の流れ 上昇したが、試験後の VPS-W 表面には全く変化が認められず、熱負荷に伴う表面損傷の形成を確認することができなかった。一方、熱疲労実験(熱負荷: 7.5 MW/m²、Beam on: 60s、Beam off: 140s、照射回数: 30cycles)の場合は、微小な亀裂が形成されたものの、大きな表面損傷は認められず、比較的良好な耐熱負荷特性を示した。

2)液相·固相(拡散)接合法

W と ODS 鋼とでは、材料特性が極めて異なるため、困難が予想されていた板材どうしの接合技術開発と して、鉄基アモルファス合金や Ti 合金をインサート材として用いるろう付け法(TLPB)の改良を進めた。 「接合界面強度」を破壊力学的に評価するための試験法として、せん断強度試験法を開発し、異なるサイズ の接合試験片を用いてせん断強度を評価した。接合部の組織観察および化学組成を調べ、接合処理による接 合部構成元素の拡散に関する情報を得た。

熱膨張係数の異なる異種金属接合には、TLPB が優れていることが理論的、実験的に示されていることか ら、インサート材に融点降下元素からなる鉄系のアモルファス合金を採用し、純 W とフェライト系の ODS 鋼の液相拡散接合を表1に示す条件下で実施した。EPMA による接合後の接合界面近傍における元素分析結 果は、接合界面にW、Cr および Fe が高濃度に分布する相互拡散相が存在すること、W が相互拡散層及びイ ンサート材を超えて ODS 鋼側に拡散していることおよびインサート材中の B が相互拡散層及び ODS 鋼に拡 散していることが明らかとなった。B の拡散は、接合時におけるインサート材およびインサート材に接する 相互拡散層及び ODS 鋼の溶融に伴うものであり、B 化合物の形成が懸念される。また、W がインサート材 を透過して ODS 鋼に拡散することが明らかになった。W は鉄中では脆化に寄与するとされている Fe2W-Laves 相を形成するため、この場合も脆化が懸念される。そこで、せん断強度評価試験を実施した。

これまで、せん断強度試験はねじり試験法を採用して実施してきたが、ねじり試験法では、せん断力が試 料断面の中心から表面への半径方向に線形的に変化するため、せん断力を過大評価する可能性がある。そこ で、本研究ではせん断試験治具を用いて、室温においてせん断試験を実施した。図2に応力ひずみ曲線を示

しており、Wと示したデータは、W単体のせ ん断強度試験データである。試験片サイズ効 果を調べるため、接合界面面積が1x1 (mm)、 1.5x1.5 (mm)、3.3x3.3 (mm)の三種類の試験 片に対して試験を実施した結果、試験片の小 型化に伴い、応力ひずみ曲線の傾きが小さく なり、データのばらつきが増大することが判 った。図3は、接合界面が3.3x3.3 (mm)の場 合であり、応力ひずみ曲線の傾きが各試験片 に対してほぼ同一であり、試験片と治具の間 のすべりに伴う曲げモード発生の度合いも少 ないと言える。この結果によると、接合界面 強度は W に比べ、低い傾向を示しているが、 同等の場合も観察されており、現状のW材料 のせん断強度に近い強度を持つ接合界面が得 られたと言える。



図3:W/ODSS 液相拡散接合(TLPB)後の接合界面せん断強度試験 結果(室温)

多孔質金属膜における水素・ヘリウム挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【目的】

近年クリーンな二次エネルギーとしての水素が注目されており、水素の製造・貯蔵・輸送に関連する技術開発の ため、様々な材料における水素挙動の理解が求められている。白金やタングステンは、他の金属に比べて水素溶解 度がきわめて小さいという特性を有する。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には、形成過程で多くの水素が捕捉されることがわかっている。また、ヘリウム プラズマを用いた場合は、多くのヘリウムガスが捕捉されることもわかっている。応用力学研究所とのこれまでの 共同研究により、50℃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、捕捉された水素やヘリウム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。本研究では、水素・アルゴン混合プラズマを利用して、タングステンをスパッタリ ングし、異なる基板温度にて形成されたタングステン膜中の水素捕捉量及び構造変化を調査した。

【実験方法】

プラズマスパッタ薄膜作製装置の概略図を Fig.1 に示す。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、純度 99.95%)を挿入した。石英管内をロータリーポンプで真空に排気後、モレキュラーシーブを通して水分 を除去した任意の水素濃度の水素・アルゴン混合ガスを、マスフローコントローラーを介して導入した。流量を調 整して所定の圧力に設定した後、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タングステン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。なお TEM 観察のため、直径 3mm の円盤状タングステン基板上にも同様な手法によってタングステン膜 を形成させた。タングステン膜中に含まれる元素は EDX により分析した。また石英基板とともにタングステン膜 を割り、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。実験に用いた水素・アルゴン混合ガス中の水素濃度は、2,20,50,80%である。ガス圧は、プラズマ 下流側に設置した隔膜式圧力計にて測定した。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

(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H₂⁺、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。

タングステン膜中に捕捉された水素量を定量するため、タングステン膜試料を基板ごと昇温加熱装置内に 設置し Ar 雰囲気で 200℃から 800℃まで 200℃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。



Fig.1 プラズマスパッタ薄膜作製装置概略図

【結果及び考察】

EDX による元素分析では、懸念されていた不純物酸素は検 出されなかった。図2に基板温度38℃、300℃、500℃で作製 されたタングステン膜の断面 SEM 像を示す。基板温度・堆積 時間以外の条件は、ガス流量 2.3sccm、ガス圧力 5.4Pa、印加 高周波電力100W、印加直流電圧-200Vである。38℃試料は個々 の柱状組織が確認でき、明瞭な柱状構造を持つことがわかる。 一方 300℃、500℃試料では個々の柱状組織ははっきりとは確 認できない。ただし、300℃試料は縦方向に直線的な組織境界 が見られるため、比較的緻密な柱状構造を有すると考えられ る。これら基板温度による構造の違いは、飛来したタングス テン原子の表面拡散に起因すると考えられる。34℃、500℃の 基板温度にて同様にして作製したタングステン膜の TEM 観 察を行った。作製された膜厚が観察に適した厚みよりも厚か ったため、今後堆積条件を調整し、改めて TEM 観察を行う予 定である。そのため、予備的な TEM 観察結果ではあるが、34℃ と 500℃を比較したところ共に非晶質構造でありナノオーダ ーでの組織の違いは見られなかった。タングステンの融点が 3400℃程度と高いため、500℃の加熱下においても結晶性の向 上が見られなかったと考えられる。

水素・アルゴン混合ガス中の水素濃度の違いにより、堆積 速度や水素捕捉量に違いがみられた。水素濃度が低い場合は 堆積速度が増加し、水素捕捉量は減少した。この堆積速度の 向上は、アルゴンイオン密度の上昇によりスパッタ速度が促 進されるためである。水素捕捉量の減少は、堆積速度すなわ ちタングステンの堆積フラックスが増加する一方で、水素フ ラックスが減少するためと考えられる。そこで、異なる水素 濃度、基板温度で作製したタングステン膜中の水素捕捉量を 水素フラックスとタングステンフラックスの比(H/W フラッ クス比)に対してプロットし Fig.3 に示す。ここでは水素フラ ックスとして、タングステンターゲットから反跳する水素の フラックスを用いた。反跳水素フラックスは、ターゲットに 入射する水素イオンと反射係数を用いて見積もった。基板温 度 58℃から 156℃の低温条件で作製された場合、H/W フラッ クス比依存性が最も大きく、H/W フラックス比の 0.43 乗で水 素捕捉量が増加する。基板温度 300℃では 0.27 乗、500℃では 0.1 乗と整理された。

Fig.4 に各加熱温度においてタングステン膜から放出された 水素量を示す。いずれの試料からも 600℃においては水素放出 が見られ 800℃では水素放出が見られなかったことから、 600℃加熱により堆積層中の水素がほぼ回収できることがわ かった。500℃試料からの水素放出は 400℃から観測されてい るが、これは放電中にプラズマから注入された水素のうち



Fig.2 タングステン膜断面 SEM 像.(a)基板温度 38℃, 堆積時間 21h、(b)基板温度 300℃,堆積時間 24h、(c) 基板温度 500℃,堆積時間 24h.



Fig.3 タングステン膜への水素捕捉量の水素/タング ステンフラックス比依存性



Fig.4 各加熱温度においてタングステン膜から放出 された水素量

【成果報告】

[1] <u>K. Katayama</u>, Y. Ohnishi, T. Honda, K. Uehara, S. Fukada, M. Nishikwa, <u>H. Watanabe</u>, "Deuterium retention in tungsten deposits by deuterium ion exposure", 11th China-Japan symposium on materials for advanced energy system and fission & fusion engineering, September 11-14, 2012, Chengdu, China.

400℃で脱離可能な水素が放電停止後の試料温度降下過程で堆積層中に残留したことによると考えられる。

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、ヘリウムなど)に加えて、ELM(エルム)と呼ばれる間欠的な熱負荷が加わる。パルス熱負荷が 繰り返し与えられた場合には、表面温度の上昇と共に、高い熱応力が表面近傍に生じ、さらに金属疲労 の影響により、結晶組織や亀裂の発生に影響を及ぼす。

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、大阪大学のプラズマとパルスレーザーを同時 に照射できる装置(Laplex)を利用して、ヘリウムイオンとパルスレーザーを同時照射し、表面近傍の 結晶構造の変化や亀裂の発生、あるいは材料の損耗に関する基礎的な知見を得る。さらに、TEXTOR トカマクの周辺プラズマに異なった表面温度でさらしたTFGR-W材料の分析を行う。これらの材料に 対して、応用力学研究所の複合表面分析装置や水素動態観測装置を活用して、表面近傍の組織観察を行 い、熱・粒子複合照射環境におけるタングステン材料の応答について理解を深める。

2. 実験方法·結果

TFGR-Wでは1.1TiCと3.3TiCを用いた。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、微結晶粒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ミクロン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。

TEXTOR プラズマ照射実験では、グラファイトのテストリミターに円形の試料(直径 22 mm)2 個(TiC 添加材と TaC 添加材)をセットし表面温度を 1500℃程度から融点を超える範囲でさらして、表面の損傷・ 溶融挙動について詳しく調べた。表面からの金属不純物(Ti、Ta、W)の放出については、分光的に調 べた。また、TEM 観察については、吉田先生に担当していただいた。

3. 実験結果

TEXTOR プラズマ照射実験では、31 ショット同じ放電にさらして、損耗や表面形状の変化を観察した。 表面温度は最高で 1900℃まで上昇した。分光測定により、約 1600℃を超えると、Ti の放出が顕著になった。一方で、Ta については、もともと信号が少なく、また温度が変化してもその発生量は変化してい

ない。Ti の放出に伴う 材料の組織の変化を調 べるため、断面を FIB で切断し、TEM 観察を 行った(図1、前ペー ジ)。TiC はコントラス トの違いとして明確に 認識できた。表面に露 出している TiC は損耗



図1 TFGR-TiC 表面近傍の組織。(a)と(b)は図2と対応

し、完全に失われたものもあるが、多くは表面に 不純物が堆積して、損耗が抑制されたと考えられ る。また、内部のTiCは変化がなかった。

図2にプラズマ照射後の表面近傍のTiCの様子 を示す。図2(b)では、TiCの一部が損耗し、その 上に堆積物が存在しており、コントラストから TiやCよりも重い元素の可能性がある。W上に堆 積していない理由は、TiCの方が軽い元素のため、 入射イオンが堆積しやすいため、と考えられる。 また、Heによって生じるバブルが観測されるこ とから、プラズマ中にHeの存在が示唆される。 一方、図2(b)ではほぼすべてのTiCが損耗して いることがわかる。

TiCはWに比べて軽いためスパッタリングが起 きやすく、Wより先に損耗することは定性的には 理解できる。しかしながら、1600℃程度以上で損 耗が顕著にみられることを考えると、これは単な る物理スパッタリングではなく、温度によりスパ



図2 プラズマ照射後の表面近傍の TiC 粒の様子

ッタリングが促進される機構があると考えられる。TiCの融点は、3433 Kと非常に高いが、それより低い温度から熱分解が始まることが知られている。しかし、TiCの損耗はプラズマが照射される表面のみの損耗であるため、単なる熱分解とも考えにくい。プラズマ照射により熱分解や昇華が促進される現象ではないかと推察されるが、今後さらに研究が必要である。なお、パルス熱負荷実験によれば、2500℃程度まで温度が上昇すると、内部のTiCも急速に失われ、結晶粒成長が急激に進むことがわかっており、TFGR-TiC は純Wに比べると、高温の安定性は高いが、TiC が失われる温度になると純Wと大きな違いがなくなる。

一方、TaC 添加材については、レーザーの熱負荷実験では、融点近傍まで TaC は失われることがなく、 高温での組織の安定性は、TiC 添加材に比べ格段に高い。TEXTOR プラズマ照射試料についても、初期的 な結果であるが、TiC に比べて高温でも組織は安定しており、耐熱性については TaC 添加材料の方が優 れていると考えられる。TaC 添加材については現在詳細な検討を行っているところであり、今後詳細な 結果を発表していく予定である。

4. 研究成果発表

- 1. T. Kawai, Y. Ohtsuka, Y. Ueda, H. Kurishita, N. Yoshida, "Effects of repeated short heat pulses on TFGR tungsten", presented at 27th SOFT (Liege, Belgium) 2012.
- 2. 上田 他、"TFGRタングステンへの短パルス繰り返しレーザー照射実験"、プラズマ・核融合学会 第29回年会、2012年11月、クローバープラザ、福岡県
- 3. Y. Ueda et al., "Surface erosion and modification of Toughened, Fine-Grained, Recrystallized tungsten exposed to TEXTOR edge plasma", to be presented at 14th PFMC (Germany), May 2013.

「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 燃料材料試験部 材料試験課

井上 利彦

1. 緒言

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

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

また、機構では、耐スエリング特性に優れた高 Ni 鋼の基礎的な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材料開発を目指している。高照射量及び高照射温度域で も炭窒化物やッソッ"析出物が安定に存在していること及びボイドスエリングの照射温度依 存性等を確認した。今後、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等を試み、耐スエリング特性に及ぼす析 出物の影響評価を行う。

2. 実験方法

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

高 Ni 鋼(15Cr-43Ni、γ′/γ"弱析出型)を供試材として、タンデム型イオン加速器を用 いた 2.4MeV Cu イオンの照射を行った。照射条件は 700、800℃、200dpa として、応力無
負荷での微細組織観察試料とした。H24 年度は、JAEA 高崎量子応用研究所イオン照射研究施設(TIARA)にてイオン照射した試料に関してFIBを用いて微細組織観察試料に加工し、微細組織観察を行った。

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

応力無負荷における高 Ni 鋼(15Cr-43Ni、γ′/γ"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"(Ni₃(Ti,Al)/ Ni₃Nb)析出物は安定に存在していた。また、高 Ni 鋼(15Cr-35Ni 鋼:炭窒化物析出型、 15Cr-43Ni 鋼: γ′/γ"析出型)及び相対比較材の PNC316 鋼のボイドスエリングの照射温度 依存性を図 3 に示す。照射下における高 Ni 鋼の基礎的な挙動評価に関する知見を得た。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。



(図中の括弧内は照射量を示す)

平成 24 年度 応用力学研究所 共同研究

「プラズマ輸送理論」成果報告書

代表者 核融合科学研究所 伊藤公孝

研究目的

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

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

研究基盤と進展の概観

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

多種の揺動構造の競合の理論

具体的な例として、Inagaki,et al.に報告された長波長揺動[2]の問題を取り上げ、励起 強度の等分配からの逸脱を検討する。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。

多スケール乱流の理論は近年展開を見せ、ドリフト波―帯状流の系に定式化が行われ た。この系は磁場閉じ込めプラズマの乱流と異常輸送を考察するための基本的な体系で ある。一方、Inagakiらの発見は、(帯状流と異なって)磁気面上で均一ではない巨視的 な揺動が実在する事を示した。この場合、巨視的モードが線形安定である事に変わりは なく、巨視的モードの励起が微視的なドリフト波からエネルギーを取り去る事は共通で ある。しかし、帯状流とは異なり、巨視的なモード自体が揺動輸送を励起する。巨視的 モードの誘起が全体として乱流輸送を増やすのか否か、分析が必要である。更に、巨視 的モードによる輸送流束は、局所的な(拡散的な)輸送現象とは全く異なる輸送現象を もたらす。

ドリフト波とこの巨視的なモードの競合関係を実験で確認した[3]。[2]に示された実験観測データについてドリフト波揺動強度*Id*(*t*)と、長波長モードの振幅*It*(*t*)のリサージュ

図を図1に示す。最少二乗法によるフィットでは

$$\frac{I_d(t)}{\langle I_d \rangle} = 1.068(\pm 0.016) - 0.068(\pm 0.014) \frac{I_l(t)}{\langle I_l \rangle}$$

との結果を得て、負の相関を確認した[3]。ここで 〈*I*₄〉と〈*I*₁〉は *I*₄(*t*) と *I*₁(*t*) の長時間 平均値である。ドリフト波揺動のエンベロープを観測し、その周波数スペクトルを図2 に示す。低周波揺動の周波数でモジュレーションを受けている事が実証された。



図 1: 巨視的モードとドリフト波揺動振幅 *I*(*t*) *I*_d(*t*) のリサージュ。点線は平 均値、 実線は最少二乗法によるフィッテイング。

図2:周波数スペクトルを図2に示す。 低周波揺動の周波数でモジュレーション を受けている[3]

森肇先生記念研究集会「非線形・非平衡系の統計力学」

この共同研究に於いて、森肇先生記念研究集会「非線形・非平衡系の統計力学」を共 催として開催した(於、九州大学応用力学研究所、2012年11月23日(金))。

かねてより森先生が九州大学応用力学研究所での本共同研究に参加下さり、ともに議論をする機会を得た。この共同研究の中から森先生は「記憶関数と相関関数の相似性」の考察を進めた。一方、乱流中の非線形過程で励起される多数の揺動や不安定なモードを解析する「乱流を着たモードの解析」というモデルがある。同方法を森の方法によって基礎づける事により、乱流場への外力の効果を解析し非線形応答が得られた[4]。

この研究会ではプラズマ物理学から非平衡系の統計力学を対象にし、プラズマ輸送理 論に関する大きな進展を得た。発表プログラムを添付する。

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] K. Itoh, et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012) 095016

[4] S. J. Itah and V. Itah. Chin. Dhys. D **21** (2012) 005201

[4] S.-I. Itoh and K. Itoh: Chin. Phys. B 21 (2012) 095201

森肇先生記念研究集会 - 非線形・非平衡系の統計力学-

九州大学応用力学研究所 2012年11月23日 (金) プログラム

10:00-10:10 開会挨拶

伊藤早苗(九州大学副学長、九州大学応用力学研究所)山田知司(九州工業大学名誉教授)

「森肇先生とのカオス研究」座長:森信之(九州看護福祉大学)

10:10-10:40 保存力学系のカオスと輸送現象

石崎龍二(福岡県立大学人間社会学)

- 10:40-11:10 カオスのフラクタル構造から軌道拡大率の揺らぎ 秦浩起(鹿児島大学大学院理工学研究科)
- 11:10-11:20 休憩
- 11:20-11:50 射影演算子法の大偏差統計関数導出への応用 宮崎修次(京都大学情報学研究科複雑系科学専攻)
- 11:50-12:20 カオス・乱流の時間相関関数

岡村誠(九州大学応用力学研究所)

12:20-14:00 昼食

「非線形・非平衡系の統計力学に関する研究交流」

14:00-15:00 ポスターセッション

「森肇先生との研究の交わり」座長:黒木昌一(福岡女子大学)

- 15:10-15:40 パターン・エントロピー時系列法の開発と応用例 井上政義(鹿児島大学名誉教授)
- 15:40-16:10 森理論とプラズマ乱流研究について

伊藤早苗(九州大学副学長、九州大学応用力学研究所)

- 16:10-16:20 休憩
- 16:20-16:50 モード結合理論への道

川崎恭治(九州大学名誉教授)

16:50-17:20 集団同期現象をめぐって

蔵本由紀(京都大学数理解析研究所)

17:20-17:30 閉会挨拶 吉田健(九州大学・福岡工業大学元教員)

ポスターセッション一覧

- P1.「液晶電気対流系での二重構造」 鳴海孝之(九州大学工学研究院)
- P2. 「低温下の概日リズム」 伊藤浩史(九大芸工),村山依子(早稲田理工),八木田和弘(京都府医)
- P3.「非ガウス性に起因する熱伝導」
 金澤輝代士(京都大学基礎物理学研究所),沙川貴大(京都大学基礎物理学研 究所, 京都大学白眉プロジェクト),早川尚男(京都大学基礎物理学研究所)
- P4. 「両面テープの剥離ダイナミクス」山口哲生(九大工)
- P5. 「森の射影演算子法による相対論的線形流体方程式の導出」 南佑樹(理研),日高義将(理研)
- P6. 「結合振動子系の集合ダイナミクス」 前山聡美(九州大学総合理工学府),坂口英継(九州大学総合理工学府)
- P7. 「Lorentz 対称性がない場合の南部-Goldstone の定理」 日高義将(理研)
- P8.「ネットワーク上の情報熱力学」 伊藤創祐(東大理),沙川貴大(京大白眉センター)
- P9. 「調和振動子における速度時刻相関の波数依存性」August Wierling(University of Rostock (Germany)),沢田功(香川高専)
- P10.「電力網の位相モデルにおけるカスケード故障」 松尾龍磨(九州大学総合理工学府),坂口英継(九州大学総合理工学府)
- P11. 「租視化により隠れるエントロピー生成と非平衡関係式」 川口喬吾(東京大学理学系研究科物理学専攻),中山洋平(東京大学理学系研 究科 物理学専攻)
- P12. 「縮約にともなう物理量の変化と非平衡熱力学第二法則」 中山洋平(東京大学理学系研究科物理学専攻),川口喬吾(東京大学理学系研 究科 物理学専攻)
- P13. 「Duffing 系の記憶関数」富永広貴(佐賀大医)

金属材料へのイオンビームとプラズマ/レーザーの複合照射効果

研究代表者 名古屋大学大学院工学研究科 大野哲靖

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)でのトムソン散乱計測では、パルスレーザー用金属ミラーのレーザー誘起 損傷閾値(LIDT)の調査が重要な課題となっている。高出力パルスレーザー(Nd:YAGレーザー)照射によ って、一旦金属ミラーが損傷を受けると光学特性が著しく劣化してしまうためである。懸念の一つとし て、中性子とレーザーとの複合照射による損傷閾値の劣化が挙げられる。光学的な劣化は極めて少なか ったとしても、繰り返しのパルス的なレーザー照射に耐えうる必要があり、中性子照射により損傷閾値 が下がった場合には、ミラーの寿命を著しく短くしてしまう可能性がある。しかし、これらの特性の調 査例は少なく、中性子照射効果に関しては、データは皆無である。本研究では、特に、九州大学が所有 する重イオンビームを利用し、中性子照射模擬実験を実施し、金属ミラー材料へのレーザー損傷閾値に 与える影響を実験的に調査した。

2. 実験方法

九州大学のタンデム加速器を用いて、純銅ミラーに対して2.4MeVCu²⁺のイオンビームを照射した。純銅ミラー のCu²⁺イオンビームによる損傷量の深さ分布は、SLIM 2012 codeを用いて計算した。ピーク損傷量が5.5 dpaの 試料の損傷量dpaの深さ分布を図1に示す。ピーク損傷量が5.5 dpaの試料のイオン平均飛程は758 nmであり、 損傷ピーク位置は680 nmであった。表面から1100-1200 nm付近までイオンビームよる損傷があると計算された。 Cu²⁺イオンビーム照射純銅ミラーの断面組織写真を図2に示す。試料の断面を観察すると、表面から1100 nm付 近まで損傷を受けていると見受けられ、計算結果と一致していた。



図 1 Cu^{2+} イオンビーム照射純銅ミラーの dpa の深 図2 Cu^{2+} イオンビーム照射純銅断面の写真。 さ分布。

3. 実験結果

イオンビーム照射銅における損傷閾値の計測を実施した。本実験では Nd:YAG レーザーを利用し,集 光した YAG レーザー光を銅ミラーに照射し,反射率の変化から LIDT を評価した(図 3)。イオンビー ム照射銅の LIDT はイオンビーム未照射試料の LIDT より高かった。一般的に、重イオンビーム照射が なされると金属表面の硬度が増すが、この実験においても、重イオンビーム照射により表面硬度が増加 し、LIDT が増加した可能性が示唆される。

レーザー照射時間内の熱拡散距離は $\sqrt{\alpha\tau}$ で見積もられる。(α :熱拡散率, τ :レーザーパルス幅)銅の熱拡散率は 1.059 cm²/s,パルス幅は 5-7 ns であるため,熱拡散距離は 0.8 µm 程度であり,重イオン ビームの平均飛程距離と同等である。より深い領域までイオンビームで損傷を与える実験も重要と思わ れるが,損傷が十分に進行していない領域では、本イオンビームの模擬実験により十分に欠陥の影響が 模擬できていると思われる。本実験から、高パルス領域(10⁴-10⁵ pulse の領域)のマルチパルス損傷閾値に 対する中性子負荷の影響は小さいと考えられる。



成果報告(論文,学会発表等)

- (1) 佐藤雅也, 梶田信, 安原亮, 大野哲靖, 時谷政行, 吉田直亮, 田原譲: "トムソン散乱計測用金属ミラ ーのマルチパルスレーザー損傷閾値"第9会核融合エネルギー連合講演会 (29A-34p, 神戸国際会議 場) 2012 年 6 月.
- (2) M.Sato, S. Kajita, R. Yasuhara, N. Ohno, M. Tokitani, N. Yoshida, and Y. Tawara : "Multi pulse laser damage threshold of Cu and Ag mirrors", The 6th International Conference on PLAsma NanoTechnology & Science (P-H1, Gero Synergy Center)
- (3) 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" submitted.

ドリフト波乱流中の渦構造に関する

非線形シミュレーション研究

Nonlinear simulation on vortex structures in drift wave turbulence

富山大学・人間発達科学部 成行 泰裕

研究目的:

核融合プラズマ中には圧力・密度・温度勾配が普遍的に存在し、それらによってドリフト 波乱流が励起される。このようなドリフト波乱流を記述する基本的な方程式としては、 Hasegawa-Mima 方程式がよく知られている。近年、熱の輸送現象に大きく寄与するドリフト 波のミクロスケールの揺動の「寄り集まり(バンチング)」によって生じる周方向の流れの塊(スト リーマー)が実験室プラズマ中で観測され、さらにこのストリーマー構造が Hasegawa-Mima 方程式から導かれる非線形方程式のソリトン解(渦構造)に対応していることが指摘された。

本研究では、前年度の共同研究を通じて、(1)反磁性ドリフトを考慮した多種イオンプラズマ中の Hasegawa-Mima 方程式からの KdV 方程式の導出およびソリトン解の温度比・イオン組成への依存性の評価、(2)イオン-電子温度比を含む Hasegawa-Wakatani 方程式からの VZSC モデルの導出、を行った。本年度は、導出したイオン-電子温度比を含む VZSC モデルの数値シミュレーションを行う。

研究方法:

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

研究成果:

本年度は前年度導出した有限温度比を含む小数自由度モデル(modified VZSC モデル)の基本的な性質を議論した[1]。まず初めに、系の平衡点を解析的に求め、温度 比に対する依存性を確認した。次に、4次のルンゲクッタ法を用いて数値的に系の時 間発展を議論した。図1は温度比に関する量(*a*=1+τ、τ:イオン-電子温度比)で規格化 したレイノルズ数(*R'*)に対する分岐図である。赤い線はτ=0、青い線はτ=0.5 をそれ ぞれ表している。図1は4周期に分岐した所から示しているが、*R'*が大きくなるに つれて周期倍分岐を生じカオスへ至っていることが確認できる。赤い線と青い線の比 較では、それぞれ値に違いはあるものの、*R'*に対する分岐の依存性は変わらないこ とが分かる。ただし、この場合の*R'*は実際のレイノルズ数*R*に*a*を掛けた量である ため、温度比(イオン温度)が大きくなるほど小さいレイノルズ数*R*でカオスへの遷 移が生じることになる。すなわち、有限の温度比の効果により、層流状態から乱流状 態へ至るレイノルズ数の閾値が下がることになる。



図1 規格化したレイノルズ数に対する分岐図(詳細は本文参照)

また、VZSC モデルはレイノルズ数をある程度上げていくと解が発散することが知られているが[2]、一部の項に対してのみ温度比の効果を入れることでレイノルズ数を上げても発散しなくなることが分かった。今後は、この操作の物理的意味の解明やフィードバックなどを含む系[3]の解析、および統計的性質の解析[4]などが課題となる。

引用文献

[1]福永航平,平成24年度高知工業高等専門学校特別研究論文集(印刷中)(in English)

[2] A. A. Vasil'ev et al, Sov. J. Plasma Phys., 16(10), 1990.

[3] C. F. Figarella et al, Plasma Phys. Control Fusion, 45, 1297-1308, 2003.

[4] D. Hamada, Master's Thesis of Interdisciplinary Graduate school of Engineering Science, Kyushu University, 2007.

公表状況:

なし (*2013年3月15日に下記講演予定) 福永航平、成行泰裕、谷澤俊弘、佐々木真、矢木雅敏、"イオン - 電子温度比を含む ドリフト波乱流モデル",名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「雷・超高層放電の 科学」

研究組織:

成行泰裕(富大・人間発達)、福永航平(高知高専・専攻科)、谷澤俊弘(高知高専)、 佐々木真(九大・応力研)、矢木雅敏(原研)、羽田亨(九大・総理工) タングステン中の水素同位体保持特性に及ぼす照射欠陥の影響

富山大学 水素同位体科学研究センター 波多野雄治

1. はじめに

核融合炉プラズマ対向材料としてタングステン(W)が有望視されており、安全性の観点からトリチウ ム保持特性の解明が急務となっている。著者らは日米科学技術協力事業 TITAN 計画のもとで中性子照射 W 中の水素同位体保持特性を調べ、欠陥の捕獲効果により照射前に比べ水素同位体保持量が著しく増大 することを見出し、保持量低減とトリチウム除去法の開発に向けた研究の必要性を提言している[1,2]。 一方、中性子照射は照射条件の制約が大きく、試料の放射化などの問題もあり、実験精度には限界があ る。また、照射キャプセル体積の制限から、試験できる材料種もおのずと限定される。そこで、並行し たイオン照射による広範かつ精緻な実験が不可欠と考え、本共同研究を推進している。今年度は微量の Re 添加が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) および純度 99.99% の純 W 板材を用いた。これらの試料に室温および 600℃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、673 K で 1.2 または 100 kPa の D₂ガスに 10 時間曝露し、D の 深さ方向分布を核反応法(NRA) で分析すると共に、昇温脱離スペクトルを測定した。また、あらかじ め薄膜化した直径 3 mm の W-5Re ディスクに 2.4 MeV の Cu イオンを 0.25~1 dpa 照射したのち、TEM 観 察を行った。

3. 結果及び考察

Wイオン照射した純WおよびW-5Re 試料中のD濃度及びはじき出し損傷の深さ方向分布を図1に示す。 表面から約2µm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。はじき出し損傷量が最大となる深さ(約1.4µm)におけるD濃度に及ぼす Re 添加、照射温度、D₂ガス曝露温度の影響を図2に示す。いずれの試料においても873 K で照射すると室温で照射した場合に比べD濃度が低下している。これは、高温では欠陥の拡散が活発となり、照射中に一部の欠陥が消滅するためと考えられる。興味深いことに、純Wと比べW-5Re中のD濃度は常に低い値となっている。また、図3は873 K で照射した試料からのDの昇温脱離スペクトルであるが、W-5ReからのD脱離開始温度は純Wに比べ約150 K も低い。これらの結果は、水素同位体捕獲サイトとして働く照射欠陥の密度および欠陥からの水素同位体の脱離エネルギーが共に Re を添加することにより低下することを示している。すなわち、Re 添加はトリチウム保持量を低減する効果があると期待される。

照射前および Cu イオンを室温で1 dpa 照射したのちの TEM 像を図4 に示す。照射により、微細な空 孔クラスターが多数形成されており、これら空孔クラスターが主要なD 捕獲サイトとして働いていると 考えらえる。今後、空孔クラスターのサイズ分布等を調べ、上述のような Re 添加や照射温度依存性が 現れたメカニズムを考察する予定である。

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としても実施され た。ここに謝意を表する。



図1Wイオンで照射したのちD2ガスに曝露したW(左列)およびW-Re 合金(右列)試料中の Dの深さ方向分布およびはじき出し損傷分布.照射温度は上段が室温、下段が873K.



- 図 2 損傷ピーク深さでの D 濃度に及ぼす照射温 度、D₂ガス曝露温度および Re 添加の影響.
- 図 3 873 K で照射損傷を導入した W および W-Re 合金試料からのD 脱離スペクトル.

室温.

1 dpa

10nm



図4 照射前(右)および室温でCuイオンを1dpa 照射したのち(左)のW-5Re 試料のTEM像.

-172-

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

東日本大震災による福島原発事故以後、原子力政策に慎重になる国がある一方、世界では約400 基の商業炉が稼働中であり、さらに新興国での相次ぐ新設など、原子力分野での安全性の重要性は 変わらない。それに関連して、我々のグループでは、照射環境下での圧力容器鋼および炉内構造物 の脆化機構の解明と、それに基づく健全性評価法の確立に関する研究を進めてきた。特に磁気利用 による脆化の非破壊評価の可能性を検討しており、そのためには磁気特性に与える照射欠陥形成の 影響の解明が必要である。しかし、原子炉を使う中性子照射では系統的な実験が難しく、さらに放 射化するため通常の設備で試料を扱えないという問題があった。それらを解決する新しい手法とし てイオン照射と単結晶薄膜試料の組み合わせを提案している(科研費・基盤研究 B、No23360418)。 カスケード損傷が起こるイオン照射では中性子照射と似た損傷組織が得られると同時に、試料が放 射化しない利点を有する。損傷深さが浅いという欠点があるが、試料全体が損傷を受ける薄膜の利 用で照射領域の物性測定が容易になる。さらに単結晶を利用することで複雑な粒界の影響を除くこ とができ、相関機構の解明が容易になる。このような考えに基づき、単結晶鉄クロム薄膜における Fe-20%Cr 二相分離の照射促進現象の可能性をH22-23 年度に報告した。本年度は、磁気特性の照射 量依存性とクロム濃度依存性について検討を行った。

方法

単結晶試料の作製は、MBE 法(到達真空度 2×10⁻¹⁰ Torr)を用いて行った。MgO(001)単結晶基板上 に Fe-x%Cr (x= 5,10,15,20)を 30 nm 蒸着した。RHEED 観察より、良質な単結晶薄膜の形成を確認し た。イオン照射は、タンデム型加速器(九州大学応用力学研究所)を用いて、475℃で 1h 保持し、 Cu²⁺(2.4 MeV, 1.6×10⁻⁴ dpa/s)を照射した。照射時間は Fe-20%Cr で 5, 15, 45min、Fe-x%Cr (x= 5, 10, 15, 20) は 15min とした。SRIM 計算より、損傷度は 15min 照射で 0.14 dpa と見積もられた。照射した Cu²⁺は薄膜を貫通し基板に達するため、残留イオンの影響は無視できる。磁気特性評価として、VSM を用いて磁化測定(最大磁界 2 kOe)を行った。

結果および考察

Fe-20%Cr 単結晶薄膜の印加磁化方向を変えて磁化測定を行ったところ、純鉄と同様に、 H//[100]_{Fe-Cr}、H//[110]_{Fe-Cr}がそれぞれ磁化容易、磁化困難方向であることを確認した。図1に照射量 0から0.43 dpa までの磁化曲線を示す。飽和磁化はほとんど変化ないが、保磁力は照射量とともに 増加している。照射による過剰空孔の形成で2相分離が促進し、Crリッチ析出物が形成・成長した ことを反映している可能性がある。図2に保磁力の照射量依存性を過去の実験値(2.3dpa, 2.4×10⁻³ dpa/s)とあわせて整理した。保磁力が硬度増加に比例し(バルク Fe-20%Cr の熱時効実験で確認済[参 考文献])、さらに照射量の平方根に比例すると仮定した場合の曲線をプロットした。高照射量(高 フラックス)で曲線から外れており、フラックス効果の可能性もあるが今後検討が必要である。

Fe-x%Cr (x=5, 10, 15, 20)の未照射・照射(0.14dpa) 試料の飽和磁化は、照射前後で変化は見られなかった。一方、保磁力については、5%Cr から 15%Cr 合金では測定誤差の範囲で変化は無かったが、20%Cr 合金では照射により増加した(図 3)。この照射条件では 15%以下では二相分離がほとんど進行していない可能性がある。

今年度は、さらに直線駆動シャッターと専用ヒータ試料台を新しく据え付けることで、コンビナトリ アル型照射実験にも成功した。実験条件を系統的に変え、磁性に与える照射効果を解明したい。

- 参考文献: J. Mohapatra, Y. Kamada, 他 5 名: Effect of Cr-Rich Phase Precipitation on Magnetic and Mechanical Properties of Fe-20%Cr Alloy, IEEE Trans. Mag. 47 (2011) pp.4356-4359.
- 成果報告: Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi, M. Mizuguchi and K. Takanashi: Ion-Irradiation Enhancement of Materials Degradation in Fe-Cr Single Crystals Detected by Magnetic Techniques, Journal of Nuclear Materials, 2013, *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



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

静岡大学 理学部 大矢恭久

[目的]

D-T 核融合炉におけるプラズマ対向壁として、高融点・低スパッタ率等の特徴を持つタングステンの使用が 考えられている。対向壁にはプラズマから漏えいした高エネルギー水素同位体が照射され、照射欠陥が形成す る。形成した照射欠陥には水素同位体が捕捉され、壁中に滞留することが予想されている。そのため、核融合 炉の運転時間増加に伴い欠陥量およびタングステンの構造が変化し、水素同位体滞留挙動に影響することが考 えられる。また、プラズマ中には不純物として炭素が混入することが考えられ、水素同位体と同時に第一壁に 照射され、欠陥やタングステン炭素混合層を形成することが予想される。そ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サイクルに影響を及ぼす。核融合炉の定常運転のために は、混合層形成が及ぼす水素同位体滞留挙動への影響の解明は重要な課題である。そこで本年度は、タングス テンに重水素イオンを照射し、TEM 観察および TDS 測定により形成した欠陥状態および重水素滞留挙動の解 明を行った。加えて、照射温度を変化させて炭素照射したタングステンに重水素照射を行い、XPS 測定、TEM 観察および TDS 測定から炭素照射温度変化が及ぼすタングステン炭素混合層の化学状態、表面構造および重 水素滞留挙動への影響を検討し、炭素照射タングステン中の欠陥形成および水素同位体滞留とタングステン炭 素混合層形成との相関を明らかにした。

【実験】

本研究にはアライドマテリアル社製、1173 K 歪み取り処理済みの多結晶タングステンを使用した。試料を3 mm^{ϕ}×0.1 mm^tに加工した後、静岡大学にて重水素をエネルギー3 keV D₂⁺、フラックス 1.0×10¹⁸ D⁺ m⁻² s⁻¹、フル エンス 1.0×10²³ D⁺ m⁻² の条件で照射した。また炭素イオン照射に関しては、照射時の試料温度を室温、673 K と変化させて、イオンエネルギーを 10 keV C⁺、イオンフラックスを 1.0×10¹⁷ C⁺ m⁻² s⁻¹、イオンフルエンスを 1.0×10²¹ C⁺ m⁻² として照射を行った。各イオン照射後、九州大学の透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて 1073 K での焼鈍前後における試料中の照射損傷を観察した。

また静岡大学にて、同条件で重水素単独照射および炭素照射後重水素照射したWに昇温脱離法(TDS)による 測定を、昇温速度30K/min、昇温領域R.T-1173Kにて行い重水素の放出挙動を測定した。加えて、炭素照 射タングステンの表面化学状態および深さ方向における化学状態をX線光電子分光法(XPS)にて測定した。各 試料中の重水素深さ方向分布は富山大学にてグロー放電発光分光分析(GD-OES)により測定した。

【結果および考察】

図1にフルエンス1.0×10²³ D⁺ m⁻² 照射したW 試料のTDS スペクトルを、これまでに行った1.0×10²² D⁺ m⁻² 照射時の結果と比較したものを示す。 1.0×10^{23} D⁺ m⁻² 照射試料では、400、520、600、700 K に4つの重水素 放出ピークが見られた。低温側の400 K と 520 K の放出はそれぞれ表面吸着および転位ループ^[1]と原子空孔^[2] に捕捉された重水素の脱離と帰属した。一方、高温側の脱離ピーク(600 K および 700 K)は、重水素放出量に顕 著な増加が見られた。これは重水素照射量増加による新たな捕捉サイトの形成および重水素のバルクへの拡散 によるものと考えられた。図2に、フルエンス 1.0×10^{23} D⁺ m⁻² にて重水素照射した試料の焼鈍後における TEM 観察像を示す。焼鈍によりボイドの集合が観察されたため、照射時にナノボイドが形成していたことが示唆さ れた。また、富山大学にて行った GD-OES の結果より、重水素高フルエンス照射時にはバルク領域での重水 素滞留量が増加した。これらの結果および酸素に捕捉された重水素の脱離温度領域に関する報告から、ピーク

3およびピーク4はそれぞれボイドに捕捉された重水素の脱離およびバルク方向へ拡散し結晶粒界に存在する





図2 1.0×10²³ D⁺ m⁻²照射したWに 対する焼鈍後のTEM観察像

酸素に捕捉された重水素の脱離と帰属しされた。

図3に室温および673Kで炭素照射した試料における焼鈍後のTEM像を示す。どちらの試料においてもボ イドの形成が確認されたが、焼鈍後のボイドの大きさは室温照射試料が5nm以下であるのに対し673Kでの 照射試料は約10nmであった。また、静岡大学にて行ったXPS測定より、室温照射時と比較し673K照射試 料では表面炭素量が減少することがわかった。これらの結果より、室温での炭素照射時では673Kでの照射と 比較し、照射により形成した原子空孔が炭素により占有されている割合が高いことが示された。図4に各温度 で炭素照射した後、重水素を1.0×10²²D⁺m⁻²照射した試料のTDS結果を示す。炭素照射試料においてピーク



1、ピーク2、ピーク3としての重水素放出ピークが見られた。ボイドの形成はどちらの試料でも観察された が、欠陥における重水素滞留量は673Kで照射した試料の方が大きい。これは、原子空孔やボイドを占有して いた炭素が加熱により減少し、各捕捉サイトにおける重水素滞留能が増加したことが原因と考えた。

本研究により、照射した炭素が欠陥に捕捉されることにより欠陥の集合および重水素滞留挙動に影響を及ぼ すことが明らかとなった。

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

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

24 FP-23

極限環境下におけるタングステンの表面改質と水素吸蔵の基礎研究

筑波大学数理物質系 坂本瑞樹

1. 研究目的

プラズマ対向壁の表面状態は、照射損傷、再堆積、He バブル形成等の様々なプラズマ・壁相互 作用(PWI)現象に起因して変化する。この表面改質が壁の水素吸蔵・放出特性に与える影響の理 解は、核融合炉のトリチウムインベントリーやプラズマの粒子制御に関連して重要である。本研 究では、低損耗・高融点という特長から国際熱核融合実験炉 ITER においてプラズマ対向材料とし ての使用が計画されているタングステン材料に注目し、小型の直線型プラズマ生成装置を用いた 低エネルギー・高フラックスプラズマのタングステンへの照射及びタンデムミラー型装置 GAMMA10 を用いた高イオン温度プラズマのタングステンへの照射実験を行い、極限環境下におけるタング ステン中の水素吸蔵、材料損傷に関する基礎過程の理解を深めることを目的としている。

2. 実験結果及び考察

2.1 低エネルギー・高フラックスプラズマ照射実験

今回の実験では、2種類のタングステン(アライド マテリアル社製)を用いた。サンプルのサイズは、 ゆ 10mm×t1mmである。ひとつはロッド状に成形された タングステンをカットしたものであり、もう一方は板 状に成形されたタングステン板をカットしたもので ある。これら2つのサンプルの断面写真を図1に示す。 タングステン粒の伸びの方向がプラズマ照射面に対 して、垂直方向(垂直サンプル:図1(a))と平行方向

(平行サンプル:図1(b))に伸びていることが分かる。 粒のサイズは、垂直サンプルで10×2 µm、平行サンプ ルで5×2 µmである。2 つのサンプルの純度は99.99%で ある。サンプルは鏡面研磨後、アセトン、エタノール にて超音波洗浄され、1173K、1×10⁻⁶ torrで1時間焼鈍 された。焼鈍後のサンプルは、小型PWI模擬実験装置 APSEDASにて低エネルギー・高フラックスプラズマ に照射された。サンプルへの入射フラックスは3×10²¹ D/m²secであり、入射エネルギーは20-30eVである。プ ラズマ照射後にサンプルをTDS装置に移し、300Kから 1470Kまで1K/sの昇温速度で加熱してTDSスペクトル と重水素吸蔵量を測定した。

図2に垂直サンプルと平行サンプルの重水素リテ ンションの照射温度(サンプルの表面温度)依存性を 示す。いずれの照射温度でも、垂直サンプルのリテン ションの方が平行サンプルよりも高くなっているこ とが分かる。また、両サンプルともに照射温度が550K 付近で最大値をとっている。垂直サンプルのリテンシ ョンが高い理由としては、垂直サンプルの材料深さ方 向への実効的な水素拡散係数が平行サンプルに比べ て高いためであると考えられる。



図1 (a)ロッド状に成形されたタン グステン(垂直サンプル)と板状に成 形されたタングステン(平行サンプ ル)の断面 SEM 画像。プラズマ照射 面は横方向。



図 2 垂直サンプル(○)と平行サン プル(□)の重水素リテンションの照 射表面温度依存性。

2.2 高イオン温度プラズマ照射実験

水素リサイクリングの理解のためには、PWIに起因する壁の微視的状態変化の把握が重要となる。今回の実験では、W板及び透過型電子顕微鏡(TEM)観察用のステンレス(SS)薄膜とタングステ

ン(W)薄膜を用いて、GAMMA10のセントラル部のプラズマ を照射した。照射時間及び照射時期による損傷、堆積の 依存性を調べるために照射日数を1日、12日、49日(全 実験期間)と変えて実験を行った。それぞれの照射実験 での総照射時間は1日照射で約9秒、12日照射で約80 秒、全実験期間の照射では約370秒である。1日照射実 験時はイオンサイクロトロン周波数帯加熱(ICRF)のみ でプラズマ生成・維持し、12日照射実験時はICRFに加 え、プラグ・バリア部に短時間の電子サイクロトロン加 熱(ECH)を行っている。この2回の照射実験はGAMMA10 セントラル部に今回新たに設置した表面プローブシス テムを用いて行った。全実験期間を通じての照射は、 GAMMA10真空容器内に2箇所設置した長期設置試料を用 いた。

図1に長期設置試料のW薄膜のTEM観察結果を示す。 試料内部に微細な転位ループが形成されていることが 分かる。長期設置試料は、GAMMA10セントラル部の軸方 向中央(センター部)と中央から軸方向東側に1.2m離



図3 GAMMA 10 の(a)セントラル セル中央部と(b)軸方向へ 1.2m 離れ た位置に長期設置されたタングステ ンサンプルの TEM 観測結果。

れた位置(イースト部)に設置されており、中央から離れた試料では転位ループ形成が少なくなっていることが分かる。この損傷はプラズマからの荷電交換中性粒子に起因している。セントラル部のプラズマのイオン温度は数 keV であり、図3に示す転位ループ形成量の違いはセントラル部のイオン温度と密度の軸方向分布を反映していると考えられる。また、試料の断面観察から評価した堆積層の厚さは、センター部の試料では約8nm、イースト部の試料では約1.8nm であった。センター部試料の堆積層は、ナノ結晶の集合体であり、回折リングから鉄の酸化層であることが分かった。

3. 研究成果報告

- (1) 坂本瑞樹、吉田直亮 他、「GAMMA10 における長期設置試料と表面プローブを用いたプラ ズマ・壁相互作用研究」、プラズマ・核融合学会第 29 回年会、2012 年 11 月 27 日~30 日、ク ローバープラザ(福岡県) 27E38P.
- (2) A. Rusinov, M. Sakamoto et al., "Deuterium retention in various kinds of tungsten irradiated by low energy and high flux plasma in APSEDAS", Joint Conference of OS2012 and PMIF2012, August 27-31, 2012 (Tsukuba) O/PMIF-21.

4. 研究組織

氏 名	所属	役割・研究分担
坂本 瑞樹	筑波大学·数理物質系	研究統括(代表者)
赤羽 泰央	筑波大学·数理物質科学研究科	プラズマ照射実験・解析
芦川 直子	核融合科学研究所	ダスト解析
時谷 政行	核融合科学研究所	材料解析
大野 哲靖	名古屋大学・工学研究科	ダスト挙動
剣持 貴弘	同志社大学·生命医科学部	ACAT-DIFFUSE解析
宮本 光貴	島根大学・総理工	水素吸蔵解析
吉田 直亮	九州大学・応力研	材料解析
渡辺 英雄	九州大学・応力研	材料解析
徳永 和俊	九州大学・応力研	材料解析
ルシノフ アレキサント゛ル	九州大学・総理工	プラズマ照射実験・解析

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達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、その健全性および実用寿命の延長を目指して、接合界面の微細組織と機械的特性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) 接合材料を制作する。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 以下と高純度材である OFC を使用する。

次いで、タングステンと銅との接合材料に、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(Cu²⁺)を、573[K]において高温照射する。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)を実施する。

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 を実施する。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(α = 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。

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、材料特性のアニーリング効果を究明し、実用寿 命の延長について考察する。

3. 実験結果及び考察

Table1は、JT-01W/0FCとJT-02W/0FCについて、照射後高温熱処理によるダイナミック硬さの変化率を示す。また、Fig.1は、照射後高温熱処理による曲げ強度の変化を示す。

Table 1 において、タングステンは軽照射で平均 1.05 倍、重照射で平均 1.09 倍の照射硬化を示した後、照射後高温熱処理により、タングステン部分では軽照射後熱処理で平均 0.95 倍、重照射後熱処理で平均 0.96 倍の硬さを示し、照射硬化の回復が確認できた。一方、銅部分では、再結晶温度(473K)を超えた高温照射では、熱による影響が大きく、再結晶や粒成長を生じ軟化した後、照射後熱処理によりさらに大きく軟化した。

Fig.1において、軽照射では、JT-01W/OFC で 1.22 倍、JT-02W/OFC で 2.56 倍の曲げ強度の増大 を示し、重照射では、JT-01W/OFC で 1.36 倍、JT-02W/OFC で 1.33 倍の曲げ強度の増大を示し、照 射効果による曲げ強度の増大が確認できた。また、軽照射後熱処理では、JT-01W/OFC で照射材の 0.77 倍、JT-02W/OFC で照射材の 0.82 倍の曲げ強度を示し、重照射後熱処理では、JT-01W/OFC で 照射材の 1.11 倍、JT-02W/OFC では照射材の 0.48 倍の曲げ強度を示した。照射後高温熱処理によ る曲げ強度の低下傾向が確認できた。さらに、微細組織を有する JT-01W/OFC の方が、高温照射や 照射後熱処理による曲げ強度の変化率が小さく、耐熱構造機器の材料に適していると考えられた。

Heat treated joint specimen		w		OFC	
	Condition	Outside 0-1[mm]	Inside 1-2[mm]	Inside 2-3[mm]	Outside 3-4[mm]
JT-01W/OFC	Unirradiation [Dh]	1867	1938	239	188
	LI at R.T	×0.95	×1.01	×0.80	×0.60
	HI at R.T	×1.05	×1.01	×0.77	×0.65
	LI at 573K	×0.94	×0.92	×0.57	×0.58
	HI at 573K	×0.98	×0.99	×0.54	×0.51
JT-02W/OFC	Unirradiation [Dh]	1827	1834	203	201
	LI at R.T	×1.20	×1.05	×0.70	×0.70
	HI at R.T	×1.11	×1.19	×0.74	×0.71
	LI at 573K	×0.98	×0.95	×0.75	×0.80
	HI at 573K	×0.91	×0.95	×0.64	×0.66

Table 1 Dynamic hardness of heat treated joint materials after irradiation.



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

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性質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/0FCとJT-02W/0FC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/0FC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。

5. 研究組織

茨城大学工学部:車田 亮 大学院生: 小吹隆之、由比藤峻佑 九州大学応用力学研究所:渡邉英雄

6. 研究成果報告

1) 小吹隆之、車田 亮、他、日本機械学会関東支部第 20 回茨城講演会講演論文集、茨城大学、 (2012.8.24), pp.163-166.

小吹、車田、他、日本銅学会第52回講演大会講演概要集、東京工業大学、(2012.11.3-4), p. 85-86.
 車田 亮、小吹隆之、伊藤吾朗、渡邉英雄、松尾 明、銅とタングステンの接合界面強度に及ぼすイオン照射後熱処理の影響、銅と銅合金、第51巻1号, (2012), pp. 153-157.

無欠陥接合により作製されたタングステン/銅接合材料の熱負荷特性

茨城大学工学部 車田 亮

1.目的

タングステン(W)材料は、耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導率を有するためITERのダイバータ、原型炉の第一壁及びタイバータのアーマ材料等として使用すること計画されている。今後、実用化を目指 すためには、W材料に対する熱負荷特性を究明する必要がある。また、最近、HIP後、鍛造や圧延等を行なわ ないW材が開発され、この材料は従来の粉末焼結タングステン材と組織が大きく異なり、耐熱負荷特性も異なる ことが予想される。さらに、無欠陥接合法(NDB: Non Defective Bonding)により、銅との接合方法が開発され、W 材と銅の接合強度や熱伝達特性が著しく改善されている。そこで、本研究は、この新しく開発されたW材と無欠 陥接合法により作製された銅との接合体について、実際の核融合実験装置において想定される熱負荷を与え、 耐熱負荷特性を評価することを目的とする。

2. 実験方法

(1) 試料製作

NDB 法はタングステン合金と銅との接合方法として開発された接合技術で、ろう材を使用しない直接接合方法である。この接合の理論的な接合メカニズムは充分には解明されてはいないが、CuとWが機械的に接している段階、Cuの溶解によりWとの接触面積が増加する段階、CuとWとの原子間距離がさらに近くなり合金が形成される段階、その後、Cuが冷却され凝固する段階を経て接合体が作製されるものと考えられる。

本研究では、10mm x 10mm x 5mmt の超微細結晶粒 W 材と10mm x 10mm x 5mmt の Cu の接合体を NDB 法により 作製した。使用した超微細結晶粒 W 材は、HIP 法により作 製されたもので、その後、鍛造圧延等されておらず、通常の 粉末焼結 W 材とは、性質も異なることが予想される。図1に NDB 法により作製した W/銅接合体の写真を示した。熱負 荷実験の際の界面の許容温度は接合温度の 1/3 程度と考 えられる。また、Cu 部分の使用可能な温度は純銅で 200℃ 程度から再結晶するため、それ以下にする必要があると考 えられる。従って、W 表面で 1500-1600℃、界面で 300—400℃、Cu 部分で 200℃以下が使用温度と考えられ る。

(2)熱負荷実験

熱負荷実験は、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷 実験装置を用いた。接合体はCu製の試料台に5mm φ の孔が開い たW製の押さえ板で機械的に固定した。この接合体を試料台に固 定した写真を図2に示す。接合体には、Cu部側面の接合界面から 2mm下の位置に、直径1mm φ で深さ4mmの孔を開け、この孔に図 2に見られるようにシースタイプの熱電対を装着し、これにより銅部 分の温度測定を行った。また、試料台内部の冷却管に水を流し、 強制水冷却を行っている。接合体のW表面温度は、低温用及び 高温用の2台の二色放射温度計を使用し、ビーム照射部の温度を



図1 NDB法により作製したW/Cu接合体



図2 試料台に装着した接合体

測定した。この二色放射温度計は、2 つの波長における放射エネルギーを計測し、比率から温度を測定するた

め、単色放射温度計より正確に温度測定を行うことができる。

電子ビームの加速電圧は 20kV でビームサイズは約 3mm である。また、試料に 100V の電圧を印加し、電子 ビーム照射により発生する 2 次電子や熱電子の放出を抑えた状態で試料電流を測定し、これにより熱流束を求 めた。熱負荷実験は、2 s のビーム照射を行い、その後、30 sの休止期間をおき、1サイクル 35 s の繰り返しを5 回行った。この際、2 s の電子ビーム照射は、一定の熱流束で、12 MW/m²、24 MW/m²、37 MW/m²、42 MW/m²及び 59 MW/m²の5つの異なる値について実験を行った。

3. 実験結果及び考察

図3には、熱流束が59 MW/m²の場合の試料電流、熱電対の温度の時間変化を示した。照射を開始すると 共に、試料電流が流れ終了と共に、試料電流がOFFとなっていることがわかる。表面温度は、放射温度計の測 定下限温度である450℃には至ってはいない。一方、Cu部分の温度は、照射開始後、上昇し、定常状態に達 する前に照射終了と共に下降していることがわかる。5回の照射においてもその温度変化は変わらず、加熱に より界面部分の剥離等の損傷は発生していないことがわかる。図4には、熱流束を変化させたときのCu部分の 最高温度を示した。熱流束が増加するに従いほぼ直線的に最高温度は増加することがわかる。熱流束が、59 MW/m²の場合、Cuの測定部の温度は最高174℃となっているが、繰り返し照射による温度変化には変化はな く、剥離等の損傷による温度変化への影響はないことがわかった。

4. モックアップ接合試験体の作製

上記のように NDB 法により作製した W/Cu 接合体の熱負荷特性を評価した。さらに、試料の大型化及び強 制冷却状態における熱負荷及び熱疲労特性を評価するために、冷却管付のモックアップ接合試験体を作製し た。この際、大型化による熱応力の増加を低下させるために、W 部分を 19.5 mm x 5mm x 5mm の 4 つの部分 に分割し、冷却管付の OFHC に NDB 接合を行った。また、W 材については、超微細結晶粒 W 材に加え、粗 大結晶粒 W 材についても接合を行い、2 種類の異なる W 材について NDB接合を試みた。このモックアップ接 合体の写真を図 5 に示した。接合中及び接合後に亀裂、

剥離など発生せず、良好な接合が実施できた。

5. 研究成果発表

K. Tokunaga, T. Hotta, K. Araki, Y. Miyamoto, T. Fujiwara, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Kurumada, M. Tokitani, S. Masuzaki, K. Ezato, S. Suzuki, M. Enoeda, M. Akiba , Thermomechanical behavior of plasma spray tungsten coated reduced-activation ferritic/martensitic steel, 27th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2012), September 24–28, 2012, Belgium





図3 試料電流とCu部温度の時間変化



図 5 NDB 法により作製された冷却 管付 W/Cu モックアップ接合試験体

ゾーンプレートを使った QUEST プラズマ計測

電気通信大学 竹田辰興

【目的】磁気閉じ込めプラズマの実験的研究においては電磁波計測が有効で、中でも可視光を 中心とする画像計測は重要である。本研究はゾーンプレートによるプラズマ画像計測法の開発 を目的とする。

【研究概要】ゾーンプレートによる画像において特徴的なことは「背景光」と波長依存性がガ ラスレンズと逆向きの「大きな色収差」の存在である。大きな色収差の存在は、場合によって は、積極的に利用する可能性があり、我々も検討課題とした。しかし、背景光は画像のコント ラストを弱めて分解能を低下させるので除去することが望ましい。ゾーンプレートによる画像 は、一般に、1次の回折光によって作られるが、1次以外の回折光は背景光としてダイナミッ クレンジを狭くする(コントラストを弱くする)働きを持つ。これら1次以外の回折光の内0 次の回折光(非回折光、直進光)は特に大きくて、フレネル型ゾーンプレートの場合、1次の 回折光の $\pi^2/4$ 倍に達する。ゾーンプレートによる画像の内1次回折光による部分はゾーン数 を増やすことによって、より鮮明になるが、この背景光の存在のために画像全体は極めて不鮮 明なものとなる。ここでは、背景光の効果を取り除いて、より鮮明な画像を得る方法について 研究すると供にゾーンプレートの磁気閉じ込めプラズマ画像解析への利用について検討をした。 **背景光の除去** 上の記述からわかるように、1次以外の回折光を除去することによって背景光 を取り除くことができる。特に、0次の回折光(直進光)を取り除くことによって背景光の影 響を大幅に減らすことが可能である。このためには、たとえば、次のような方法が考えられる。 第一には、ゾーンプレートを出た光のうち 1 次回折光が収束する位置に凸レンズを置いてそこ に平行光線として到達した0次回折光を収束させ、そこにマスクを置き0次回折光を遮断する。 一方、収束点を過ぎて広がった1次回折光は色消しレンズ系で収束させて目的を達成する。こ のシステムは、L. Koechlin, et al. により衛星搭載望遠鏡のプロトタイプ(焦点距離:約18m、 ゾーン数:696)として成功したことが報告されている[1]。しかし、この方法は、短焦点の 系に応用することは困難と思われる。第2の方法としては、背景光は0次回折光だけに因るも のとして0次回折光による画像は同じ半径のピンホール画像と同じであると考えてゾーンプレ ート画像からピンホール画像の定数倍を差し引き1次回折光の画像だけを撮り出すというアイ デアがある。ゾーン数が 2n+1 であるような正のゾーンプレートの場合、入射した光の内、 n/(2n+1)~1/2 が透明ゾーンの位置に入射する。このことを考慮すれば、同じ被写体を、ゾ ーンプレートと、(そのゾーンプレートと同じ半径の)ピンホールによって撮影(これらを「像 A」および「像 B」とする)して、ピクセルごとに、「像 A-k*像 B」(k~0.5) の演算をするこ とにより、背景光はほぼ除去される。この演算は、PixelMath [2] や imageJ の PlugIn [3]

を使って容易に行える。 焦点距離 200 mm、 ゾーン数 29 のフレネルゾーンプレートを用いて、 この操作を行った例を図1~3に示す。図1および図2がそれぞれ、像Aおよび像Bを示して おり、図3が「像 A – (1/2)*像 B」である。図3は背景光がかなり除去されて、図1に比べて 鮮明になっているが必ずしも十分ではない。これは、ゾーン数が少ないことも原因の一つであ るが、この実験は背景光除去のアイデアを簡単な装置で検証することであったので工作精度が 著しく悪いためと考えられる。また、この方法では、同じ時点に同じ位置から2枚の写真を撮 らなければならないので、たとえば、ハーフミラーを使って光を分割するなどの必要性もある ので実際の実験での利用には多くの課題をクリアする必要がある。

プラズマ画像解析への適用性 ゾーンプレートによる点光源の像の解像度自体はゾーン数を多 くすることによって大きくすることができ、何らかの方法で背景光を取り除けば、解像度の高 い写真が得られる。光学素子としての ZP の特徴は、①ガラスレンズと違い光線が通る経路を真 空にできるし1枚の薄い板状材料から作られるので大きな ZP は対応するガラスレンズに比べ て極端に軽い、②焦点距離が光の波長に逆比例するのでガラスレンズに比べて分散がきわめて 大きな素子ができる、③ゾーン数を増やすと解像度が増加し、焦点深度、被写界深度が浅くな る、ということである。このうち、①の特徴は、いろいろな分野で有効利用されつつある。② の特徴に関しては、分散の向きが通常のガラスと逆であることを利用した超高性能色消しレン ズが可視光分野での利用例の一つである。プラズマ計測に関しては①の特徴の利用が今後期待 される他、なるべく浅い被写界深度の光学系を実現して、プラズマの Ηα線による単色光像を 撮影することが期待できる。しかし、現時点では磁気閉じ込めプラズマの可視光計測における ゾーンプレートのガラスレンズに対する優位性は明確とは言えない。

参考文献

- [1] L. Koechlin, et al., First high dynamic range and high resolution images of the sky obtained with a diffractive Fresnel array telescope, Experimental Astronomy (2012) 33, p.129.
- [2] S.L. Tanimoto, An Interdisciplinary Introduction to Image Processing, 2012, The MIT Press, http://pixels.cs.washington.edu/PixelMath/pmdownload/request.php,
- [3] <u>http://rsbweb.nih.gov/ij/</u>、http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/calculator-plus.html



図1

図3

磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス現象の

理論・シミュレーション研究

日本原子力研究開発機構 石井康友

目的

磁場閉じ込めプラズマにおいては、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に跨って相互作用し、その結果として 核融合炉の特性が決まる。それを総合的に理解し、予測・制御するためには、外 部情報入力を伴う、輸送、MHD、乱流、高エネルギー粒子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(1)プラズマ周辺における非線形 MHD 現象およびそれとコアプラ ズマとの相互作用(2)核融合炉における MHD 不安定性の飽和・抑制や突発現象 を解明するための理論・シミュレーションモデル及び(3)高エネルギー粒子と MHD 現象の相互作用を記述する理論・シミュレーションモデルを改良・開発し、核 融合炉の MHD 特性の総合的な解析を可能にするとともに、核燃焼プラズマの統合 シミュレーションを実現する上で必要なモデルを提供することを目指す。

研究成果

プラズマの安定性にとって重要なプラズマ回転が抵抗性壁モード(RWM)に与 える影響を、日本原子力研究開発機構で開発した MINERVA/RWMaC コードを用い て調べた(N.Aiba、J.Shiraishi)。正磁気シア配位における RWM に対しては、プラ ズマ回転に伴う遠心力により MHD 平衡が変化し、RWM の成長率が減少する事を 明らかにした(J.Shiraishi, IAEA2012)。また、負磁気シアプラズマに於いては、プ ラズマ回転は RWM の安定化のみでなく不安定化を引き起こす可能性が有る事を明 らかにした(N.Aiba, accepted to PPCF)。プラズマ回転によるこのような再不安定 化は、RWM と安定な MHD モードとの相互作用により引き起こされている可能性 が有る。回転により再不安定化した RWM では、静止プラズマにおける RWM に比 べて、プラズマ中心領域においても高振幅のモード構造を持っている。

核燃焼プラズマで重要となる高エネルギー粒子駆動モードに関するシミュレーション研究を行った(A.Bierwage, Y.Todo)。今年度は、プラズマの最外殻磁気面の外を通過してプラズマ中に戻る軌道を持つ粒子の影響を考慮した AE 安定性解析を行った。MEGA コード(NIFS)と粒子軌道追跡コード OFMC(JAEA)を連動させたシミ

ュレーションにより、異なるタイムスケール(波一粒子相互作用~10ms、バンプ オンテイル~10ms、減速時間~1s)の物理によって決定される位相空間の構造形 成の数値解析を行った(A.Bierwage IAEA2012)。

プラズマ中の突発現象に関しては、電子慣性効果を含む拡張型 MHD モデルに於 いて変分原理を定式化し、m=1内部キンクティアリングモードの爆発的成長を解 析的手法に予測する事に成功した(M.Hirota submitted to NF)。トカマクプラズマ で観測される鋸歯状振動現象は、炉心プラズマの高性能化に於いて重要な制御対 象の現象である。この鋸歯状現象はm=1内部キンクティアリングモードに起因す ると考えられているが、その速い成長率を引き起こす物理的機構はまだ解明され ていない。速い成長率を再現するために、電子慣性効果による無衝突磁気再結合 がその原因と考えられている。しかしながら、従来の解析的手法である漸近接続 法は線形領域しか取り扱えず、非線形発展を解析的に取り扱う事は不可能であっ た。また、電子流体効果が重要となる内部領域と、理想MHDで記述できる外部 領域における時間・空間スケールの差により、直接的な非線形シミュレーション も多くの計算資源を必要とし、高性能トカマクプラズマのパラメータ領域でのシ ミュレーションは依然として困難である。本研究では、無衝突プラズマが散逸を 持たない保存系であることに着目し、2流体モデルへの変分原理の拡張と変分原 理を用いた非摂動論的な解析手法により、鋸歯状振動における爆発的成長の理論 解析に成功した。

酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

九大工、安田 和弘, 高木 聖也(院), 山本知一, 松村 晶

1. 目的

蛍石型酸化物セラミックスは、優れた耐放射線照射損傷性を示すことが多くの研究により報告 されている。そのため、イットリア安定化立方晶ジルコニア(Y₂O₃-ZrO₂)、セリア(CeO₂)および類 似の結晶構造を有するパイロクロア酸化物は、長寿命核種核変換や放射性廃棄物処理のための不 活性母相の候補材料となっている。

蛍石型酸化物セラミックスは、金属イオンの質量が酸素イオンに比べて著しく大きく、かつはじき出しエネルギーは金属イオンおよび酸素イオン副格子で異なる値を示し、金属イオン副格子のはじき出しエネルギーは酸素イオン副格子の2倍程度大きい。したがって、放射線照射下における点欠陥形成速度は、酸素イオンの方が著しく大きくなる。例えば、電子照射のように比較的小さい運動エネルギーを格子原子に伝達する照射条件では、酸素イオンにのみ選択的なはじき出し損傷が生じる。さらに、酸素イオン点欠陥の移動度は陽イオンより大きい。以上より、蛍石型酸化物セラミックス中の照射欠陥の形成・成長過程は、酸素イオン点欠陥の挙動に大きく影響を受けることが予想される。実際の核融合炉や原子炉照射環境では、幅広いエネルギースペクトルを持つ一次はじき出しが生成されるため、そのエネルギーに依存して酸素イオン副格子に優先的にはじき出し損傷が誘起されたり、両イオン副格子にはじき出し損傷が誘起される。このような背景に基づいて、核融合炉や原子炉照射環境下での照射欠陥形成・成長過程を明らかにするために、これまで選択的に酸素イオンのはじき出し損傷が誘起される電子照射下において、酸素イオン転位ループの形成・成長過程について調べてきた。本報告では、電子照射により蛍石型構造のCeO2 中に形成される転位ループの挙動、およびその詳細な構造を電子顕微鏡法にて原子レベルで調べた結果について報告する。

2. 実験方法

CeO₂ 焼結体から透過電子顕微鏡用薄膜試料を Ar イオン研磨法により作製した。電子照射下「その場」観察実験は、収差補正器を搭載した高分解能走査透過電子顕微鏡(JEOL JEM ARM200F)および汎用電子顕微鏡(JEOL JEM-2100HC)を用いて行った。電子エネルギーは 80 keV~200 keV,照射強度は 1.5×10²³ e⁻/m²s とした。本研究の電子エネルギーでは Ce イオン副格子にはじき出し損傷は生じず、酸素イオン副格子にのみはじき出し損傷が生じる。高分解能走査透過電子顕微鏡観察には、高角度散乱環状暗視野(HAADF-STEM)法、および環状明視野(ABF-STEM)法を用いた。

3. 結果及び考察

図1は、200 keVの電子照射により形成・成長する転位ループの時間変化を観察した結果を示している。照 射温度は300 K で、照射強度1.5×10²³ electrons/m²s である。照射開始後170秒で黒色のドット状コントラスト を呈する2~3 nmの欠陥集合体(転位ループ)が形成され、照射時間の経過とともに強い歪み場を伴ったダブ ルアーク型コントラストを呈する転位ループが成長している。図1b-f中に1および2で示した転位ループに着 目すると、照射時間の増加に伴って{111}面上を移動しながら成長していた。また、図1c-e中に3および4で 示した転位ループは、1および2の転位ループと同様に{111}面上を移動しながら成長し、照射開始後920秒 で両者が合体する現象が観察された。

図 2 は、200 keV 電子を照射した CeO2を[011]方向から観察した HAADF-STEM 像である。直径約 5 nm

の転位ループ(図 2 中に矢印で例示)が edge-on 条件で形成されており、周辺に強い歪を誘起していることが わかる。この転位ループを同一の方向から高倍率にて HAADF-STEM で観察した<110>方向から観察した 転位ループを含む領域の HAADF-STEM 像であり、転位ループは edge-on 条件で写真中央に形成し ている。自く見えるコントラストは、Ce イオン原子列を示している。図 2 より、転位ループには余分な Ce イ オン原子列は含まれていないことが分かる。さらに、格子像の解析から、転位ループが存在している箇所 の Ce イオン原子間距離は 4.9Å であり、(111)面の Ce イオン面間距離(3.5Å)に比べて著しく広がっている。 このため、転位ループ周辺の Ce イオン配列に大きな格子歪が誘起されている。以上の結果は、低エネル ギーの電子照射で形成される転位ループが{111}面に板状に集合した酸素イオンに起因する二次欠陥 であるという考察を支持している。



Figure 1. Sequential BF images for the nucleation-and-growth process of dislocation loops in CeO₂ under 200 keV electron irradiation at 300 K with an electron flux of 1.5×10^{23} electrons/m²s. The micrographs (a)-(f) were taken at an identical region with changing electron irradiation time.



Figure 2. HAADF STEM image of dislocation loops in CeO_2 formed under 200 keV electron illumination during the observation at 300 K, showing dislocation loops on {111} planes at edge-on conditions (indicated by arrows).



Figure 3. An example of high resolution HAADF STEM image of a dislocation loop in CeO_2 irradiated with 200 keV electrons.

物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状 再構築システム(CCS)の ST プラズマ位置形状制御への適用検討(III)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構 栗原研一、川俣陽一、末岡通治、武智 学 九州東海大学 御手洗 修 九州大学 薛 二兵、劉 暁龍、浮田天志、中村一男

1. 目的

本研究は、九大応力研で平成20年度より既に実験を開始しているプラズマ境界力学実験装置 (QUEST: Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak, R=0.68m, a=0.40m, Bt=0.25T, 図1参照)におけるプラズマ断面位置形状の高精度平衡制御系の構築を目指すもの

である。その手法として、原子力機構JT-60におけるプラズマ断面位間形状の高精度平衡特で「コーシー条件面(CCS)法」を用いた面位をしていた面で、QUESTのプラズマ時間形状の間形状をしていたのである。



図 1:QUEST

る。特に、プラズマ変動期の再構築精度に大きな影響を及ぼす真空容器内渦電流の推定法について、物理的に無矛盾なモデルによる実時間計算方法の検討も行う。また昨年度から開始した、

センサー種類が増えた場合の精度向上について の検討、並びにQUEST装置での現制御システムと CCS法搭載制御システムの並列同時稼働手法に関 して、JT-60で実績のあるメモリ共有方式による 入力信号の共有方法の検討も検討時間の確保を 前提に継続する。

2. 研究の具体的方法

研究対象としては、原子力機構JT-60でのCCS 法を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築 システムをプラズマ境界力学実験装置(QUEST) への適用に於いて、図2に示すようなQUESTの幾 何学体系を踏まえ、昨年度に引き続き以下の検 討を行う。①フラックスループ及び磁気プローブ を考慮したCCS法の最適化について検討する。② 幾何学体系を踏まえた実験データから、真空容器 などプラズマ周辺の導体を流れる渦電流の影響 の推定手法を検討する。③プラズマ実時間制御 システムや実時間プラズマ断面形状可視化シス テムの構築に向けた検討を継続する。特に、その 実現には磁気センサーからのデータ転送/共有 が鍵となるが、その有力な方法「メモリ共有方式」



図 2:QUEST のポロイダル断面図

に用いる「リフレクティブ・メモリボード」が、QUEST実時間制御システムを構成するNI(ナショナル・インスツルメンツ社)製のPXIバスシステムに対応可能であることを昨年度確認したことを受けて、実現に向けての技術課題の検討を可能な限り進める。

3. 結果概要

3.1 2種類の磁気センサーを用いたQUESTダイバータ配位プラズマ断面形状再構成

QUEST (B_t = 0.25 T, R = 0.68 m, a = 0.40 m) では球状トカマクプラズマの定常維持法の一方法として、OHプラズマにて高密度ダイバータ配位プラズマを生成し、EBW電流駆動により定常維持することを計画している。

磁気プローブ8本の増設により、これまでのフラックスループ21本と伴に2種類の磁気センサーを



用いることにより、真空容器渦電流の影響の考慮の精度が向上し、ダイバータプラズマ断面形状の高精度化が可能となった。また、渦電流については、図3の一番右に示すように作年度6種類だった。

たものを、8種類の一様電流に自由度を増 やして配置した。

これら磁気センサー及び渦電流を考慮し てCCS法に基づくQUESTプラズマの高精度 再構築を行った。

PF35-12内外直列ダイバータコイルを用 いて低三角度(キャンディ状)OHダイバータ 配位を形成し、PF35-1内側ダイバータコイ ルを用いて高三角度(D形)OHダイバータ 配位を形成した。ダイバータ配位プラズマは TASK/EQUコードを用いて磁場配位を計画 し、生成されたプラズマ境界の形状は2種類 の磁気センサー(磁束ループ、磁気プロー ブ)からの信号に基づいてCCS(コーシー条 件面)法[1]にて再構成した。その再構成結 果はダブルヌルダイバータ配位を示した(図





4)。また、その再構成結果をEFITコードによるフィッティング結果と比較検討した。

現状の OH プラズマには高エネルギー電子が存在し、非等方的圧力分布を有する可能性がある。その場合、通常の平衡解析は困難となるが、CCS 法は非等方的にもかかわらず、プラズマ形状を正確に再構成することが可能である[2]。

磁東ループに加えて、磁気プローブを真空容器内面に設置したので、CCS を磁気計測面に設置することが可能である。図 5 に、(ケース1)磁東ループ 21ch のみ、(ケース2)磁気プローブ 3ch 追加、(ケース3)EFIT による再構成磁気面を例として示す。センサーの増加は、渦電流の影響も、 求める自由度が上昇したことから精度の向上が図れることが判った。

さらに境界積分方程式を磁気センサー設置面に適用することにより、真空容器に流れる渦電流 および真空容器外に位置する PFC (ポロイダル磁場コイル)は、磁場及び磁束の計測面内での内 挿計算が良好であるという前提の下で、考慮する必要がなくなる。また、高周波電流駆動プラズマ において、閉磁気面外の開磁気面に存在するプラズマ電流の効果を、開磁気面上に仮想導体ま たは仮想 PFC を仮定することにより、計算することが可能となるかどうかについても検討したので次 節で述べる。



(左:磁束ループ21chのみ、中:左に磁気プローブ3ch追加、右:EFITによる再構成磁気面)

3.2 仮想インベッセルコイルを用いたQUESTダイバータプラズマ形状再構成

QUESTでは球状トカマクプラズマの定常維持法のために、OHプラズマにてダイバータ配位を形成し、EBW電流駆動により定常維持することが計画され、PF35-12直列ダイバータコイルを用いたダブルヌル的なダイバータ配位とPF35-1内側ダイバータコイルを用いたD形ダイバータ配位について、2種類の磁気センサー(フラックスループ、磁気プローブ)を用いてダイバータ配位プラズマ断面形状をCCS法にて再構成出来るかどうかを確認することを意図した。

RF立上/維持プラズマに関しては、電流密度分布が閉磁気面より低磁場側にシフトしていることが推定され、一方、EFIT解析では、閉磁気面内に電流密度分布を仮定するため、電流密度分布は閉磁気面内で低磁場側にシフトするとともに、強磁場側に異符号の電流密度領域が現れることが判明した。

そこで、2種類の磁気センサー(FL, MP)信号により拘束条件を増した場合に、仮想インベッセル コイルを配置して、EFIT解析と組み合わせて、磁気面外電流の対処を行った。また、圧力分布の 異方性に依存しないCCS法を適用した場合の再構成を含め検討した。これらの検討結果を以下に まとめる。

(1)閉磁気面外に流れているプラズマ電流を仮想インベッセルコイルにて模擬して、閉磁気面内に 流れているプラズマ電流に関して平衡の式を解き、EFITにて解析した結果、以下が判明。

①仮想インベッセルコイルを仮定すれば、平衡の式を満足する閉磁気面が得られる。

②閉磁気面外に流れている電流を仮定しなければ、横長で、電流密度分布が低磁場側にシフトしたダイバータ配位で、閉磁気面内の強磁場側には異符号の電流密度領域が現れる。

- ③R=1.2m, Z=0mに仮想インベッセルコイルを設置すれば、外側ヌルのダイバータ配位が形成。
- ④EFIT解析においては、仮想インベッセルコイルの周りに閉磁気面プラズマができている。

⑤仮想インベッセルコイルにプラズマ電流の約30%の電流を仮定すれば、強磁場側における異 符号の電流密度領域が消滅す

る。

- (2)以下の方策の検討が重要である。

 閉磁気面外に流れる電流を考慮した電流駆動法を検討する必要がある。例えば、RFの入/切を繰返すことなどで高E電子による電流をバルクに移す必要がある。
 - ②オーム加熱コイルなどによりバル クプラズマを最初に生成する必 要がある。
 - ③高温壁を考慮した解析が必要で ある。また大断面プラズマを生成 する方策が必要である。
 - ④非円形度を上げるならば、不安定 性抑制のため高速応答電源が 必要である。
 - ⑤非円形度を上げなければ、大きな ダイバータコイル電流が必要とな る。
- (3)CCS法を用いる場合のポイントは以 下である。
 - ①CCS法では異方性圧力分布でも 解ける。但し仮想インベッセルコ イルの設置必要。
 - ②磁気センサー以外の計測データ と比較で検証する。軟X線カメラ 像、可視カメラ像、など。
 - ③強磁場側の異符号の電流密度領 域を無くなると期待される。





④正則化にチコノフ条件を課すことで、精度の向上が図れる。図6に結果を示す。内側ダイバー タ配位が再構築することに成功した。

3.3 CCS法を用いたQUESTプラズマ断面形状実時間制御用再構築に向けた制御システム構成

プラズマ実時間制御システムの構築に向け、磁気センサーからのデータ共有を「リフレクティブ・メ モリボード」で行うことで、QUEST実時間制御システムを構成することを目指した。しかし、作業時間、 コストなどの制約から今年度は実施しないこととし、別途次年度以降再度検討することとした。

4. まとめ ―今後の展開を期待して―

以上の検討結果から以下の成果が得られた。

- 従来のフラックスセンサーに加え、磁気プローブセンサーも加えて、渦電流を考慮したCCS法 によるプラズマ最外殻磁気面の再構成精度が一段と向上した。
- RF駆動によるQUESTプラズマの再構築のために、仮想インベッセルコイルを設置する試みを 行い、チコノフの正則化法による非適切性回避策を講じたCCS法により、内側ダイバータ配位 プラズマの高精度再構成が可能である事を示した。
- 今後は、さらに以上の成果を踏まえて以下の展開が期待される:
- QUEST実時間制御システムに、CCSによるプラズマ断面形状実時間再構築システムを実現 する。

参考文献

- [1] K. Kurihara, "A new shape reproduction method based on the Cauchy-condition surface for real-time tokamak reactor control" Fusion Eng. Des., 51-52 (2002), pp. 1049-1057.
- [2] K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, Fusion Engineering and Design, Vol.86 (2011) 1080-1084.

5. 関連文献

<今年度(H24年度)分>

- [a] <u>中村一男</u>, 劉 暁龍, 薛 二兵, 夏 凡, 御手洗 修, 栗原 研一, 川俣 陽一, 末岡 通治, 長谷川 真, 徳永 和俊, 図子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 松岡啓介, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌 二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 荒木 邦明, 福山 淳: 2種類の磁気センサーを用いた QUEST ダイ バータ配位プラズマ断面形状再構成, 第9回核融合エネルギー連合講演会、神戸国際会議場 (兵庫県神戸市、2012 年 6 月 28-29 日)、29A-26p。
- [b] <u>K. Nakamura</u>, X.L. Liu, E.B. Xue, F. Xia, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Matsuoka, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, K. Araki, A. Fukuyama: Plasma Shape Reproduction with Two Kinds of Magnetic Sensors on QUEST, 27th Symposium on Fusion Technology, Liege, Belgium (Sept. 25, 2012) P2-60.
- [c] <u>中村一男</u>, 劉 暁龍, 薛 二兵, 夏 凡, 御手洗 修, 栗原 研一, 川俣 陽一, 末岡 通治, 長谷川 真, 徳永 和俊, 図子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 松岡啓介, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌 二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 荒木 邦明, 福山 淳: 仮想インベッセルコイルを用いた QUEST ダイ バータプラズマ形状再構成, 第29回プラズマ・核融合学会年会(クローバープラザ福岡県春日市 2012年11月27-30日)、30D40P。
- [d] <u>K. Nakamura</u>, H. Fujita, X.L. Liu, E.B. Xue, F. Xia, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Matsuoka, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, K. Araki, A. Fukuyama: QUEST Divertor Plasma Shape Reproduction, Workshop on ST Seoul National Univ. (Jan. 14 16, 2013)

<H23年度分>

- K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, Fusion Engineering and Design, Vol.86 (2011) 1080-1084.
- K. Nakamura, X.L. Liu, M. Tomoda, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Effect of Shell Cut and Diagnostic Port on Stabilizing Characteristics of Vertical Position Instability on QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-34.
- K. Nakamura, X.L. Liu, T. Yoshisue, O. Mitarai, K. Tokunaga, M. Hasegawa, et al.: Venturini Method and Space Vector Modulation Method in Matrix Converter, ICEE2011, Hongkong (2011) A367.
- ・吉末竜也,中村一男,劉 暁龍,薛 二兵,長谷川 真,徳永 和俊,御手洗 修,他: QUEST プラズ マ制御のためのマトリクスコンバータの検討,電気関係学会九州支部連合大会,佐賀(2011) 01-1A-01.
- X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study

of Matrix Converter as a Current-Controlled Power Supply in QUEST Tokamak, Plasma Fusion Res., Vol.6 (2011) 2405137.

- Xue Erbing, Luo Jiarong, Liu Xiaolong, Kazuo Nakamura: Modeling of Vacuum Field in Start-up in EAST, ITC-21, Toki (2011) P1-54.
- K. Nakamura, X.L. Liu, E.B. Xue, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: QUEST Shape Reproduction Based on CCS Method with Two Kinds of Magnetic Sensors, Plasma Conference 2011, Kanazawa (2011) 22P132-P.
- X.L. Liu, K. Nakamura, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Robust Control Design for Plasma Vertical Instability of QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-39.

<H22年度以前分>

- ・中村一男,姜 毅,劉 暁龍,御手洗修,栗原研一,川俣陽一,末岡通治,長谷川真,他: CCS法に基 づくQUESTプラズマ断面再構成に及ぼす渦電流の影響,第8回核融合エネルギー連合講演会, Takayama (June 11, 2010) 11B-10p.
- K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, 26th Symposium on Fusion Technology, Porto (Sept. 29, 2010) P3-158.
- ・中村一男,姜 毅,劉 暁龍,御手洗修,栗原研一,川俣陽一,末岡通治,長谷川真,他: QUEST における各種電流駆動時のCCS法による断面形状再構成,第27回プラズマ・核融合学会, Sapporo (Dec. 1, 2010) 01P54.
- X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study of a Matrix Converter for Plasma Vertical Position Control on QUEST Tokamak, ITC-20, Toki (2010) P2-69.
- ・中村一男,劉 暁龍,吉末竜也,御手洗修,徳永和俊,長谷川真,他:マトリクスコンバータにおけるVenturini法と空間ベクトル法, 電気学会半導体電力変換研究会,Kobe (Jan. 21, 2011) SPC-11-024.
- •K. Nakamura, et al., "Characteristics of SVD in ST Plasma Shape Reconstruction Method Based on CCS" Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Vol.8 (2009), pp. 1048–1051, Sep. 2009.
- •K. Nakamura, et al., "Eddy Current Effect on Plasma Shape Reconstruction Based on CCS Method in CPD and QUEST" Asia Plasma Fusion Association 2009, Festival City AUGA, Aomori, Japan, Oct. 27th-30th, 2009.
- ・中村一男,他,「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解の特徴」第25回プラズ マ・核融合学会 年会 予稿集 (2008).
- ・中村一男,他,「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解」第24回プラズマ・核融 合学会 年会 予稿集 (2007).
- ・姜 毅,他,「渦電流を考慮したCCS法によるQUEST球状プラズマ断面形状の実時間再構成」第13 回プラズマ・核融合学会年会(九州・沖縄・山口支部大会)予稿集 (2009).
- ・松藤伸治,他,「真空容器渦電流分布を考慮したCCS法によるCPDプラズマ断面形状再構成」第12 回プラズマ・核融合学会(九州・沖縄・山口支部大会)年会 予稿集 (2008).
- •F. Wang, K. Nakamura, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, K. N. Sato, H. Zushi, K. Hanada, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, et al.: *Engineering Sciences Reports, Kyushu University*, Vol. 29, No. 1 (2007) 7–12.

(以上)

H-C-N 反応性低温プラズマ牛成による炭素堆積膜成長と水素同位体吸蔵の制御

金沢大学理工研究域 上杉喜彦

1. はじめに

低Z材であるグラファイトは、長い間、核融合実験装置のダイバータ板および第1壁材として 用いられているが、炭素材特有の化学スパッタリングによる損耗や核融合燃料であるトリチウム の炉壁炭素材および炭素再堆積膜への物理・化学的吸蔵が問題視され、ダイバータ板材料として は高融点金属材であるタングステンに取って代わられようとしている.しかしながら、タングステ ン材は、水素・ヘリウム照射によるブリスタリングやバブル形成、高い熱衝撃による溶融・ドロッ プレット・クラックの発生等、将来の核融合炉ダイバータ板材料として使用するには問題点も多 いのが現状である、核融合炉ダイバータ材料開発研究の大半がタングステン材使用に向けて行われ る中で、本研究はグラファイト材の欠点とされるトリチウム吸蔵を制御・抑制する手法の開発を 行い、将来の核融合炉における炭素材使用の可能性を検討すること目的としている、決定的なダイ バータ材料ではないタングステン材の開発研究に加えて、本研究のような補完的材料基礎研究を 行うことは、OUESTにおけるプラズマ-壁相互作用研究に大きく貢献するものである.

直流アーク放電による不純物導入実験

2-1 実験装置

アーク放電により不純物導入実験は、Heliotron-DR 装置において行った.プラズマは定常電力:3. 3 kW, 周波数: 13.56, および 27.12 MHz の高周波により生成した. また, 弱い閉じ込め磁場と してヘリカル磁場 200 G. トロイダル磁場 40 G を印加している. アーク放電には同軸型炭素電極 (内部電極外形:12 mm. 外部電極内径:18 mm)を用いて,電極間に直流電圧(最大電圧 400 V) を印加し約20Aでのアーク放電による炭素不純物供給を行った.

2-2 実験結果

図1に炭素電極を用いたアーク放電時の画像、図2にアーク放電領域の発光スペクトルと水素 / メタンプラズマ放電時にメタンガス導入部の発光スペクトルの比較を示す. アーク放電中には 強い C,の分子線の発光が観測されており,主に炭素粒子として放出されていることがわかる.ま

た、観測されたスペクトルには連続スペクトル成分も含まれていること から、黒体輻射温度を評価したところ約2.900 K となった、実験後にシ リコンサンプル上の堆積膜の膜厚をエリプソメータを用いて測定したと ころ、約10nmの膜ができており、アーク放電による炭素不純物供給で もメタンガス導入時と同等の炭素膜の成長が確認できた。

図2に質量分 析器を用いてアーク放電およびメタンガス導入時の排出ガス分析を行っ た結果を示す.アーク放電時にもエチレン (C,H₄) 等の炭化水素が観測さ れている.



2-3 今後の予定

Intensity (a.u.)



図1 炭素電極アーク放電

Heliotron-DR 装置を用いた炭素電極アーク放電により水素プラズマ中への炭素不純物導入実験を 行い、炭素堆積膜の成長を確認した.今後、重水素中での同様の実験やタングステンなどの高融 点金属電極を用いたアーク放電により金属不純物導入実験を行う予定である.

3. 低温重水素プラズマ中への窒素導入による炭素堆積膜成長抑制

本研究では,同様の装置を用いて核融合炉における壁周辺プラズマでの不純物膜堆積,水素同 位体吸蔵に関する知見を得るため,重水素/メタンプラズマを試料へ照射する.この条件下にお いて窒素添加による炭素膜堆積抑制効果およびダスト生成抑制効果を調べた.

3-1 実験装置

本実験でのプラズマ照射の実験条件は、電力が定常 2.3 kW、ガス流量は重水素が 20 sccm、メタンは 1 sccm とした.動作ガス圧は P_f~0.64 Pa で、生成したプラズマの電子温度は 7-10 eV、電子密度は (0.5-1.4)×1016 m⁻³ である.閉じ込め磁場としてヘリカル磁場 200 G、トロイダル磁場 40 G を印加した.照射台には、外部から温度制御を行うために熱電対とヒーターを取り付けた.試料にはシリコンを用いた.評価方法として、分光観測と四重極型質量分析、またプラズマ照射後の試料に対しては走査型電子顕微鏡とエリプソメータ、触

針式段差膜厚計を用いた.

3-2 実験結果

図4に重水素/メタンプラズマおよび重水素/メタ ン/窒素プラズマの質量分析結果を示す.メタンを導 入しているのに mass=15 が増加しないのはメタンの炭 素原子がプラズマ中にある水素に比べて多量にある重 水素と結合して CD₃や CD₄ などになるからだと考えら れる. 窒素添加後は NH, CN や DCN 分子などの非凝集 性分子が増加している.図5に重水素 / メタン / 窒素プ ラズマの分光観測結果を示す. 揮発性の CN や NH 分子 の強い発光が確認できた. CN, NH 分子などの生成は水 素 / メタン / 窒素プラズマ実験でも観測されており、こ れら非凝集性分子の生成により炭素膜堆積の抑制をもた らすと考えられる.図6に軽水素プラズマ中への窒素導 入時の炭素膜厚と非凝集性分子発光の一例として CN 分 子線発光強度の窒素導入割合依存性を示す.水素ガスに 対して数%の窒素を添加することで強い炭素膜堆積の抑 制効果があることが分かる。また、炭素膜成長に対して 強い温度依存性があることも初期実験で判明しているこ とから今後より詳細な実験を行う予定である。

4 まとめと今後の計画

重水素プラズマ中への窒素導入による炭素膜堆積お よび重水素吸蔵に関する実験の着手した.また、メタン ガスに代わる炭素不純物導入法として、同軸炭素電極 を用いたアーク放電による炭素不純物導入試験を行い、 安定に炭素不純物の導入が行えることを確認した.今 後、タングステン電極等の金属電極を用いたアーク放 電により金属不純物導入試験を行うとともに各種不純 物堆積膜中への重水素吸蔵特性を調べるとともに、窒 素ガス導入による堆積膜中への吸蔵抑制効果と重水素 を含む非凝集性分子の炉外排出特性を明らかにする 予定である.







微量イットリウム添加がバナジウム合金のイオン照射硬化挙動に及ぼす影響

核融合科学研究所 長坂琢也

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。一方、Y添加で強度は低下するが、それはCr 量の増量で補うことが可能であることも明らかになってきた。

材料の使用温度下限を定めるのは比較的低温(400~500℃)での中性子照射脆化であり、 上記の新合金についても従来のバナジウム合金と比較するために照射データを取得するの が急務である。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1µm以下に限られること、短時間に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 合金(NIFS-HEAT-2)及び、これを基本組成として微量 Y 添加等により試作した合金試料を用意した。試料組成を表1に示す。今年度は V-4Cr-4Ti-0.0190 (NIFS-HEAT-2)及び V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.00900 に対し、九大応力研の高エネルギー

Code	Cr	Ti	Y	С	Ν	0	0濃度
V-4Cr-4Ti-0.019O (NH2)	4.11	4.15	< 0.002	0.025	0.009	0.019	低
V-4Cr-4Ti-0.051O	4.40	4.51	< 0.002	0.014	0.015	0.051	高
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.011O	4.51	4.59	0.09	0.011	0.013	0.011	低
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.00900	4.23	4.17	0.11	0.011	0.009	0.0090	低
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.27O	3.87	3.99	0.06	0.010	0.018	0.27	高
V-6Cr-4Ti-0.15Y-0.0095O	6.21	4.16	0.08	0.013	0.011	0.0095	低
V-6Cr-4Ti-0.15Y-0.089O	6.81	4.10	0.08	0.0080	0.016	0.089	高
V-10Cr-4Ti-0.15Y-0.00980	9.87	3.72	0.18	0.011	0.0050	0.0098	低

表1 V合金の組成
イオン発生装置を用いて 0.1~10 dpa の 3MeV Cu イオン照射を行った。照射 温度は 200℃である。照射後の試料に ついて、核融合研の微小押込み試験機 で表面の照射硬化を測定した。九大応 力研の電解研磨装置で電子顕微鏡試料 を作製し、透過電子顕微鏡で表面の照 射損傷組織の観察を行った。

3. 結果と考察

図1はイオン照射後の表面の押込 硬さを示す。横軸は押込み深さである。 イオン照射試料では、表面の約1µmの 領域のみが照射損傷を受けているため、 押込み深さが大きい場合(押込み深さ 1 µm 以上)には非損傷領域の影響が大 きく、照射による硬さの変化は小さか った。一方、押込み深さ 0.6~0.8 µm 以 下から0.2 µm までは明確な照射硬化が 確認された。1 dpa と 10 dpa での照射硬 化の違いは大きくなかった。Y 添加合 金 (V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.00900)の方が 無添加合金(V-4Cr-4Ti-0.019O)より も照射硬化が小さいことが示唆された。 図2に照射損傷組織を示す。数 nm の サイズの高数密度 (~5×10²² m⁻³程度) の照射欠陥が観察された。Y 添加合金 と無添加合金の間でサイズと数密度の 大きな違いはなく、上記の Y 添加によ る照射硬化の抑制と、微細組織発達の 相関についてはさらに詳細な分析と検 討をすることが今後の課題である。

4. 成果報告

(1) 宮澤健, 長坂琢也, 菱沼良光, 室賀 健夫, 渡邉英雄, "イットリウム添加 バナジウム合金 V-4Cr-4Ti-0.15Y の照 射硬", プラズマ・核融合学会第29回 年会, 2012 年 11 月 27 日~ 30 日, ク ローバープラザ, 福岡県春日市





図 2 200℃、1 dpa 照射後の照射欠陥組織(暗 視野像)

プラズマ照射によって金属材料に注入された水素の蓄積とその放出機構の解明 九州大学・総合理工学研究院 大塚 哲平

【目的】 核融合原型炉の第一壁候補材料である低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(F82H)には タングステン(W)を被覆することが検討されている。このため、燃料である放射性水素同位体トリチ ウムがW被覆材およびF82H基板にどのように蓄積されるのかを明らかにすることは安全性確保の観点 から重要である。前年度の研究では、W 被覆 F82H 鋼にトレーサーレベルのトリチウムを含んだ水素を 注入し、その注入された水素の深さ分布をトリチウムイメージングプレート(TIP)法を用いて測定す ることにより、W 被覆層および F82H 基板への水素進入機構を明らかにした。本年度は、W 被覆層およ び F82H 基板中に進入した水素が真空加熱によりどのように放出されるのか、その放出機構を明らかに することを目的とした。

【実験】 大気圧プラズマ溶射 (APS) 法または減圧プラズ マ溶射 (VPS) 法によって、W 粒子を F82H 基板 (2.6 mm 厚さ) 上に 1 mm 厚さになるように積層させたものを試料 (3.6 mm 厚さ) として用いた。以後、APS-W/F82H および VPS-W/F82H と呼ぶ。溶射に用いた平均 W 粒子径は VPS-W の場合 17 µm および APS-W では 50 µm であった。また、作 製された W 被覆層の見かけの空隙率は前者が 0.6 %であり、 後者が 6 %であった。

前年度において、図1に示すように、トリチウムを含んだ 水素(T/H=1.3 x 10⁴)のDCグロー放電プラズマによって、 試料のW被覆層表面にトリチウムを注入した。注入温度は 453 K または533 K、注入時間は2時間とした。放電は、水 素ガス圧力2.6 mPa、DC電圧400Vで行った。放電終了後、 試料を233 K まで速やかに冷却し、トリチウムのその後の移 動を防いだ。本年度は、放電プラズマ注入と同じガス圧力、 温度でトリチウムを含んだ水素ガスに曝露し、試料中に水素 を吸収させた試料も用意した。つぎに図2に示すように、ト



図 1 DC グロー放電による試料への水素(トリチウム)注入方法の概略



図 2 TIP 法における試料と TIP との配 置状況の概略

リチウム入射表面に対して垂直断面を切り出し、この断面のトリチウムβ線強度分布を TIP 法により測定することにより、W 被覆層および F82H 基板中の入射方向へのトリチウム深さ分布を求めた。また、 放電プラズマによりトリチウムを注入した試料を 673 K および 873 K で 10 分間、真空中で加熱し、試料中のトリチウムを放出させた後で、トリチウム深さ分布を調べた。

【結果・考察】 図3に、プラズマ注入またはガス吸収によって APS-W/F82H 中に蓄積したトリチウムの深さ分布を示す。453 K でプラズマ注入した場合、APS-W 被覆層の表面近傍に極めて高濃度のトリチウムが偏在しており(表面近傍の偏在成分)、これより深い領域では被覆層中にほぼ均一に分布していた(均一分布成分)。また、F82H 基板中ではトリチウム濃度が深さ方向に指数関数的に減衰しており、トリチウムが拡散進入していることが示唆された。573 K でプラズマ注入した場合には、APS-W 被覆層

の表面近傍の偏在成分は見られず、均一分布成分の みが観察された。F82H 基板では、473 K での注入時 に比べて、より深くまでトリチウムが拡散進入して おり、その濃度プロファイルが平坦になっていた。 同じ温度・圧力条件でガス吸収させた場合には、 APS-W 被覆層では均一分布成分しか見られず、その トリチウム濃度はプラズマ注入したものに比べ、約 半分程度であった。

図 4 は 573 K でのプラズマ注入によって VPS-W/F82H に蓄積したトリチウムの深さ分布が真 空焼鈍によってどのように変化したのかを示してい る。図中、673 K で真空焼鈍した場合、VPS-W 被覆 層中のトリチウム濃度分布は変化していないが、 F82H 基板からはほぼ全てのトリチウムが放出され たことがわかった。873 K で真空焼鈍すると、VPS-W 被覆層中のトリチウム濃度はプロファイル形状を保 ったまま、1/3 程度にまで減少した。

図5に、多孔質なW被覆層およびその基板への水 素(トリチウム)進入・蓄積および放出機構の概念 図を示す。図中(a)は、放電プラズマから高いエネル ギーをもったトリチウムがW被覆層表面に入射し た様子を表している。W被覆層の表面近傍の偏在成 分は、高エネルギーをもつ多量の水素(トリチウム) が入射することにより、表面近傍に欠陥が生成し、 そこに水素が捕獲されたことによって生じたと考え



図 3 プラズマ注入法およびガス吸収法によっ て APS-W/F82H 中に蓄積したトリチウム の深さ分布



図4 真空加熱放出による VPS-W/F82H 中のトリ チウム深さ分布の変化



図 5 多孔質タングステン被覆層および F82H 基板への水素(トリチウム)進入・蓄積および放出機構の 概念図

られる。また、均一分布成分はガス吸収のみによっても生じたことから、プラズマ注入された大部分の 水素はガス状となって、W 粒子間の空隙を通って内部に進入し、被覆層全体にほぼ均一に分布し、空隙 表面(W 粒子表面)またはW 粒子内部に捕獲されたものであろう。そうして、ガス状水素はW 被覆層 と F82H 基板との界面に到達し、基板中に原子状となって溶解し、拡散によって深さ方向に進入したと 考えられる(図 5(b)参照)。図 5(c)は、いったんW 被覆層や F82H 基板中に蓄積した水素が、進入・蓄 積機構とは逆の過程を経て放出される様子を表している。本実験結果より、W 被覆層に捕獲された水素 は放出されにくく、なかでも表面近傍に偏在した成分は均一分布成分よりも強く捕獲されており、真空 加熱放出によっても取り除くことが難しいことが示唆された。

核融合プラズマのマルチスケール・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

核融合プラズマにおいては、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に跨って相互作用し、その結果として炉心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、外部情報入力を伴う、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、非局所輸送、直線装置における乱流現象等、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。今年度は、非局所輸送のシミュレーション研究に進展が見られたのでその結果に 関して報告する。

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[1]。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[2]、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[3,4]が存在するが、いづれも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。4 場簡約化 MHD モデルは、渦方程式、オーム則、磁力線方向のイオンの運動方程式、密度の発展方程式から構 成され規格化はポロイダルアルフベン時間 τ_{ph}とプラズマの小半径 a を用いている[5]。密度の発展 方程式に以下のようなソース項を導入する。

 $\frac{\partial n}{\partial t} + [\phi, n] = \beta [r \cos \theta, \phi - \delta_e n] + \beta (\delta \nabla_{//} j - \nabla_{//} v) + D \nabla_{\perp}^2 n + S_n$ ここで $j = -\nabla_{\perp}^2 A, \delta = c / (a \omega_{pi}), \delta_e = \delta / (1 + \tau), \tau = T_i / T_e$ 。 シミュレーションにおいて $D = 10^{-6}$ を用いた。従って衝突による拡散時間は $\tau_{coll} = 10^6 \tau_{ph}$ と評価される。ソース項は

 $S_n = S_{AMP} \exp(-(r^2 + r_s^2 + 2rr_s \cos\theta)/2\Delta)$ で与えた $(r_s = 0.8, \Delta = 0.1)$ 。図1に内部エネルギーフーリエ成分の時間発展を示す。支配的な(0/0)モード(それぞれポロイダルモード数/トロイダルモード数)は磁気面平均された密度を表している。(1,0)モードはいわゆる対流胞であり、(11, -3), (12, -3), (13, -3)等は印可ソース近傍の q=4 面で不安定化したバルーニングモードを示し

ている。t=900 において定常乱流状態に達した後、t=980 において密度ソースを印可し、その後 t=1200 においてソースを切った。その後の密度分布の発展を追跡した。図2 に密度分布の時間発展



を示す。シミュレーションにおいては、t=1200で 密度ソースを切ったが、その後しばらくは周辺で 密度が上昇し、t=1250を境に周辺密度は急激に減 少する。t=1350においてr=0.4付近に非局所輸送 が発生しているのがわかる(実線)。t=1350で卓越 しているモードを調べた結果、(m=1, n=0)モード (m:ポロイダルモード数、n:トロイダルモード数) が渦巻き状の揺らぎ構造を形成することが判明し た。図3にt=1350での(1,0)モードのみから構成 される密度揺らぎの等高線(z=0)を示す。(1,0)モ ードが非局所輸送の担い手と考えられ、2次元の 渦巻き構造がプラズマのコア-領域と周辺領域を

連結することを発見した。今後は(1,0)モードの励起機構を解析する予定である。



[1] S. Inagaki, et al., Phys. Rev. Lett. 107 115001(2011), [2] N. Tamura, et al., Phys. Plasmas 12 110705(2005), [3] T. Iwasaki, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 68 478(1999), [4] G. Dif-Pradalier, et al., Phy. Rev. E 82 025401(2010), [5] M. Yagi, et al., Nucl. Fusion 45 900(2005).

研究組織

矢木雅敏(原子力機構)、西村征也(核融合研)、杉田暁(中部大学)、徳永晋介(RIST)

核融合炉の中性子照射環境に対応した高熱流束機器用タングステン材料の 高熱流束負荷下の挙動

東北大学大学院工学研究科 長谷川 晃

I.目 的

将来の核融合炉では、第一壁・ブランケットやダーバータの冷却管のアーマ材として、熱及びスパッタリング 特性に優れたタングステン(W)を使用する計画が進められている。このタングステ材は、プラズマからの熱・プラ ズマ粒子負荷を受けると共に、核融合反応で発生した中性子の照射を受け、照射損傷による脆化等が発生す る。我々は、中性子照射特性を考慮した高熱流束機器用タングステン合金を開発することを目的として、これま で実験室規模で作製されたW材料を用いて、中性子照射やその後の評価によって得られた成果を基に、核融 合炉の使用環境により適した新しい合金を設計し、さらに耐照射性の向上が予測される熱・機械的処理を行い、 各種の評価用の試料を作製すると共に、作製した試料の評価を進めている。本研究では、高熱流束機器材料 に求められる諸特性の内、高熱負荷特性、熱疲労等の特性を評価し、材料開発のための基礎データを取得す ることを目的とする

Ⅱ.実験方法

実験には ITER grade W (IG-W(a)) 及びこの再結晶材 (IG-W(b))を使用した。また、1500℃で1時間保持す ることにより再結晶化させた K doped W とW-1wt%La₂O₃ についても実験を行い比較した。K doped W は、製造 過程の熱処理により K が揮発しバブルを形成し、これにより分散したバブルが粒界や転位の動きを阻害し高温 強度が向上する。また、W-1wt%La₂O₃ は La₂O₃ 粒子を分散させることで、粒界すべりが抑制されると共に組織が 安定し、高温強度が向上している。

本実験では、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷実験装置を使用し、熱源として電子ビームを用 いた。今回用いた試料サイズは 10mm x10 mm x 1mmt で、実験前に電解研磨を行った。試料は Cu 製の強制水 冷却を行っている試験台に 5mm φ の孔が開いた W 製の押さえ板で機械的に固定した。試料の表面温度は、二 色放射温度計を用いて測定した。電子ビームの加速電圧は 20kV でビームサイズの径は約 3mm φ で、2 秒間の 照射で試料表面が 1300℃程度に達するようパワーを調節した。2 秒間のビーム照射の後、冷却時間として 7.5 秒間保持することで、1 サイクル 9.5 秒とした。このようなサイクルを、各試料に対し計 200 回繰り返した。また、損 傷過程を確認するため適宜取り出し、走査型電子顕微鏡 (SEM)を用いて表面観察を行った。

Ⅲ. 主な結果および考察

ビーム電流を調節することで最高到達温度が約 1300℃の繰り返し熱負荷を与えることができた。表面温度は 照射から2秒後に最高温度に達し、照射終了と共に下降し、表面温度は定常状態になることはなかった。

図1には、それぞれの試料について照射実験後試料を取出し表面観察を行った SEM 像を示した。熱負荷 を 20 回繰り返すと、各試料で変形が生じた。IG-W(a)では転位の移動により生じたすべり線が確認できた。これ は、温度が上昇し降伏応力が低下することにより、熱応力により塑性変形が起こり、これにより表面にすべり線が 発生し粗面化したものと考えられる。熱応力計算では、ビーム照射部分では、加熱中に圧縮応力、冷却中に引 っ張り応力が働くことがわかった。一方、IG-W(b)では IG-W(a)よりも、表面は粗面化しており、結晶粒内は多くの すべり線が見られ、結晶粒界においても凹凸が生じている。これは、IG-W(b)は再結晶材であるため、IG-W(a)と 比較し柔らかいため粒内の表面形状変化が大きいものと考えられる。また、再結晶により粒界が弱くなっており、 このため、粒界における変形も大きいものと考えられる。

K doped W では結晶粒界の損傷は IG-W(b)と同程度見られたが、粒界内のすべり線は少なかった。一方、W-1wt%La₂O₃では、他の試料と同様な損傷が発生しているが、損傷範囲は狭い領域に限られている。

70 サイクル後は、W-1%wtLa₂O₃では損傷範囲が拡大し、また、La₂O₃の粒子が欠損し、孔となっている個所が 多く発生していた。さらに、すべり線が見られた箇所や La₂O₃が欠損した箇所に亀裂が生じていた。これは W-1%wtLa₂O₃では繰り返し熱負荷により La₂O₃の粒子が欠損したものと考えられ、さらに繰り返し熱負荷が進み 応力集中などが発生し亀裂が拡大していったものと考えられる。従って、繰り返し熱負荷についての耐性は少な いことも予想される。200 サイクル後では、IG-W(a)、IG-W(b)では損傷が急激に進み、表面の凹凸は激しくなり、 結晶粒内、結晶粒界に亀裂が発生していた。また、W-1wt%La₂O₃では 70 サイクル後に確認された亀裂が進展 し、剥離が発生している箇所が見られた。しかし、K doped W では合計 200 サイクルの熱負荷をかけても亀裂 や剥離などは発生しななかった。



図1 繰り返し熱負荷実験後の試料表面の SEM 像

IV. まとめ

各種W材に対して、電子ビーム熱負荷装置を用いて熱負荷実験を行った。非定常熱負荷の繰り返しによりW 材表面には粗面化等の損傷が進行する。電子ビーム照射中の圧縮応力と照射後の引張応力が繰り返し生じ、 繰返し熱負荷の回数が増加すると熱疲労による損傷が進むものと考えられる。

九州大学・応用力学研究所 炉内構造物の経年変化に関する研究集会

研究代表者 京都大学原子炉実験所 義家敏正 研究協力者 九州大学応用力学研究所 渡邉英雄

1. はじめに

加速器を含めて原子力材料の特徴は、放射線場で使われることである。特にエネルギーの高い量子ビ ームの照射は材料に多様な変化を引き起こす。ビームによりエネルギーが付与された領域は、短時間で 局所的にはエネルギー最小の状態になるが、材料全体としては非平衡状態である。原子力材料の構造変 化は、多くの場合原子の弾き出しによって引き起こされる。従って必然的に点欠陥過程を含む。点欠陥 過程は熱活性化過程であるので、照射温度、損傷速度、材料中の既存欠陥、形状等の影響を受ける。原 子炉であれ核融合炉であれ、炉内構造物はこのような状態に長期間曝される。そのための経年変化の解 明は重要である。一昨年の福島原発事故以降、中性子照射脆化による鉄系構造材料の劣化が新聞等で 大きく報道されており、劣化プロセスの社会的な関心も高い。従って本研究集会では、炉内構造物の経 年変化の解明を中心とし、現在までの知見を集約することを目的とした。このような知見は将来の核融 合炉設計にも寄与すると期待される。

中性子照射環境下における材料研究会は、平成 20, 21 年度に応用力学研究所・研究集会とし開催さ れ非常に好評であった。特に平成 21 年 7 月 9-10 日において実施された研究会では、学外 29 名、学内 10 名の参加者を集め開催された。発表論文件数 19 件であり、実験から理論・計算、更に動力炉の現場 での高経年化対策まで幅広い内容で、2 日間に亘り活発な発表と意見交換がなされた。本年度の研究会 はこれを引き継ぐものである。この研究集会で発表・討論された内容は、照射損傷一般に当てはまる現 象であり、原子炉材料だけでなく、核融合炉材料や他の照射効果が問題となる材料、例えば核破砕中性 子源のターゲット材料の開発にも貢献することが期待される。

2. 研究集会概要

今回の研究集会は平成24年7月24日、25日に亘って開催された。参加者は学外15人、学内36人 である。両日で17件の研究発表があり、活発な質疑応答や意見の交換がなされた。理論・計算から実 験、さらに実機の現場での高経年化対策まで幅広い内容であった。大学院生も含めた若い研究者の参加 が多いことが特色であった。また石野栞東京大学名誉教授、小岩昌宏京都大学名誉教授及び井野博満東 京大学名誉教授の参加と発表があった。若い研究者たちが、定年後も引き続いて活発な研究活動をして いるこれら大家の方々と交流する機会を持てたことは、大きな刺激になったと思われる。

3. 講演概要

3.1 圧力容器照射脆化関連(1)

原子炉圧力容器鋼は原子炉の重要な構造物であり、その脆化が原子炉の事実上の寿命を決定する。こ のセクションでは石野栞東京大学名誉教授の座長で、まず義家敏正京都大学原子炉実験所教授から本研 究集会の申請者として挨拶があった。引き続いて5件の講演があった。最初の講演は渡邉英雄九州大学 准教授で、「玄海原発1号炉照射脆化に関するこれまでの経緯と九大での取り組み」というタイトルで 発表がなされた。最近の九州電力玄海原発1号炉の高経年化を巡る経緯、原子炉内監視試験片のDBT Tの上昇にも関わらず、材料の照射欠陥構造からは上昇を示唆する結果が得られていないという重要な 問題点が指摘された。同准教授は保安院の意見聴取会のメンバーであり、非常にインパクトのある講演 であった。発表の最後に現象の詳細な理解のためのスキームが提示された。次に井野博満東京大学名誉 教授と小岩昌宏京都大学名誉教授により「玄海原発1号炉圧力容器の照射脆化および現行予測式につい ての考察」という講演がなされた。井野教授は玄海原発1号炉の問題点を渡邉准教授とは異なる視点か ら述べた。小岩教授からは予測式が機構論に基づいていないとの厳しい指摘が行われた。引き続いて永 井康介東北大学金属材料研究所教授により「3次元アトムプローブ及び陽電子消滅によるフィンランド Loviisa炉のナノ組織解析」という講演がなされた。国内監視試験片は大学では扱え ないため、外国のフィンランドのVVER-440炉の監視試験片を用いた貴重なデータの紹介があった。 義家敏正京都大学原子炉実験所教授により「照射下における原子炉圧力容器鋼の点欠陥挙動に関する考 察」という講演がなされた。内容のない発表でありあまり興味が持たれなかった。鳴井実東北大学金属 材料研究所研究員により「大学における研究炉を用いた材料照射と今後の予定」という講演がなされた。 東北大学金属材料研究所量子エネルギー材料科学国際研究センターにおける過去の原子炉照射装置改 良の歴史と実績及び今後の開発研究についての講演であった。

3.2 機械的特性と照射損傷基礎

INSS福谷耕司研究員の座長で3件の講演がなされた。青野雄太九州大学工学研究院准教授により 「PTS評価におけるき裂深さの影響について」という講演がなされた。脆化による破壊を評価するた めの破壊靱性値と応力拡大係数についての計算と玄海1号炉への応用が話された。材料照射効果の専門 家があまり知らない事柄であり、参加者全員がその重要性を認識した。森下和功京都大学エネルギー理 工学研究所准教により「燃料被覆管材料の酸化プロセスのモデル化」という講演がなされた。燃料被覆 管酸化メカニズムを理解するために、第一原理計算によってZr酸化膜中の酸素拡散過程を理論的に評価 したものであり、原子炉の安全性に関連する重要な内容であった。石野栞東京大学名誉教授により「衝 突カスケードのMD計算における電子的エネルギー損失の影響」という講演がなされた。従来考慮がな されていない電子的エネルギー損失の重要性を提示し、今後のMD計算の方向を示したものである。

3.3 照射損傷基礎と圧力容器照射脆化関連(2)

永井康介東北大学金属材料研究所教授の座長で4件の講演がなされた。大澤一人九州大学応用力学研 究所助教により「BCC金属中の水素と空孔濃度の熱力学計算」という講演がなされた。今まで核融合材 料として重要なタングステン空孔に捕獲される水素の個数を第一原理で計算していたが、タングステン 以外のBCC金属も同じような計算をすることで全体像が却って分かるようになったことが示された。岡 弘北大工学研究科大学院生により「重照射した改良SUS316鋼における微細組織と機械強度の相関」 についての講演がなされた。中性子照射データの豊富な改良SUS316鋼(PNC316鋼)を対象に、照射挙動 のモデル化のための微細組織と機械強度のミクローマクロ相関評価を研究したものである。村上健太東 京大学大学院助教により「照射欠陥の移動と集合に対する溶質原子の影響」という講演がなされ、2つ の課題、銅を含まずニッケルとマンガンを含む溶質原子クラスタが、溶質原子のどのような形態の移動 によるものかを明らかにすることと、溶質原子クラスタの発達において、シリコンの効果を明らかにす ることについて発表された。Kai Lu福井大学工学研究科院生により「Prediction of lower bound facture toughness in the transition temperature region by T33-stress」というタイトルで、TSTのための Jcの予想についてFEAを用いた計算結果が講演された

3.4 圧力容器照射脆化関連 (3)

義家敏正京都大学原子炉実験所教授が座長として5件の講演がなされた。藤井克彦原子力安全システ ム研究所研究員により「Cu クラスタ形成に対する応力下照射の影響」という講演がなされた。原子炉容 器鋼の照射脆化に対する外部応力の影響とそのメカニズムを解明し、照射脆化予測の高度化に資するた めに、Fe-Cuモデル合金に対して単軸引張応力下でイオン照射を行い、Cuクラスタ形成に対する応力の 影響を3次元アトムプローブでミクロ組織を観察し、クラスタ形成による照射硬化に対する応力影響 の基礎課程を検討したものである。笠田竜太京都大学エネルギー理工学研究所准教授により「イオン照 射材のナノインデンテーション硬さ」という講演がなされた。イオン照射材の強度特性評価にはナノイ ンデンテーション法の適応が重要であるが、イオン照射材のナノインデンテーション硬さが意味すると ころは、正確には(定量的には)理解されていなかった。講演ではナノインデンテーション硬さの押込 み深さ依存性の理解が、相関則の構築のために重要であることが指摘された。鎌田康寛岩手大学工学部 教授により「照射過程での純鉄・ 低合金鋼の磁気特性変化 - 冷間圧延した純鉄の磁性 - 」という講演 がなされた。中性子照射による原子炉圧力容器鋼の磁気特性の変化(磁気ヒステリシス曲線)から照射 脆化の非破壊評価の可能性を探る重要な研究である。荒瀬史朗九州大学総合理工学研究院大学院生によ り「圧力容器鋼における 照射欠陥挙動の Cu 濃度依存性」という講演がなされた。IVAR プログラム(UCSB) で使用された Cu 含有量の異なる3種類の圧力容器鋼に温度を変えて鉄イオン照射を行い、Cu 含有量の 違いが照射量や照射温度にどのような変化を及ぼすのかを検討したものである。

最後に渡邉英雄九州大学応用力学研究所准教授により、今後の予定と連絡があり閉会した。以上今回 の研究集会が非常に実りのあるものであったと総括できる。

九州大学・応用力学研究所・研究会プログラム(最終) 炉内構造物の経年変化に関する研究集会

場所 九州大学応用力学研究所 中会議室(2階)

日時 平成24年7月24日(火)13:30 p.m.~7月25日(水)12:05 p.m.

7月24日	圧力容器照	射脆化関連(1)	座長 石野 栞
13:30	13:35 義家敏正	京都大学原子炉実験所	挨 拶
13:35	13:55 渡邉英雄	九州大学応用力学研究所	玄海原発1号炉照射脆化に関するこれまでの経緯と九大での取り組み
13:55	14:35 井野博満	東京大学 名誉教授	玄海原発1号炉圧力容器の照射脆化および現行予測式についての考 察(40分)
	小岩昌宏	京都大学 名誉教授	
14:35	14:55 永井康介	東北大学金属材料研究所	3次元アトムプローブ及び陽電子消滅によるフィンランドLoviisa炉監視 試験片のナノ組織解析
14:55	15:15 義家敏正	京都大学原子炉実験所	照射下における原子炉圧力容器鋼の点欠陥挙動に関する考察
15:15	15:35 鳴井 実	東北大学金属材料研究所	大学における研究炉を用いた材料照射と今後の予定
15:35	15:50		< Coffee Break >
	機械的特性	と照射損傷基礎	座長 福谷耕司
15:50	16:10 青野雄太	九州大学工学研究院	PTS評価におけるき裂深さの影響について
16:10	16:30 森下和功	京都大学エネルギー理工学研 究所	燃料被覆管材料の酸化プロセスのモデル化
16:30	16:55 石野 栞	東京大学 名誉教授	衝突カスケードのMD計算における電子的エネルギー損失の影響(25 分)
16:55	17:25		討論(30分)
18:00	20:00		懇 親 会
			大学より徒歩10分程度
7月25日	照射損傷基	磁と圧力容器照射脆化関連 (2)) 座長 永井康介
9:00	9:20 大澤一人	九州大学応用力学研究所	BCC金属中の水素と空孔濃度の熱力学計算
9:20	9:40 岡 弘	北大工学院	重照射した改良SUS316鋼における微細組織と機械強度の相関
9:40	10:00 村上健太	東京大学大学院	照射欠陥の移動と集合に対する溶質原子の影響
10:00	10:20 Kai Lu	福井大学工学研究科	Prediction of lower bound facture toughness in the transition temperature region by T33-stress
10:20	10:40		< Coffee Break >
	圧力容器照	射脆化関連(3)	座長 義家敏正
10:40	11:00 藤井克彦	㈱原子力安全システム研究所	Cuクラスタ形成に対する応力下照射の影響
11:00	11:20 笠田竜太	京都大学エネルギー理工学研	イオン照射材のナノインデンテーション硬さ
11:20		<u> </u>	四台记忆在一边人人间不进行转进大儿,人里广播上站处
	11:40 鎌田康寛	岩手大学工学部	照射過程での純鉄・低合金鋼の磁気特性変化 - 冷間圧延した純鉄の磁性-
11:40	11:40 鎌田康寛 12:00 荒瀬史朗	岩手大学工学部 九州大学総合理工学研究院	照射過程での純鉄・低合金鋼の磁気特性変化 - 冷間圧延した純鉄の磁性- 圧力容器鋼における 照射欠陥挙動のCu濃度依存性

懇親会につきましては、九大大澤さんから別途ご連絡いたします。会費は、当日受付にて徴収させてください。

各種磁場配位での周辺揺動研究

代表者 広島大学大学院工学研究院 西野信博

目的と特徴

近年、核融合プラズマ実現の上で障害となっているプラズマの乱流状態に関する実験研究、理論研究、 シミュレーションが盛んに行われている。そして、多くの磁場配位で類似の乱流現象が観測されており、 乱流はプラズマと磁場との関連(あるいは、相互作用)において一般的な物理現象と認識されている。

一方、我が国の核融合研究では、種々の磁場配位の装置が稼働しており、現存する装置とその磁場配 位の種類は世界一といってよい。そこで、本研究会の目的は、日本の利点を生かし、上記多種の磁場配 位の装置で実験的に観測されているエネルギー閉じ込め特性(エネルギー・粒子閉じ込め時間)の向上 を阻む周辺プラズマ乱流の計測結果を統一的な視点でとらえようとする試みである。

初年度の本年は、各磁場配位の装置とその計測装置の紹介、また、最新の乱流の計測結果を発表し、 参加者で議論し、乱流現象に対する理解を深めることにある。次年度では、各磁場配位における乱流の 分類(あるいは、範疇わけ)を行いたいと考えている。

以下は、本年度開催した研究会の情報である。

プロシーディングスを含む詳細な資料は、応用力学研究所のHP (http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST_HP/kenkyushukai241205.html)にパスワード付で掲載している。参加者以外で情報を得たい方は、発表資料の各担当者、もしくは、所内世話人図子秀樹教授に連絡されたい。

研究会日程とプログラム

日時:平成24年12月5日(水)

会場:九州大学応用力学研究所本館2F大会議室

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: 図子秀樹

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

13:00-13:05 Opening address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

Chair: Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

13:05-13:35 Statistical features of coherent structures at the plasma edge in QUEST - investigated with fast visible imaging

Santanu Banerjee (Kyushu University)

13:35-14:05 Study of intermittent features of edge plasma fluctuations after SMBI in Heliotron J Linge Zang (Kyoto University)

14:05-14:35 ヘリオトロン J 装置において観測された高速イオン励起 MHD 不安定性時の周辺 プラ ズマのレスポンス

		Shunsuke Ohshima (Kyoto University)			
14:35-14:50 (Coffee Break)					
14:50-15:20 直線・ヘリカル装置における周辺プラズマ揺動解析					
		Hiroshiko Tanaka (NIFS)			
15:20-15:40 ガンマ 10における揺動計測と高速カメラを用いた周辺プラズマ観測					
		Yousuke Nakashima (University of Tsukuba)			
15:40-15:55 高速カメラを用いた周辺プラズマ観測					
		Satoru Kigure (University of Tsukuba)			
15:55-16:25 Progress towards understanding of dynamical interactions between global fields and turbu					
nonlinear force in laboratory plasmas					
		Yoshihiko Nagashima (Kyushu University)			
16:25-17:00 Closing Address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)					
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)			
木暮	諭	(筑波大・数理物質科学研究科・M1)			
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)
- 田島 西夜 (九大・応用力学研究所・D3)

Santanu Banerjee (九大・応用力学研究所・D2)

田中 宏彦 (核融合科学研究所・助教)

反省点

今回は、言語を指定しなかったため、日本語でのpptの発表があり、数人の留学生には理解しづらかったことがあげられる。次年度の研究会も申請中であるが、認められれば最低ppt等の資料は英語とする予定である。