## 直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析

九州大学 基幹教育院 山田 琢磨

プラズマ乱流中に発生するメゾスケール構造の一種であるストリーマー構造について、その媒介 波と搬送波の非線形結合を解析した。従来までの方法では、時間方向と周方向の2次元計測によってまず揺動を周方向モード数に分解し、各モード数がマッチング条件を満たす組み合わせを抽出してから周波数方向のバイスペクトル解析を行っていたが、本研究ではある時刻でのタイムスライスを抜き出し、周方向のバイスペクトル解析を行った。結果、従来では分からなかった周方向モード 数内での非線形結合の詳細が明らかになり、周方向モード数の組み合わせによってはストリーマー構造の形成に寄与しないような成分があることが判明した。

#### 1. 目的

ストリーマーはゾーナルフローと同様に、プラズマ乱流中のミクロスケール構造であるドリフト波が非線形結合することで発生するメゾスケール構造であり、その存在は径方向輸送に大きな影響を与えるため、発生機構や制御・抑制を研究することは核融合プラズマの輸送を理解するうえで非常に重要である。九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 LMD-Uのような直線プラズマはトロイダルプラズマに比べて低温で近接性に優れるため、乱流やメゾスケール構造の基礎的解析を行う点において有利である。LMD-Uではその利点を活かし、ストリーマーとその構造形成に重要な役割を果たす媒介波が世界で初めて発見された。計測は周方向静電プローブアレーと径方向駆動プローブによって行われ、相関解析により直線プラズマの2次元円断面内においてストリーマー構造は周方向に自己収束し、径方向に伸びた構造を持つことが分かり、また媒介波は径方向に節を持つ構造であることが分かった。ところがこれまでの解析方法では、時間方向と周方向の2次元計測を行った後、揺動を周方向のフーリエ変換によって周方向モード数に分解し、各モード数がマッチング条件を満たす組み合わせはその周方向モード間に非線形結合が当然あるものとみなして抽出し、周波数方向でのバイスペクトル解析のみを行っていた。そこで本研究では逆に、ある時刻でのタイムスライスを抽出し、その中での周方向モード数間の非線形結合を詳細に調べるために周方向のバイスペクトル解析を行った。一例として、媒介波とストリーマー構造の包絡線の位相差をバイフェーズ解析により求めた。

#### 2. 実験方法

直線プラズマ実験装置 LMD-U を用いてストリーマー実験を行い、静電プローブアレーでイオン飽和電流(電子密度揺動)を計測することで、ストリーマー構造とその発生に重要な役割を果たす媒介波、またストリーマーを形作る搬送波(ドリフト波)を観測し、両者の間に存在する非線形結合を明らかにした。LMD-U は軸方向の長さが  $z=3740~\mathrm{mm}$ 、内径  $r=450~\mathrm{mm}$  の直線装置である。ソース部に付けられた内径 95 mm のガラス管に RF アンテナで 3 kW/7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生することで真空容器内部に直径が約  $100~\mathrm{mm}$  の直線プラズマが発生する。軸方向に  $0.09~\mathrm{T}$  の磁場を発生させ、内部に封入したアルゴンの圧力を  $1.5~\mathrm{mTorr}$  に調整することで、ドリフト波乱流が非線形結合を通してストリーマー構造を形成する。このとき中心部の密度は  $10^{19}~\mathrm{m}^{-3}$ 程度、電子温度は  $3\pm0.5~\mathrm{eV}$  のおおよそ平坦な分布である。

軸方向 z=1885 mm、半径 r=40 mm の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブが設置されている。このプローブにより揺動を時間方向と周方向に詳細に観測し、特に精度の良い乱流の周方向モード数を観測することを可能にした。ストリーマー構造は搬送波が周方向に自己収束した構造体であり、その包絡線は媒介波と位相関係を保持する。つまり搬送波が形作る包絡線構造は媒介波と同じ周方向モード数と周波数を持つことになる。そのため、ストリーマーの位相構造を特定するためには、媒介波を参照波

として、媒介波と 2つの搬送波のバイスペクトル解析を行い、バイフェーズを計算すればよい。この時、バイフェーズが搬送波の包絡線(ストリーマー構造)と媒介波の間の位相差を表す。本研究では周方向での非線形結合を確認するため、ある時刻でのタイムスライスを抜き出し、周方向空間での各モード数間のバイフェーズを計算する。隣り合うタイムスライスではバイフェーズの計算結果がほぼ似通ったものになるため、十分に時刻が離れたタイムスライスをいくつも抜き出し、その平均を取ることでバイフェーズの計算結果とした。

## 3. 実験結果と考察

LMD-U のストリーマー発生放電(磁 場 0.09 T、圧力 1.5 mTorr) で周方向 64 チャンネルプローブにより電子密度揺 動を測定し、ストリーマーの包絡線構造、 媒介波、搬送波を観測した。媒介波は周 方向モード数  $m_1 = 1$ ,  $f_1 = -1.2$  kHz で、最 も振幅の大きく媒介波との結合が強い 搬送波は、 $m_2 = 2$ ,  $f_2 = 7.8$  kHz の波と  $m_3 =$  $3, f_3 = 6.6 \, \text{kHz}$  の波であった。図 1 は密度 揺動のタイムスライスを抜き出し、周方 向モード数 (1, m, m+1) 間のバイフェ ーズ値を計算したものである。初めの1 は媒介波の周方向モード数を示し、mと m+1 は隣り合う周方向モード数を持 つ媒介波である。結果は、(1, 1, 2) の 結合のバイフェーズ値のみ他の結合と 大きく異なる値となり、他の結合はバイ フェーズ値がほぼ変わらなかった。

この結果の妥当性を確認するために、 実際に密度揺動の時空間構造から媒介 波成分を消去し、隣り合う周方向モード

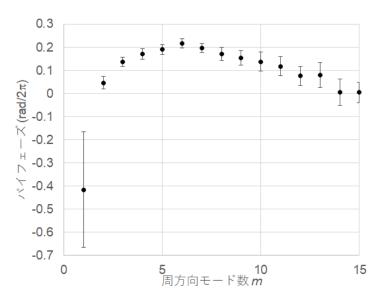


図 1. 媒介波と搬送波間のバイフェーズの値、すなわち媒介波とストリーマー構造の包絡線との位相差。横軸がmの場合、媒介波(周方向モード数 1)と、搬送波(周方向モード数mおよびm+1)間のバイフェーズ値を示す。(1,1,2)の結合のバイフェーズ値のみ、他のバイフェーズ値と離れた値を持つことが分かった。

数のみを抜き出して重ね合わせたところ、m=1&2以外の重ね合わせの結果は媒介波の山の位置にほぼ揺動が収束して存在しストリーマー構造を形作っていることが確認できたが、m=1&2を重ね合わせた場合は、揺動の収束する位置が他と全く異なり、ストリーマー構造の形成に全く貢献していないことが分かった。今後、この現象の詳細をさらに解析することで本研究を発展させる。

#### 4. 研究成果報告

- [1] 山田琢磨, "閉じ込めを左右するメゾスケール構造~乱流内の非線形結合~", 東京大学 先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター(APET)特別講演会 (Aug 27, 2018).
- [2] 山田琢磨他, "PANTA における乱流の三次元構造", 日本物理学会 2018 年秋季大会, 11aC101-2, 同志 社大学 (Sep 9-12, 2018).
- [3] T. Yamada *et al.*, "Three Dimensional Structure of Streamer in Drift Wave Fluctuations (Invited Talk)", 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, CD-I20, Kanazawa (Nov 12-17, 2018).

#### 5. 研究組織

研究代表者:山田琢磨(九大) 研究協力者:稲垣滋、佐々木真(九大)、小林達哉(核融合研)

## 流体波動の局所分離解析に関する研究

九州大学応用力学研究所 大貫陽平

#### 背景

大気海洋(一般に地球流体)中の波動は、エネルギーおよび運動量のキャリアとして、惑星規模の物質循環の駆動に深く関わっている。計算機の発達に伴い、地球流体システムの再現を目的とした数値シミュレーションの精度は年々向上しており、そこから生み出される膨大なデータから各種波動成分の伝搬情報(フラックス)を解析して循環場へ与える影響を検証する作業が、世界中の研究グループによって進められている。既往研究においては、慣性重力波およびロスビー波をひとまとめにしてフラックスを解析する手法が提案されて来た(例: Kinoshita et al. 2013, J. Atmos. Sci., Aiki et al. 2017, Prog. Earth Planet. Sci.)が、地球流体システムのさらなる理解のためには、異なる種別の波動成分を分離して解析する手法の開発が望まれている。そこで代表者はこれまで、量子力学や音響学の分野で利用されている Wigner 変換の手法を導入することで、地球流体における新しい波動分離解析技術の開発を進めて来た。

興味深いことに、地球流体力学とプラズマ物理学には様々な類似性がある。例えば、地球自転に伴う渦度の南北勾配を復元力としたロスビー波は、プラズマ中に存在するドリフト波と共通の方程式によって記述でき、そのため同一の分散関係を持つ。さらに、時間スケールの異なる波動成分が共存し、相互にエネルギーをやり取りする過程が大きな関心を持って研究されている。これらのことから、地球流体波動を対象とした解析手法が、プラズマ波動にも応用できる可能性が期待される。そこで本研究では、地球科学と核融合科学の分野融合課題として、流体波動に普遍的に適用可能な波動の局所分離解析理論とそれを用いたデータマイニング技術について検討を行った。

#### 理論の概要と数値データへの適用

一般に、流体波動は放物型の偏微分方程式によって記述され、特に時間定常解からのわずかなずれについて線形化された方程式を用いて議論されることが多い。初等的には、方程式の係数が空間に依存しなければ、フーリエ変換と行列の対角化作業を組み合わせることで系に含まれる各種波動成分を固有モードとして分離することができる。しかし、空間的に変動する場においては、媒質の振動方向を規定する固有ベクトルや周波数が波数と位置座標の関数として変化するため、通常のフーリエ変換の方法を当てはめることができない。

本研究では、方程式の係数作用素を、Wigner 変換によって擬微分作用素の形式へ書き換えてから漸近解析を行うことで、従来のフーリエ変換の方法を拡張して流体波動の分離解析が可能なことを理論的に示した。分離によって得られた各種成分の信号から Wigner 分布 関数を定義することで、エネルギー密度の時間変化が radiative transfer equation:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla_p \omega \cdot \nabla_x w - \nabla_x \omega \cdot \nabla_p w = S$$

によって記述できることを提案し、一連の手法を海洋波動の数値シミュレーションデータ に当てはめることで、慣性重力波とロスビー波を明瞭に分離することに成功した(図 1)。こ の成果は現在学術誌に投稿中である。

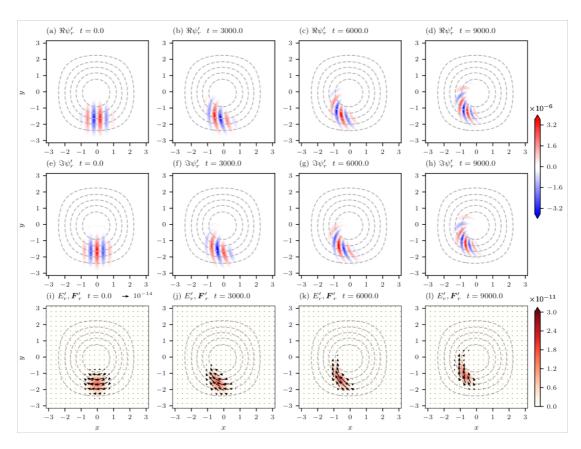


図1: モデルデータから分離したロスビー波の信号、エネルギー密度およびフラックス.

#### 検討内容

所内の研究セミナーおよび報告会で、核融合プラズマ分野の研究者に向け、前節で述べた Wigner 変換を用いた波動分離解析技術についての研究報告を行った。その中で、大気海洋 分野で radiative transfer equation として認識されている理論モデルが、核融合分野では wave kinetic equation と呼ばれ、その利用法に著しい類似性があるという情報を得た。

報告会終了後、プラズマ波動の wave kinetic equation に詳しい佐々木真氏と個別に研究打ち合わせを行い、複数種の不安定モードが共存する系への本研究手法の適用可能性について議論した。具体的には、Sasaki et al. (2017, Phys. Plasmas)によって考察の対象となっていたシア流中プラズマの乱流生成過程において、ドリフト波と D'Angelo モードの分離および wave kinetic equation の立式に Winger 変換の利用が有効ではないかという結論に達した。ただし、この系は複数種の不安定モードが縮退するという特殊な状況をはらんでおり、Wigner 分布関数の非対角成分の評価という、新たな課題が立ち上がっている。次年度は、背景密度勾配や流速シアを伴うプラズマ中の不安定波動の解析を中心テーマに位置付け、特に背景流成分が乱流成分から受けるレイノルズ応力の評価に関して、本解析手法の有効性についての検討を重ねていく予定である。

研究組織: 大貫陽平, 稲垣滋, 小菅佑輔, 佐々木真(九大応力研)

成果報告: <u>大貫陽平</u>,「流体波動の局所分離解析に関する研究」, 応用力学研究所研究集会 "波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング", 2019/2.

#### 九州大学 応用力学研究所 2018年度共同利用研究 成果報告書

サブテーマ研究代表者:

横井 喜充 (よこい のぶみつ)

東京大学 生産技術研究所 基礎系部門 助教

### 課題:

乱流輸送の促進と抑制機構の理論・実験的解明:ヘリシティ効果

Theoretical and experimental explorations of turbulent transport enhancement and suppression, with special emphasis on effects of helicities

## 要旨:

輸送促進と抑制のダイナミクスに基づいて統一的な非一様プラズマの乱流輸送モデルを理 論的に構築し、諸ヘリシティの計測を含む実験によって検証し発展させた.

#### 序論:

乱れが存在すると一般に系の輸送が大きく促進する(渦粘性、渦拡散、乱流磁気拡散など).しかし、系の幾何構造・回転、密度変動、不均一流れ、大規模磁場などを伴う現実の乱流では、対称性の破れによって系統的にエネルギー以外の乱流統計量(運動・磁気・クロスなどの諸へリシティ)が生成される。それらの効果で輸送が抑制され、乱れによる輸送促進と輸送抑制のダイナミクスが系の発展を支配する。

サブテーマ研究代表者(横井)は、促進と抑制のダイナミクスに基づく乱流輸送モデルを提唱してきた。その発展には、プラズマ中の諸ヘリシティの実験的計測による検証・議論が不可欠である。応用力学研究所のPANTAをはじめとする実験装置は、プラズマ中のマクロな流れ・波動とヘリシティを含む乱流相関の時空発展の同時計測を可能とする。輸送促進と抑制のダイナミクスに基づく非一様乱流の統一的乱流輸送モデルの研究を理論と実験の両面から強力に推進していく。

#### 方法:

横井の理論モデルに基づき、輸送と直結するゆらぎ場の相関の時空分布と平均場の非一様性とを同時に測定する。ゆらぎ相関としては、ゆらぎ強度の情報である、密度、速度、温度の自己相関に加えて、ゆらぎ構造の情報である諸ヘリシティ〔運動ヘリシティ(速度=渦度相関)、磁気ヘリシティ(磁場=電流密度相関)、クロス・ヘリシティ(速度=磁場相関)」などの時空分布を稲垣が計測する。諸ヘリシティの時空分布の直接計測は世界的にも例が限られており、それ自体として高い価値がある。その結果と平均場の分布と組み合わせることで、レイノルズ応力、乱流起電力、乱流熱流束などの実際の分布とモデル表現とを横井と稲垣で比較検討する。さらにヘリシティ自体とその生成率(別の乱流相関と平均場の非一様性の結合やプラズマ波動の伝搬)の時空分布とを比較することで、測定や観測が難しい場合に用いる代替観測量(proxy)の情報を得る。実験との比較結果を用いて、横井は乱流輸送モデルを発展させる。

#### 結果:

測定する物理量の特定と、そのための実験設定の確認を行った。速度と磁場の同時測定を同じ制度で行うためには観測装置の開発も必要であるため、そのための検討を行った。

## 考察:

今回の研究を通じて、モデルの検証のためにどのような物理量をどのような時空分布で測定するかについての理解が深まった。乱流質量流束やエネルギー流束に関するモデルの検証には、速度と磁場の相関を非圧縮部分と圧縮生部分に分ける必要があることもわかり、今後の研究方針が明確になったと言える。

## 論文:

[1] Valery V. Pipin and Nobumitsu Yokoi,

Generation of a large-scale magnetic field in a convective full-sphere cross-helicity dynamo, Astrophysical Journal, **859**, 18-1-11 (2018/05)

- [2] Dmitry Sokoloff and Nobumitsu Yokoi, Path integrals for mean-field equations in nonlinear dynamos, Journal of Plasma Physics, 84, 735840307-1-7 (2018/06)
- [3] Nobumitsu Yokoi,

Turbulent dynamos beyond the heuristic modeling: Helicities and density variance, AIP Conference Proceedings 1993, 020010-1-10 (2018/08)

[4] Nobumitsu Yokoi,

Electromotive force in strongly compressible magnetohydrodynamic turbulence, Journal of Plasma Physics, 84, 735840501-1-26 (2018/10)

[5] Nobumitsu Yokoi,

Mass and internal-energy transports in strongly compressible magnetohydrodynamic turbulence, Journal of Plasma Physics, **84**, 775840603-1-30 (2018/12)

[6] Valera Titov, Rodion Stepanov, Nobumitsu Yokoi, Mahendra Verma, and Ravi Samtaney,

Cross helicity sign reversals in the dissipative scales of magnetohydrodynamic turbulence, Magnetohydrodynamics, 55, 1-7 (2019/02)

### 学会発表:

[1] Nobumitsu Yokoi,

Multiple-scale analysis of turbulent transport in strongly compressible magnetohydrodynamic flows, European Geosciences Union General Assembly Meeting 2018, EGU2018-12095 (2018/04)

[2] Nobumitsu Yokoi,

Effective mass and energy fluxes in strongly compressible magnetohydrodynamic turbulence: Density-variance and compressive cross-helicity effects, American Geophysical Society Fall Meeting 2018, NG23A05, (2018/12)

## 振幅変調反応性高周波放電中のナノ粒子量のエンベロープ解析 古閑一憲、白谷正治、稲垣滋

半導体デバイス製造の前工程において、プラズマプロセスは必須の技術である。近年の半導体デバイスの高性能化では、微細化から、3次元スケーリングと呼ばれる多段積層化が進められている。このような3次元スケーリングにおいてもプラズマプロセスは必要であり、3次元のナノ構造体を精密に加工する必要があり、プラズマとナノ構造体の界面との相互作用ゆらぎの抑制は重要課題である。この課題の解決には、プラズマとナノ界面の相互作用ゆらぎを解明する必要がある。本研究では、プラズマとナノ界面の相互作用を解明するため反応性プラズマ中のナノ粒子成長をナノ界面のモデルとして、プラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎをプラズマ乱流物理の視点から解析することを目指している。これまでに振幅変調放電におけるナノ粒子量のゆらぎにプラズマ乱流解析を適用し、以下の成果を得ている。

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

ここでは、放電空間中のナノ粒子のサイズを計測し、これらのゆらぎ構造との相関について検討した。

実験には、図 1 に示す容量結合型プラズマ CVD 装置を用いた[2]。反応容器中心に直径  $60\text{mm}(r=-30\sim+30\text{ mm})$ の 2 枚の電極を  $20\text{mm}(z=0\sim20\text{mm})$ の間隔で設置した。Ar と DM-DMOS(Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)を、それぞれガス流量 40sccm、2sccm で容器内に導入し、圧力を 166.3Pa とした。周波数 60MHz、電圧 120V の高周波電圧を電極間に印加し、プラズマを生成した。このとき、放電電圧に変調周波数 100Hz、変調度 30%の正弦波で振幅変調を加え、プラズマ密度に意図的に摂動を与えることにより、プラズマ密度の揺動がナノ粒子成長に

与える影響について調べた。気相中ナノ粒子量の時空間変化は2次元レーザー散乱法で計測した。シート状 YAG レーザー光(厚さ 16mm、幅1mm、入射パワー2.0W、波長 532nm)を、接地電極と放電電極間(電極間距離 20mm)に平行に入射し、ナノ粒子からの90度レーリー散乱光を、干渉フィルタを装着した高速度カメラ(1000fps)

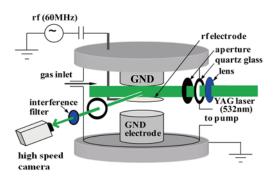


図 1. 実験装置図。

で撮影した[5,6]。

レーザー散乱光(LLS)強度にエンベロープ解析を適用して、ナノ粒子とプラズマの相互作用ゆらぎを抽出した。例えば100Hzを抜き出す場合、LLS強度に94-106Hzでバンドパスフィルタをかけることで、LLS強度ゆらぎの100Hz成分を抜き出し、100Hz振幅のエンベロープを得た。図2に電極中央(r=0mm)と電極の外周部(r=27mm)における相互作用ゆらぎの時空間分布を示す。電極外周部の法が、相互作用ゆらぎが顕著に表れる放電開始からの時間が早く、z方向(電極間距離方向。z=0が放電電極、z=20mmが接地電極を示す。)全体にゆらぎ構造が存在している。

上述した相互作用ゆらぎとナノ粒子成長の相関を明らかにするため、各半径方向における放電開始後8秒におけるナノ粒子のサイズ分布を調べた。結果を図3に示す。ゆらぎ構造が強く発生しているエッジ部分では、7nmと10nmにピークを持つ分布であったが、電極中央11nmにピークを持つ分布であり、ゆらぎ構造が強い領域では、ナノ粒子成長が抑制されていることが示唆される。

今後は、ゆらぎ構造とナノ粒子生成の相関について変調周波数依存性などから明らかにしたい。

#### 参考文献

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

投稿論文: 3件、学会発表: 国際会議 5件、国内会議 2件

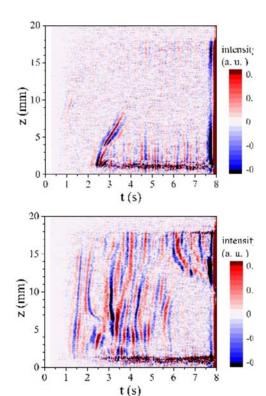


図 2. 変調周波数 100Hz, 変調度 30%時の LLS 強度の 100Hz 成分の相 互作用ゆらぎ。(上図)r=0mm, (下 図)r=27mm

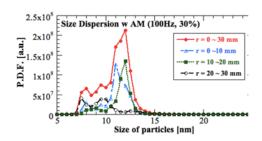


図3.変調周波数 100Hz,変調度 30%、放電開始後 8s 時の各半径位置 におけるナノ粒子サイズ分布。

# 医療用 CT・MRI 技術を応用したプラズマ乱流計測

島根大学学術研究院理工学系 荒川弘之

### 背景と研究目標

応用力学研究所直線磁化プラズマ発生装置 PANTA では、乱流の時空間構造を高速に測定することが必要とされ、近年では、乱流への摂動がない、CT 技術を応用した手法やレーザーによる乱流測定手法の開発が進められている。開発においては、光検出器による線積分されたプラズマの発光情報からプラズマ乱流揺動の情報を画像再構成手法により再構築する必要がある。この際、医療分野で急速に開発が進んでいる、少ない点から効率的に対象を測定可能な『圧縮センシング MRI』や『圧縮センシング CT』の手法を適用することで新たな乱流観測手法の開発が期待できる。本研究では、医療分野で開発が進められている圧縮センシングによる MRI・CT 手法を、レーザーによるプラズマ乱流計測に適用を行うための基礎的な検討を行う。

## 方法と検討結果

プラズマイオン流れ測定の基礎的な検討のため、(i)数値シミュレーション結果を用いたベクトルトモグラフィーの検討と、(ii)レーザー吸収分光による信号強度の測定実験を行った。この際、医療用のCT技術をそのまま適用する場合、レーザーを様々な方向から照射する必要がある。このため、本研究では、ラングミュアプローブを用いて開発されたプラズマ二次元揺動再構成手法(H. Arakawa Sci. Rep. 2016)を応用して、一方向のみのレーザー照射で行う形とした。

#### (i) 数値シミュレーション結果を用いたベクトルトモグラフィー模擬

九州大学で開発されている、円筒形プラズマ中での乱流解析コード Numerical Linear Device (NLD)による乱流シミュレーション結果を用いて、計測模擬による検討を行った。イオン温度は、過去の実験で得られている、0.3eV とした。得られたポテンシャル情報を元に、2次元周方向速度分布、2次元径方向速度分布の導出を行った。

これらを踏まえて、ベクトルトモグラフィーによる測定実験の模擬を行った。円柱状プラズマの下方から磁場に垂直にレーザーを照射するとし、プラズマの回転は、プラズマの端における乱流揺動の位相変化から見積もった。イオンは、アルゴンイオンの $3d^4F_{7/2}$ 準位から $4p^4D_{5/2}$ 準位への励起の際の、レーザー光の吸収または蛍光を利用するとした。イオンの流れと温度により、吸収される波長のドップラーシフトとドップラー

広がりが起こる為、668.6138nmを中心波長として10GHz程度の掃引を模擬した。得られた波長ごとの線積分情報を元に、2次元密度分布、2次元周方向速度分布、2次元径方向速度分布を再構成した。結果、元の2次元分布をおおよそ再現できることを確認した。

## (ii)レーザー吸収分光実験

これまで開発しているレーザー誘起蛍光法では、アルゴンイオンの $4p^4D_{5/2}$ への励起後に、 $4s^4P_{3/2}$ への準位へ遷移する際の蛍光(442.6nm)を測定するための集光光学系を別途設置している。レーザー吸収分光法を用いた手法では、レーザー光の吸収量を測定するための光検出器を新たに設置するだけで大掛かりな集光光学系は必要なく、位置調整も容易である。このため、計測装置の簡易化ができる可能性がある。本研究では、線積分した吸収量の測定により、レーザー誘起蛍光法と比較した、本手法の可否を検討した。レーザーは、円柱プラズマ中心を通過するように設置した。レーザー波長は、アルゴンイオンの $3d^4F_{7/2}$ 準位から $4p^4D_{5/2}$ 準位への励起の際の吸収波長である、668.6138nmとした。プラズマを透過した光は、光ファイバにより伝送後、アバランシェフォトダイオードにより光強度を検出した。

得られた結果として、プラズマによるレーザー光の吸収量が非常に少なく、吸収量の測定には、数十回の繰り返し測定を行う必要があることがわかった。S/Nの改善には、プラズマの円柱の軸方向ヘレーザー径を拡大し、吸収量の増加を行う方法が考えられる。一方で、現状のレーザー誘起蛍光による局所的な蛍光測定を用いた場合のS/Nの方が良いため、蛍光の線積分を測定する形とした方が、本研究には適していると考えられる。

今後は、以下の検討により、本乱流測定手法の開発を行う。(a) 本研究によるシミュレーションの結果を元に、医療用圧縮センシング MRI や CT の技術を適用して、その画質やノイズの評価により、どこまで測定点を減少させ、効率的に測定できるかを検討する。(b) 新たな集光光学系設置により、レーザー誘起蛍光による線積分データを測定し、S/N の測定を行う。

## · 成果報告:

本検討に関する論文を査読付き論文へ投稿準備中である。

## デジタル分光を用いた ECE 計測の解析手法に関する研究

核融合科学研究所 土屋 隼人

## 1. 要旨

デジタル相関 ECE 計測は高速デジタイザーのシーケンシャルモードを開発し LHD で 運用されている。同計測をドイツの W7-X の ECE 計測に適応可能性を検討した。高速デジタイザーを W7-X の ECE 計測器に試験的に接続し、初期結果を得た。

### 2. 序論

様々な実験研究の計測にとって、高空間分解能かつ高時間分解能で現象を観測することは一つの夢である。大抵の場合、空間分解能や時間分解能は測定器のハードウェアの性能で決まり、実験準備の段階でそれらは決められてしまう。実験後に解析を進めていくうちに、時間分解能を高めたいことや空間分解能を高めたいことがあるが、実験準備で見積もった分解能以上は実現できない。プラズマ研究においても同様で、乱流のようなスケールが小さく現象の時間スケールも小さい現象を観測する計測器が望まれている。

## 3. デジタルコリレーションECE原理とLHDとW7-Xへの適応

電子温度計測の有効な手段として、電子サイクロトロン放射(ECE)計測が有効であることはよく認知されている。ECE の周波数帯は装置の磁場強度に比例し、テスラマシンの場合数十ギガから数百ギガヘルツである。かつカットオフ密度との関連を考慮すると、ECE は高磁場装置で有効で、LHD の場合 50GHz 以上の ECE が計測に利用できる。

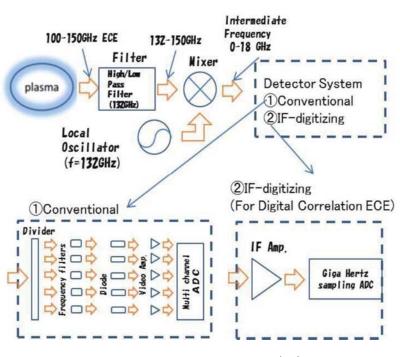


図 1 .LHD の DCECE 概念図

をフーリエ変換することで、IFの分光スペクトルを得ることができる(デジタル分光)[1,2]。 核融合科学研究所の大型へリカル装置(LHD)においては高磁場領域から発せられる ECE を従来の BPF を使ったラジオメータとデジタル分光を使って検波している。今年度は同様のシステムをドイツのマックスプランク研究所 (IPP) の Wendelstein 7-X (W7-X)の ECE 計測に試験的に導入し初期的な結果を得た。W7-X は超伝導ステラレータ実験装置であり、2015 年に実験を開始し、ECE 計測は電子温度分布と電子温度摂動を観測する主幹計測して稼動している。今回は低磁場側 ECE がスーパーへテロダインで周波数変換された IF をデジタル分光用に分波しデータ取得を行った。図 2 は高速デジタイザーに分波接続した様子である。図 3 に測定

機器の熱ノイズ((a),(b))とあるプラズマ放電からの ECE 信号((c),(d))の IF 波形とそのスペクトルを示す。(b)より機器からノイズに特徴的な周波数がいくつかあることが分かる。(a)(b)よりプラズマからの信号は十分有意な振幅であることが確認された。そのスペクトルはブロードであるが、機器からの特徴的な周波数ピークよりおおきなスペクトル強度ではないため、解析の際には機器の特徴的なピークを取り除く必要がある。このことを踏まえ今後解析を進めていく。



図 2.W7-X ECE デジタル分光接続の様子

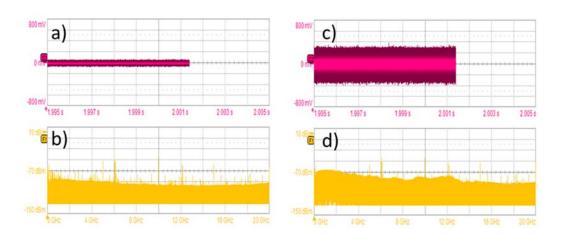


図 3.W7-X IF 波形とそのスペクトル a)プラズマがない場合の測定器の熱ノイズの波形 b) 測定器の熱ノイズのスペクトル c)プラズマからの ECE の波形 b) ECE の IF スペクトル

#### 参考文献

- \*1. Hayato TSUCHIYA, Sigeru INAGAKI<sup>1,2)</sup>, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA and Yoshio NAGAYAMA, Plasma and Fusion Research Volume 9, 3402021 (2014)
- \*2 Hayato TSUCHIYA, Shigeru INAGAKI, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA, Yoshio NAGAYAMA, LHD Experiment Group, Plasma and Fusion Research Volume11, 2402072 (2016)

# 東シナ海黒潮域における乱流混合過程の解明

沖縄科学技術大学院大学 沖縄マリンサイエンスサポートセクション 森 康輔

#### 1. 目的

海洋における鉛直混合は、風や潮流によって励起される近慣性周期の内部波が大きく寄与しているが、特に風起源の内部波が深海に伝わり、強鉛直混合域を形成する過程には不明な点が多い。そこで本研究では、乱流の鉛直伝播メカニズムを解明するため、乱流微細構造プロファイラーを用いて定点における乱流連続観測を実施し、乱流構造の時間変化を調べた。

#### 2. 観測

カナダ Rockland Scientific 社製乱流 微細構造プロファイラーVMP-500 を 用いて、日本海の観測点 PM5 において(図1)、2018年10月9日午前8時頃から24時間連続で、長崎大学水産学部付属練習船長崎丸による乱流 観測を実施した。観測範囲は表層から水深約500mまで、キャスト数は39回である。VMP-500には様々なセンサが付属しているが、本研究で用いたパラメータは、鉛直シア・水温・圧力である。

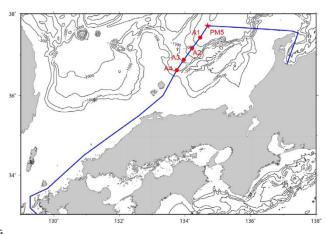


図1: 観測点

得られたデータからスパイク成分を取り除き、5 dBar のセグメントで 2.5 dBar 毎に、乱流エネルギー散逸率  $\epsilon$  [W/kg]を算出した。乱流計は、海面から一定速度で降下しながら計測するという特徴を持つ。降下速度が安定しない表層付近(海面から水深数十 m まで)は、 $\epsilon$  の算出が困難となるため欠測扱いとした。

#### 3. 結果

 $\epsilon$  と水温の鉛直プロファイル時系列を図 2 に示す。18 時頃以降から表層付近で  $\epsilon$  ~10<sup>-7</sup> W/kg と比較的大きくなっており,これは,夜間の冷却による表層混合によるものと考えられる。鉛直方向に注目すると,10~30 dBar の間隔で 1 オーダ程度大きな  $\epsilon$  が離散的に分布するところがある(例えば,20 時頃の 70 dBar,90 dBar,110 dBar,140 dBar 付近など)。また,水温躍層よりも下層において, $\epsilon$  極大層が数時間にわたり存在していることがわかる(例え

ば, 16 時~19 時の 200 dBar 付近, 1 時~5 時の 250 dBar 付近など)。

今後は、本航海で得られた流速や風などの他のデータを解析し、鉛直方向の  $\epsilon$  の離散的な分布や、中層の  $\epsilon$  極大、さらにそれらの時間変化の要因について調査する予定である。

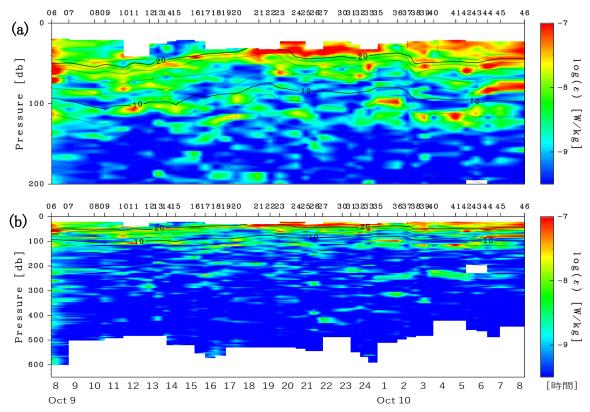


図 2: 乱流エネルギー散逸率  $\epsilon$  [W/kg]と水温[ $^{\circ}$ C]の鉛直プロファイル時系列 (a)0 $^{\circ}$ 200 dBar, (b)0 $^{\circ}$ 650 dBar, コンタ間隔は太線  $10^{\circ}$ C, 細線  $2^{\circ}$ Cである。

## 4. 研究組織

研究代表者 沖縄科学技術大学院大学 森 康輔 所内世話人 九州大学応用力学研究所 遠藤 貴洋 研究協力者 九州大学応用力学研究所 千手 智晴 30 特 2-8

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

サブテーマ代表者:高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 谷澤俊弘

## 1 研究目的

超高温のプラズマ中に形成されるドリフト波乱流の物理的性質を詳細に理解するためには、プラズマ流体の圧力・密度・温度・電位等の物理諸量が生み出す膨大な時系列データを詳しく解析しなければならない。近年、本研究課題代表者(谷澤俊弘)および研究協力者(中村知道・兵庫県立大学)によって、時系列データを統計モデル化した後、ネットワークとして視覚化することによって直観的に理解する新しい手法が開発された。本研究は、この手法を磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波乱流の大容量時系列データ解析に適用することにより、膨大な多次元時系列データから物理的情報を抽出する新しい手法を開発することを目的とする。

## 2 現在までの研究結果

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

$$x(t) = a_0 + a_1 x(t - l_1) + a_2 x(t - l_2) + \dots + a_w x(t - l_w) + \varepsilon(t)$$
(1)

と線形モデル化する。ここで、パラメータ  $a_0,a_1,\dots,a_w$  は実際に観測された時系列データと線形モデルに よって生成されるデータ間の誤差の二乗平均を最小化し、さらにモデルの最適化基準として情報量基準を合わ せて用いることにより、いくつかの時間遅れ項  $x(t-l_1),x(t-l_2),\dots,x(t-l_w)$  から最適な部分集合を選び 出すものとして決められる。この手法は Reduced Auto-Regressive Model (RAR) と呼ばれている。RAR モデルは時系列データが持つ周期をその時間遅れ項の中に必ず含むことがわかっている。

この RAR モデリングは多変数の時系列データにも有効であることがわかっている [2]。多変数に拡張された RAR モデルは、

$$x_i(t) = a_{i,0} + \sum_{j=1}^{N} \left( \sum_{k=1}^{w_j} a_{i,j,k} \ x_j(t - l_k) \right) + \varepsilon_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$
 (2)

で表わされる。ここで, $j=1,2,\ldots,N$  はチャンネル数である。本年度は,この多変数 RAR モデリングの方法を 64 チャンネルのプラズマ乱流データに適用し解析を行った。まず 64 チャンネル中の一つのチャンネルに注目し,ターゲットチャンネルとする。そのターゲットチャンネルを中心とする両側 15 チャンネルずつ,合計 31 チャンネルを探索範囲とし,最大ラグを 25 として多次元 RAR モデルを構築した。ここでラグは  $10[\mu s]$  を単位とする。用いた時系列データ数は 1 チャンネルあたり 10000 点である。

結果の一部を列挙すると以下の通りとなる。

Ch 10: 
$$x_{10}(t) = 0.00012x_8(t-1) + 2.26x_{10}(t-1) - 1.88x_{11}(x-2) + 0.51x_{12}(x-3)$$

```
{\rm Ch~20:}\quad x_{20}(t)=0.025x_{19}(t-1)+1.96x_{20}(t-1)-0.90x_{21}(t-2)
```

Ch 30: 
$$x_{30}(t) = 0.078x_{28}(t-1) + 1.79x_{30}(t-1) - 0.87x_{31}(t-2)$$

Ch 40: 
$$x_{40}(t) = 0.31x_{38}(t-1) - 0.26x_{39}(t-2) + 1.65x_{40}(t-1) - 0.67x_{41}(t-2)$$

Ch 50: 
$$x_{50}(t) = 1.81x_{50}(t-1) + 0.071x_{50}(t-2) - 0.87x_{51}(t-2)$$

Ch 60: 
$$x_{60}(t) = 0.013x_{58}(t-1) + 2.34x_{60}(t-1) - 1.60x_{61}(t-2) + 0.23x_{63}(t-4)$$

これらの結果を見ると、ターゲットチャンネルのデータはそのターゲットよりも番号が  $1\sim2$  大きいチャンネルのデータによって予測され、番号の大きいチャンネルから小さいチャンネルに向かって、その影響が伝播されている可能性が示唆される。

## 3 今後の研究の方向について

本年度の研究により、RAR モデルによる多次元時系列データ解析が全チャンネルについて、コンシステンシーを持つ結果となることがわかってきた。来年度は、、本手法が新たなデータ解析手段として実用化できるように、この結果をさらに精密化し定量的に理解を深めていきたい。その際、多チャンネルであることで最適モデルを選び出すために多くの計算時間が必要となるため、高速な計算機の使用やアルゴリズムの最適化等が必要となる。また、その適用範囲を広げていくために、チャンネル数、ノイズレベル、非線形性等に対する手法の頑強性の考察も重要となると考えられる。

## 4 研究成果発表

- Toshihiro Tanizawa, Tomomichi Nakamura, Fumihiko Taya, and Michael Small, "Constructing directed networks from multivariate time series using linear modelling technique," Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, Vol. 512, 437-455 (2018).
- Tomomichi Nakamura, and Michael Small, Toshihiro Tanizawa, "Long-range correlation properties of stationary linear models with mixed periodicities," Physical Review E, Vol. 99, 022128 (2019).

## 参考文献

- [1] Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: "Networks with time structure from time series," Physica A, Vol. 391, 4704-4710 (2012).
- [2] Toshihiro Tanizawa, Tomomichi Nakamura, Fumihiko Taya and Michael Small, "Constructing directed networks from multivariate time series using linear modelling technique," Physica A, Vol. 512, 437-455 (2018).

平成30年度 応用力学研究所特定研究(2)申請 報告書

## 研究課題名

直線ヘリコン波プラズマ内で誘起される電子密 度・温度揺らぎの非接触計測

Non-intrusive measurements of fluctuated electron density and temperature in a linear helicon plasma

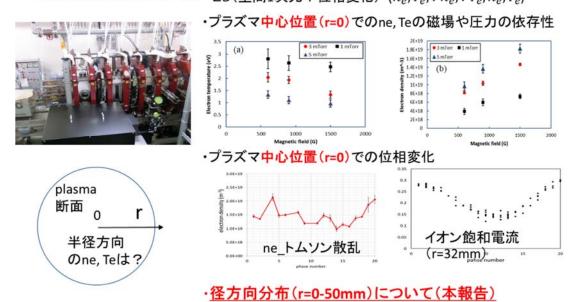
## 平成31年2月28日

富田健太郎(九大総理工)、内野喜一郎(九大総理工)、稲垣滋(九大応力研)

### 要旨

プラズマの応用研究が多岐にわたる中、プラズマの巨視的な学理は著しく進展した。しかしプラズマ中のミクロな構造、例えば電子密度や温度の揺らぎ、中性粒子との相互作用等は、必然的に高空間・時間分解能かつ非接触なセンシング技術を必要とし、十分に把握されているとは言い難い。ヘリコンプラズマは比較的容易に生成する事が可能であり、磁化プラズマ乱流やプロセスプラズマの基礎過程の研究に利用されてきた。応用力学研究所の直線プラズマ乱流装置 PANTA では、ヘリコンプラズマ中に乱流を励起し、乱流が輸送に与える影響を多数のプローブや発光観測により進めている。ミクロな構造を定量的に評価するためには、プラズマの電子温度と電子密度の径方向分布の時間変化(ゆらぎの位相に対応した変化)を高精度に計測し、勾配と流束を評価する事が必須である。レーザートムソン散乱法はプラズマに与える擾乱が小さく、かつ高い空間(~0.1 mm)・時間(~10ns)分解能での計測が可能である。本研究ではトムソン散乱法を主軸として、プラズマ中のミクロな電子密度・温度構造を、揺らぎの位相情報を含めた時間・空間多次元計測として達成することを目指す。今年度は電子密度・温度の実空間(プラズマの径方向)分布を、磁場独度・ガス圧力を変えつつ、多点計測により、詳細に明らかにした。その結果について報告する。

非協同レーザートムソン散乱法をPANTAに適用し、その電子密度・温度の空間・時間変化の観測を進めている。 2D(空間1次元+位相変化)  $(n_e, T_e, \nabla n_e, \nabla T_e, \tilde{n}_e, \tilde{T}_e)$ 



### はじめに

プラズマの応用研究は、核融合を目指した磁場閉じ込めや半導体プロセス、高出力光源や農業・バイオ応用など、広範に渡っている。ヘリコンプラズマは比較的容易に生成する事が可能であり、磁化プラズマ乱流やプロセスプラズマの基礎過程の研究に利用されてきた。応用力学研究所の直線プラズマ乱流装置 PANTA においてヘリコンプラズマ中に乱流を励起し、乱流が輸送に与える影響を観察している。PANTA ではプラズマの計測にはプローブ法や分光法が用いられてきたが、乱流駆動輸送のより定量的な評価を行うためにはプラズマの温度と密度の径方向分布を高精度に計測し、勾配と流束を評価する事が必須である。さらに PANTA では運転条件により、特定の周波数でのプラズマ揺らぎが増大することが観測されており、その場合の  $n_{\rm e}, T_{\rm e}$  を得ることも求められている。

トムソン散乱計測はプラズマに与える擾乱が小さく、かつ高精度に温度と密度が計測可能である。すでに行われているプローブ計測の結果から、電子密度・電子温度の範囲はそれぞれ $10^{19}\,\mathrm{m}^{-3}$ 、数 eV と予想された。このようなプラズマに対しては、 $0.1\,\mathrm{J}$  クラスの小規模な可視光レーザーをプローブとした、比較的簡易なシステムでトムソン散乱計測が可能であると予想された。これまでに PANTA プラズマに可視プローブを用いたトムソン散乱計測システムを構築し、プラズマ中心位置における電子密度・電子温度計測の実証を行った[1]。さらにプラズマ揺らぎに対応した  $n_\mathrm{e}$ ,  $T_\mathrm{e}$  計測まで拡張可能であることを、これまでに示してきた。本年度は、プラズマ径方向分布の詳細な計測・解析を行ったので、その結果について報告する。

### 実験方法(レーザートムソン散乱法)

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

### 実験装置

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

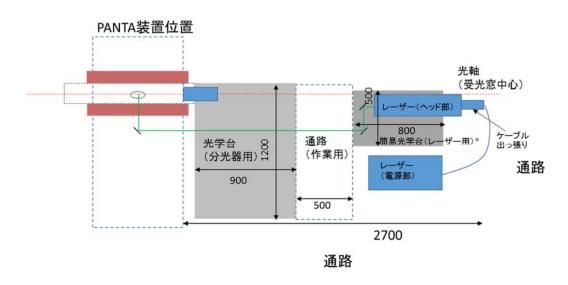


図 1. PANTA 用可視トムソン散乱計測システムの配置図(図中スケールはすべて mm)

計測に必要な主な装置は、レーザー (Qスイッチ Nd:YAG レーザー)、分光器である。分光器は実験用光学台の上に、各種光学部品を組み込んで自作した。分光器内の概要を図2に示す。図2には併せて、散乱光の受光光学系の概略を示した。1st レンズはできる限り大きな受光立体角が望ましいが、チャンバー外に配置せざるを得ないことや、保有するレンズ種

類の制限から、焦点距離 400 mm で、有効直径 46 mm のアクロマートレンズを使用した。このレンズで一度平行光にした散乱光の一部を、f = 220 mm のレンズで入口スリットに集光し、分光器内に導いた。分光器内の回折格子は、トムソン散乱で使用する偏向方向に高い回折効率を持つ、サインカーブ形状の反射型回折格子(刻線本数 2400 本/mm)を用いた。スリット幅、焦点距離、回折格子条件などで決まる波長分解能は、0.2 nm程度であった。検出器には ICCD カメラ(米国 Princeton Instruments 社製 PIMAX4, 波長 532 nm における量子効率は 45%程度)を用いた。使用したプローブレーザーは移設が容易な小型のレーザー(米国 Continuums 社製 Surelite)を用いた。今回使用した第 2 高調波(波長532 nm)の出力は130 mJ程度であり、レーザーの繰り返し周波数は10 Hzであった。

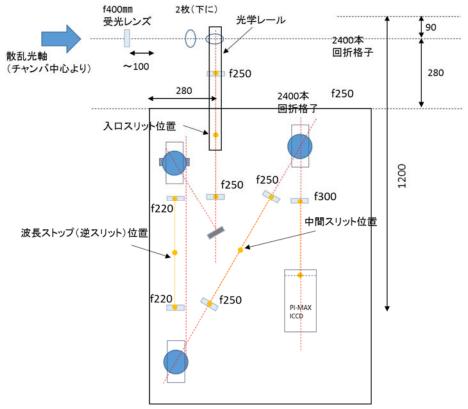


図 2. トムソン散乱用トリプル分光器の概要図 (図中スケールは mm)

図3に計測システム導入後の装置周辺の写真を示す。計測時、分光器やレーザー光軸は、背景光を除去するために完全に遮光した。図4には自作したトリプル分光器の写真を示す。 分光器および受光系の光軸調整は、PANTA チャンバー側面の反対側の窓から、波長532 nm の半導体レーザーを入射し、行った。



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

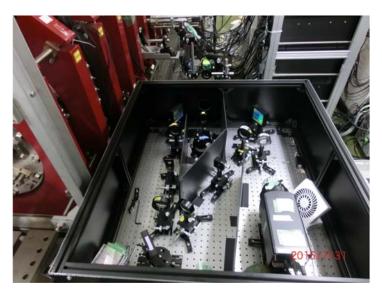
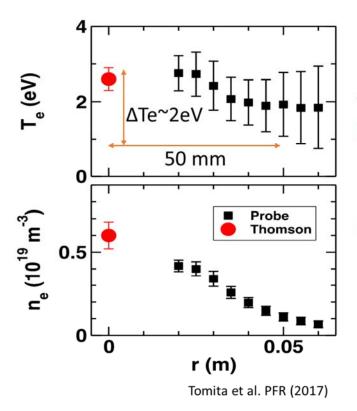


図 4. 自作したトリプル分光器の内部写真。

本年度の計測では、ne, Te の詳細な径方向分布の計測を目指した。例えば温度勾配の変化を計測するには、10 点以上の多点計測が必要となる。また、1eV 程度の温度領域で、±0.1eV の温度決定精度は、実験環境上、困難を伴う。そこで計測点を増やすことで、温度決定精度を高めることとした。温度の検出下限として 0.1eV の分光システムで、100 点超の多点計測を行い、温度の径方向分布の計測を行った。



径方向(0<r<50mm)での温 度・密度変化を詳しく知りたい。

例えば温度勾配の変化を計 測するには、

10点以上の多点計測。

±0.1 eV@1eVの温度決定精度は困難。

さらに計測点を増やすことで データの信頼性を高めたい。

検出下限0.1 eVのシステム構成で、100点超の多点計測を行うことで対応。

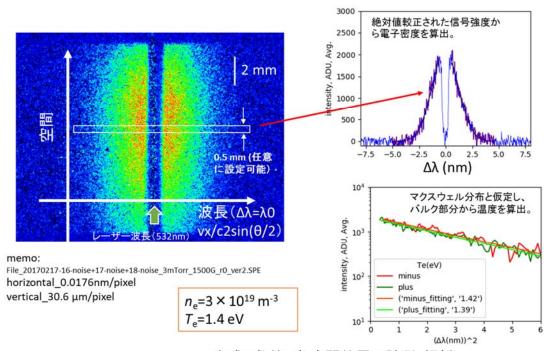
図 5. 電子密度・温度の位相データ取得のための同期系統図

### 実験結果と考察

レーリー散乱およびラマン散乱より、構築したシステムが正常に動作していることを確認したのち、トムソン散乱計測を行った。プラズマ生成条件は以下のとおりである。

・ プラズマ生成時の Ar ガス圧は 1mTorr, 3mTorr, 5mTorr, 磁場強度は 600 Gauss, 1200Gauss, 1500 Gauss とし、合計 9 条件での計測を行った。

#### 2次元(波長・空間)計測であり、ある程度の空間範囲は同時に計測可能。



→生成9条件、各空間位置で計測・解析

図 6. トムソン散乱計測例

計測レーザーの繰り返し周波数は 10Hz で、3000 ショットの積算計測を行った。プラズマとの同期は取らず、Duty 比 1:1 より、半数の 1500 ショットが実際の積算回数と考えた。計測データの例を図 6 に示す。横軸は ICCD カメラのピクセル(1 ピクセル=13  $\mu m$ )である。分光器の仕様で決まる逆線分散は 1.35nm/mm であり、1 ピクセルあたり 0.0176nm の波長幅となる。装置関数は 0.27nm であった。計測レーザー波長(波長 532 nm,  $\Delta$   $\lambda$ =0)付近の信号は、迷光除去のために差分散型分光器に設置したレーザー波長ストップ(逆スリット)によりカットされており、正しい計測値ではない。グラフ縦軸は信号強度であり、単位は Analog-to-digital unit である。画像の縦方向は空間分布そのものであり、空間幅 0.5mm の散乱スペクトルを抜き出したもの、そのフィッティングを例として示した。

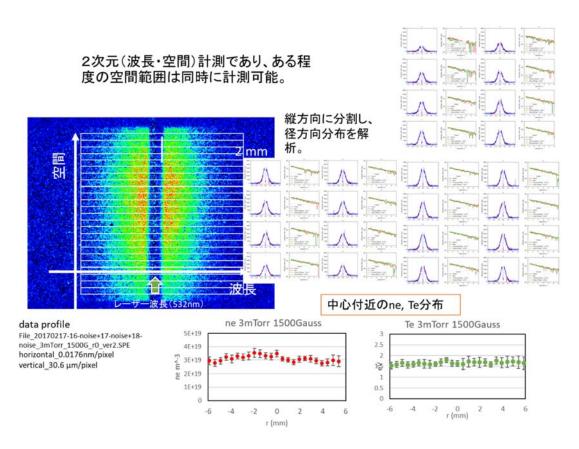


図 7. 径方向分布解析例

空間幅を 0.5 mm として、全データを解析した例を示す。それぞれにフィッテイング、絶対 値較正を行うことで、径方向の 12mm 幅の空間分布が得られることがわかる。 空間方向視野は~12mm。位置を変え、感度較正を行いつつ、r=0~50mmの範囲を計測。

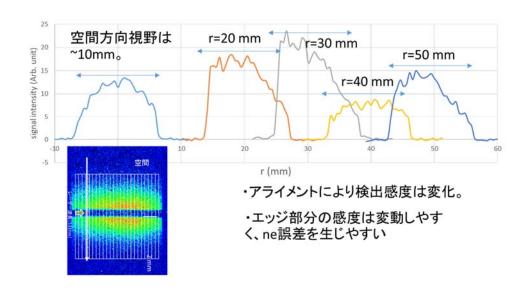
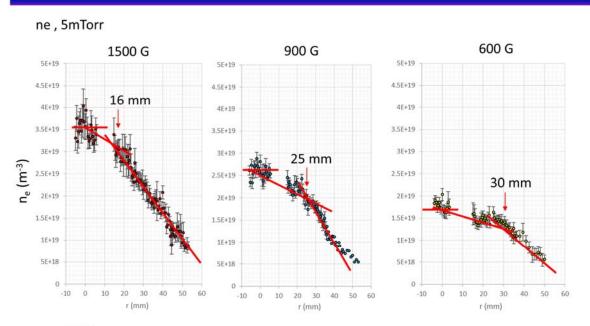


図 8. 径方向分布計測のための各受光位置での感度特性

一度の計測視野や 10mm 程度である。これに対して PANTA でのプラズマ半径は、およそ 50mm である。そこで、空間方向視野は、計測位置を変化させることで補った。

## 電子密度(5mTorr固定,磁場依存)

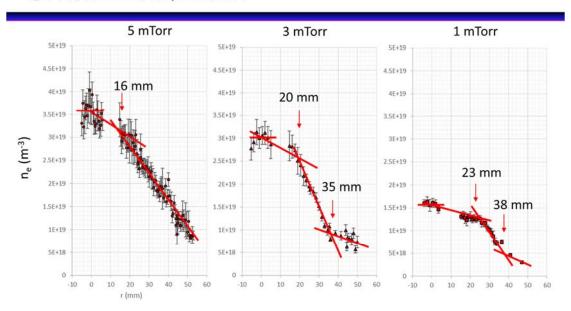


- ·磁場ス、neス。
- ・周辺に行くにつれ、密度は減少する。
- ・密度勾配の変化位置が異なる(外側に移動?)。

図 9. 電子密度の径方向分布の磁場強度依存性

電子密度の径方向分布を示す。ガス圧は5mTorrで固定した場合である。磁場強度の上昇に伴い、電子密度は増加していくことがわかる。また、プラズマ中心から周辺部に行くにつれ、密度は減少していることがわかる。一方で、密度勾配は単調でない。密度勾配の変化位置も、磁場圧力により変化していくように思われる。

## 電子密度(1500 G固定, 圧力依存)

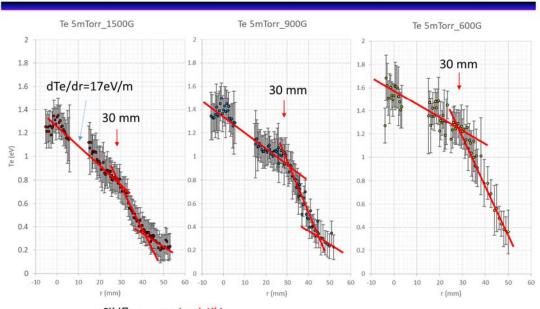


- ・圧力ン、neン
- ・密度勾配の変化点が異なる(外側に移動?)。
- ・3m, 1mTorrでは2度目の勾配変化?

図 10. 電子密度の径方向分布の圧力依存性

ガス圧力を低下させると、単調に電子密度は低下した。この場合も、密度勾配は一定ではなく、プラズマ条件により、勾配変化点も移動しているように感じられる。

## 電子温度(5mTorr,磁場依存)

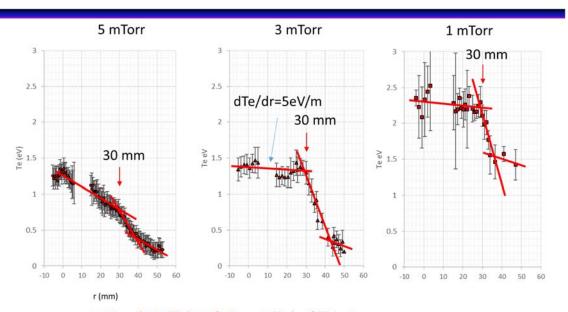


- ・磁場ス、Te」(neと逆)。
- ・周辺に行くにつれ、温度は減少。
- •r=30mm付近で共通して温度勾配に変化(neと傾向が異なる)。

図 11. 電子温度の径方向分布の磁場強度依存性

電子温度の径方向分布について示す。圧力が 5mTorr 固定、磁場強度による電子温度の違いを示す。電子密度とは異なり、中心部での電子温度は、磁場強度の増加と共に低下していった。周辺部に行くにつれ電子温度は減少した。温度勾配の変化は、どの磁場圧力でも中心から 30mm (r=30mm) で共通して見られた。この点も電子密度とは異なる傾向を示した。

## 電子温度(1500 G, 圧力依存)



- ・圧力で勾配傾向に変化(neと傾向が異なる)。
- → 0<r<30mm: 5 mTorrのみ勾配あり。他は一定。
- \*r=30mm付近で共通して温度勾配に変化(磁場変化時と同傾向)
- 圧力」、Te オ

図 12. 電子温度の径方向分布の圧力依存性

同じ磁場強度では、圧力の上昇とともに電子温度は減少する傾向となった。5mTorr 圧力の時のみ、プラズマ中心付近での勾配がみられる。温度勾配は、共通して r=30mm で大きく変化している。

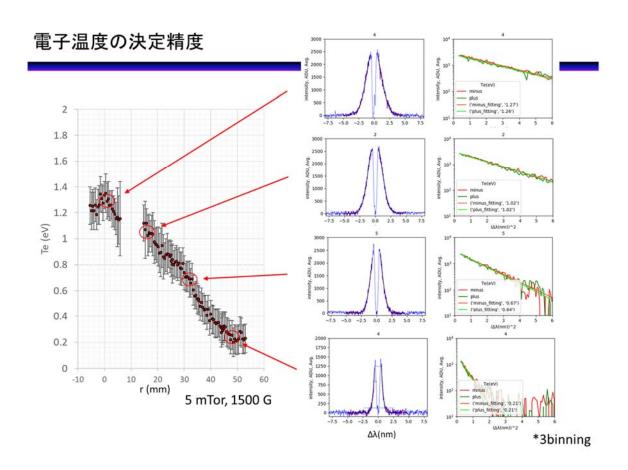
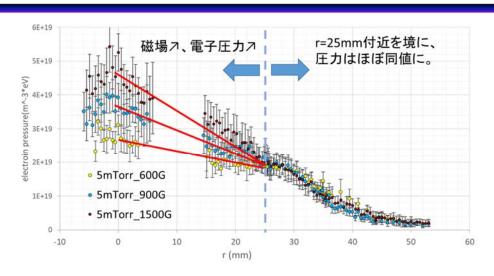


図 13. 各電子温度でのトムソン散乱スペクトル計測例

本計測では高い電子温度の決定精度が求められる。各温度でのトムソン散乱スペクトル例を示す。明確なスペクトル形状変化がみられることがわかる。

# 電子圧力(n<sub>e</sub> × T<sub>e</sub>)

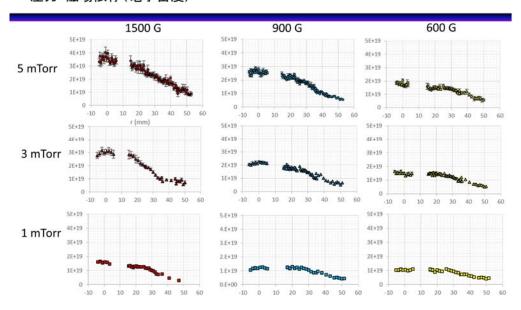


- ・磁場ス、電子圧力ス(周辺部は差がない)。
- •r=25~30 mmで圧力勾配に変化あり。
- •r=25 mmを境に電子圧力に明確な違い。

得られた電子密度・電子温度から、電子圧力の径方向分布を求めた。r=25mm 付近から、磁場強度の増加と共に、明確な電子圧力の違いが得られた。r=25mm 付近で、磁場圧力でプラズマ状態が変化している可能性がある

図 14. 電子圧力の径方向分布の磁場強度依存性

## 圧力·磁場依存(電子密度)



圧力·磁場依存(電子温度)

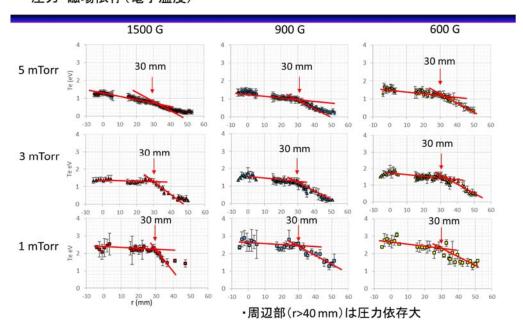


図 15. 各条件での電子密度・温度の径方向分布

全9条件での電子密度・電子温度の径方向分布を示す。

## まとめと今後の展望

本共同研究の本年度の成果を以下に示す。

- ・ PANTA 装置における異なる 9条件のプラズマに対して、径方向分布の電子密度・電子温度をレーザートムソン散乱法で計測した。計測箇所を 100点以上とすることで、詳細な密度・温度の空間変化を観測可能とした。
- ・ 勾配長の分解能は 5mm 程度であり、特に温度の勾配変化観測の強力な計測手段となりうる。

今後の展望として、径方向分布で得られた精度での計測を、位相空間まで拡大させることを 考えている。

## 論文発表

Kentaro TOMITA, Yuta SATO, Nima BOLOUKI, Tatsuro SHIRAISHI, Kiichiro UCHINO, Yudai MIWA, Tatsuya KOBAYASHI and Shigeru INAGAKI, Measurements of Electron Density and Electron Temperature Using Laser Thomson Scattering in PANTA, Plasma and Fusion Research: Regular Article, Vol. 12, 1401018 (5pages) (2017).

## 分野融合研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2: 波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング」における個別課題の成果の統合を議論する。

#### 目的と背景

応用力学研究所は3つの研究分野から構成されている。そこで本研究所ならではの分野融合領域研究の開拓が求められている。プラズマ、大気海洋、新エネルギーに共通したキーワードとして流体力学が挙げられる。特に多くの流体(多成流。多相流、反応流を含む)で普遍的に観測され、エネルギーや物質の輸送に大きな影響を与える波・渦・流れに着目する。本研究では、それぞれの領域で発展してきたこの波・渦・流れ、を観測(センシング)、解析(データマイニング、可視化)、物理過程の抽出(モデリング)に関する情報交換及び議論を行う場を提供する事を目的とする。更には他分野で共通の手法となり得るデータサイエンスの導入についても議論する。そのため研究集会を開催し、特定研究2のサブテーマリーダー及び流体を扱う多方面からの研究者が一堂に会して議論する機会を設ける。個別のアプローチを統合することで、研究手法そのものに新たな展開がもたらされることが期待できる。

### 研究集会の開催

2019年1月31日から2月1日にかけて応用力学研究所2F会議室において研究集会を開催した。研究会のプログラムを添付する。

#### 予算の執行

予算は研究集会参加の旅費に執行した。

#### 研究集会のまとめ

分野融合型共同研究としては初年度にあたる本年度は特に海洋・大気及びプラズマの分野融合について、お互いのシーズとニーズの確認を行った。分野融合研究は理論・シミュレーション研究がやり易く海洋・大気及びプラズマ分野から乱流と波に関する理論と解析手法についての発表があった。海洋分野における Wigner 変換を用いた微分方程式の解法

はプラズマ乱流現象において現在進めている解析と非常に類似しており、海洋乱流現象とプラズマ乱流現象に共通の物理がある事を示している。また、乱流の計算から求まる乱流強度と実際に観測される物質輸送との関係が複雑である事も共通していると認識された。乱流強度と物質輸送の関連はプラズマ分野では実験観測されている。この点はプラズマ分野の利点と考えられる。そこで先ほどのWigner 変換をプラズマ過渡輸送実験のデータ解析へ適用できないか議論された。

また、近年盛んなデータサイエンスの手法を取り込んだデータ解析の紹介があった。医療用 CT・MRI はデータ処理技術によって支えられており、近年は圧縮センシングという手法を用いることで臓器の明瞭な像を得る事ができる。これをプラズマ CT に応用し、乱流解析を行うアイデアが示された。また、ソーシャルネットワーク科学の時系列データ解析手法が紹介された。自己回帰モデルでは全てのタイムラグに対し結合係数が決められるが、そこにスパース性を導入し結合係数 0 を許す解析(縮小自己回帰モデル)を行うことで、影響のあるなしを明確にすることができる。更にこのモデルを多変数系に拡張した。相関解析からは元のモデルを推定することができないが、本手法ではモデルを与える事ができる。この手法は時系列データのモデリングに対して非常に有効であると期待できる。これらデータ解析手法の進展について、それぞれの分野における適用性について討論した。

センシングに関して多くの話題が提供された。レーザーとマイクロ波を用いた先進的な乱流及び乱流駆動輸送の観測法が紹介された。トリプルグレーティング分光器を用いたトムソン散乱により様々な実験条件における PANTA プラズマの温度、密度の径方向勾配が得られた。PANTA プラズマの周辺では大きな温度勾配が形成されている事が明らかになった。更に統計的平均法と組み合わせる事で温度揺動の推定が行われた。マイクロ波計測に関しては、周波数コム、超短パルス、高速周波数掃引技術を用いた様々なタイプの反射計が紹介された。先述の時系列データ解析チームから、信号のトレンドを除去したノイズライクな成分の解析可能性が指摘された。反射計はプラズマの平衡分布や比較的大きな揺らぎを計測対象としているが、データ解析により極ミクロな揺らぎの情報が手に入る可能性がある。海洋分野ではプローブによる直接計測が行われているが、プローブを海面から海底に掃引する際に有限の時間がかかるため、その間の乱流構造の変化が指摘され、参照用のプローブを加える事が議論された。

MHD を考慮した液体金属のシミュレーション結果が示された。液体金属流動はまさしく電磁流体と中性流体との融合領域である。このシミュレーションではまだ熱輸送が含まれていないが、外部や内部の入熱による温度の非一様性を考慮できれば液体金属ダイバータや地球ダイナモの理解につながると期待される。

応用力学研究所研究集会

"波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング"

日時: 2019年1月31日-2月1日

場所: 応用力学研究所2F大会議室

# プログラム

1月31日(木)

13:30-13:40

はじめに (稲垣)

13:40-14:10

医療用CT・MRI技術を応用したプラズマ乱流計測 (荒川)

14:10-14:40

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

14:40-15:10

CFD手法による液体金属熱流動の解析(胡, Jabir Al Salami)

休憩

15:30-16:00

直線へリコン波プラズマ内で誘起される電子密度・温度揺らぎの非接触計測(富田)

16:00-16:30

流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシング技術の開発(徳沢)

16:30-17:00

全体討論

懇親会予定

2月1日(金)

9:30-10:00

日本海における乱流観測 (森)

10:00-10:30

流体波動の局所分離解析に関する研究 (大貫)

10:30-11:00

振幅変調反応性プラズマのナノ粒子量ゆらぎの相互相関解析 (古閑)

11:00-11:30

乱流輸送の促進と抑制機構の理論・実験的解明:ヘリシティ効果(横井)

11:30-12:00

全体討論

# 流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシング技術の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

#### 1. 目的

乱流は、自然界において普遍的に観測される物理現象であるが、磁場閉じ込め核融合プラズマ研究においても種々の乱流による物理現象の理解は最重要研究課題の一つである。特に非平衡な状態、現象が時間的に変化しているような状況における乱流の時空間構造を調べることは、この物理現象を理解する上で非常に重要である。しかしながら、タングステン・白金などの重金属をも溶かしてしまう高温高密度プラズマ実験においては、その計測手段が非常に限られている。そこで我々は、マイクロ波を用いた新しい非接触な計測手法の開発を行い、乱流の高精度な時空間構造を観測することを目指している。特に、乱流の流れる方向と強度を精度よく観測することを主目的として、これまでに周波数コムを用いたドップラー反射法を開発し、応用力学研究所のPANTA装置や核融合研の大型へリカル装置LHDなどに適用し、乱流構造に関する大規模なデータを得られるようになってきた。このドップラー反射計を実験装置に多数取り付け、相関計測が可能となると、物理研究の理解に大変有用である。そのためには計測システムのコンパクト化省コスト化が重要となるため、今回、Dual comb方式を用いたドップラー反射計システムの開発を行った。結果について以下に報告する。

#### 2. Dual comb Doppler 反射計

プラズマ中の密度揺動による後方散乱波を計測することで、プラズマ密度揺動強度とそのフロー速度を調べることができるドップラー反射計であるが、空間分解能を高めるためには、プラズマ中へ入射する電磁波の周波数の数を増やす必要がある。そのため、マイクロ波帯の周波数コムを用いたドップラー反射計を開発し、PANTA装置およびLHD装置に適用しているが、これまで、信号検出には入射した各周波数に対応したマイクロ波帯のフィルタバンクとその位相変化を測定するIQ検出器が必要であった。これらのマイクロ波検出回

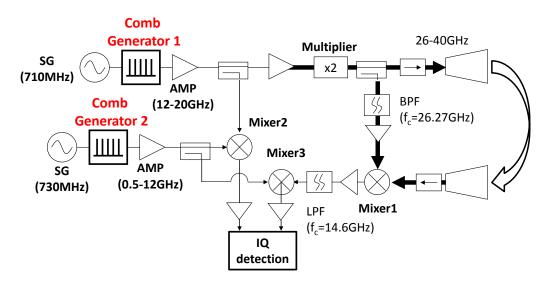


図1: Dual comb Doppler 反射計システムの概略図

路は、各素子を SMA コネクタでケーブル接続する必要から、コンパクトなサイズにすることが困難でかつコストも必要となり、せっかく多周波数を同時発生できるコムジェネレータを用いても、フィルタバンクの数で利用できる周波数に制限が発生していた。そこで今回、二つの周波数コムを用いて、IF(中間周波数)を劇的に低減し、観測周波数を増大させるための省コスト化を目指した。システムの概略を図 1 に示す。発振周波数をわずかに(20MHz)ずらして、2 つの周波数コムを動作させると、IQ 検出器に入力される、IF 周波数列は、n x 20 MHzの周波数コムとなる(n は整数)。これまでの 10 GHzを超える周波数帯域からの大幅な低減ができ、表面実装型のフィルタやアンプ、ミキサ等の素子を利用することができる。これらを用いて作成した、IQ 検出回路基板

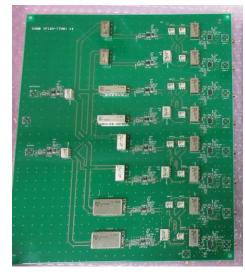


図 2: IQ 検出基板の例。これで、4ch 分の IQ 出力が得られる。

を図2に示す。新計測システムの導入により、長距離相関など新たな知見が得られるようになった。

### 3. 論文と学会発表

- 1. T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, M. Emoto, H. Nakanishi, S. Inagaki, K. Ida, H. Yamada, A. Ejiri, K. Y. Watanabe, K. Oguri, T. Akiyama, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group "Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD" Review of Scientific Instruments 89, 10H118-1-5 (2018); doi: 10.1063/1.5035118
- 2. T. Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group

"Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements" Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves Sep. 9 - 14, 2018@Nagoya Congress Center Nagoya, Japan [Th-P2-R2-1]

#### また、次の学会にて発表を行った。

- T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, M. Emoto, H. Nakanishi, S. Inagaki, K. Ida, H. Yamada, A. Ejiri, K. Y. Watanabe, K. Oguri, T. Akiyama, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group "Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD" 22nd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (HTPD2018) @April 16-19, 2018 @Paradise Point Resort & Spa, San Diego, California, USA [8.56]
- T. Tokuzawa, M. Kobayashi, S. Masuzaki, S. Inagaki, K. Ida, H. Tsuchiya, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Oguri, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group
   "Turbulence rapid reduction in the stable detached LHD plasma with magnetic perturbation application"
   8th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference, June 12 15, 2018
   @ETCCUT, SWIP, Leshan, Sichuan, China [C-O1]
- 3. T. Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group
  - "Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements" 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018) Sep. 9 14, 2018@Nagoya Congress Center Nagoya, Japan [Th-P2-R2-1]
- 4. T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, T. Tsujimura, M. Emoto, C. Suzuki, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Oguri, K. Tanaka, G. Motijima, I. Yamada, and LHD Experiment Group; "Rapid Radial Propagation of Momentum Change and Flow Oscillation Associated with the Pellet Injection", 27<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference (FEC-2018) @2018.10.22-10.27 Mahatma Mandir, Gandhinagar, Gujarat, INDIA [EX/P3-7]

# CFD手法による液体金属熱流動の解析

九州大学応用力学研究所 胡 長洪

#### 1. Introduction

The divertor is an essential component of tokamak fusion reactors not only to extract the energy from the plasma to generate electricity, but also to expel reactor byproducts, also known as fusion ash, which adversely affect the quality of plasma confinement and temperature. One of the main challenges facing divertor design is the tremendous energy fluxes (~ 10<sup>7</sup> W/m²) that divertors are projected to experience in electricity-producing scale reactors¹. At such thermal loads, even Tungsten, the material of choice for the divertors in ITER and DEMO, can sustain cracks due to thermal shock and fatigue in addition to high rates of sputtering due to plasma influx². Also, the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) for tungsten increases with neutron irradiation, which may cause cracking of tungsten plasma facing components (PFCs)³. Such limitations of solid PFCs have motivated the consideration of liquid metals as viable alternatives for future tokamak designs. The operation of a liquid metal (LM) divertor involves phenomena spanning multiple disciplines of physics such as fluid dynamics, electromagnetism, thermodynamics and plasma physics. The evaluation and refinement process of engineering designs of such a device must involve numerical simulations to avoid the prohibitive costs and durations of experiments.

Computational fluid dynamics (CFD) methods have been widely used in many industrial applications. CFD method for magnetohydrodynamics (MHD) has also been studied and applied to simulation of liquid metal flows<sup>4</sup>, which is called CMHD (computational magnetohydrodynamics) method. Due to multi-physics nature of the LM flows in the diverter, directly application of an existing CFD code will not be effective. The purpose of the present research is develop an new CMHD code that is capable of LM divertor simulations. Among the existing well-established CFD methods, we chose SPH for numerical simulation of liquid metal flows. SPH is a mesh-free, Lagrangian method that is well-suited for multiphysics applications such as the problem associated with the liquid metal divertors.

#### 2. Development of SPMHD Method

The development of a hydrodynamics version of the SPH code has been completed. Figure 1 shows a recently obtained dam-break simulation to demonstrate the ability of capturing the complicated and highly non-linear free-surface phenomena by our code.

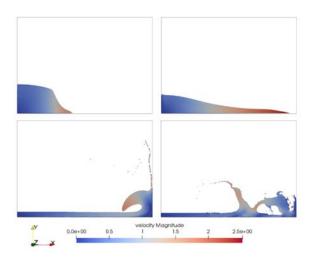


Figure 1: Dam-break simulation using SPH

The above mentioned SPH features have motivated us to choose SPH for simulation of liquid metal divertor. However, since SPH for MHD has not be well studied yet, in this research at first we extend the hydrodynamic SPH code to the SPMHD (smoothed particle magnetohydrodynamics) code.

Governing equations for MHD can be described as follows.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\nabla \tau + +\frac{1}{\rho}(\mathbf{j} \times \mathbf{B}) + \mathbf{g}$$

where  $\tau$  is the viscous stress tensor, j is the current density and B the magnetic field vectors. The latter two are governed by the following Maxwell equations.

$$\nabla \times \mathbf{B}_i = \mu_0 \mathbf{j}, \qquad \mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}), \qquad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}_i}{\partial t}$$

In the SPH framework, the fluid is discretized into material particles that in addition to carrying the fluid properties, serve as interpolation nodes for the discretized fields. In this work, the weakly compressible formulation of SPH is adopted.

As the first result of our SPMHD development, a 2-dimensional simulation of a Hartmann flow versus the analytical solution for Hartmann numbers ( $Ha = BL\sqrt{\sigma/\nu\rho}$ ) of 8, 25 and 50 are presented in Figure 2, where the Hartmann number is a non-dimensional number signifying the ratio of electromagnetic forces to viscous forces. Comparison between the SPMHD result and the analytical solution is satisfactory.

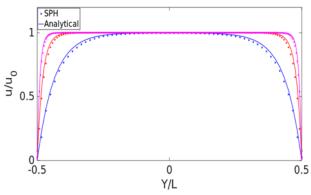


Figure 2: Hartmann Flow simulation using SPH for Ha = 8 (blue), Ha = 25 (red) and Ha = 50 (magenta)

This research has just been started. Future work includes extending the present 2D code to 3D, comprehensive comparison between  $\phi$  and B formulations for liquid metal flows, implementation of turbulence model and surface tension model, extending the present model to non-uniform, time varying magnetic field, etc.

#### **REFERENCES**

- 1 S.V. Mirnov, V.N. Dem'yanenko, E.V. Murav'ev, J. of Nuclear Materials, Vol. 196-198, (1992).
- 2 T. W. Morgan, P. Rindt, G. G. van Eden, V. Kvon, M. A. Jaworksi and N J. Lopes Cardozo, Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 60, N. 1 (2017).
- 3 P. Krautwasser, H. Derz, Kny, E, Plasma Physics And Fusion Technology (1995)
- 4 T. Yanagisawa, et al., Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys. (2013)
- 5 J. Monaghan, Reports on Progres in Physics, vol. 68 (2005)
- 6 H. Kumamaru, J. of Nuclear Science and Technology, Vol 54, No.2 (2017)

# 研究組織

九州大学応用力学研究所: 胡 長洪 (サブテーマ代表者) 九州大学大学院総合理工学府: Jabir Saif Said (大学院生) 九州大学応用力学研究所: 稲垣 滋 (所内世話人) レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

#### 目的

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

#### 経緯と実験方法

大型望遠鏡では、大気の揺らぎによって天体からの光の波面が乱され、解像度が向上しない問題がある。これに対し、すばる望遠鏡では波面形状を計測し、乱れを可変形鏡で補正する補償光学により、解像度の大幅な改善に成功している。プラズマにレーザー光を入射した場合、乱流揺動に対応するのが望遠鏡での大気揺らぎであり、レーザー光の波面を測定することで、乱流揺動の情報が得られると考えられる。

この波面計測による電子密度揺動計測は、平成 27 年度より本格的に PANTA にて計測を開始した。当 初利用した市販のシャックハルトマン波面センサーでは有意な波面の変化は観測できなかったことから、プラズマ計測に最適化したシャックハルトマン波面センサーを自作した。撮像素子の画素数、シャックハルトマンセンサーを構成するマイクロレンズアレイのレンズアレイ数・焦点距離などを最適化した結果、プラズマの揺動によると考えられる波面変動を捉えることができた。

一方、課題として明らかになったのは、波面としては比較的平面成分に近い非揺動成分(直進光成分)が揺動成分よりも極めて大きいため、それらが僅かにでも変動すると揺動成分がマスクされることである。平面成分の変動は、機械振動やレーザー光直径より構造が大きい空気の揺らぎが原因となっている。そのため、平成30年度は断熱性の高い素材で光学系を覆う風防を製作し、外部からの気流や温度変化を極力抑制した実験系とした。また、それでも残る緩やかな気流の変化による波面変動については、プラズマが無い時の波面形状を参照信号とし、プラズマがある時の信号から差し引くことで変化分をプラズマによる波面変動とした。以前から参照信号の取得は行っていたが、トリガー系の制約から、プラズマ有りの条件で100フレーム取得した後、プラズマ無しの条件で参照信号を100フレーム取得していた。そのため、10分程度の時間差があり、気流の状態も変化するため、参照信号としての質が十分でなかった。そこで、トリガー系の改良を行い、PANTAでプラズマがオン・オフするタイミングに合わせてプラズマ有り・無しの波面を取得できるようにした。プラズマ有りのフレーム直後のタイミングで参照信号を取得して差し引くため、気流の変化を精度よく抑制することが可能になった。

#### 開発•実験結果

図1 にデータ処理方法を模式的に示す。PANTA のプラズマオン後 300 ms、プラズマオフ後 400 ms に 撮像し、両者の差分を取ってハルトマンスポットの広がりを得る。ただし、スポットの変化は微小であるため、これを 100 組連続で取得し、それらを重ね合わせてランダムノイズを低下させる。更に、空間分解能は失われることになるが、個々のハルトマンスポットを更に重ね合わせて平均のサンプル数を増やし、スポットの広がりをより見えやすくした。

今回の実験条件で取得したハルトマンスポットの広がりを図 2(1)に示す。(a)は図 1 のデータ取得をプラズマ無しで実施し、プラズマ無しのデータから無しのデータを差し引いたものである。理想的にはスポットの広がりは無いことになるが、(a)で示されている変化の程度は、本実験条件でのノイズレベルに相当する。加熱パワーを 3 kW から 5 kW まで変化させた時のハルトマンスポットの広がりの様子を(b) -(d)に示す。加熱

パワーを増大させるに従い、ハルトマンスポットの広がりが強くなっていることが示唆されている。図 2(2) は(b) -(d)と同条件でプラズマを生成した時の、静電プローブのイオン飽和電流である。加熱パワーを上げるほど、揺動の振幅が大きくなっていることが分かる。今回のハルトマンスポットの広がりの加熱パワー依存性は、静電プローブでの計測結果と定性的に良く合致していると言える。

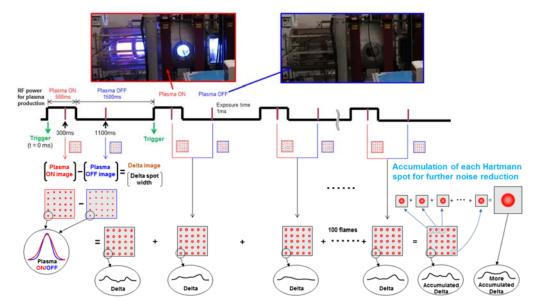


図1 ハルトマンスポットの微小広がりを捉えるための信号処理方法

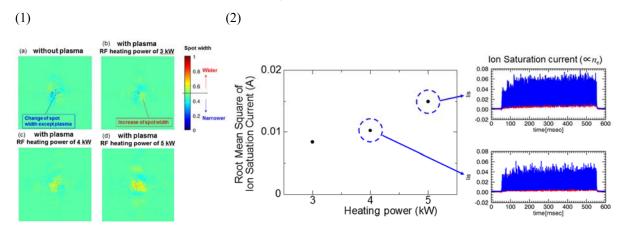


図 2 (1)得られたハルトマンスポット。加熱パワーを変えた時のハルトマンスポット変化 (b-d)、(2)(b-d)と同条件で計測したイオン飽和電流。

### まとめ

基本的には以前のシャックハルトマン波面センサーの光学系と一緒であるが、平成30年は風防とトリガー系の整備により、気流の影響を更に低減させた条件で波面計測を実施した。ハルトマンスポットの広がりは加熱パワーが大きいほど強くなり、同条件で静電プローブで計測した揺動振幅の加熱パワー依存性と定性的に一致した。この結果はハルトマンスポットの広がりが揺動を反映していることを強く支持するものであり、本研究で提案しているハルトマンスポット幅に注目した揺動計測の妥当性を示していると考えている。

#### 研究組織

研究代表者: 秋山毅志(核融合研)、早野裕(国立天文台)、服部雅之(国立天文台)、村上尚史(北海道大学)、玉田洋介(基生研)

研究協力者:居田克巳(核融合研)、稲垣滋(応力研)

### 直線装置 PANTA における ITG 乱流輸送シミュレーション研究

#### 量子科学技術研究開発機構 矢木雅敏

#### 目的

九大応力研付属の直線装置 PANTA ではイオン温度勾配モード(ITG モード)の励起実験が検討されている。前回の共同研究においては、ジャイロ流体モデルに基づく線形解析コードを開発し、ITGモードが不安定になるパラメータ領域を探索した。本研究では、非線形モデルへと拡張し、コードに実装する。これにより直線装置における ITG 乱流輸送のシミュレーション研究を行い、実験に向けた提言を行うことを研究目的とする。

#### 研究成果

磁場閉じ込めプラズマにおける異常輸送の原因の1つにイオン温度勾配による微視的不安定性(ITG 不安定性)が挙げられる。ITG 不安定性の励起条件や、それらモード間の非線形結合の研究は、直線型磁化プラズマを用いた基礎実験において行われており、直線装置 PANTA においても、イオン温度計測が進められ流体モデルを用いた ITG 不安定性の解析が検討されている。ITG 不安定性はイオンの温度勾配と密度の比 $\eta$ が閾値を超えることにより励起されるがイオン温度が数 eV と低くても $k_\perp \rho_s \sim 1$ のモードが不安定となり得る。そのため、有限ラーマ半径(FLR)効果を考慮したモデルによる解析が必要となる。ジャイロ流体モデルを用い、ITG 不安定性の径方向分布を含む固有関数を解くための初期値コードを開発し、PANTAにおける ITG 不安定性の線形成長率のモード構造とパラメータ依存性を明らかにした[1-4]。その一例を示す。電子とイオンの温度比 $\tau = T_e/T_i$ を導入すると、 $\tau$ が小さな極限において閾値は

$$\eta_c = \frac{2}{3} + \frac{5}{9}b\tau$$

と評価できる。ここで $b = -\nabla_1^2$ は有限ラーマ効果を示す。図1に $(\tau, \eta)$ パラメータ空間における成長率の依存性を示す。

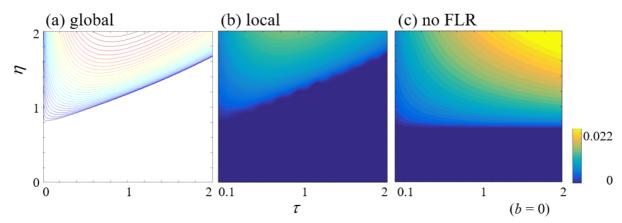


図1 (a)大局モデルによる成長率の依存性、(b)局所モデルによる評価(有限ラーマ効果あり)、(c)局所モデルによる評価(有限ラーマ効果なし)

この結果より、閾値は大局モデルと局所モデルでほぼ一致していることを確認した。また、有限ラーマ効果 が閾値を決める上で重要なパラメータになっていることも確認できた。

さらに非線形コードを開発する上で、r=0におけるm=1モードの境界条件を検討した。密度の発展方程

式は円柱近似では

$$\frac{dn}{dt} + \nabla_{\parallel} u_{\parallel} + \left(1 + \eta_{\perp} \frac{\widehat{\nabla}_{\perp}^{2}}{2}\right) \frac{1}{L_{n}} \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = 0$$

と与えられる。r=0の近傍において $\Psi \sim r^m$ とするとm=1に対し、 $L_n$ が空間的に一定の場合、左辺第3項は有限の値を持ってしまうことが判明した。その状況を図 2 に示す。

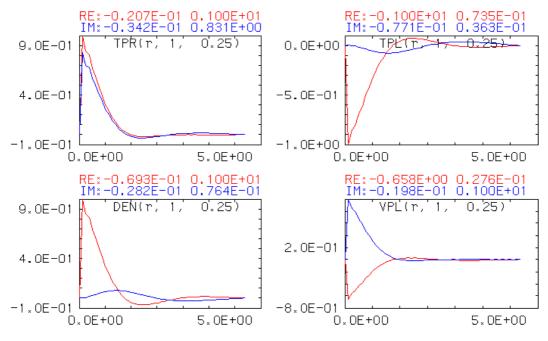


図 2 m = 1の場合の固有関数を示す。上段左: $T_{\perp}$ 、上段右: $T_{\parallel}$ 、下段左:n、下段右: $v_{\parallel}$ 

従って、 $L_n$ が空間的に変化し、r=0において $1/L_n\to 0$ とならない限り、左辺第3項は有限の値にとどまってしまい、 $n,u_\parallel$ の境界条件と整合しなくなる。次年度に向けた課題として、自己無撞着な境界条件を導入するとともに、非線形項の評価するための数値スキームを検討することが考えられる。

#### 参考文献

[1] T. Ohno, N. Kasuya, M. Sasaki, M. Yagi, 'Global Mode Analysis of Ion-Temperature-Gradient Instabilities Using the Gyro-Fluid Model in Linear Devices', Plasma Fusion Res. 13, 1401081 (2018).

[2] N. Kasuya, T. Ohno, M. Sasaki, M. Yagi, 'Comparison of reduced sets of a gyro-fluid model for ion-temperature-gradient instabilities in cylindrical plasmas', Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Kanazawa, Japan, Nov. 12–17, 2018) BP-12

[3] 糟谷直宏, 大野友嗣, 佐々木真, 矢木雅敏, 基礎実験装置のプラズマ不安定性に関するシミュレーション研究、第16回統合コード研究会(春日市、2018年11月29日-30日)3-5

[4] 糟谷直宏, 大野友嗣, 佐々木真, 矢木雅敏, 円筒プラズマにおけるイオン温度勾配不安定性に対する有限ラーマ半径効果,日本物理学会第74回年次大会(福岡市、2019年3月14日-17日)17aK310-3

#### 研究組織

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

#### タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響

京都大学複合原子力科学研究所九州大学応用力学研究所

徐 **虬** 徳永和俊

#### 1. 目的

一般的に、タングステンは低温脆化、再結晶脆化及び照射脆化などの弱点で核融合炉プラズマ対向材として問題がある。近年、 $W-Y_2O_3$  合金が良い力学特性を示したため、注目されている。本研究では、 $W-Y_2O_3$  合金を用いて、重水素保持特性を調べた。

#### 2. 実験方法

液相ドーピング法及び放電プラズマ焼結する方法(SPS)でタングステン合金 W-Y $_2$ O $_3$  を作製した。作製途中に 50%の冷間加工の工程を入れた。この合金から厚み 0.2mm、直径 5mm の試料を切り出した。試料の表面を粗研磨から鏡面研磨まで実施した。比較のため、1773K で 1 時間焼鈍した市販の純タングステンも使われた。核融合炉の中性子照射を模擬するために、両者に対して、京都大学大学院工学研究科附属量子理工学教育センターに設置されたタンデム型静電加速器を用いて、室温で Fe イオン照射を行った。Fe イオンエネルギーは 1MeV であった。損傷ピーク所の照射量は 0.3dpa と 1dpa であった。その後に、Fe イオンの未照射試料と照射した試料に対して、更にマグネットセパレータ付重水素イオン銃(オメガトロン社製)を用いて 5keV で重水素を注入した。重水素の照射量は  $1.0 \times 10^{20}$  から  $1.0 \times 10^{22}$   $D^+$ /m $^2$  であった。注入後、1073K まで昇温脱離ガス分析法(TDS)により重水素の放出を調べた。昇温速度は 1K/s であった。

#### 3. 実験結果と考察

図1に Fe イオン未照射した純 W と W-Y2O3 合金における重水素照射による重水素放出の照射量依存性を示す。比較のため、SPS で作られたタングステンの重水素放出の特性も示す。図1(a)、(b)と(c)はそれぞれ市販の純タングステン、SPS の純タングステン及び W-Y2O3 合金の重水素脱離スペクトルである。すべての試料においては、放出された重水素の量が照射量の増加と共に増加した。SPS のタングステンの重水素放出量が最も多かった。このことからドープされた Y2O3 粒子がタングステン中の重水素の蓄積を抑制したことが分かった。市販の純タングステンにおいては、 $1.0\times10^{22}$  D<sup>†</sup>/m² まで照射しても重水素放出ピークは1つしかなかった。その放出ピークの温度は 430K であった。これは、試料表面の照射によって形成された欠陥にトラップされた重水素だと考えられる。一方、SPS の純タングステンは照射量の増加につれて、600K で新たに放出ピークが現れた。W-Y2O3 合金においては、SPS の純タングステンと同様に 700K で新たに放出ピークが現れた。この放出ピークは試料中に既存の欠陥によるものだと思われる。

図 2 に Fe イオンで損傷ピークの所に 0.3dpa まで予照射した純 W と W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金における重水素照射による重水素放出の照射量依存性を示す。Fe イオンの予照射がない試料と同じように、放出された重水素の量が重水素照射量の増加と共に増加した。予照射した純 W の重水素放出量が予照射ない純 W より高かった。また、Fe イオンの予照射で欠陥を形成したので、750K 付近で二つ目の重水素放出ピークが現れた。W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金においても、同様な結果が得られた。すなわち、予照射した試料の重水素放出量が予照射ない試料より高かった。また、予照射した試料の二つ目の重水素放出ピークも高かった。これは、欠陥密度は高い方が重水素をトラップ可能性は高いことを示している。一方、図 1 に示したように、W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金が純 W より重水素放出量が高かったのに対して、Fe イオン照射した W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金においては、純 W に比べ、トータル重水素放出量がほとんど変わらなかった。特に、試料表面の欠陥にトラップされた重水素放出量が抑えられた。従って、 $Y_2O_3$ 粒子を添加した合金の耐照射性が向上された。Fe イオン予照射の照射量を増加しても同じ結果が得られた。

### 4. まとめ

液相ドーピング法及び放電プラズマ焼結する方法を用いて、 $W-Y_2O_3$ 合金を作製した。この合金に対して、重水素照射を行い、重水素保持特性を調べた。また、中性子照射を模擬するため、Feイオン照射を行い、重水素保持特性に及ぼすFeイオン照射効果を調べた。ドープされた $Y_2O_3$ 粒子がタングステン中の重水素の蓄積を抑えただけではなく、W合金の耐照射性も改善された。

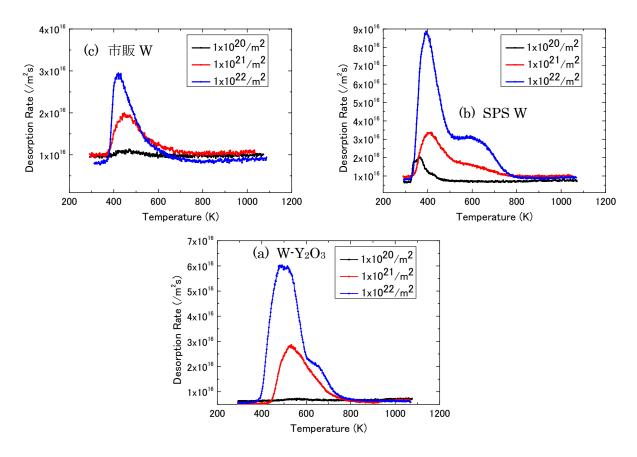


図1 重水素放出の温度依存性

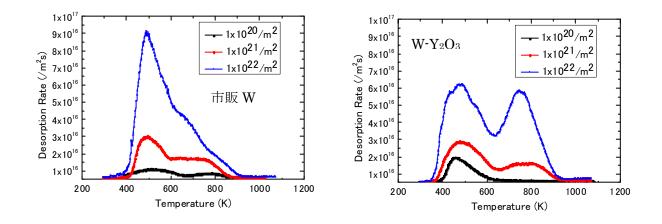


図 2 0.3dpa(損傷ピーク)まで Fe イオン予照射した Wと W-Y203 合金の重水素放出の温度依存性

# 直線プラズマ装置 PANTA における音速分子ビーム入射装置を用いた密度プロファイル制御

核融合科学研究所 小林達哉

# 1. 研究目的

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

直線プラズマ装置 PANTA には、主に計測ビームとして SMBI (Super Molecular Beam Injection, 超音速分子ビーム入射) 装置が導入されている. SMBI を入射し、密度揺動パターンの応答を観測することを本研究の目的とする. また、揺動パターンの変化の要因を同定することを最終的なゴールとする. 本年度は乱流状態のアルゴンプラズマにヘリウム、ネオン、アルゴン SMBI を入射した際の密度・電位プロファイルの変化や、揺動の応答を観測した.

### 2. SMBI 実験

#### 2.1 実験条件

図 1 (a) に PANTA の schematic view (top view)を示す. 円筒の真空容器の片側底面で RF により生成されたプラズマを軸方向磁場で閉じ込める. 反対側の底面ではプラズマがターミネートされており,中性化したガスを排気するためポンプが取り付けられている. 円筒側面にはプラズマを取り囲む計測ポートが配置されている. 本研究では,主に 64-channel 周方向プローブアレイ 5-channel 径方向プローブアレイ (tip 間隔 1cm)を用いる. プラズマ生成部から 1375mm 離れた位置に図 1 (b) に示す SMBI 装置が取り付けられている.

本研究では、SMBI 特有の局所的にフォーカスした入射特性は積極的に用いず、むしろ長時間パルス入射で装置全体にガスを行き渡らせることを目的とする (ガスパフ装置として用いる). パフするガス種は、He, Ne, Ar を用いる. 1 回のガスパフで、装置内に満たされている中性ガスと同程度の粒子数が供給される.

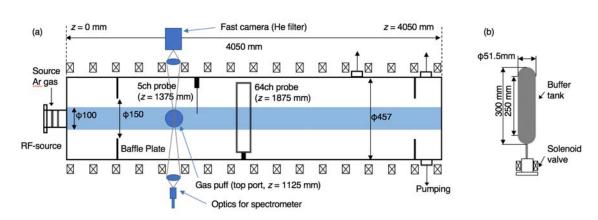


図 1. (a) 直線装置 PANTA の schematic view. (b) SMBI 装置.

# 2.2 実験結果

図 2 は典型的な放電波形を示す. t=0.3s でガスパフを開始し,50ms 継続する. ガスパフが行われている間 He I 発光強度は増加し,ガスパフ終了後も微減はするが維持される.プラズマ密度を主に反映していると思われるイオン飽和電流はガスパフ後もほとんど変化がない.このことから,入射されたヘリウムはほとんど電離されず,中性のまま装置内に留まっていることが考えられる.図 2(c)のスペクトルの変化をみると,Gas puff 後,高周波成分(f>5 kHz)が減り低周波成分(f<5kHz)が増える.

図3に、He、Ne、Arパフ時の、イオン飽和電流と浮遊電位の変化を示す.イオン飽和電流に関しては、Ne 入射でほぼ変化なし、He 入射は勾配が微減、Arは全体的に増える傾向にあった.一方浮遊電位に関しては、He で勾配増、Ne で微増、Ar は勾配減となった.これらの変化が Gas puff の直接的影響によるものか、Gas puff が揺動を変化させたことによる影響かを議論する必要がある.

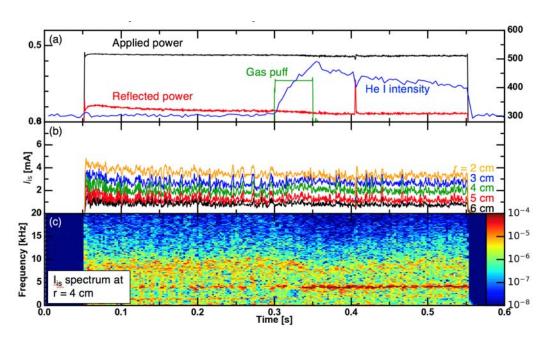


図 2. 放電の時間発展. (a) RF 入射パワー, 反射パワー, ガスパフトリガ及び He I 発光ライン強度, (b) 5-channel probe を用いて計測した r=2-6cm の平均イオン飽和電流波形, (c) r=4cm で計測されたイオン飽和電流揺動スペクトルの時間発展

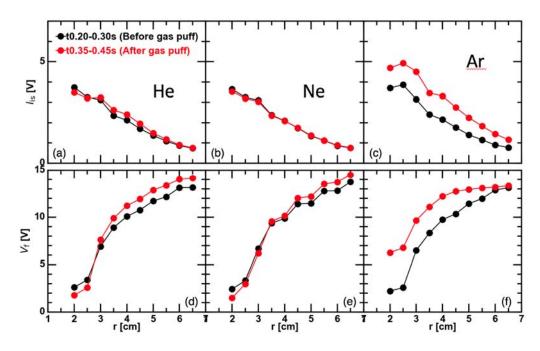


図 3. (a) He, (b) Ne, (c) Ar ガスパフ入射前後のイオン飽和電流プロファイル及び(d) He, (e) Ne, (f) Ar ガスパフ入射前後の浮遊電位プロファイル

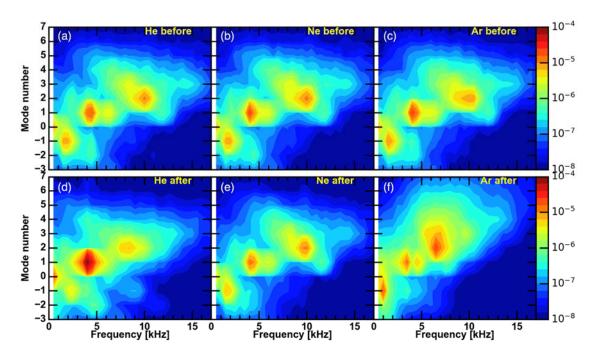


図 4. (a) He, (b) Ne, (c) Ar ガスパフ入射前のイオン飽和電流 2D スペクトル及び(d) He, (e) Ne, (f) Ar ガスパフ入射後のイオン飽和電流 2D スペクトル

図 4 には、ガスパフ入射前後の周波数—周方向モード数スペクトルの比較を示す. He ガスパフでは、4kHz のモードパワーが増え、高周波成分が減る. また、m=-1 の Mediator のパワーが減る. Ne ガスパフは、その前後でイオン飽和電流のスペクトルにほとんど変化が見られない. Ar のケースでは、全体的にスペクトルピークが低周波側にシフトしている. ガスパフ後のスペクトルは、単純にソースガス圧を上げた際の放電のスペクトルと良い一致を示す.

He と Ne を比較すると、中性ガス数、プロファイルの変化はよく似たものであるのにも関わらず、He では乱流スペクトルに有意な変化が見られ、Ne では見られなかった。今後は入射ガス量のスキャンを行い、入射ガス種の違いが揺動スペクトルにどの様に影響を及ぼすかを議論する。

### 3. まとめ

直線プラズマ装置 PANTA において中性ガスパフ装置を開発した. He, Ne, Ar パフ実験を行い、次に列挙する変化を得た.

- 1. He gas puff:
  - イオン飽和電流プロファイル:勾配が微減

- ・浮遊電離プロファイル: 勾配が増
- ・揺動スペクトル:低周波数揺動のパワー増
- 2. Ne gas puff:
  - ・イオン飽和電流プロファイル:ほとんど変化なし
  - ・ 浮遊電離プロファイル: 勾配が微増
  - ・揺動スペクトル:ほとんど変化なし
- 3. He gas puff:
  - ・イオン飽和電流プロファイル:密度が全体的に増えた
  - ・浮遊電離プロファイル: 勾配が減
  - ・揺動スペクトル:ガス入射後は、ソースガス圧を上げた際の揺動スペクトルとよく一致した.

# 研究組織

稲垣滋 (九大応力研), 佐々木真 (九大応力研)

#### 電磁的ジャイロ運動論解析結果に基づく乱流輸送係数を用いたダイナミクスシミュレーション

核融合科学研究所 登田慎一郎

磁気核融合エネルギーを実現するためには、乱流輸送の定量的な予測は最も重要な課題の一つである。最近、トロイダルプラズマにおいて乱流輸送に関して、多くのジャイロ運動論的シミュレーションが行われている。トカマク、ヘリカルプラズマにおけるジャイロ運動論的解析結果は実験観測結果と比較されている。トカマクプラズマでは、時刻ステップごとに直接ジャイロ運動論的解析と結合させる輸送シミュレーションが大域的にされている。ヘリカルプラズマにおけるジャイロ運動論的シミュレーションはトカマクプラズマと比べて、はるかに大きい計算資源を使う。なぜなら、前者はヘリカルリップル構造を捉えるために、磁力線に沿った多くのメッシュ点を必要とする。特にヘリカルプラズマでは、非線形ジャイロ運動論的シミュレーションを統合輸送シミュレーションコードと結合させるのは簡単でないので、高速に非線形解析結果を近似することができる予測モデルが望まれている。乱流輸送に関する予測モデルは、大型ヘリカル装置 (LHD) での統合輸送コードの中で他のシミュレーションコード (例えば新古典輸送コード)と、低計算資源を用いて、結合することができる。LHD においてジャイロ運動論的シミュレーションのイオン乱流時間スケール~ $10\mu$ s と輸送シミュレーションの時間スケール~100ms は大きく違うので、ジャイロ運動論的輸送モデルを用いた動的輸送シミュレーションを行うのはチャレンジングな研究課題である。

本研究では、粒子、熱輸送の拡散係数や流東をモデル化するために、数値シミュレーションにより、電子とイオンの両方のジャイロ運動論的方程式を解析した [1]。最初に、イオン温度勾配 (ITG) モードが不安定化しているときに、LHD の高イオン温度放電において、非線形シミュレーションから電子、イオン熱拡散係数を概算した。乱流ポテンシャル揺動と帯状流ポテンシャル揺動に関するモデル関数を電子、イオン熱拡散係数について示した。次に、線形成長率と帯状流の線形応答に関する特徴的な量(帯状流崩壊時間)を評価するために、線形ジャイロ運動論的シミュレーションを行う。モデル関数の二つの量(乱流ポテンシャル揺動と帯状流ポテンシャル揺動)は、混合長概算に関係する線形量と帯状流崩壊時間で近似される。線形シミュレーション結果を熱拡散係数モデルに用いることにより、電子、イオン乱流拡散係数に対する非線形シミュレーション結果を再現することができた。密度勾配が、LHD プラズマでは径方向の数点で、ゼロに近くなるので、粒子輸送に関する信頼できる拡散係数モデルは示すことができなかった。非線形シミュレーション結果を定量的に再現するために、電子、イオン熱輸送に関する準線形流東モデルを提唱した。非線形シミュレーション結果である電子、イオン熱流東は、熱拡散係数のモデルの正確さと同程度で、準線形流束モデルにより再現される。さらに、LHDでの平坦化した密度分布でさえも適用できる準線形粒子流東モデルを提唱した。したがって、ジャイロ運動論的解析結果に基づく、熱拡散係数モデ

ルと準線形流束モデルのような輸送モデルを示した。粒子輸送に関する準線形流束モデルは提唱することができたが、粒子拡散係数モデルは提唱することができなかった。一方、拡散係数モデルは、2つの線形ジャイロ運動論的シミュレーション結果で評価される。準線形流束モデルが非線形解析結果を再現するために概算されるとき、線形解析結果である流束と揺動ポテンシャルの比が、混合長概算に関係する線形量と帯状流崩壊時間に加えて必要である。輸送シミュレーションコードに流束と揺動ポテンシャルの比を取り入れるのは現在のところ困難である。輸送コードにイオンの熱拡散係数モデルを取り入れる方法はすでに報告している[2]。

乱流輸送について、ジャイロ運動論的解析結果に基づいた熱拡散係数モデルや準線形流束モデルを 用いて、動的な輸送シミュレーションを行った [3]。新古典輸送については DGN/LHD データベー スを用いている。イオン温度に関する動的シミュレーションの際に、イオンの熱輸送を評価する ために、イオン熱拡散係数モデルを用いた。電子運動についてもジャイロ運動論的方程式の解析 を行うと、LHD でのショットナンバー 88343 での高イオン温度プラズマの実験結果と矛盾しない、 イオン温度分布に関するシミュレーション結果が得られることがわかった。また、乱流輸送が新 古典輸送よりも優位である。そして、実験結果のイオン温度分布と比べると、輸送について硬直 性 (stiffness) が強いことを示した。低イオン温度プラズマについても同様の解析を行い、イオン 温度分布の実験結果が、シミュレーション結果と矛盾しない。この時、イオン温度勾配不安定性 による乱流輸送が新古典輸送より小さい領域が広い。また、電子熱拡散係数モデルと電子準線形 熱流束モデルを用いて、高イオン温度プラズマと低イオン温度プラズマについて、電子温度分布 に関するシミュレーションを行い、実験結果と比較できるシミュレーション結果を得た。この時、 電子準線形流束モデルは、イオン熱拡散係数モデルを用いて、電子準線形熱流束とイオン準線形 熱流束の比から評価される。電子熱輸送モデリングの際、イオン温度勾配不安定性に対しての電 子温度勾配を含める研究は今後行われる。ジャイロ運動論的乱流輸送モデルを輸送シミュレーショ ンに、低計算機資源で取り入れる方法 [2] を用いた。非線形結果を再現する簡約化モデルを用いた 時に、輸送シミュレーション結果である温度分布は、実験結果と矛盾しないことがわかった。

- [1] S. Toda et al., Phys. Plasmas Vol. 26 012510 (2019)
- [2] S. Toda et al., Journal of Physics: Conference Series 561, 012020 (2014)
- [3] S. Toda et al., *Plasma and Fusion Research* submitted (2019); The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research and The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, November 19-22, 2018, P1-26

# 金属間化合物における空孔型欠陥と水素原子の相互作用に関する研究

# 大阪府立大学工学研究科 堀史説

#### はじめに

物質中の水素の材料への影響は様々な分野で重要な問題である。特に水素脆化や水素貯蔵などの観点から重要な課題の一つである。核融合炉など大量の放射線に晒され結晶として損傷を受けるような特殊な環境下では、その挙動がプラズマの安定化、熱伝導および強度などの材料特性劣化を促進するなど密接な関係を有しており、これらの相互作用について様々な研究が進められている。このような材料中の水素の状態は他の元素に比べて非常に難しく、微量検出や欠陥との結合捕獲状態などの評価は限られた手法で特定のものに限られて来た。加えて合金中の格子欠陥も必ずしも単純な状態で存在するわけではない。このような格子欠陥に対して陽電子消滅法は原子レベルでの空孔の検出に優れ、対消滅時の局所的な電子密度分布を簡便に詳細な評価が可能である。

一方、現実問題として体心立方格子(bcc)からなる金属では水素同位体の貯留が大きな問題になっている。例えばタングステンに照射によって空孔型欠陥が導入されると、多量の水素が捕獲されるという報告がある。しかし bcc 金属が必ずしも同様の水素捕獲が起こる訳ではない。我々のこれまでの研究で同じ bcc 構造を有する金属間化合物でも空孔当りに複数の水素原子が捕獲安定化する合金系があることが計算によって求められている。B2型規則構造を有する Fe-Al 合金での多量水素捕獲と考えられる空孔挙動を陽電子でも捉えてきた。同様に B2 型構造を有する Fe-Rh 合金においては鉄とロジウムの弾き出し関エネルギーが大きく異なるため欠陥種の制御が容易であると考え、これまでは電子線照射前後の陽電子寿命測定と水素放出の実験を行い、Fe-Al 同様に空孔への水素捕獲が確認された。今年度はさらに同時計数ドップラー測定などを積み重ね、照射による空孔種生成の比率およびそれらへの水素捕獲についてより詳しく検討した。

#### 実験方法

アーク溶解にて作成した等比組成(化学量論組成)の Fe-Rh 合金インゴットをおよそ 10 mm×10 mm×1 mm の板状に切出し表面を鏡面研磨した。この試料を  $3\times10^{-4}$  Pa の真空中で  $600^{\circ}$ C、120 時間の焼鈍を行均一化熱処理したものを用い、エックス線回折により B2 単相で特に今回は未照射でできるだけ残留空孔のない試料を事前に陽電子消滅測定で確認した試料を用い電子線照射に供した。電子線照射は京都大学複合原子力研究所(KURRI)にて線形型電子線型加速器を用いて 8MeV の電子線を照射温度  $35\sim40^{\circ}$ Cで照射量  $1\times10^{18}$  e  $1\times10^{1$ 

# 実験結果

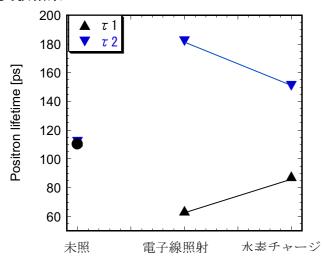


図1 電子線照射後に水素チャージした Fe-Rh合金の陽電子寿命の経時変化

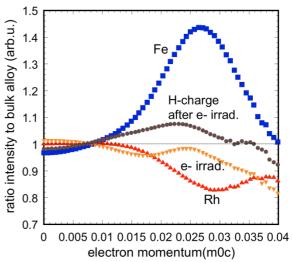


図2 電子線照射および水素チャージした Fe-Rh合金のCDB比率曲線

図1は各試料の陽電子寿命測定結果を示す。 照射によって空孔が導入されていることが わかるが、これまでの寿命計算との比較でロ ジウム空孔ではないかと考えられている。図 2にこれらの試料の同時計数ドップラー拡が りスペクトルの比率曲線を示す。この曲線で は電子線照射後の比率曲線において低運動量

表電子線照射前後のCDBから求めた空孔比率

|        | Fe 空孔:Rh 空孔 |  |
|--------|-------------|--|
| 照射前    |             |  |
| 電子線照射後 | 9:1         |  |

領域が上昇しており空孔が導入されていることが陽電子寿命の結果と一致している。一方、高運動量領域に純鉄の電子分布に対応するプロファイルが確認できる。そこで、このプロファイルから純鉄及びロジウムの電子運動量分布とのフィッティングにより空孔種の同定と存在空孔種の比率を求めた。表にその比率を示す。この結果を見ると鉄空孔が多く導入されいることがわかる。この結果はこれまでの陽電子寿命測定でロジウム空孔が導入されたとの結果に対し整合していないような結果であるが、電子による弾き出し損傷を計算したところ、8MeVの電子ではおよそ8:2の割合で鉄原子の弾き出しが多く起こり、空孔の比率もこれに従うことがわかった。そのため、ロジウム空孔も導入されるが、この照射では鉄空孔が優先的に導入されていたことが明示された。一方、水素注入後は陽電子寿命が減少しており、比率曲線においても低運動量領域が減少していることから、空孔中に水素原子が捕獲されたことが確認された。以上より、捕獲された水素原子は主に鉄空孔への捕獲であり、第一原理計算で予想されていた結果と良い一致を示した。

**謝辞**:本研究を実施するにあたり、共同研究により議論いただきました大澤先生に感謝致します。また、実験を実施するにあたり、電子線照射にご協力頂いた京大複合研の徐准教授及び阿部尚也技師に感謝いたします。

研究組織:堀史説(大阪府大工学研究科)、角倉優雅(大阪府大院生)、鷹野陽弘(大阪府大院生)、Xu Qiu(京大原子炉)、大澤一人(九大応力研)

30FP-6

# 多層グラフェン膜の水素吸収特性に対する窒素添加効果

Effect of doped nitrogen of hydrogen absorption characteristic for multilayer graphene films

名城大学理工学部 土屋 文

Bun Tsuchiya

Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

**目的** 安全でクリーンな水素酸素燃料電池は、火力発電や原子力発電に替わる発電機として世界的に大きな期待を寄せられている。本研究室では、多層グラフェン薄膜を水素(H)供給源とした水素酸素マイクロ燃料電池の開発に取り組んでいる。これまで、本研究室では、ミスト化学蒸着法を用いて作製した多層グラフェン膜は多量の水( $H_2O$ )および H を吸収し、その吸収された H の解離温度は約  $100^{\circ}$ C以下であることを発見した。しかしながら、このマイクロ燃料電池の開発を目指すためには、より低い温度で H を解離する H 供給源を必要とする。本研究では、窒素(N)ドープにより点欠陥を形成させ、H 貯蔵量の増加および H 解離温度の低下を目指すため、イオンビーム分析の一つである反跳粒子検出(ERD)法を用いて、N ドープされた多層グラフェン薄膜内に蓄積された H 濃度を測定し、また、昇温ガス脱離(TDS)法により、H の解離温度を調べ、H 吸収・貯蔵・放出特性に対する N ドープの効果について明らかにすることを目的とした。

実験方法 ミスト化学蒸着法を用いて、 $1.3x10^3$  Pa の真空排気および 1198 K に加熱された石英管内にミスト状のメラミンを含んだメタノールおよび  $2\%H_2$  を含有する Ar 混合ガスを流した後、Cu 板を 2 分間導入して多層グラフェン 薄膜試料を作製した。N ドープ量を変えるために、メラミンを加熱する温度を 423 および 473 K にした。ラザフォード後方散乱(RBS:Rutherford Backscattering Spectrometry)法および光吸収法により、作製された多層グラフェン膜の厚さは約  $8\pm3$  nm (約  $24\pm9$  .層程度)であると評価した。次に、多層グラフェン薄膜試料を恒湿恒温器内に導入し、約  $297\sim303$  K の室温および約 30-40%R.H.の相対湿度の雰囲気中に放置した。空気中の水蒸気が多層グラフェン薄膜内に飽和するまで吸収された後、量子科学技術研究開発機構に既存のタンデム型加速器からの 6.38-6.50 MeV N+イオンをプローブビームとした NRA 法を用いて、H および N 間の核反応(H(15N,  $\alpha\gamma$ )12C)により生成された 4.44 MeVのガンマ線を NaI (TI) シンチレーション検出器により検出し、深さに対する H 濃度分布を数 nm の深さ分解能で測定した。次に、東北大学金属材料研究所に既存のタンデム型加速器からの 2.8 MeV He $^2$ +イオンをプローブビームとした ERD 法を用いて、作製した多層グラフェン薄膜試料を真空雰囲気で室温から約 573 K までの各温度において 10 分間の等時加熱(isochronal annealing)を行い、各温度における捕捉 H 濃度の変化について調べた。また、空気暴露後、九州大学応用力学研究所に設置された TDS 法により、放出ガス種の判別および各ガス種の解離温度を調べた。

**実験結果および考察** 室温から 573 K の温度までの各温度で 10 分間の等時加熱後、ERD 法を用いて測定された N ドープ多層グラフェン膜の ERD スペクトルを測定した。ERD スペクトルから求めた作製後の N ドープ多層グラフェン膜中の水素濃度は、多層グラフェン膜中の水素濃度とほぼ同様で H/C=0.74 であり、NRA 法により求めた結果と一致することがわかった。しかしながら、ERD 法では約 100 nm 以上と深さ分解能が低いため、膜表面上の  $H_2O$  とインターカレーション中の H を分けることができない。従って、縦軸のピーク強度は、N ドープ多層グラフェン膜表面および層間の合計の H 濃度を表す。ERD スペクトルの強度は、加熱温度の増加とともに減少することがわかった。加熱温度に対する N ドープ多層グラフェン膜中の捕捉 H 濃度は、グラファイト中の H 濃度が 673 K まで全く減少しないことに対して約 373 K 以下の低温で除々に減少し、573 K で約 3 割程度まで減少することがわかった。この結果は、多層グラフェン膜中の水素濃度の変化とほぼ同様であった。グラファイトの場合、捕捉 H は 673 K 以上で  $CH_4$  の形状で放出されることが報告されているが、多層グラフェン膜中の捕捉 H は、 $H_2O$  あるいは  $H_2$  の形状で放出されていることが推測された。

TDS 法を用いて、N ドープ多層グラフェン膜を室温から 773 K まで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、N ドープ 多層グラフェン膜から放出されるガス種の判別を行った。バックグランド(試料の無い場合)、チタン水素化物( $TiH_{1.99}$ )、

Cu 板のみ、N ドープ多層グラフェン膜および Cu 板から得られた TDS スペクトルをそれぞれ図 1(a)~(d)に示す。図 1(a)および(b)より、 $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $H_2O$ 、CO、 $CO_2$ がバックグランドとして存在するが、773 K までの加熱により増加しないこと、 $H_2$ が約 500 K で  $TiH_{1.99}$ から放出されることを確認した。次に、図 1(c)より、 $H_2O$  および  $H_2$ が Cu 板から放出されないが、 $CO_2$ および CO がそれぞれ約 500 K および CO が CO

**<u>まとめ</u>** NRA 法、ERD 法および TDS 法を用いて、真空内で約  $573\sim773~K$  まで加熱された N ドープ多層グラフェン膜中の水素濃度変化について調べた。大気に放置された多層グラフェン膜において、多量の  $H_2O$  が表面に吸着され、微量の H が層間に占有されていることがわかった。また、これらの捕捉 H 濃度は約 373~K 以下の低温から除々に  $CH_4$  の形状で放出され、573~K で約 3 割程度まで減少し、それ以上の温度では  $H_2$  の形状で放出されることがわかった。

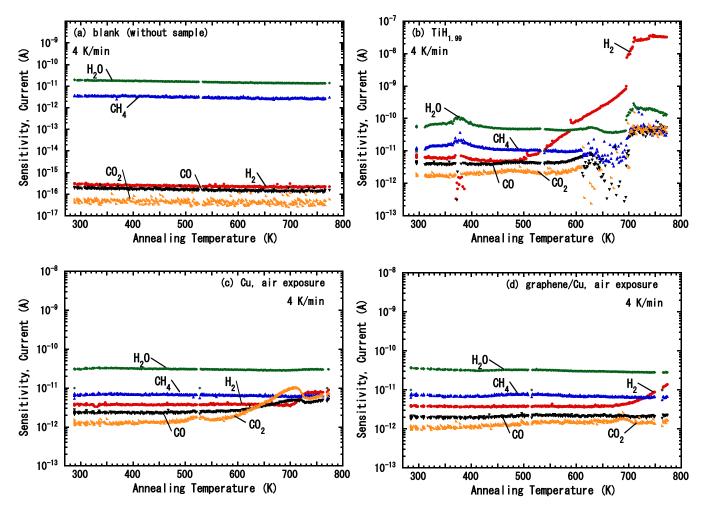


図 1 (a) バックグランド(試料の無い場合)、(b) チタン水素化物( $TiH_{1.99}$ )、(c) Cu 板のみ、(d) N ドープ 多層グラフェン膜および Cu 板を室温から 773 K まで加熱したときに得られた TDS スペクトル。

# ジルコニウム合金中の水素同位体の挙動に関する第一原理計算

琉球大学教育学部 岩切宏友 若狭湾エネルギー研究センター 安永和史 京都大学エネルギー理工学研究所 森下和功 九州大学応用力学研究所 渡邊英雄,吉田直亮

#### 【研究の目的】

ジルコニウム合金は燃料被覆管として非常に優れた特性を有し、多くの軽水炉で利用されている。燃料被覆管として使用を続けていると、水素吸蔵量が増加していくとともに、c 軸方向への収縮ひずみが発生する。これは、ジルコニウム合金中における転位ループの生成が一因となっていると考えられているが、具体的なメカニズムは明らかにされていない。そこで、本研究では第一原理計算により、ジルコニウム合金中における水素の基礎的な挙動や、転位ループとの相互作用等を調べることを目的とした。本年度は燃料被覆管での使用は見込まれていないが、ジルコニウムを含んだ合金の一種であるBe2Zrを試行的な研究対象とし、水素との基礎的な相互作用に関する研究を実施した。

#### 【研究方法】

本研究では、電子状態を考慮した量子力学計算手法として SIESTA コードを使用した。SIESTA では各原子に帰属する実在波動関数を基底関数として用いており、格子欠陥周辺などの局所的な電子状態を知るための効果的手法である。まず、構造最適化された  $Be_2Zr$  結晶を作成し、この構造の格子間位置に水素を付与することで  $Be_2Zr$  中における水素の捕獲位置の解明や全体的な構造の変化、捕獲エネルギーの計算等を行った。k 点サンプリングは Monkhorst-Pack 法で  $4\times4\times4$ 、擬ポテンシャルのカットオフ半径は 300 Ry である。さらに、各原子に作用する力が 0.005 eV/Ang 以下になるまで構造最適化計算を実施した。

## 【研究結果および考察】

 $Be_2Zr$  中における水素の固溶状態を調べるために、 $Be_2Zr$  の格子間位置に水素を配置し、水素を含めた構造最適化及びエネルギー計算、分子軌道計算を行った。第一原理電子状態計算における構造最適化計算は「準安定状態」を探索する手法のため、原子の初期配置の影響を受ける場合がある。特に、本研究で用いた  $Be_2Zr$  は複雑な結晶構造を有する為、水素の初期配置の影響を受けやすい。そこで、 $Be_2Zr$  における結晶構造の対称性を考慮し、結晶構造の性質を代表し得る規約領域内において 9 パターンの初期配置を設定し、それぞれについての計算を行った。その結果、格子間位置における 6 種類の存在位置(サイト)を発見した。各サイトにおける水素の固溶エネルギーを表1に示す。もっとも安定なサイト(Site-1)は 2 個の Be と 3 個の Zr が形作る 6 面体(三方両錐体)の中心であり、このときの固溶エネルギーは-0.929 eV であった。このことは、 $Be_2Zr$  は水素に対して発熱型の合金であることを示しており、大量の水素を固溶しうることが第一原理計算により示された。

次に、Be<sub>2</sub>Zr 中における水素のペアリング効果についての計算を実施した。隣接する格子間サイトに水素が複数存在する場合,近接効果により結合力や反発力が生じ,場合によっては分子化する。

これは  $Be_2Zr$  における水素吸蔵量の上限に影響を与える。ここでは、格子間位置で隣接した 2 個の水素についての計算を行った。水素は表 1 で示したサイトのうち、近接したものを 2 か所選択して配置し、構造最適化計算を実施した。その際、ありうる限りの近接した格子間水素の組み合わせを考慮し、合計 9 パターンについての計算を行った。これを表 2 に示す。その結果、原子間距離が 2.0 Å以下の組み合わせは構造最適化計算の際に水素同士が強く反発し、安定なペアとして存在することができなかった。この結果により、 $Be_2Zr$  中の格子間位置においては水素同士のブロッキング効果が作用することが明らかとなった。この結果より、 $Be_2Zr$  中における水素の最大固溶量の導出を見積もると  $Be_2Zr$  のユニットセル中に最大 4 個の水素が固溶できることになり、3.53 化%であることが示された。

表1 各格子間サイトにおける水素の固溶エネルギー

| Site-1                             | Site-2       | Site- 3      | Site- 4                            | Site- 5                            | Site-6                             |
|------------------------------------|--------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| (Be <sub>2</sub> Zr <sub>3</sub> ) | $(Be_4Zr_2)$ | $(Be_4Zr_2)$ | (Be <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> ) | (Be <sub>2</sub> Zr <sub>4</sub> ) | (Be <sub>6</sub> Zr <sub>2</sub> ) |
| 6面体                                | 8面体          | 8面体          | <b>4</b> 面体                        | 8面体                                | 12面体                               |
| -0.929 eV                          | -0.688 eV    | -0.641 eV    | -0.540 eV                          | -0.099 eV                          | -0.008 eV                          |

表2 Be<sub>2</sub>Zr 中の格子間水素のペアリング効果

| 2個の水素配置           | 原子間距離(Å)<br>(計算前) | 原子間距離(Å)<br>(計算後) | 固溶エネルギー(eV) | 水素1個当たりの固溶<br>解エネルギー(eV) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------|--------------------------|
| Site1-Site1       | 2.39              | 2.44              | -1.85       | -0.92                    |
| Site1-Site2       | 1.46              | 解離(反発による)         | _           | -                        |
| Site1-Site3       | 1.19              | 解離(反発による)         | _           | -                        |
| Site1-Site4       | 2.30              | 2.29              | -1.43       | -0.72                    |
| Site2-Site2(第1近接) | 1.68              | 解離(反発による)         | _           | -                        |
| Site2-Site2(第2近接) | 2.07              | 解離(反発による)         | _           | -                        |
| Site3-Site3       | 2.07              | 解離(反発による)         | _           | -                        |
| Site4-Site4(第1近接) | 2.07              | 2.09              | -1.10       | -0.55                    |
| Site4-Site4(第2近接) | 2.73              | 2.60              | -1.06       | -0.53                    |

#### (成果発表)

特になし

# 構造材料中の水素挙動に及ぼす水素導入方法の影響

Influence of Charging Methods on Hydrogen Behavior in Structural Materials

茨城大学工学部 車田 亮

### 1. 研究目的

核融合実験装置等の構造材料は、プラズマ対向材料を透過した中性子照射損傷を受けるとともに、重水素やトリチウム等が材料内部に拡散すると考えられる。一方、構造材料のき裂進展や破壊には、応力腐食割れ(SCC)や活性経路割れ(APC)等がしばしば問題となり、その1つの要因として材料中の水素の影響が懸念されている。そこで、本研究では、構造材料(ステンレス鋼やアルミニウム合金等)中の水素の透過・放出挙動が、水素導入方法(電解水素チャージ法、水素プラズマチャージ法等)の違いによりどのように変化するかを調査することを目的とする。そのために、茨大の電解水素チャージ装置や水素プラズマチャージ装置と、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置や SEM・TEM の微細組織観察装置を共同研究に利用する。その結果、材料に関する豊富な知識と経験を共有しながら核融合実験装置等の構造材料の高性能化研究を推進するものであり、両者にとってメリットが大きい。

#### 2. 実験方法

#### 2.1 水素プラズマチャージ法

本年度はまず、研究の第一段階として、茨大の水素プラズマチャージ装置 (イオンプレーティング装置) により、材料への水素導入を試みた。水素導入の有無については、アルミニウム基板上の酸化アルミニウムが水素プラズマにより、純アルミニウムに還元されたことで確認する。

本研究では、非平衡の反応を低温で発生させることが期待できるプラズマを利用して、酸化アルミニウムの水素プラズマによる還元を試みた。

試料としては、表面を硫酸法による陽極酸化したアルミニウム板を用いることにした。アルミニウムが基板となることによりプラズマ処理時に電位を印加しやすいうえに、厚い膜を生成することができ、結果を容易に評価できるためである。まず、0.5mm 厚に圧延した 4N の純アルミニウム板から縦 15mm、横 50mm の試料を切り出し、陽極酸化およびプラズマ照射を行う面に#400 から#2000 までの湿式研磨を施した。その後、試料表面に付着している汚染物などを除去するため、アルカリ洗浄とデスマット処理を行った。アルカリ洗浄には、10%水酸化ナトリウム水溶液を用いて、室温で 1 分間の条件で洗浄を行い、さらに、10%硝酸水溶液を用いて、室温で 1 分間の条件でデスマット処理を行った。また、アルカリ洗浄の前後とデスマット処理後には、水道水による超音波洗浄を十分に行った。

その後、10%硫酸水溶液を用いて、室温で 10 分間の条件で陽極酸化処理を行った。陽極酸化皮膜のついたアルミニウム基板について、イオンプレーティング装置(AOT-IP-500W)を用いて、水素プラズマを照射した。陽極酸化前後およびプラズマ照射前後の各段階において、試料表面の SEM/EDX 分析を行い、陽極酸化により生成した酸化アルミニウムが、水素プラズマ照射により、純アルミニウムに還元されたかどうかを確認する。また、水素プラズマを照射した後、基板温度が 35℃以下まで低下した段階で、真空中で金プローブを基板に接触させ、金プローブと基板が接触してから、試験片の中心に向かって 40  $\mu$  m 地点と 50  $\mu$  m 地点間(10  $\mu$  m)を照射面に沿って移動させ、接触抵抗や電圧電流特性を測定し,酸化アルミニウムが還元されたかどうかを確認する。

#### 3. 実験結果及び考察

図1に水素プラズマの照射原理を示す。真空状態で、直流電圧により、チャンバー内の水素ガスを イオン化し、試料にマイナス電荷を印加することで、試料表面に水素プラズマを導入させる。

図2に水素プラズマ照射前後のEDX分析結果を示す。水素プラズマ照射前後において、原子数濃度分布の変化が認められず、SEMによる表面の膜厚の変化も確認できなかった。したがって、今回の実験

では、材料表面への水素の導入はできなかった。今後の対策として、試料温度を上げての再実験や他のプラズマ照射装置(UBMS:UnBalanced Magnetron Sputtering)での実験を再検討する必要がある。

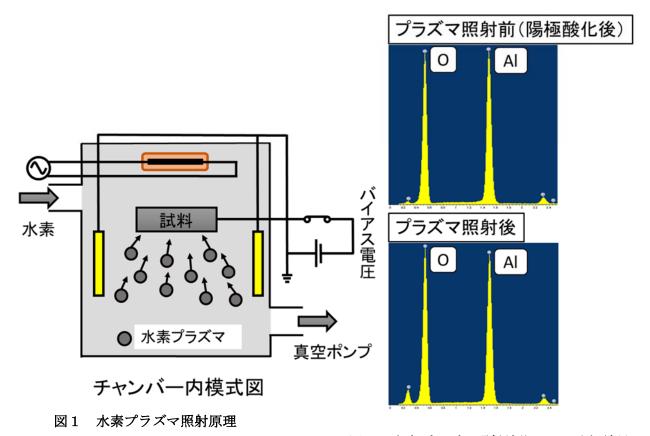


図2 水素プラズマ照射前後の EDX 分析結果

#### 4. まとめ

本研究は、核融合実験装置等の構造材料中の水素挙動が、水素導入方法によりどのように変化するかを解明することにより、重水素やトリチウムと構造壁との相互作用を抑制・制御できる知見を得て、核融合実験装置等の構造材料の健全性および実用寿命の延長に貢献することを目標に、構造材料(アルミニウム合金)の表面を鏡面仕上げした後、水素プラズマチャージ装置(イオンプレーティング装置 AOT-IP-500W)を用いて、材料表面に水素原子の導入を試みた。しかし、材料表面への水素の導入が出来なかったので、今後の対策として、試料温度を上げての再実験や他のプラズマ照射装置(UBMS:UnBalanced Magnetron Sputtering)での実験を再検討する必要があった。

# 参考文献

(1) 井上泰一, 伊藤吾朗, 佐藤直幸, 池畑 隆, 中村雅史, 第 134 回春期大会講演概要集, 軽金属学会, 熊本大学, (2018. 5. 26-27), pp. 71-72.

### タングステンの熱負荷特性に及ぼす再結晶の影響

茨城大学工学部 車田 亮

【目的】プラズマ閉じ込め装置のダイバータ板の表面材料としてスパッタリング特性や熱特性が良好なタングステン(W)が使用されている。しかし、Wは低温脆化、再結晶脆化、照射性化の問題がある。特に、高熱負荷を受けるタイバータ板では、再結晶脆化が問題である。このため、再結晶温度が高く、さらに、高温強度が高い K や La ドープW合金が試作されている。しかし、これらのW合金は、ディスラプションや ELMs 時のパルス熱負荷より突沸等が発生し損耗量が大きいことが明らかとなっている。これに対して、研究代表者らは、熱間等方圧加圧法(HIP)により製作されたW(HIP-W)について研究を進め、最も普及している粉末焼結Wとは組織が異なるためその特性も大きく異なり、たとえば、溶融接合用の電極に使用した場合特性が良好なことを明らかにしてきた。また、粉末焼結Wのような圧延組織を持つWとは異なり残留歪みも小さいと考えられることから再結晶した際の結晶粒の粗大化の影響も少ないことが予想される。本研究では、粉末焼結 W と共に、HIP-Wの再結晶挙動やこれらが熱負荷特性に及ぼす影響を明らかにし、ダイバータ板の表面材料としての性能を評価することを目的とする。

【実験及び解析】本年度は、W 圧延材、及び再結晶 W 材に対する電子ビーム熱負荷実験について報告すると共に、昨年度報告した強度試験結果との対応について考察した。試料はアライドマテリアル製のW 圧延材、及びこの W 圧延材を再結晶処理した再結晶 W 材を使用した。試料サイズは 10mm×10mm×1mm である。電子ビーム熱負荷装置を用い、試料は Cu 製の試験台に 5mm φ の孔が開いた W 製の押さえ板で機械的に固定した。温度測定には低温、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測定した。電子ビーム熱負荷装置の加速電圧は 20kV でビームサイズは約 3mm φ である。また、試料に 100V の電圧を印加し、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熱流束を求めた。2 秒間の照射で電子ビームの照射部の最高到達温度が約 1300℃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 サイクルのトータルの時間を 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。さらに、これらの実験結果を引張試験における応力・歪み曲線の温度依存性を元に考察した。

【結果】図1に繰り返し熱負荷実験時のビーム電流と試料温度を示す。ビーム電流を調節することで、最高到達温度が約1300℃となる温度変化を繰り返すことができた。また、表面温度は照射から2秒後に最高温度に達し、ビーム OFF後、表面温度は下降し、次の照射開始と共に上昇している。図2に繰り返し熱負荷を行った試料の SEM 像を示す。繰り返し熱負荷前では、W圧延材の表面は滑らかで粒界部に凹凸などは識別できない。再結晶 W 材では、表面は滑らかであったが、SEM 像の明暗により粒界が確認できた。これは、再結晶材であるため、結晶方位の違いによる入射電子線のチャンネリングにより発生する SEM 像の明暗がはっきりしているためであると考えられる。熱負荷を20回繰り返し(20サイクル)後の観察では、試料表面が変形していた。W圧延材では結晶内に白線が確認でき、塑性変形による転位の移動により生じたすべり線であると考えられる。また、結晶粒界にも変形が生じていることがわかる。再結晶 W 材では W圧延材よりも、表面の変形が大きい。結晶粒内は W圧延材より多くのすべり線が見られ、結晶粒界も凹凸が生じていた。40サイクル後では、W圧延材、及び再結晶 W 材共に新たなすべり線や結晶粒界部分の凹凸に大きな変化は見られなかった 70サイクル後では、W圧延材では多少凹凸が激しくなっているが、大きな変化は見られなかった。また、再結晶 W 材も同様に顕著な変化は確認できなかった。200サイクル後では、特に W圧延材の損傷が急激に進み、表面の凹凸は激しくなり、結晶粒内、結晶粒界共にミクロなき裂が確認された。

【考察】図 2 に示されたように 20 サイクル後の W 圧延材では結晶内と結晶粒界で変形が見られたが、 再結晶 W 材ではより大きな塑性変形によると思われる表面形状変化が確認された。また、引張試験の 結果、再結晶化により降伏応力が約 1/3 に低下すると共に、延性が発現する高温では、W 圧延材では約 10%の伸びに対して、再結晶 W 材では約 60%近く伸びることができることが分かった。従って、再結 晶 W 材では低い応力で塑性変形し、さらに伸び量も大きいため W 圧延材と比較し大きな表面形状変化が発生したものと考えられる。一方、さらに繰り返し熱負荷を加えた 200 サイクル後では、W 圧延材で 微細な表面形状変化やミクロなき裂が発生している。これは、W 圧延材の場合は延性が発現する高温で

も伸びは10%と再結晶材に比べて小さいため、ミクロなき裂等の破壊が発生したものと考えられる。また、20サイクルから70サイクルまでは、W圧延材、及び再結晶W材共に大きな表面形状変化は見られなかった。これは、初めの数回で塑性変形を起こした後硬化し、塑性変形による表面形状変化が起こりにくいためであると考えられる。しかし、W圧延材ではさらに繰り返し熱負荷による熱疲労により欠陥が蓄積され、同じ応力でもき裂発生による破壊につながったものと考えられる。また、延性が発現する高温では、再結晶W材では、粒界における破壊応力よりも粒内での降伏応力が小さいため、粒界破壊は発生しなかったものと考えられる。

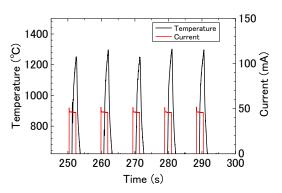


図1 電子ビーム照射実験中の 電流と表面温度変化(W 圧延材)

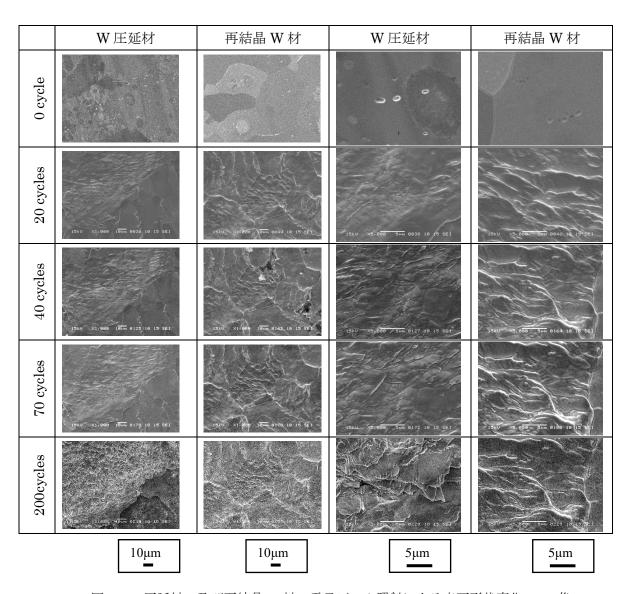


図2 W圧延材、及び再結晶W材の電子ビーム照射による表面形状変化(SEM像)

#### 収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 安永和史

#### 1. 緒言

昨年度は、重イオン照射されたジルカロイ 2 (Zry-2) 試料中の損傷及び非損傷領域の微細組織を比較することにより、製造時からの存在と考えられる水素化物の弾き出し環境下での挙動を調査した。その結果、弾き出し損傷により 150 nm 未満のサイズの水素化物の密度が低下する現象が確認され、水素化物と弾き出しにより生じた空孔との反応により水素 (H) が Zr 母相中に再固溶したと考察した。

ジルカロイ 4 (Zry-4) は、加圧水型の軽水炉 (PWR) の燃料被覆管材料として用いられている。Zry-4 の Zry-2 と異なる特徴は、成分元素に Ni を含まないこと及び製管時の加工に伴う転位が残存していることである。本年度は、Zry-4 に元来存在する析出物について、その構成元素・サイズ・体積密度を調査した結果について報告する。

#### 実験方法

試料は、Zry-4 の厚板をダイヤモンドワイヤーソーで六方晶の a 面に平行に切断後、ダイヤモンドシートで手研磨した 100  $\mu m$  厚の板状試料である。板状試料は 3  $mm\phi$ の円盤形に打ち抜き、電解研磨法(ツインジェット法)やイオン研磨 法を併用して TEM 観察用に薄膜化した。ツインジェット電解研磨には九州大学応用力学研究所の TenuPol-5 を、イオン 研磨には若狭湾エネルギー研究センターの PIPS(PRECISION ION POLISHING SYSTEM、Model 691、Gatan)を それぞれ用いた。ツインジェット法による薄膜化条件は、電解液としてメタノール 950 ml、過塩素酸 50 ml の溶液を用い、25 vl 、40 vl である。イオン研磨による薄膜化条件は、円盤試料の中心領域が開孔するまで試料表裏を複数回反転し ながら 6 vl を収 の Ar イオンを Ry 大射角は 6° である。 さらに、仕上げ加工として 2 vl の Ar イオンを 入射角 6° で 10 vl min 照射した。ION BEAM MODULATOR は DOUBLE、2 つのイオン源配置は共に TOP である。このイオン研磨により、ツインジェット研磨では得にくかった極薄領域を開口部周辺にもつ TEM 観察に適した試料が作製された。試料の微 細組織観察には透過型電子顕微鏡(TEM、JEM-3000F、JEOL)を用い、STEM-BF(Scanning Transmission Electron Microscopy-Bright Field)像及び STEM-EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)マッピングにより元素分析した。電子の加速電圧は 300 vl である。

#### 2. 結果および考察

図1 左は Zry-4 薄膜の STEM-BF 像(a)、Fe 及び Cr の分布を示す STEM-EDS マッピング(b、c)、これら全てに Zr の分布を重ね合わせた像(d)である。厚膜(電子線の透過強度が低く黒く観察される領域)から試料端の極薄膜(透けて観察される領域)を含む領域について特性 X 線分析を試みた。STEM-BF 中の黄色破線の矩形領域がそれで、白矢印方向に X 線の発生しない真空領域を終端に含めた。厚膜領域には、緑および赤の強度が強い点が観察され、それらの位置関係も一致していることから、Fe 及び Cr を含む析出物が存在していることが分かる。厚膜領域の析出物は STEM-BF 像では電子線透過量が低いため確認できなかったが、長時間の電子線の走査により発生した特性 X 線の積算による元素分布像により確認可能となった。体積密度が低い対象物の場合、その存在を多数捉えるためには、当然ながら観察すべき体積が増大する。そこで、TEM の拡大率としては比較的低倍率の 25 k で広範囲かつ十分な厚みも有する領域で観察した。今回用いた特性 X 線の積算による低密度の微視的対象物の撮像手法は、厚膜試料中の微視的組織に元素分布の局所的なゆらぎがある際には、その可視化及び定量化に有効な手段となり得ると考える。図 1 右は Fe、Cr、Zr の特性 X 線強度の位置依存性を示すグラフである。試料端には Zr の特性 X 線強度が低くかつその増加が緩やかな領域が存在している。一方、試料端から厚膜領域の方向には急激に特性 X 線強度が増加している。膜厚評価には 0002 ブラッグ反射時に生じる等厚干渉縞を用いた。300 kV 電子の Zr 中での消衰距離は 45 nm である。また、Zr の特性 X 線強度変化も厚み評価

に利用した。まず、粗大析出物については d の点線で囲まれた領域( $2~\mu m$  四方)に存在する析出物の個数から面密度を算出、その後、楔形を考慮にいれた厚みで除して体積密度を導出した。厚膜領域には体積密度  $8.3x10^{18}/m^3$  の Fe および Cr を含む析出物が存在していると評価された。粗大析出物のサイズ(長軸の測定値)は  $47\sim330~nm$  の範囲に分布し、平均サイズは 130~nm と評価された。

図 2 は試料端の極薄領域において観察された微小析出物を示す STEM-BF 像である。微小析出物は近傍のもの同士が合体して成長する傾向があり、例として白破線で示した。微小析出物の体積密度は、 $2.4 \times 10^{23} / m^3$  と評価された。また、微小析出物のサイズは  $4 \sim 33$  nm の範囲に分布し、平均サイズは 14 nm と評価された。サイズは粗大析出物と同様に長軸の測定値である。微小析出物の元素の組成については、現時点では不明である。微小析出物は粗大析出物の体積密度及びサイズを比較すると、体積密度は 4 桁高く、サイズは 1 桁小さい値をもつことが明らかとなった。

#### 3. まとめ

試料端近傍の極薄膜及び数百 nm 厚の厚膜を共に一視野に含む Zry-4 を TEM 観察することにより、サイズ及び数密度 が顕著に異なる析出物の存在を明確にした。粗大析出物は Fe-Cr 系、微小析出物の成分は現時点で不明である。

#### 研究組織

研究代表者:安永和史(公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター主任研究員)

研究世話人:渡辺英雄(九州大学応用力学研究所准教授)

研究協力者:島袋瞬、牟田口嵩史(九州大学応用力学研究所技術職員)

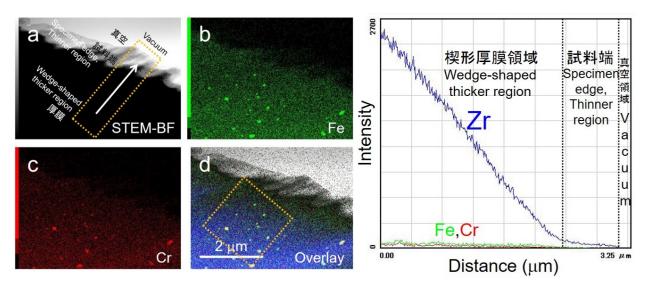


図 1 Zry-4 の微細組織の STEM 明視野像及び元素マップ (左図)。試料厚さを示す特性 X 線強度 (右図)。

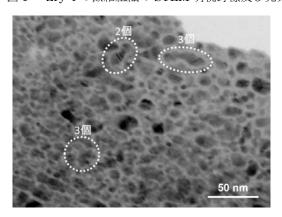


表1 Zry-4 に含まれる析出物のサイズ及び体積密度。

|       | サイズ (nm) | 体積密度 (m <sup>-3</sup> ) |
|-------|----------|-------------------------|
| 粗大析出物 | 130      | 8.3x10 <sup>18</sup>    |
| 微小析出物 | 14       | 2.4x10 <sup>23</sup>    |

図2 試料端の極薄領域において観察された微小析出物。

# データ駆動的手法に基づいたトロイダルプラズマの熱輸送特性の理解

#### 核融合科学研究所 ヘリカル研究部 横山 雅之

トロイダルプラズマの熱輸送モデリングを、多数の実験や熱輸送解析結果をデータベースとして、統計的手法 や、いわゆる「データ駆動科学」的手法によって行う試みを行っている。現在の実験での熱輸送特性を説明しう るモデリングを行うとともに、新規の装置や将来の核融合炉の運転制御において、データベース作成のための"学 習実験"を経て同様のデータ駆動的モデリングを行うことで、到達温度などを簡便かつ短時間で予測する上での 有望な手法として確立することが期待される。

統計手法の端緒として、LHDプラズマにおけるイオン熱輸送係数の回帰式導出を行った [Ref: M.Yokoyama, Plasma and Fusion Res. 9 (2014) 1302137, A Statistical Approach for Predicting Thermal Diffusivity Profiles in Fusion Plasmas as a Transport Model.] 際のデータベース (イオン温度 2~7 keV の多数の実験結果に対して、LHD 実験解析型の統合輸送解析スイート TASK3D-a による熱輸送解析を行った結果:およそ 3000 のイオン熱輸送係数解析データが含まれる)を九州大学の共同研究者との間で共有した。このようなデータベースの共有は、データ駆動手法の核融合研究への今後の展開にとって重要なステップである。

赤池情報量規準 (AIC) を用いた説明変数の選択、洗濯された変数でのモデルのあてはめ (goodness of fit) の 向上などによって、拡散描像を仮定した際のイオン熱輸送係数が、それぞれのローカルな位置でのイオンのラーマー半径 (プラズマ小半径で無次元化)、電子温度とイオン温度の比、イオン温度勾配スケール長 (プラズマ大半径で無次元化) などで決定係数 0.93 というあてはまりの良さで記述できることが最近示された。イオン温度勾配の情報をモデルのあてはめに用いることができる点が、従来のゼロ次元のエネルギー閉じ込め時間のスケーリング則と質的に異なっている特長であり、これにより、イオン熱輸送係数が温度勾配にも依存しているという特性も浮かび上がっている。

従来の理論的議論に基づく理解と相補的に、このようなデータ駆動手法を応用していくことで研究の進展が図 られていくものと期待している。

# 運動論的プラズマ・シミュレーションと実験との直接的な Validation 解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 沼波 政倫

#### 研究の目的

磁場閉じ込め系におけるプラズマ輸送機構の解明と輸送予測は核融合研究における最重要課題の一つである。プラズマの位相空間分布関数の時間発展を扱うことが出来る運動論的な数値解析手法は、このプラズマ輸送現象を第一原理的に評価し得る強力な手法として広く用いられている。近年のプログラムコード開発の進展と大型計算機の性能向上によって、詳細な計算結果を与えられるようになってきたが、一方で、より定量的な解析や輸送予測、そして、計算結果の妥当性確認といった数値計算の信頼性に関する課題が重要になってきている。こうした背景の下、本研究課題では、ジャイロ運動論的シミュレーションによるプラズマ乱流解析と、ドリフト運動論的シミュレーションによる新古典輸送解析に対して、これまでに実施した数値計測技法 [1] を用いた実験計測模擬を行い、実際のプラズマ実験での観測結果と直接的な比較を行うことで、数値シミュレーションの定量的な Validation の実現を目指す。特に、前年度までの共同研究で進めてきた位相コントラスト・イメージング (PCI)による数値計測模擬や、重イオンビームプローブ (HIBP)を模擬した電場測定などを実際のプラズマ配位等を対象に実施した運動論的シミュレーションの計算結果に適用し、運動論的シミュレーションの Validation 手法を発展させる。

# 研究方法

本研究課題では、局所フラックス・チューブ配位上でのプラズマ乱流現象を扱う局所ジャイロ運動論的コード「GKV」[2] による磁場閉じ込めプラズマ乱流輸送シミュレーションと、ドリフト運動論に基づいて大域的な取り扱いが可能な新古典粒子コード「FORTEC-3D」[3] による新古典輸送シミュレーションの計算結果を対象にして進める。ここで得られるジャイロ運動論的シミュレーションでの乱流揺動データや、新古典シミュレーションでの粒子密度分布データを計測モジュールへ渡し、それを実際の観測手法を模擬しながら計測できるよう、下記に挙げる解析を進める。

- 乱流揺動の模擬計測と磁力線ラベル依存性の解析 前年度までの研究で課題となっていた単一の磁力線ラベルのフラックスチューブにおける乱 流シミュレーションを拡張し、異なる磁力線ラベルに対するフラックスチューブを用意し、 その上で GKV シミュレーションを実行し、そこで得られた乱流揺動分布データ (3 次元空間上の密度揺動分布データ) に対して、PCI 計測モジュールを用いて揺動スペクトルを取得 する。この結果を実験で観測されたデータと直接比較し、より正確で定量的な輸送解析を進 める。
- 新古典シミュレーションと電場計測模擬 FORTEC-3D コードによる新古典粒子シミュレーションでの密度分布データを利用し、重イオン・ビーム・プローブ (HIBP) 計測モジュールでの電場計測を目指す。特に、近年、その重要性が指摘されている磁気面上のポテンシャルの磁気面平均からのずれの効果を反映したシミュレーション・データに関する計測模擬を目指し、対象となる新古典輸送シミュレーションの実行と、計測モジュールに渡すべきポテンシャル分布を計算する。

#### 今年度の成果

平成 30 年度に実施した乱流揺動の計測模擬研究では、LHD 配位において異なる磁力線ラベルを持つ別々のフラックスチューブ上での GKV による乱流シミュレーションを実行し (図 1)、そこから得られる乱流揺動分布データに対する揺動計測模擬を実施した。線形計算による予備解析では、不安定性成長率等に磁力線ラベル依存性は殆どないことが確認されていたが、今回の非線形乱流シミュレーションでも、乱流揺動の波数スペクトルや帯状流成分の時間発展等について、磁力線に対する明確な依存性は確認されなかった。この乱流シミュレーションで得た揺動分布データに対する PCI 模擬計測結果についても、同様に磁力線ラベル間に差異はなく、ほぼ同一の計測結果を得た。従って、少なくとも LHD 配位においては、磁力線ラベルを区別することなく、乱流揺動の計測模擬を実施できることが示された。

次に、FORTEC-3D コードによるドリフト運動論的粒子シミュレーションを実行し、新古典輸送解析で得られる粒子分布から、HIBP 数値計測模擬ツールに適応可能なポテンシャル分布の計算を進めた。ここでは、磁気面平均量ではなく、磁気面上で変異分布を持ち、かつ径方向にも分布を持つ3次元分布としてポテンシャル分布データを計算する。これは、上述のように、粒子輸送研究の分野でその重要性が指摘されている磁気面上のポテンシャル分布の磁気面平均からのずれの効果をダイレクトに取り入れられたデータに対応している。また、ここで取得した3次元ポテンシャル分布のデータにより、HIBP 計測ツールへの適用が可能になる。

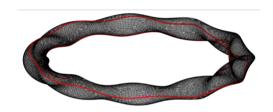


図 1: LHD 配位における磁力線。フラックスチューブ乱流シミュレーションでは、ある特定の磁力線ラベルの近傍における局所乱流を扱っている。

#### まとめ

我々はこれまでに、プラズマ輸送の現象に対して、ジャイロ運動論やドリフト運動論に基づいた第一原理シミュレーションを用いて、定性的な議論のみならず、実験結果の定量的な再現をも目指し、研究を進めてきた。近年の計算機性能の大幅な向上にも助けられ、径方向の輸送フラックスなど1次元的な物理量に対しては、実験結果を再現し得る計算結果も得られてきた。しかし、実験との定量的な比較や再現には、詳細な実験観測データに対して、シミュレーション結果についても同等のデータ解析を行う必要がある。その中にあって、実験と対等な条件下で行う数値計測模擬は、計算機シミュレーションと実際の生の実験データとを、ダイレクトに比較できる最終的な Validation 手法の一つである。本共同研究課題では、PCI 計測と HIBP 計測の数値模擬に着目し、定量的な数値計測模擬を進めてきたが、今年度では、局所乱流シミュレーションの磁力線ラベル依存性に対する評価を行い、計測模擬についての妥当性を確認した。さらに、HIBP 計測模擬に対応できるよう、新古典シミュレーションからポテンシャルの3次元分布データを取得した。これを電場計測模擬に適用し、電場計測についても、実験観測との定量的な比較および Validation 解析を進めていきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] N. Kasuya, et al., Plasma Sci. Technol. 13, 326 (2011).
- [2] M. Nunami, et al., Plasma Fusion Res. 5, 016 (2010).
- [3] S. Satake, et al., Plasma Fusion Res. 3, S1062 (2008).

### LIF を用いた直線装置 PANTA における境界領域の高精度中性粒子計測

# 九州大学 総理工学研究院 寺坂健一郎

# 目的

本研究の目的は、直線装置 PANTA における中性粒子の温度や速度を計測し、流れ場の構造形成における役割を検討することである。近年の研究から、乱流プラズマ中の最終的な流れ場の分布を決めるためには、減衰力や境界条件が重要な情報となる。こうした効果をもたらす重要な自由度として中性粒子がある。本研究では、高精度レーザー誘起蛍光ドップラー分光システムを PANTA に導入し、イオンや中性粒子の速度や温度を計測し、プラズマ流形成に対する中性粒子効果(すなわち減衰力や境界条件)を実験定量的に調査することを目的とする。また、九州大学の直線装置 HYPER-II における装置間比較実験を行うことで、流れ形成の物理素過程に関する普遍性を抽出する試みに着手した。

# 結果

本年度の研究では、中性粒子計測用のレーザー誘起蛍光 (LIF) システムを直線 装置 PATNA に実装することを目指したシステムの開発を行った。初めに、LIF 計測に実績のある九州大学の HYPER-II 装置において入射系や測定条件の最適

化を行った。プラズマ自発光に埋もれた微小な LIF 信号を抽出するためにロックイン検出法を用いることで、定常プラズマ中の準安定アルゴン原子のLIF スペクトル (速度分布関数)を得ることに成功した。飽和吸収分光スペクトル [図 1(a)]を用いて計測系の精度を評価したところ、10 m/s 程度の流れを識別可能であることが明らかとなった。図 1(b)は、 HYPER-II およびPANTA 装置で典型的な実験領域となる導入ガス圧力 0.1 Pa の場合の LIFスペクトルで、流速 30±5 m/s、中性粒

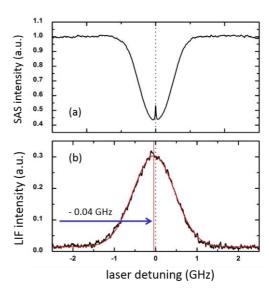


図 1. 典型的な (a): 飽和吸収分光 スペクトルと(b): LIF スペクトル。

子温度 0.045 eV であり、中性粒子の運動量密度や圧力がプラズマの運動量密度 や圧力に匹敵することが明らかとなった。

次に、本システムを PANTA に 導入するために、図 2 のように既 存のイオン計測用の LIF システム に中性粒子計測用のユニットを 組み込んだ。中性粒子計測用に 772 nm の波長可変半導体レーザーを用いた。従来のシステムと光軸を合わせることで、電気光学変調器 (EOM) を用いた振幅変調や 波長計や Fabry-Perot 干渉計による波長較正をミラー1 枚の切り替えで可能にし、効率的な計測が可能なシステムを構築した。また、 径方向や周方向に加え、軸方向に

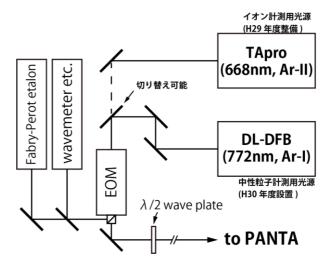


図 2. PANTA に構築した LIF システム の概観。中性粒子計測用のシステムを 新たに導入。

もビーム入射が可能なシステムを整備した。

PANTA における中性粒子 LIF 計測の初期実験として、吸収分光計測を行ったところ、準安定アルゴン原子の吸収波長で有意な吸収が確認できた。LIF 信号については信号-ノイズ比の改善が必要であり、今後はビームの集光や受光システムなどの最適化を行うことで乱流プラズマや過渡現象中の中性粒子の速度分布関数計測を順次進める予定である。

# 成果報告

[1] 安部瑛美夏、寺坂健一郎、他 3 名、「HYPER-II 装置におけるイオンと中性粒子の流れ構造形成」、第 35 回 プラズマ・核融合学会 年会、大阪大学 2018.12.4 [2] 青木大輔、小菅佑輔「エンストロフィーを最小化する流れ構造に対する中性粒子の影響」 プラズマ核融合学会 九州沖縄山口支部 第 2 2 回支部大会2018.12.15

#### 研究組織

代表者:寺坂健一郎 (九大総理工)

所内世話人:小菅佑輔

研究協力者:稲垣滋(九大応力研)荒川弘之(島根大学)

タングステンにおける複合イオン照射下の欠陥形成と水素同位体滞留ダイナミックス 静岡大学学術院理学領域 大矢恭久

#### 【目的】

核融合炉プラズマ対向材料であるタングステン (W) には、中性子等の高エネルギー粒子が入射し、水素同位体の捕捉サイトとなる照射欠陥が形成される。そのため、核融合炉における水素リサイクリングを理解する上で、照射欠陥形成と水素同位体・滞留挙動を関連付けることが重要となる。しかし、核融合生成物であるヘリウム (He) や炉内不純物である炭素 (C) が W に入射すると、He バブルや C-W 混合層が形成するため、中性子や重イオンの単独照射に比べて、水素同位体滞留挙動が複雑化することが予想される。そのため、本研究では鉄イオン (Fe²+) 照射によって欠陥を導入した W に対して、C+・He+同時照射を行い九州大学応用力学研究所の透過電子顕微鏡 (TEM) を用いて照射欠陥および He バブルの挙動の観察を行った。また、重水素 (D)イオン照射・昇温脱離法 (TDS) によって D 滞留挙動評価を行うと共に X 線光電子分光法 (XPS)分析を行い、欠陥導入 W 中の C+・He+同時照射が水素同位体滞留挙動に及ぼす影響を評価した。

#### 【実験】

試料としてアライドマテリアル社製歪取加工済多結晶 W( $10\,\mathrm{mm}^\circ$ ,  $0.5\,\mathrm{mm}^\mathrm{t}$ )を用いた。量子科学技術研究開発機構(QST)高崎量子応用研究所の  $3\,\mathrm{MV}$  タンデム加速器(TIARA)を用いて、室温にて  $6\,\mathrm{MeV}$  Fe²+照射を  $0.3\,\mathrm{dpa}$  まで行った。その後、Fe²+照射 W 試料に静岡大学にて三種イオン同時照射システムを用いて、イオンエネルギー $10\,\mathrm{keV}$  C+および  $3.0\,\mathrm{keV}$  He+をイオンフラックス  $1.0\times10^{17}$  C+(He+) m² s¹ にて、 $1.0\times10^{21}$  C+(He+) m² まで室温にて C+・He+を同時に照射した後、九州大学応用力学研究所の透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて欠陥形成について観察した。また、C+・He+照射 W に対してイオンエネルギー $1.0\,\mathrm{keV}$  D₂+をイオンフラックス  $1.0\times10^{18}$  D+ m² s¹ にて、 $1.0\times10^{22}$  D+m² まで室温で D+照射を行い、昇温速度  $0.5\,\mathrm{K}$  s¹ にて室温から  $1173\,\mathrm{K}$  まで TDS を行った。さらに、XPS にて炭素の化学状態の評価も行った。

#### 【結果・考察】

図 1 に  $Fe^{2+}$ -  $C^+$ ・ $He^+$ 同時照射試料および、 $C^+$ ・ $He^+$ 同時照射試料、 $He^+$ 単独照射試料における TEM 写真を示す。各試料において、転位ループ及び直径  $1\sim 2$  nm 程度のヘリウムバブルが形成していた。 $C^+$ 照射および  $He^+$ 照射によって形成した転位ループの密度は、 $Fe^{2+}$  照射によって形成

する密度よりも高いため、Fe<sup>2+</sup>照射後に各イオン照射をした試料においても大きな変化は見られなかった。一方で、C<sup>+</sup>・He<sup>+</sup>同時照射試料では、各イオン単独照射試料と比較して、さらに転位ループが

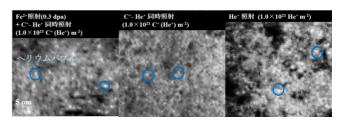
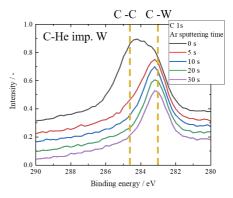


図1 各イオン照射試料における TEM 写真

高密度になっていることがわかる。これは、C+および He+照射の欠陥密度が大きく、照射範囲が重なっているため鉄イオン照射を付与したものと比べて変化したと考えられる。He バブルに注目すると、バブルの大きさや密度は炭素濃度に依らず同程度であり、He バブルの形成では、C+照射に依らず He+照射フルエンスに依存することがわかった。

図 2 に C+・He+同時照射 W および C+単独照射 W における C 1s の XPS スペクトルを示す。どちらの試料においても 284.5 eV 及び 283.0 eV にピークが見られることから、C+照射により W 中に C-C 結合及び C-W 結合が形成していることが分かった。C+単独照射では、最表面では C-C 結合が多いのに対して、C+・He+同時照射試料では最表面に C-C 結合および C-W 結合が見られた。これらの結果から、同時照射試料では、照射中に He+照射によって W に照射された C がスパッタリングされることにより C 濃度が減少したと考えられる。また、C+照射に関係なく同程度の He バブルの形成が起こったことから、C に比べて He の方が W 中で安定に存在することがわかった。

図 3 に Fe<sup>2+</sup>照射後、各フルエンスにて C 同時照射した W 試料における重水素 TDS スペクトルを示す。 TDS スペクトルは 400 K、600 K、780 K の三つのピークからなることがわかった。 C<sup>+</sup>・He<sup>+</sup>同時照射フルエンスの増加に伴い Peak 1 の重水素滞留量が増加している。これは C<sup>+</sup>照射および He<sup>+</sup>照射によって表面付近に高密度の転位ループが形成したためである。また、C<sup>+</sup>・He<sup>+</sup>同時照射によって Peak 2 および Peak3 の D 滞留量は減少している。これは、He バブルが形成することで He<sup>+</sup>単独



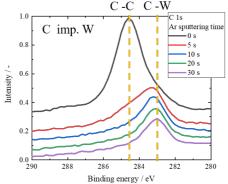


図2 ClsのXPSスペクトル

- (上) C+·He+同時照射試料
- (下) C+単独照射試料

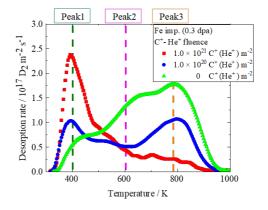


図 3 Fe<sup>2+</sup> 照射後、C<sup>+</sup>・He<sup>+</sup>同時照射した W 試料における重水素 TDS スペクトル

照射時と同様にDのバルク方向への拡散が抑制されるためだと考えられる。

以上の結果より、 $Fe^{2+}$   $C^+$ ・ $He^+$ 同時照射試料では、表面付近で高密度の転位ループの形成による D 滞留量の増加が起こる。一方で、 $He^+$ 照射による寄与が大きいため、 $C^+$ 非照射時と同様にHe バブルを形成し、拡散抑制効果によって試料中の全 D 滞留量が減少することが明らかとなった。

# 結晶性固体材料における析出物の加工誘起高速オストワルド成長

東北大金研、熊本大 松川義孝 九大応力研 渡辺英雄

### 1. 背景

金属材料の強度や、高温クリープ変形(本来塑性変形が起こる臨界応力よりも低い応力で徐々に変形 してしまう現象)に対する耐性、中性子照射損傷に対する耐性は、材料に含まれる析出物の種類や分布 状態によって大きく変化する。後者については例えば、析出量(つまり析出物の総体積)が一定の条件 で比較すると、析出物粒子のサイズが小さいほど数密度は増大し、数密度が大きいほど材料特性は向上 する。析出物のサイズと数密度のバランスは温度に依存して変化する。ある程度高い温度まで加熱する と、系内の自由エネルギーを低下させるために、析出物の表面積を減らす方向に組織が変化する。その 結果、析出物の平均サイズは増大し、数密度は減少する。元々大きい析出物はより大きく成長し、小さ い析出物は消失することになる。これはオストワルド成長と呼ばれる現象であり、熱力学的な駆動力の 下で、析出物同士が原子の授受をすることで発現する。原子の授受は、析出物を構成する原子が一旦マ トリックスに再固溶し、拡散し、別の析出物に辿り着き、吸収されることで達成される。本研究では、 拡散モードの違いが析出物のオストワルド成長に及ぼす影響について検討する。具体的に着目した拡散 モードは、転位を介した高速原子拡散(パイプ拡散)である。転位とは、結晶の内部で nm オーダーの 局所的な原子配列の乱れが線状に連なった、nm から mm オーダーの長さを有する線欠陥である。その 乱れた構造故に、転位においては原子の拡散が容易に起こり、その場合の拡散係数は通常の格子拡散(バ ルク拡散)よりも3桁以上大きいことが知られている[1]。透過型電子顕微鏡を用いたその場観察によっ て、転位で連結された2つの析出物粒子が成長・収縮する速度から、転位1本当たりのパイプ拡散係数 が導出されている[1]。連結する転位が2本の場合は、拡散経路が2つになるという意味で、拡散速度(こ の場合は"ある時間内に授受される原子の数"として検出される)が2倍になる可能性があるが、転位 の本数が拡散に及ぼす影響を定量的に検証した例はない。また、パイプ拡散がオストワルド成長に関与 することで、析出物の平均サイズが最終的にどのように変化するのかを検討した例もない。平均サイズ が変化するのであれば、材料が高温でクリープ変形する際に、耐クリープ特性がダイナミックに変化す るということになる。この情報はまた、材料プロセッシングにおける微細組織制御技術の高度化にも有 用である。本研究はこれらの未解決問題を念頭に置いて開始した萌芽的基礎研究である。

#### 2. 実験方法

試料は軽水炉の燃料被覆管材料として最近開発された Zr-2.5Nb 合金である。これは実機材でありながらモデル合金並みにシンプルな組織を有しており、マトリックス (hcp 構造の Zr) に1種類の析出物 (bcc Nb) のみが分散している。析出物の平均サイズは56.8±0.8 nm、数密度は10<sup>20</sup> m³のオーダーである。これは完全焼きなまし材であり、マトリックスには転位が殆ど含まれない。完全焼きなまし材に含まれる転位の数密度(線密度)は一般に10<sup>10</sup> m³のオーダーである。この合金をそのまま加熱し、種々の温度でそれぞれ3日間熱処理した結果、析出物の平均サイズが増大する臨界温度は580℃であり、平均サイズは64.4±1.2 nm まで増大することが明らかとなった。本研究では、転位を冷間加工(室温における圧延)によって導入してパイプ拡散の影響を検討した。転位の本数は圧延率で調整し、圧延率5、10、20、50、90%の5条件について検討した。平均サイズ導出に用いた析出物粒子の数は、各条件につ

いてそれぞれ 500~2,000 個である。

### 3. 結果及び考察

圧延率が 10%の試料を上述した手順で熱処理した結果、平均サイズが増大する臨界温度は 100℃であ り、それ以上の温度で熱処理しても平均サイズはそれ以上殆ど変化しないことが明らかとなった。この ときの平均サイズは約 61 nm であり、転位を含まない試料を 580℃で熱処理した場合の平均サイズより も小さい。平均サイズの増加量を同じ温度で比較するために、580℃で 10%圧延材を熱処理することも 試みたが、それより低い 450℃まで加熱した時点で転位組織が消失し始め、580℃に達したときには完全 焼きなまし組織になってしまい、この温度では転位の影響を検討できないことが明らかとなった。拡散 係数は、通常の拡散の場合、拡散長(拡散係数と時間の積)を温度に対してアレニウスプロットしたと きの傾きから導出される。パイプ拡散の場合は、拡散長の代わりに平均サイズについてプロットするこ とになるが、本研究ではサイズの温度依存が顕著でなかったため、計算の前提が満たされない。この問 題は想定外であり、今後要検討である。本研究では、これ以外にも予想外の発見がもう一つあった。圧 延率の増加に伴って、析出物の平均サイズが増大することが明らかとなった。加工後に試料に残留する 転位の数密度には上限があり、この上限( $10^{15} \text{ m}^{-2}$ のオーダー)は一般に圧延率 20%程度で達するが、 析出物のサイズはそれ以上の圧延率でも増大し続けることが明らかとなった。これはパイプ拡散が(室 温で)圧延中に起ったことを意味する。平均サイズは 50%圧延材で 64.2±0.9 nm、90%圧延材で 65.8±1.2 nm であった。これは非圧延材を 580℃で熱処理した際の平均サイズと同等かそれ以上である。Zr 中の Nb の拡散係数は、室温と 580℃では 15 桁異なる。580℃における熱処理が 3 日間 (26 万秒) であるの に対し、室温における圧延に要した時間はせいぜい3秒であり、時間の差は5桁ということになる。し たがって、拡散長で比較した場合の差は 20 桁である。本実験データの信憑性については、少なくとも 電子顕微鏡観察におけるアーティファクトの影響は考えにくい。圧延材は転位を多数含むため、転位の コントラストに小さい析出物が隠れ、見落としてしまう可能性が考えられるが、20%以上の圧延では残 留転位密度が増加しないため、20~90%圧延材における見落としの可能性は同程度ということになり、そ れによってサイズに差が生じることはないと期待される。

### 参考文献

[1] M. Legros et al., Science 319 1646-1649, 2008.

### 4. 本年度 発表リスト

### [口頭発表リスト]

- 1) Y. Matsukawa, "The theory of precipitation hardening revisited: the effect of crystal structure on the obstacle strength." 8th Forum on New Materials, 2018.6.4-14, Perugia (Italy). (招待講演)
- 2) 松川義孝、大熊一平、阿部弘亨、"冷間強加工中の析出物のオストワルド成長:動く転位を介した超高速パイプ拡散の可能性について"、日本金属学会秋期大会、2018.9.20-21 仙台(口頭)

### [論文リスト]

- 1) [Book chapter] Y. Matsukawa, Crystallography of precipitates in metals and alloys: (1) Analysis of crystallography. in: M. Ali (Eds), Crystallography, IntechOpen, published online on 2019.2.21. (DOI: 10.5772/intechopen.82693)
- 2) [Book chapter] Y. Matsukawa, Crystallography of precipitates in metals and alloys: (2) Impact of crystallography on precipitation hardening. in: M. Ali (Eds), Crystallography, IntechOpen, published online on 2019.2.21. (DOI: 10.5772/intechopen.84273)

Fe-Mn モデル合金における特異な照射硬化とナノサイズの Mn 析出物形成の相関

京都大学エネルギー理工学研究所 藪内 聖皓、木村 晃彦

### 1. 目的

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

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

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

### 2. 研究成果の概要

### 1) 経過

圧力容器鋼の照射影響評価のための基礎研究として、鉄基モデル合金における照射脆化挙動に及ぼす中性子照射の影響を高照射量(高経年対応)まで調査した結果、Fe-Mn 合金では、高照射領域においてのみ、照射硬化量が顕著に増大することが判った。高経年化に伴う照射脆化の促進が懸念されることから、この現象を「Mn 影響」と名付け、その発現機構に関する研究を実施している。この Mn 影響は、鉄格子の中に均一に固溶している Mn 原子と照射によって形成された Vacancy (V:空孔) や Interstitial (I:格子間原子)との強い相互作用に起因すると考えられるが、その詳細は明らかではない。特に、V-Mn 相互作用と I-Mn 相互作用のどちらが重要になるかについては、図 1 に示すようなモデルが提唱されているが、実験的な確証はまだ得られていない。

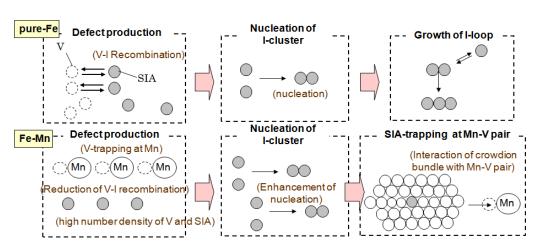


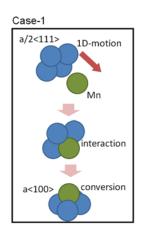
図 1 純 Fe と Fe-Mn 合金における中性子照射損傷組織生成モデル

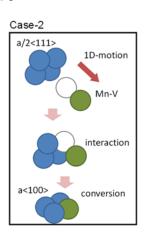
### 2) 照射実験

中性子照射( $290^{\circ}$ C、 $5x10^{20}$ n/cm²)により、Fe-1Mn および Fe-1Ni 合金は、顕著な照射硬化を示し、透過型電子顕微鏡による微細組織観察から、いずれも黒点状の微細な照射損傷組織が形成されていることが判明している。これらの損傷組織を TEM 内で焼鈍しながら直接観察すると、 $500^{\circ}$ Cまではほとんど変化しないが、 $550^{\circ}$ Cになるとそのサイズが大きくなることを既に報告している。純鉄に比べると、粗大化開始の温度が高温側にシフトしており、Fe-1Mn 合金では、格子間原子の易動度が純鉄に比べ低下していると考えられる。なお、平成 30 年度は新規導入の TEM の性能評価ならびに今後の中性子照射試料の観察に向けて RI 輸送に関する手続等の確認を行うとともに、「Mn 影響」メカニズムについて検討した。

### 3.「Mn 影響」のメカニズム

Fe-Mn 合金と Fe の照射損傷組織を比較すると、Fe-Mn 合金において転位ループの微細化が顕著に生じていることが判明している。転位ループは、a<100>型格子間型であることが判明しており、微細化の理由としては、格子間原子あるいは微細な転位ループの移動度が Mn 原子による捕獲効果により、低下していることがあげられる。すなわち、ここでは Mn 原子と Fe 格子間原子あるいは微細な格子間型転位ループとの相互作用により、それらの移動が Mn 原子により、抑制されたために、核生成サイト数が増加し、成長が遅れたと考えることが可能である。溶質原子クラスターの形成の素過程に関しては、クラスターの核生成サイトが空孔型欠陥なのか格子間原子型欠陥なのかについては、不明であるが、TEMで観察された a<100>型の転位ループの形成が Mn 原子の存在により促進される様子をモデル化して示すと図2の様になる。 一方、最近の高分解能分析電顕による TEM 観察によれば、イオン照射した Fe-Mn 合金において、板状の Mn 集合体の形成が認められている。 Mn 原子の集合には、 Mn-V 対や Mn-I ダンベルなどの移動が必要になる。また、 Mn 原子単独の効果の他にも、酸素原子の関わりを示唆するデータも存在する。今後は、不純物酸素量の影響についても調査する。





### 4. まとめ

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

### 5. 成果発表 特になし。

# 高エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物質の創製

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 圓谷 志郎

### 1. はじめに

グラフェンはスピン散乱の要因であるスピン-軌道相互作用が小さく、無機半導体を超えるキャリア移動度を示すことから、理想的なスピントロニクス・エレクトロニクス材料として注目されている[1]。一方でグラフェンは、半金属的な電気伝導特性を示すことから、素子応用を実現するためには、バンドギャップの導入の必要性が指摘されている。この有効な方法の一つにグラフェンへのヘテロ原子のドーピングによるグラフェン化合物の作製がある。化学的手法を用いたドーピングによる酸化グラフェンや水素化グラフェン(グラファン)などが報告されているが、同手法ではドープ可能な原子種が限定されることに加えて位置選択的なドーピングが困難であるという問題がある。我々は高エネルギーイオンをグラフェンとヘテロ原子との接合領域に照射する新しいグラフェン化合物の創製法を探索している[2]。同方法では、電子励起相互作用が支配的なエネルギー領域(数 MeV)のイオンビームをグラフェンに照射することで、電子励起後の緩和過程で空間的に近接し同様

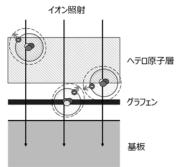


図 1 高エネルギーイオン照射に よるグラフェンへのヘテロ原子 ドーピングの概念図

に励起状態にあるヘテロ原子との間で結合の組換え(置換)を生じさせ化合物を作製する(図 1)。本研究では、フッ化リチウムとグラフェンのヘテロ構造に高エネルギーイオンを照射することで、フッ化グラフェンを作製した。 さらに同手法を用いた局所パターンドーピングの可能性を探索した。

### 2. 実験

多結晶 Cu 基板上に化学気相蒸着法によってグラフェンを成長した。さらに同グラフェン上に 100nmのフッ化リチウム層を成膜し,真空中において同へテロ界面に高エネルギーイオン(2.4 MeV <sup>63</sup>Cu<sup>2+</sup>)を照射することでフッ化グラフェンを作製した。局所パターンドーピングについては,図 2 に示すプロセスにより行った。はじめに,微細加工によりグラフェンにより行った。はじめに,微細加工によりグラフェンの素子構造を作製する。次にレジストをマスクとしてヘテロ原子層となる LiF のパターンをグラフェン上に作製する。レジストを除去した後にイオン照射を行うことで、グラフェン上の任意の場所へのフッ素ドーピングを行った。イオン照射後のグラフェンの電子状態や原子構造は顕微ラマン分光や X 線光電

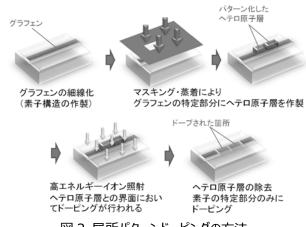


図 2 局所パターンドーピングの方法

子分光 (XPS), 放射光を用いた X 線吸収端微細構造 (XAFS) などにより評価した。

### 3. 結果および考察

図 3 にグラフェンへの高エネルギーイオン照射によるラマンスペクトルの変化を示す。イオン照射量の増大に伴い、LiF 層の有無にかかわらずグラフェンへの欠陥生成に起因する D バンドが増大することが分かった。一方で LiF/グラフェンへのイオン照射では、LiF 層の無いグラフェンへの照射に比べて D および 2D バンドが,それぞれ 20 および 40 cm<sup>-1</sup> 以上も低波数側へとシフトすることが分かった。D, 2D バンドのエネルギーはグラフェンの電子状態を反映するため[3]、LiF/グラフェンへのイオン照射では、グラフェンの電子状態が変調されていることが示唆された。そこで LiF/グラフェンについてイオン照射後のグラフェンの電子状態を C K-edge XAFS によって調べたところ、グラフェンの $\pi$ \*由来のピークが減少するとともに、 $\sigma$ \*(C-F)由来の構造 (P2) が新たに現れることが分かった。さらに X 線が斜入射の際の P2 構造の強度は垂直入射に比べて大きい

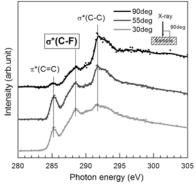


図 4 LiF/グラフェンへのイオン照射  $(10^{14} \text{ ions/cm}^2)$  後の C K-edge XAFS スペクトル。  $\pi^*(C=C)$ ,  $\sigma^*(C-F)$ および  $\sigma^*(C-C)$ 由来のピークが観察 される。

ことから、C-F 結合はグラフェンシートの面に対して垂直方向に配向していることが分かった(図4)。 XPS による炭素およびフッ素原子の化学状態の解析結果も合わせると、LiF/グラフェンへの 10<sup>14</sup> ions/cm²のイオン照射によって 20 atom%ものフッ素原子がグラフェンシート上に化学結合(フッ化グラフェン)を形成することが明らかになった。

一方で LiF 層の無いグラフェンへのイオン照射では、D バンドのピーク強度が LiF/グラフェンへの照射に比べて小さい (図 3)。D バンドと G バンドの強度比から 欠陥間距離を見積もると照射量 10<sup>14</sup> ions/cm<sup>2</sup> の場合で 10 nm であり、欠陥密

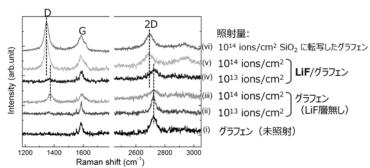


図 3 イオン照射に伴うグラフェンのラマンスペクトルの変化。LiF 層は純水リンスで除去した。

(i) イオン未照射グラフェン/Cu。(ii,iii)  $10^{13}$ ,  $10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射グラフェン/Cu。(iv,v)  $10^{13}$ ,  $10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射 LiF/グラフェン/Cu。(vi)  $10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射 LiF/グラフェン/Cu を Cu から剥離し SiO<sub>2</sub>上に転写。

度が 1%程度であることが分かった。このことは、ヘテロ原子層で被覆されていないグラフェンへのイオン照射では、欠陥生成が限定的であるということを示している。このため本研究では、フッ素原子の局所パターンドーピングの実施の際には、LiF 層を形成しない領域のグラフェンに対してもシャドーマスクを用いることなく試料全面へのイオン照射を行った(図 2)。

図 5 にフッ素原子の局所パターンドーピングを行ったグラフェンの SEM 像およびラマンスペクトルを示す。イオン照射の際の LiF 層の有無により SEM 像にコントラストが観察された。未照射のグラフェン, $10^{14}$  ions/cm² のイオンを照射した LiF/グラフェンおよび LiF 無しグラフェンのシート抵抗を測定したところ,それぞれ 33, 240, 1.2  $\times$   $10^3$   $\Omega$ /sq. であったことから,同コントラストはフッ素原子のドーピングに伴うグラフェンの電気伝導特性の変化に起因することが示唆される。一方で,上述のようにグラフェンのラマンスペクトルにおける  $\mathbf{D}$  バンドの増大や低波数シフトはフッ素原子のドーピングを反映しているため,顕微測定により局所的なドーピングの成否が評価できる。LiF 層を形成した領域(図 5: a,b,f,g) においては  $\mathbf{D}$  バンドの顕著な増大や低波数シフトが観察されている。

一方で LiF 層を形成しない領域(図 5: c,d,e)では同変化は観察されない。これにより、フッ素原子のグラフェンへの局所パターンドーピングを実証することができた。

本研究の成果によって、高エネルギーイオン照射による局所ドーピング法は、従来の化学的手法では実現困難なグラフェンのドーピング状態の幅広い制御に加えて、グラフェン上の微小領域に位置選択的なドーピングが可能であることが明らかになった。本技術を発展させることで、局所構造制御により電子・スピン機能を構築したグラフェンデバイスの実現を可能にし、ナノエレクトロニクスやスピントロニクスの技術に新たな進歩をもたらすことが期待される。

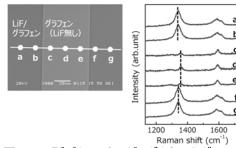


図 5 局所パターンドーピングを行ったグラフェン /SiO<sub>2</sub>の SEM 像。LiF 層は純水リンスに より除去した(左)。グラフェン上の任意 の位置におけるラマンスペクトル(右)。

### 参考文献

- [1] K. S. Novoselov, Nobel Lecture, 106 (2010).
- [2] S. Entani, et al., RSC. Adv. 6, 68525 (2016).
- [3] A. C. Ferrari, et al., Phys. Rev. Lett. 97, 187401 (2006).

### 研究組織

研究代表者:

圓谷 志郎 所属:量子科学技術研究開発機構

研究協力者:

水口 将輝 所属:東北大学金属材料研究所

所内世話人:

渡邉 英雄 所属:九州大学応用力学研究所

#### 成果報告

1) 圓谷 志郎,水口 将輝,渡邉 英雄,滝沢 優,楢本 洋,境 誠司,「高エネルギーイオン照射法によるグラフェン化合物の作製」2018年日本物理学会秋季大会,10a-C11S-11

# 磁化プラズマの簡約化 MHD シミュレーション

法政大学 理工学部 電気電子工学科 西村征也

### 【研究目的】

磁場閉じ込め方式の核融合装置や天体近傍の宇宙空間においては、高温プラズマが背景磁場に磁化された状態にある。このような磁化プラズマにおいては、磁気再結合や圧力駆動型モードなどの電磁流体力学的 (MHD) 不安定性が発生する。

磁場閉じ込め核融合装置においては、トロイダルコイルの設置誤差や外部コイルによって磁場摂動が発生するが、有理面と共鳴するようなものを共鳴磁場摂動(RMP)と呼ぶ。RMP は強制的に磁気再結合を起こして磁気島やストキャスティック層を形成するが、この過程をRMP のしみ込みと呼ぶ。プラズマ流が存在する場合には、プラズマ流による遮蔽効果が存在するため必ずしもRMPのしみ込みが起きるとは限らない。

近年、RMP を周辺局在モード(ELM)の制御に用いる手法の研究が盛んに行なわれている。トカマクにおける ELM はバルーニングモードによって駆動される。バルーニングモードは高い波数領域において不安定性を示すため、これを数値シミュレーションによって扱うには、数値安定性に優れたスペクトル法を採用する必要がある。共同研究の継続4年目である本年度においては、円形断面のトカマクプラズマに対する簡約化 MHD モデルのスペクトルコードを構築することを目的とした。

# 【研究方法】

磁化プラズマを記述する簡約化 MHD 方程式をモデルとして用いる。モデルは、渦度方程式、一般化されたオームの法則、圧力の発展方程式によって構成される。渦度、ベクトルポテンシャルの磁力線に平行な方向の成分、電子圧力が未知数であり、流れ関数と電流の磁力線方向の成分は渦度の定義式(ポアソン方程式)とアンペールの法則によって定まる。

コードの概要は以下である。各変数はポロイダル方向とトロイダル方向に複素フーリエ級数展開されており、振幅は時間と小半径方向の位置のみの関数である。複素フーリエ級数展開されたモデル方程式に対して、小半径方向の微分を有限差分法で処理し、時間微分項に予測子・修正子法を適用する。ポアソン方程式をLU分解を用いた手法によって解く。非線形項の計算においては擬スペクトル法を適用して実空間において評価する。実空間と波数空間の変換においてはFFTを用いる。

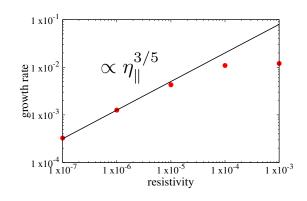
次に、シングルコアに対して開発されたコードに対して、MPIを用いて並列化を行った。波数空間に対して2次元の領域分割を行い、時間積分の処理を行う。非線形項の計算においては、実空間における小半径方向の1次元の領域分割を行う。その際、allgathervを用いて振幅の空間微分のローカル変数をグローバル変数にし、波数空間と実空間での情報のやり取りを行う。

### 【研究結果】

本年度実施した研究について、以下の内容を報告する。

### 1. テアリングモードのテストシミュレーション

古典テアリングモードが線形不安定な平衡に対してシミュレーションを行った。図1にテアリングモードの線形成長率の電気抵抗依存性を示す。低い電気抵抗の値に対しては、成長率は解析解が示す 3/5 乗のスケーリングに従うことが分かる。高い電気抵抗に対してこのスケーリングから逸脱する性質は、const-φ近似の破れとして一般的に知られている性質である。テアリングモードの非



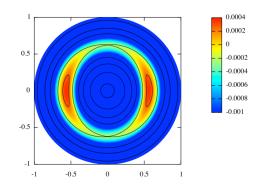


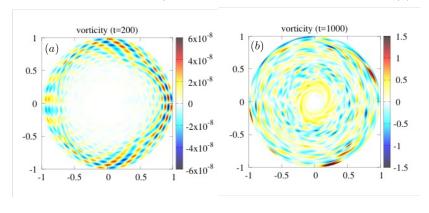
図1 成長率の電気抵抗依存性

図2 ヘリカル磁束関数の等高線図

線形シミュレーションを行った結果、磁気島幅の成長の時間依存性が指数関数的から代数的へと変化するラザフォード領域が観察され、その後非線形飽和状態に至った。図 2 に磁気島が非線形飽和した時刻におけるヘリカル磁束関数の等高線図を示す。以上のシミュレーション結果から、テアリングモードが正確にシミュレーションできることが確認された。

# 2. バルーニングモードのテストシミュレーション

トカマクプラズマにおけるトロイダル曲率の効果をコードに実装し、抵抗性バルーニングモードが線形不安定な平衡に対してシミュレーションを行った。シミュレーションにおいては、ポロイダルモード数の最大値を 20、トロイダルモード数の最大値を 10 とした。図 3 に渦度揺動の等高線図を示す。図 3(a)はバルーニングモードの線形成長段階であり、悪い曲率領域である左半面において強い揺動が発生していることが分かる。図 3(b)は非線形飽和段階であり、渦度揺動がポロイダル周方向に広がっていることが分かる。また、小半径方向の内側にも広がっていることが分かる。図 4 に非線形的に修正された平衡圧力の径分布を示す。線形成長段階においては放物型であるが、非線形飽和段階においては内側の圧力が減少し、外側に輸送されていることが分かる。以上より、バルーニングモードが正確にシミュレーションできることが確認された。



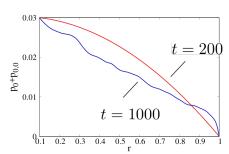


図3 渦度揺動の等高線図

図4 圧力の径分布

### 【まとめ】

本共同研究を通して、簡約化 MHD 方程式に基づくスペクトルコードの開発を行った。開発されたコードを用いた物理研究が今後の課題である。

研究者情報: 西村征也

# 中性粒子風由来のブロッブの発生と輸送特性に 関するシミュレーション

中部大学 国際GISセンター 杉田暁

### 目的

本研究の目的は、中性粒子風に由来する荷電分離およびブロップの生成・伝搬が発生する条件を数値実験により明らかにし、直線装置 PANTA による核融合周辺領域 (SoL 領域)の模擬実験の可能性を探ることにある。トロイダルプラズマを対象とした研究から、不均一磁場に由来する荷電分離とその結果生じるブロップの輸送特性が研究されている[1,2]。これはトロイダルプラズマに特有の磁場不均一性や曲率に由来する遠心力から生じる効果であるが、同様の効果が中性粒子流の効果を考慮することで得られることが報告されている[3]。本研究では、トロイダルプラズマを対象として申請者が開発したコードをベースに、中性粒子流を取り入れたモデルとの対応を明らかにし、直線装置でブロップの発生を許す中性粒子の密度や流速のパラメータサーベイを行うことを目的とする。

# 結果

今年度は、これまで数値実験を行っていた環境を応用力学研究所から中部大学国際GISセンターに移行することにより、ハンドリング性の向上と高速化を図った。中部大学の計算機クラスタにGCC8のGFortranとOpen MPIによる並列計算環境を構築し、高速フーリエ変換ライブラリFFTW-3を並列化コンパイル・準備した。また、データ解析・可視化環境としてGSAFを導入した。応用力学研究所に設置している計算機クラスタと、中部大学の計算機環境を応用力学研究所のVPN(Virtual Private Network)を経由して接続し、数値実験コードを移行した。

結果、数値実験コード、及びデータ可視化の環境が中部大学で可動することを確認し、以前の環境と比較して非線形の計算の速度が約 1.5 倍に向上することが確認できた。これは、CPU の性能及びメモリの帯域幅に加えて、数値コード中で IO のオーバーヘッドがかかっていた部分が SSD の環境に移行したことにより高速化されたことに依ると考えられる。

# 今後の展開

今年度構築した計算機環境を用いて、応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA においてブロブが発生する特徴的なパラメタを念頭においたパラメタスキャンを行う予定である。磁力線方向波数がゼロに近い揺動も PANTA で観測されており[4]、交換型不安定性との比較が今後ますます重要となる。数値コードを整備することにより、直線装置 PANTA 実験との比較などをより迅速に進めることが可能となる。

### 謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所平成30年度共同利用・共同研究30FP-19の助成を受けたものです。

# 参考文献:

- [1] D. A. D' Ippolito, et al., Phys. Plasmas 9 222 (2002)
- [2] S. Sugita, et al., J. Phys. Soc. Japan 79 044502 (2010)
- [3] S. I. Krasheninnikov and A. I. Smolyakov, Phys. Plasmas 10 3020 (2003) [4]福田郁未、他7名、「直線磁化プラズマにおける軸方向不均一性の観測」プラズマカンファレンス、23p-20、2017.11.20-24 姫路

# 研究組織

代表者:杉田暁(中部大学 国際GISセンター)

所内世話人:小菅佑輔

# プラズマ乱流における非線形時系列データの統計解析

Statistical analysis of nonlinear time series in plasma turbulence

富山大学・人間発達科学部 成行 泰裕

### 研究目的:

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

本研究課題では、統計解析法の改良およびその手法の数値計算データや観測データ への適用を目指す。本年度は、前年度から引き続き行っている機械学習を用いた解析を行った。

# 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、前々年度から用いている九州大学応用力学研究所の PANTA 実験装置で 生成されたプラズマ乱流の時系列データに対し、機械学習の一手法であるランダムフォレス ト[1]を用いて回帰モデルを作成した。これまで同様に、32 本配置されている PANTA のプロ ーブのある一つのプローブの観測データを目的変数、他の 6 本のプローブが観測したデー タを説明変数とした。ランダムフォレストの計算には、統計ソフト R[2]の randomForest パッケ ージ[3]を用いた。randomForest のパラメータは mtry=2、ntree=1600 とした。本年度は、説明 変数となるプローブの間隔(粗視化スケール)と予測性能の関係を、近隣モードからの単純 平均による予測(補間)との比較を通じて議論した。これまでと同様、ある時間帯のデータで 学習を行い、別の時間のデータを用いて性能の評価を行った。計算の結果、プローブ間隔 が大きくなるにつれて単純平均による予測が急激に悪くなる一方で、ランダムフォレストの予 測性能はプローブ間隔が大きくなっても良い精度を保っていることが分かった。時系列とし ての解析を行わない単純な機械学習で良い予測ができるのは、明確な局所構造を含まな い統計的定常状態のデータを周期境界(周方向のプローブ)で扱っているためである。同じ PANTAのデータでも、局所構造が卓越する場合(solitary wave state[4])は同様の取り扱いが 出来ない可能性があることに注意されたい。一方で、今回用いたデータにおいては、狭い プローブ間隔の場合は近隣モードの単純平均でも良い予測になることが分かった。

次に、予測データが再現している観測データの性質を議論するため、波形と周波数スペクトルの比較を行った。Figure 1、Figure 2 はそれぞれ観測データ(灰色線)、ランダムフォレストによる予測(黒実線)、単純平均による予測(黒破線)を示している。予測はプローブ間隔が 4 本の際のものである。Figure 1 が示すように、ランダムフォレストによる予測は観測データの位相とよく一致していることが分かる。周波数スペクトル上でこの性質を見た場合、エネルギーの大きな周波数モード(7[kHz]付近)の再現として現れる(Fig.2)。これらの結果について、現在投稿論文を準備中である。

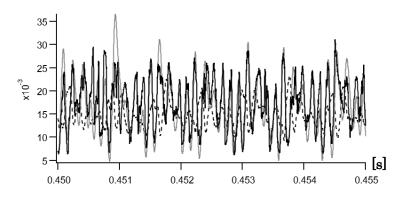


Figure 1 観測データ(灰色線)の 波形とそれに対するランダムフォ レスト(黒実線)、単純平均(黒破 線)による予測。予測はプローブ 間隔が4本の際のものである。

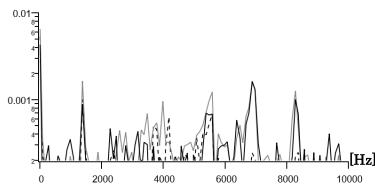


Figure 2 観測データ(灰色線)の 周波数スペクトルとそれに対する ランダムフォレスト(黒実線)、単 純平均(黒破線)による予測。周 波数スペクトルは 0.450 [s]から 0.460[s]の観測データを用いて計 [Hz] 算したものである。

引用文献: [1] L. Breiman, Machine Learning, 45, 5–32 (2001); 平井有三, はじめてのパターン認識, 森北出版(2012). [2] R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL http://www.R-project.org/. [3] A. Liaw and M. Wiener (2002). Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), 18-22. [4] T. Kobayashi et al, Plasma and Fusion Res., 12, 1401019 (2017).

# 公表状況:なし

### 研究組織:

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

研究課題名:金属、合金および酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究 A study on dissolution, diffusion and desorption of hydrogen isotopes in metals, alloys and oxide ceramics

> 九州大学大学院総合理工学研究院 エネルギー理工学部門 橋爪 健一

### 1. 目的

核融合炉では、ダイバータ材としてタングステンのような高融点金属あるいは黒鉛のような耐熱性材料が候補材料である。ダイバータでは、核融合炉の燃料の水素同位体が高いエネルギーを持ったまま照射されるため、水素同位体の照射挙動とともに溶解、透過、リサイクリングなどが重要である。本年度の共同研究では、高融点材料で水素の溶解熱が異なるタングス

テン (W) とタンタル (Ta) について (表 1 参照)、水素同位体 (重水素、 $D_2$ )をグロー放電プラズマによりそれらの金属に注入 し、水素の高温放出挙動について応用力学研究所および当研究室 の昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて調べた。さらに、拡散解析ソフトである TMAP-4 を用いて、それぞれの金属からの水素 の放出挙動をシミュレートし、実験結果と比較した。

表 1 WとTaへの水素の溶解熱[1]

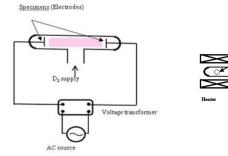
| Metal | $\Delta H_{\rm s}  ({\rm eV})$ |  |
|-------|--------------------------------|--|
| W     | + 1.1                          |  |
| Ta    | -0.39                          |  |

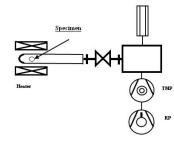
### 2. 実験

円板状の金属 W および Ta( $\phi$  6, 0.05 mm<sup>t</sup>)を試料とした。W と Ta 試料を  $10^{-5}$ Pa 以下の圧力で真空焼鈍( $800^{\circ}$ C、0.5 h)して、これを焼鈍試料とし、また、比較のために焼鈍を行わない試料を受入材試料とした。これらの試料に、重水素を AC グロー放電注入法[2]により室温で注入した。注入条件を表 2 に注入装置を図 1 に示す。重水素注入を行った試料について TDS 装置(図 2 、QMS: Inficon H200M)にて、昇温速度 0.5  $^{\circ}$ C/sec で  $1000^{\circ}$ Cまで試料を加熱し、 $D_2$  のスペクトルを測定した。

表2 グロー放電注入条件

| D <sub>2</sub> 圧力 | 10 Torr |
|-------------------|---------|
| 放電電圧              | 1.2 kV  |
| 周波数               | 60 Hz   |
| 放電注入時間            | 30 min  |
| 試料温度              | 室温      |





OMS

図1 グロー放電注入装置

図 2 TDS 装置

### 3. TMAP-4

TMAP4 (Tritium Migration Analysis Program ver.4) を用いて、W からの重水素の放出挙動を計算した。試料の厚さは実験に用いた試料と同じ 0.05 mm とし、1%の水素が均一に金属に溶解しているという初期条件で計算した。境界条件としては、表面水素濃度をゼロとして拡散律速で水素放出が起こる場合を基準として水素の放出スペクトルを計算し、また、水素の表面再結合を考慮した。

### 4. 結果と考察

図3と4に、Ta(受入材と真空焼鈍)試料のTDS放出スペクトルを示す。真空焼鈍材では、水素の溶解熱を反映して、図4のように大量の重水素放出すなわち大量の水素溶解が見られる。一方、受入材で

は、焼鈍材の 1/100 以下の放出量となっている。これは、受入材では Ta 表面に自然酸化物が存在し、注入された重水素が酸化被膜中から気相に再放出され、酸化膜内にはほとんど残らず、また Ta 金属中へ拡散溶解もわずかであったためと考えられる。Ta の酸化物は安定であり、水素の注入の抑制効果があるということがわかる。ただ、何れにしても水素の放出温度は 500℃以上と高くなっており、水素同位体の回収に高温加熱が必要なことがわかる。一方、W では、図 5 と 6 に示すように、受入材と真空焼鈍試料で TDS 放出スペクトルに明確な違いは見られず、W の場合酸化物の影響はほとんど見られない。水素の溶解熱を反映して Ta に比べ溶解量も低い。また、放出温度も 200℃程度と低く、比較的低い加熱温度で水素同位体の回収ができることを示唆している。よく知られているように、水素同位体のリテンション、インベントリーの視点からも核融合炉ダイバータ材として適した性質を有することがわかる。

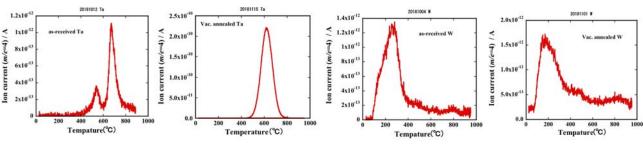


図3 受入材 Taの D2 放出

図4 TaのD2放出

図5 受入材WのD<sub>2</sub>放出

図6 WのD2放出

図7に、TMAP-4 による表面での水素濃度を0とした TDS 放出の解析結果(赤)を示す。 $100^{\circ}$  程度に小さなピークがあるが、図5、6に示したように実験結果では重水素の放出ピークが $200^{\circ}$  程度であり必ずしも一致していない。そこで実験結果を再現できるように、金属表面での水素の再結合を考慮した計算を行った。具体的には再結合速度が水素の表面濃度 $C_{surf}$ の二乗に比例し( $=kC_{surf}^2$ )、その再結合係数 k が下記の式で表せるものとして、その活性化エネルギー $E_{rec}$  を変化させて計算を行った。

$$k = 3.4x10^{-15} \exp(-\frac{E_{rec}}{RT})$$
 (1)

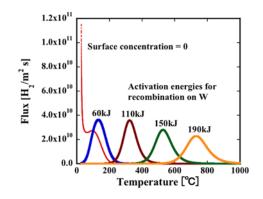


図7 TMAP-4 による水素放出解析

その結果、再結合の活性化エネルギーが80~100 kJ/mol 程度で実験データを説明できることがわかった。

### 4. まとめ

W および Ta 中にグロー放電注入した重水素の TDS により以下の結果が得られた。(1) Ta では水素が大量に溶解し得るが、表面酸化物は注入量の抑制に役立つ。(2) W では表面酸化物の影響は小さく、また、溶解量は小さい。(2) W からの水素放出挙動は、拡散と水素の表面での再結合が支配している。

### 5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一 大学院生:岩佐匡浩、浦部雄大、川口要人 九大工:岩松孝紀、田中勇渡、 田村元、藤啓太、桃谷紀広 九大応力研:渡辺英雄

### 参考文献

- [1] Y. Fukai, "The metal-hydrogen system", Springer-Verlag (1993).
- [2] K. Hashizume et al., J. Nucl Sci. Technol., 31 (1994) 1294.

### 高温プラズマ曝露炉内機器の表面変質と損傷に関する総合的研究

九州大学応用力学研究所 吉田直亮

### 1. 研究目的

核融合炉の開発を目指す高温プラズマ閉じ込め装置のプラズマ対向表面は、プラズマとの強い相互作用によって様々に変質し、その性能や寿命のみならずプラズマの特性や制御にも少なからぬ影響を及ぼすことが知られている。この現象は特に長時間放電下で顕在化し、放電の持続を妨げる重大な原因の一つであることも明らかになってきた。この現象を司るメカニズムを明らかにすることによって定常放電実現への対応策を見出すことは、核融合炉開発の基礎研究として重要な課題である。

本年度はこれまでに引き続き長時間放電実験が頻繁に行われている QUEST および LHD (核融合科学研究所)の真空容器内に多くのプローブ試料を設置し、高温プラズマとの相互作用等によってもたらされるプラズマ対向壁表面の変質とそれが水素の吸蔵・熱放出に与える影響について調べた。また、直線プラズマ装置 NAGDIS-II (名古屋大学)を用いて W 再堆積層形成に及ぼす同時 He プラズマ照射効果についても共同研究を開始した。LHD や NAGDIS-II を用いての研究でも多くの興味深い成果が得られたが、紙面の制限もあり本稿では QUEST に関連する研究成果に絞り報告する。

### 2. 実験結果及び考察

QUEST における 2018 年度の放電実験(2018S/S, 2018A/W)では CHI 放電実験及び 28GHz 高出力入射電流駆動実験の短パルス放電(数秒以下)に加え、超長時間放電実験(2018S/S:放電時間=30~56分、壁温度=200°C、2018A/W:放電時間=30~60分、壁温度=120, 200, 150°C)が一年ぶりに再開された。2017 年度は長時間放電実験が行われなかったこともあり、壁表面に新たに堆積した不純物は僅かでその殆どは C であったが、長時間放電実験が再開された 2018 年度のキャンペーンでは再び金属元素を多く含む堆積層が形成されるようになった。図1に上部壁(T)、赤道壁(E・)及び下部壁(B)に設置し 2018A/W の全放電に曝露したプローブ試料(Mo)の GD・OES 分析結果を示す。例えば、上部壁(T)の Fe, Cr, Ni, W の原子濃度はそれぞれ 24, 6, 3, 1.8 at%程度と評価でき、金属元素の濃度が35at%を超えた(残りの大半は C, O)。これらの元素は主に近傍の壁面から弾き出された元素が再堆積したものであることから、軽元素ではスパッタ率が高くなることを考慮すると、実際の上部壁(APS・W被覆 SUS316L 板)を覆う堆積層の組成は金属元素が 50at%を超えているものと思われる。

図 2 に 2017A/W 終了後に取り外したプラズマ対向壁パネル(APS-W 被覆 SUS316L)から切り出した断面薄膜試料の TEM 写真を示した。APS-W の直上には先ず 2014-2015 年度に積もった C を主成分とする隙間の多い非晶質堆積層(白い像の部分)が形成され、その上に超長時間放電が頻繁に行われた 2016S/S と 2016A/W で堆積した金属元素を多く含むナノ結晶粒子の集合体(黒い像の部分)が積もっている。1017 年度は長時間放電実験が無く上下壁への再堆積(ほとんどが C)が非常に少ないことから、2018 年度のキャンペーンは 2016 年度に形成された堆積層をプラズマ対向面として放電実験が行われたものと考えられる。即ち、超長時間放電で問題となる水素の粒子バランスを議論するには上下壁の場合厚さ  $30\sim50$ nm の金属原子と C, C0 が混合したナノ結晶の集合体で表面が覆われた C1 APS-W との水素のやり取りを議論する必要が有ることが明らかになった。

赤道壁には上下壁とは異なり SUS316L 板材が使用されている。図 3 に 2016-2018 年度の 3 年間 (6 実験キャンペーン) 赤道壁面上に固定されプラズマに曝した SUS316L 板材の GD-OES 分析結果を示す。堆積層の厚さは 40-60nm 程度で上下壁より少し厚い。堆積層中の Fe, Cr, W の原子濃度は深さによって、即ち、堆積した時期によって変動が大きいが、最大濃度はそれぞれ 35, 10, 12 at%程度で上下壁と比べ更に金属元素が高い堆積層になっている。

QUEST における超長時間放電の停止は、真空容器壁からの水素の再放出速度が徐々に増加し適切な

プラズマ密度を保てなくなったことによって起こる。この現象を抑制し安定な放電を持続させるためには、壁のどの場所で水素の大きな再放出が起こっているのかを突き止める必要がある。そのためには、先ず、それぞれの場所での水素の吸蔵能と放出温度特性を知る必要がある。すでに報告しているように 2016 年度以降の金属元素を多量に含む堆積層は水素吸蔵能は低く、室温で注入した重水素は  $190^{\circ}$ C までの加熱でその大半が熱放出される。従って壁温度  $200^{\circ}$ C での放電実験では堆積層内に蓄積される水素量は少なくそれらが異常再放出現象に直接関与することは考え難い。堆積層を通り抜けた水素は下地の APS-W または SUS316L 中に侵入し更に内部へと拡散する。SUS316L は  $100^{\circ}$ C 以上になると H を 殆ど捕捉・保持できないのとは対照的に、APS-W はその欠陥の多い構造が原因となって大量の H を捕捉でき、しかも室温から  $800^{\circ}$ C までの広い温度範囲で放出が起こる。プラズマ対向面の水素吸蔵能の観点からは APS-W を被覆した上下壁面が粒子バランスを支配している可能性が高い。

水素の捕捉・再放出は温度に敏感であるため、放電の途中で温度が上昇すると思わぬ再放出が起こる可能性もある。また、入射する水素粒子のフラックスが高い場所では再放出のタイミングも早く、粒子バランスへの寄与も大きくなる。粒子バランスを支配している場所についての最終的な結論を得るためには、プラズマ対向面の精密な温度測定、各場所での入射水素粒子フラックスの測定などについても合わせて調べる必要がある。

QUEST では今後壁温度を  $300-500^{\circ}$ C に上げての超長時間放電実験が計画されており、現在の APS-W にかわる水素リサイクリングを制御し易い W 材料とその被覆法が検討されている。十分圧延加工したタングステン薄板材(例えば、プランゼー社製 0.1mm 厚板材)では、 $200^{\circ}$ C で注入した重水素は全く内部に残留せず、室温で注入しても  $250^{\circ}$ C までには全てが熱放出されることも判ってきた。この課題についても今後集中的に取り組んでいく予定である。

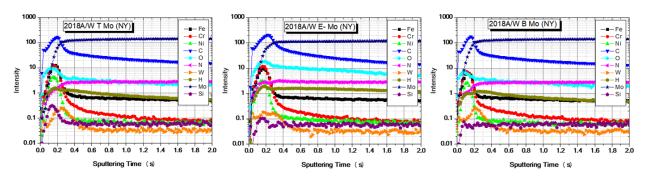


図 1 2018A/W における GD-OES 測定。各元素の深さ分布。スパッタ速度: 40nm/s 程度

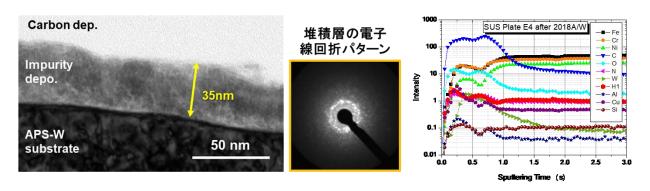


図2 2017A/W 後に取り出した APS/被覆壁パネルの表面の 断面組織

図3 2016-2018 年度に赤道面 プラズマ曝露した SUS 板 の GD-OES 分析

# 高エネルギーイオン照射された酸化物絶縁被覆の微細構造における 熱処理による回復挙動

核融合科学研究所 菱沼 良光

### 1. 研究目的

液体金属や溶融塩を用いた核融合先進ブランケットの要素技術開発において、MHD による液体金属の圧損や透過によるトリチウム漏洩の抑制は大きな課題であり、その対策としてブランケット部材への酸化物被覆が検討されている。酸化物被覆層における中性子照射効果は、先進ブランケットを設計する上で、大変重要な因子である。しかしながら、酸化物被覆層の中性子照射効果の研究については、国内的に原子炉が停止している事情も然ることながら、大変手間がかかる上に長期間の照射時間を要する。

一方で、イオン照射は損傷領域が限定されるものの短時間で大きな照射量が期待できとともに、実際の中性子照射における加速試験に相当するものである。このように、酸化物被覆材の中性子照射効果を検討する上で、イオン照射実験からの知見は先進ブランケット設計に重要であると言える。そこで、九州大学応用力学研究所に設置されている重イオン照射が可能な高エネルギーイオン発生装置にて照射損傷された酸化物被覆層の微視的構造及び膜質の変化を明らかにすることを主目的とし、本研究ではイオン照射後の酸化物被覆層の微細組織における熱処理による回復挙動を検討する。

### 2. 実験方法

SUS316 基板(基板温度 500°C)に  $Y_2O_3$ 層を成膜した後、核融合研の MOCVD 装置にて  $Er_2O_3/Y_2O_3/SUS$  二 重被覆膜を成膜した。MOCVD 被覆は直径 10 mm、厚さ 1 mm の SUS 基板上に成膜し、その成膜条件は 500 °Cの 3 時間とした。MOCVD 成膜後の  $Er_2O_3$  及び  $Y_2O_3$  被覆の膜厚はおよそ 800nm 及び 500nm であった。製作した  $Er_2O_3/Y_2O_3/SUS316$  二重被覆材を九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器にて成膜表面に対してイオンビーム照射を実施した。なお、イオン源は 2.4 MeV の  $Cu^{2+}$ イオンとした。イオン

ビーム照射前に Transport of Ions in Matter (TRIM)コードにて  $Er_2O_3/Y_2O_3/SUS$  における照射損傷速度を計算した。 TRIM 計算結果を基にして、本研究における照射損傷速度は  $Er_2O_3$  層の中心付近である  $1.44\times10^{-5}$  dpa/sec とし(図 1 参照)、室温にて 1.5 dpa 相当の  $Cu^{2+}$  イオン照射を実施した。現在、照射損傷領域の微細組織の回復を目的とした種々の熱処理を実施している。

Cu<sup>2+</sup>イオン照射前後の Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 単層被覆材の膜質変化の 1 つとして、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆と SUS 基板との間の剥離強度に注目したスクラッチ試験を実施した。スクラッチ試験は、自動車の多重塗膜や DLC 等の硬質被膜の剥離を数

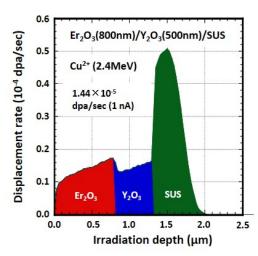


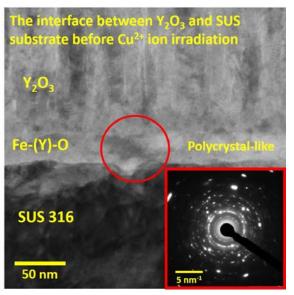
図 1 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆層の Cu<sup>2+</sup>イオン 照射損傷速度の深さ依存性

値化する目的で頻繁に用いられており、すでに日本工 業規格(JIS)にも認定されている試験法である。

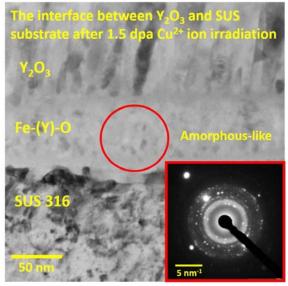
一方、酸化物被覆層及び被覆層と SUS 基板界面の微細組織における Cu<sup>2+</sup>イオン照射前後の変化については、集東イオンビーム加工機(FIB:日立製 NB-5000)にてサンプリング及び薄片化加工を行い、走査型透過電子顕微鏡(STEM:日本電子製 JEM-2800)観察をもって検討した。

### 3. 結果と考察

室温での Cu<sup>2+</sup>イオン照射前後の Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 層界 面における断面微細組織を図2に示す。図2(a)はイオ ン照射前試料を、(b)は 1.5dpa のイオン照射後試料をそ れぞれ示す。図 2(a)の TEM 像からは、Y₂O₃ 中間層の上 に MOCVD にて Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層を成膜中に、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中間層と SUS 基板の界面に 20nm 厚さ程度の Fe-(Y)-O 相が生成して いることが分かる。これは、MOCVD 過程での Fe 原子 とY原子の相互拡散によって生成したものと考えられ る。図 2(b)に示すイオン照射後の界面では、照射によ って Fe-(Y)-O 相が厚くなる傾向が見られた。これは、 図 1 に示す Cu<sup>2+</sup>イオン照射損傷速度の深さ依存性から も分かるように、界面付近の損傷速度は酸化物被覆層 よりも大きいために、Y2O3中間層への Fe 原子の拡散が 促進されたためであると考えられる。また、イオン照 射前後の Fe-(Y)-O 相の制限視野電子回折(SAED)パタ ーンを比較すると、イオン照射によって、非晶質(ア



(a) イオン照射前



(b) イオン照射後(1.5dpa 相当)

図 2 室温での  $Cu^{2+}$  イオン照射前後の  $Er_2O_3/Y_2O_3/SUS$  二重被覆層における断面 TEM 像 (a) イオン照射前試料及び(b) 1.5dpa 相当のイオン 照射後試料を示す。

モルファス) 化が進行していることが明らかになった。以上のことから、イオン照射の影響は、酸化物 被覆層よりも酸化物/金属界面に強く表れることが分かった。

一方、イオン照射損傷量の増加に伴って密着強度は単調に低下する傾向が観測された。そして、1.5 dpa の照射損傷では、未照射と比較して約 70%の強度まで低下した。Cu²+イオン照射による密着強度の低下 要因としては、図 2 に示すように、イオン照射によって Fe-(Y)-O 相の生成促進及びアモルファス化等の 層界面での微細構造変化によって界面付近の強度が低下したためであると考えられる。

研究成果: Y. Hishinuma et al. "Microstructure and peeling behavior of MOCVD processed oxide insulator coating before and after ion beam irradiation", Nuclear Materials and Energy, vol.16, (2018), p.123-127

# 鉄系合金の電磁気特性と照射ナノ組織の関係

岩手大学理工学部 物理·材料理工学科 鎌田康寛

### 目的

中性子照射環境下での鉄系遷移金属合金の磁性に与える照射効果の解明が重要とされている。例えば Fe-Co-Ni 系合金の場合、キュリー温度以上で常磁性に変態する性質に着目し、第四世代原子炉の自己作動型炉停止機構の電磁石としての利用が期待されている。磁性が照射により変化すると安全上問題となるため、照射効果の把握が必要である。その種の実験では中性子照射の実施が不可欠であるが、原子炉とホットラボが必要なため系統的な実験は難しい。代替実験として中性子と同様にカスケード損傷を起こすイオン照射が考えられるが、損傷領域が表面 1μm 以下のため、バルク材試料では損傷部のみの磁性を評価することが難しい。それに対して薄膜試料を使うと損傷領域のみの磁性評価が可能となる。ここで、鉄系 3d 遷移金属の磁性は結晶構造と密接な関係があると言われている。本報告では、Ni 濃度を変えて結晶構造を制御した Fe-Ni 合金薄膜を作製し、照射前後の構造・磁性を調べた研究成果を紹介する。なお、並行して実施した熱時効した Fe-Cr 合金のスピノーダル分解の研究成果については省略する。

### 実験方法

良質な薄膜作製のため、まず基板の前処理条件を調べた。MgO は潮解性があり、長期保管で表面に変質層が生じ得る。本研究では、Ar イオンミリングと酸素雰囲気中 1000℃熱処理を組み合わせ、AFM 及びXPSで表面状態を調べて前処理条件を決めた。その基板上に超高真空蒸着法により合金薄膜を作製した。500℃で16, 24, 29, 36%Ni 合金を電子ビームで200nm 蒸着し、600℃熱処理した。さらに、高真空ランプ加熱炉で1000℃熱処理した。結晶成長の様子をRHEEDでその場観察し、EBSD 及びXRDで構造解析を行った。イオン照射は、九州大・応用力学研究所のタンデム型加速器を用いて室温で2.4MeVのCu²+を照射した。その際の損傷量はSRIMコードより0.9dpaと見積もられた。磁気特性はVSMにより評価した。

### 結果及び考察

最適化を行った MgO 基板の表面は、AFM よりテラスと原子層ステップが見られ、XPS より水酸化物がほとんど無いことを確認した(Fig.1)。その上に蒸着した合金薄膜の構造を調べたところ、600℃熱処理後の結晶構造及び成長方位は、基板の MgO(001)[100]に対して以下の通りであった。

16,24%Ni:bcc(001)[110],29%Ni:fcc(001)[100]+bcc(001)[110],36%Ni:fcc(001)[100]
29%Ni については、1000℃熱処理後に fcc 単相となった。さらにイオン照射後、その fcc 相の一部が bcc 相に変化した(Fig.2)。続いて、照射前後で磁気測定を行ったところ、16,24,36%Ni では、磁化の変化は見られなかった。一方で、29%Ni では照射による磁化の増大を確認した(Fig.3)。

次に 29%Ni 合金で照射により飽和磁化が増加した原因を考える。 照射前は fcc 相のみで飽和磁化は 125 emu/cm³、 照射後は fcc と bcc 相の混相で 701 emu/cm³ であった。 新しく形成した bcc 相の飽和磁化が 24%Ni の値(1535 emu/cm³)と同じと考え、元々存在した fcc 相の磁化が変化しないと考えた場合、試料全体の磁化は 294 emu/cm³ となり、実験値を説明できない。一方、fcc 相の飽和磁化が照射により 584 emu/cm³ まで約 5 倍増加したとすると実験値を再現できる。

ここで、fcc 相の磁化が照射により増加した原因を考える。Ni 組成が30%前後の所謂fcc-Fe-Ni インバー

合金の磁性は、原子配列(規則・不規則状態)や原子間距離に強く依存すると言われている。本研究の Fe-29%Ni 薄膜では、カスケード損傷による短距離秩序化や照射で導入された空孔による Fe-Fe 原子間距離の増加が起こり、飽和磁化が増加した可能性が考えられる。

### まとめ

結晶構造の異なる Fe-Ni 合金薄膜を作製し、磁性に与える照射効果を調べた。16,24,36%Ni では照射後、磁化は変化しなかったが、29%Ni では増大した。これは、fcc 相の一部が照射により bcc 相に変態したことに加え、fcc 相の磁化が約 5 倍増加したことによると考えられる。磁性が結晶構造に敏感な鉄系合金の場合、照射により磁性が大きく変化することを明らかにした。

### 成果報告(学会発表):

- ・生内幸亜,鎌田康寛,村上武,小林悟,渡辺英雄,"Fe-Cr 二元合金の組織、硬さ、磁気ヒステリシス特性に与える熱時効効果",日本金属学会 2018 年秋期講演大会、東北大,仙台,2018.9.19
- T. Oyake, Y. Kamada, T. Takahashi, T. Murakami, S. Kobayashi and H. Watanabe, "Ion Irradiation Effects on Magnetic Properties of Fe-Ni Alloys", JCS-14, Sep.26, 2018, Tohoku Univ., Sendai

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

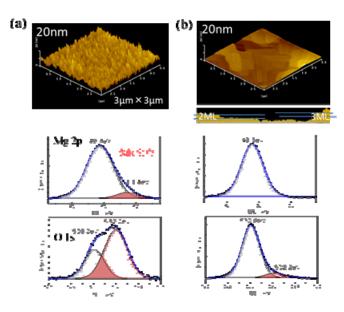


Fig. 1. MgO の AFM (上)、XPS (下) の結果 (a) 処理なし (b) 酸素雰囲気中 1000℃熱処理後

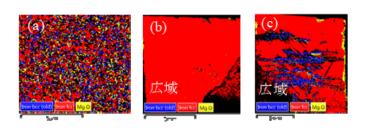


Fig. 2. Fe-29%Ni 薄膜の EBSD 解析結果 (a) 成膜後 (b) 1000℃熱処理後 (c) 照射後

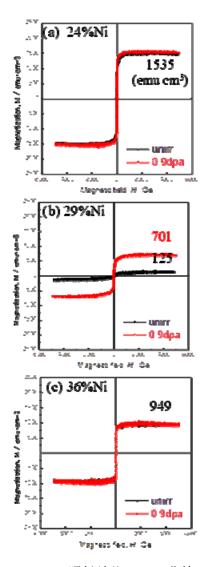


Fig. 3. 照射前後の MH 曲線

### 鉄合金の照射劣化挙動に関する基礎的検討

東芝エネルギーシステムズ 鹿野文寿

### 1. はじめに

原子炉の高経年化対策では、交換が困難である原子炉圧力容器の照射脆化への対応が必要である。照射脆化による材料劣化について、運転年数の短い低照射領域では最近の研究で理解が進んでいるが、高照射領域での振る舞いやメカニズムは、まだ十分に理解されていない。照射脆化は、Cu 等のクラスタ(析出物)とマトリクス欠陥(主に照射による転位ループ)に起因すると考えられており、特に Cu クラスタの寄与が大きい。一方で高照射領域では Cu クラスタが飽和傾向にあり、その他の脆化因子の寄与が顕在化するという指摘がある。

本研究は、中性子照射による Cu クラスタ密度が飽和した高照射領域での照射挙動を知るため、模擬的に Cu クラスタを作り、そこにイオン照射し高照射領域での照射挙動を評価することを目的とする。本報告は、その第一ステップとして、Cu クラスタ模擬材を準備し、Cu イオン照射を行ったものである。

### 2. Cuクラスタ模擬材の作製

Fe中のCuは、析出強化元素として知られており、熱処理を活用することで、自動車をはじめとして、一般的に産業利用されている。このような知見を活用し、熱処理で、模擬脆化材を作ることを試みた。これまでの検討で、実用材程度のCu量(0.1%以下)では、熱処理でCu析出物を作るのは容易でないため、規格上限である0.4%のCuを含む低合金鋼で、熱処理を行った。熱処理条件は、温度450℃で、熱時効時間は0、98、120、132時間である。

熱処理後の試験片のCu 濃度分布について、透過電子顕微鏡観察・元素マッピング分析を行った。TEM観察・分析は、応用力学研究所(馬出アイソトープ実験センター内実験室)の200kV原子分解能顕微鏡を用いた。組成分析(マッピング)は電子線プローブ径0.2nmで、1ドットのビーム滞在時間20m秒、画素数256×256ドットで実施した。その結果、Cuクラスタの平均サイズ2~3 nm、数密度~1×10<sup>23</sup> m<sup>-3</sup>であり、40 年程度経過した原子力プラントの圧力容器鋼におけるCuクラスタ分布を概ね模擬できていることを確認した。その測定結果を図1に示す。

### 3. イオン照射試験

イオン照射試験は、九州大学応用力学研究所研究棟に設置されているハイボルテージ・エンジニアリング社製重イオン照射システムを利用した。加速電圧 2.4MeV で Cu²+イオンを照射した。照射速度は 1 × 10<sup>-4</sup>dpa/s で、照射量は 0.5 および 0.33dpa の 2 水準とし、照射温度は 80℃とした。このとき薄膜は場所によって厚さが異なるが、TEMでの観察領域である 100nm 厚さの場所で照射評価を行うこととし、Cu イオンは貫通するため、観察時に自己イオンである Cu イオンが組成的な影響を示すことはなく、生成された照射欠陥のみの影響が見られることとなる。

### 4. まとめ

高照射領域での低合金鋼の組織挙動を模擬するため、模擬CuMnNiクラスタが分布した低合金鋼にイオン照射を最大0.5dpaまで実施した。0.5dpaは、これまで300℃でのイオン照射で明瞭な転位ループが観察されている照射量である。

### 5. 今後の予定

中性子照射脆化した低合金鋼におけるマトリクス欠陥の寄与を明らかにするため、TEM観察をすすめ、高照射時の 挙動予測の検討を進めていきたい。

### 6. 研究成果報告

平林潤一、藤田敏之、鹿野文寿、渡邊英雄ら、「照射脆化因子の形成に伴う低合金鋼の電磁気特性変化」、日本金属学会2019年春期大会、東京電機大

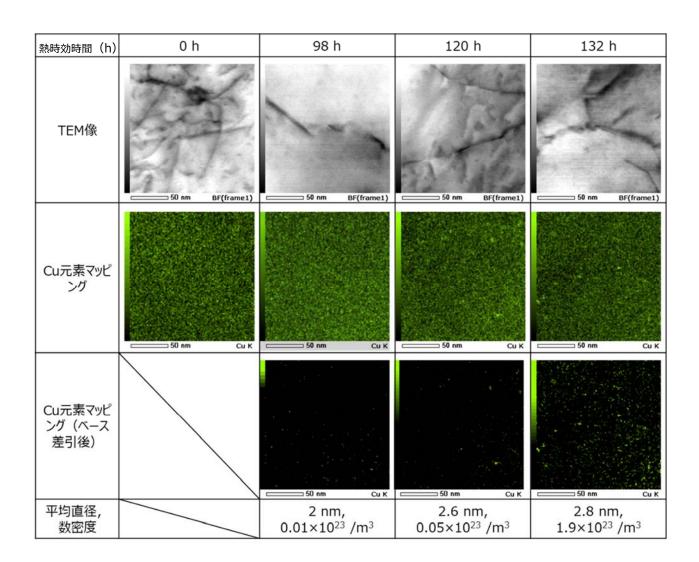


図1 熱時効材の電子顕微鏡観察・分析結果

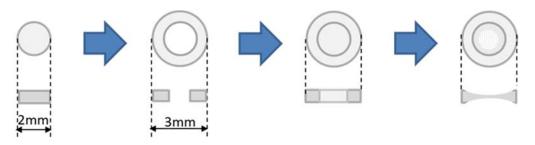


図2 イオン照射試料の作成の流れ

研究代表者: 鹿野文寿 研究協力者: 藤田敏之

平林潤一

片山義紀(東芝エネルギーシステムズ)、

渡邊英雄(九大応研)

30FP-26

種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー 密度入射損耗解析法の開発 応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所 糟谷紘一 九州大学応用力学研究所 徳永和俊 東京工業大学フロンティア材料研究所 川路 均

概要

表記の課題に関連する、最近の共同研究結果について、下記の諸項目についてその概要を述べる。(1)複合材料と厚さ計による損耗破壊監視計測法の設計と検討、(2)関連分光分析のための計測器の整備と初期テスト、(3)放射のアップコンバージョン法を利用する新しい計測法の予備試験、(4)関連調査項目。

目的 応用力学研究所の電子ビーム熱負荷発生装置を用いて、諸材料表面を照射し、各種計測装置により、表面損耗量(喪失総質量)等を測定する。これらの結果を生かして、極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指す。これらが本共同研究の最終目標である。本研究では、近く再開する電子ビーム照射のために、関連計測装置の準備と新規な方法の調査・提案を行った。

複合材料と厚さ計による損耗破壊監視計測法の設計と検討 極限状態に対向するタングステン箔と透明 SiC 薄板の組み合わせヘッド背後から、SiC 板の厚さを監視する方法については、厚さ計を新規に用意すれば実現可能であることが確認できた。高低額いずれかの厚さ計を用意するために、経費獲得の努力を、現在引き続き継続中である。

放射のアップコンバージョンと関連分光分析を含む、新しい計測法開発のための計測器の整備と予備実験結果 前項とは少々異なるアイデアとして、高温固体壁等からの熱放射を測る方法として、アップコンバージョン法を利用する新規な方法を提案しているが、ここでは、複雑な放射やノイズの影響を除いた、目的とする放射スペクトル領域に限定した有用な計測法開発のための準備結果を示す。

計測用検出ヘッド先端薄板の高温化で発生する近 赤外光を、アップコンバージョンにより可視光に変 換し、これを透明SiC越しに観測し、薄板そのもの の温度を測りたい。もちろん、貫通と同時に外方向 に出てくる内部からの電磁波そのものも検出できる から、アップコンバージョンしなくとも、これらを 検出すれば、破壊の瞬間を検知できるから、一応 は、大型装置の破壊に至る危険な状態は十分にモニ ターできる。これとは別に、破壊前後の検出ヘッド 薄板の温度変化の・その場測定が、アップコンバー ジョン光の計測によりできることになれば、新しい 方法論的成果が得られることになる。

まず初めに、東京工業大学・ファインセラミックス研究所の小型真空蒸着装置(日本真空アルバック社製)により、タングステン箔やアルミナ薄板を加熱し、応用ながれ研究所の既有溶融石英ファイバーと、九州大学・応用力学研究所の小型分光器(Ocean Optics 社・HR2000CG 高速ブロードバンド分光器)により、発光スペクトルを測定した。初期の結果例を、文末の参考資料1-2 に書いた。

その後に、米国品の代わりの中国産のアップコンバージョン材料を用意し、さらに分光測定関連の追加用品の整備を進めたが、これらと小型真空蒸着装置を併用する実験では、現在までのところ、明るいアップコンバージョン光の計測には至っていない。

### 放射の変換による温度測定のための先進方法の模

索 熱放射光によるアップコンバージョンの場合、レーザー光に比べて輝度が低いので、多光子吸収アップコンバージョン過程のみに頼る(コヒーレント)アップコンバージョン光の発生効率は低い。 そこで、将来の髙輝度熱放射が利用できる前の低輝度熱放射による変換光を得るためには、より髙変換 効率の先進材料を探す必要がある。利用できそうな 材料の調査結果を以下に述べる。

インコヒーレントアップコンバージョン材料の調査と応用のための準備 文献調査により、下記の波長変換効率の高い3種のインコヒーレントアップコンバージョン材料を見つけた。開発担当者にサンプル提供を依頼したが、3件とも、現在までの所提供許可は得られていないが、インターネットのリンク先を参考資料3-5に示す。現在、最終例について素材を購入し、試しに自作する用意をしている。

関連の深いその他の技術情報収集 上記と異なる方法として、2件の新しい提案を附記する。 1 新しい熱電変換材料の発見とその応用が、ごく最

近参考資料6に公表されている。

2 モスアイ材料の利用可能性の検討 本研究への応用が期待される、蛾の眼(モスアイ) の構造に習った、光反射率低下・無反射コート層 の、SiC, サファイア、ダイヤモンド、タングステ ン材料表面処理が、参考資料7 に記載されている。 2019/02/19 に市販品の見積書送付を電子メールに て依頼したが、応答はまだない。

極短波長ナノ秒EUVレーザー光による材料損耗 研究の詳細結果は参考資料8 にあるので、紙面の都 合により、ここでは繰り返し述べない。

### 参考資料

- 1. 糟谷紘一、徳永和俊 ほか、電子ビーム照射による材料表面の高エネルギー密度入射損耗開始閾値の評価、九州大学応用力学研究所共同利用研究成果報告書、平成 29 年度(第21号) pp. 196-197, 2018.
- 2. 糟谷紘一、徳永和俊、本越紳二、川路 均、 J. Straus K. Kolacek、et al, 井澤靖和、藤田雅 之、砂原 淳、本越伸二、島田義則、谷口誠治、中 井光男、波長変換による高熱流束測定、「原子分子 過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー

効果によるプラズマ科学の展開」、「原子分子データ 応用フォーラムセミナー」合同研究会、平成30年 12月19日-12月21日、核融合科学研究所.

3.

http://www.spring8.or.jp/ja/news\_publications/press\_release/2017/170130/

4.

https://www.titech.ac.jp/news/2017/039848.html **5.** K. Yoshihara, M. Sakamotol, H. Tamamitsu, M. Arakawa, K. Saitow, Extraordinary Field Enhancement of TiO2 Porous Layer up to 500-fold, Advanced Optical Materials DOI:10.1002/adom.201800462, 2018.

- 6. M. Sakamoto, T. Kawawaki, M. Kimura, J. Jhon, M. Vequizo, H. Matsunaga, C. Sampath, K. Ranasinghe, A. Yamakata, H. Matsuzaki, A. Furube, T. Teranishi, Clear and Transparent Nanocrystals for Infrared-Responsive Carrier Transfer, Nat. Commun., Article ASAP, January 24, 2019, DOI <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-018-08226-2">https://doi.org/10.1038/s41467-018-08226-2</a>.
- 7. http://elseed.com/jproducts/jmpss/
- 8. J. Straus, K. Kolacek, K. Kasuya et al, Response of plasma-facing materials to nanosecond pulses of extreme ultraviolet radiation. Laser and Particle Beams 1-15, https://doi.org/10.1017/S0263034618000332 Cambridge Univ. Press, 2018.

謝辞 この研究は、九州大学応用力学研究所の国内共同研究費(分類番号30FP-26)及び東京工業大学フロンティア材料研究所一般B共同研究費(採択番号22)の援助を受けて実施した。本研究を進めるにあたり、九州大学応用力学研究所(徳永和俊准教授、糟谷直宏准教授、拠点事務室)、東京工業大学フロンティア材料研究所(川路均教授、共同利用推進室)、応用ながれ研究所(糟谷惠子副代表)、核融合科学研究所、レーザー技術総合研究所の各位などの方々にお世話になった。 2019/02/28 報告

# 大規模シミュレーションによる MHD 不安定性の 3 次元構造解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 佐藤雅彦

高ベータ LHD プラズマは、プラズマ周辺部にて磁気丘が存在するため、理論的には MHD 不安定である。しかしながら、LHD 実験では、体積平均ベータ値が約 5%の高ベータプラズマが得られおり、MHD 不安定ではあるものの、その飽和レベルは閉じ込め性能に大きな影響を及ぼしていないことを示唆している。これまでに行ってきた MHD モデルに基づくシミュレーション研究では、高ベータ LHD プラズマはプラズマ周辺部にて抵抗性バルーニングモードが不安定であるが、非線形段階において不安定性の影響がプラズマ中心部まで及ぶことにより、中心圧力が大きく減少することを示してきた[1]。この MHD モデルに基づくシミュレーションは、LHD 実験結果を再現するに至っておらず、計算モデルの改良が必要であることを示唆している。そこで、本年度においては熱イオンを運動論的に取り扱うように計算モデルを拡張し、熱イオンの運動論的効果が抵抗性バルーニングモードに対する影響について調べた。本研究では、拡張された MEGA コードを用い、熱イオンをドリフト運動論、電子は断熱モデルを仮定した流体モデルで取り扱っている。MHD 平衡は HINT コードにより構築し、中心ベータ値が約 7.5%のプラズマを仮定した。この平衡はプラズマ周辺部にてメルシエ不安定な領域が存在する。初期平衡においては、電子圧力とイオン圧力は等しいと仮定し、HINT 平衡により得られた圧力の半分で与えている。簡単のために密度の初期分布は一様であると仮定した。また、イオンの分布関数はマクセル分布を仮定した。

トロイダルモード数が n=10 の抵抗性バルーニングモードに対して解析を行なった結果、運動論的 MHD モデルから得られた線形成長率は、MHD モデルより得られる成長率の約 60%程度であることがわかった。この時の n=10 モードの電子圧力、および、イオン圧力の摂動成分の固有関数を図 1 に示す[2]。電子圧力の揺動レベルに対してイオン圧力の揺動レベルが減少しており、特に、磁力線に垂直方向のイオン圧力の揺動成分が著しく抑制されている。この原因を調べたところ、歳差ドリフトにより、捕捉イオンがモード構造を横切るように運動するため、MHD 不安定性に対する応答が著しく弱くなるからであることがわかった(図 2)。今後は、非線形飽和レベルへの熱イオンの運動論的効果の解析を進めていく予定である。

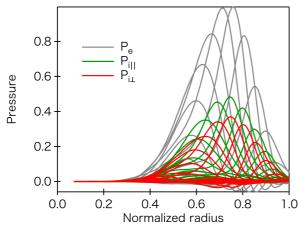


図 1. n=10 の抵抗性バルーニングモードの揺動 圧力の固有関数分布。黒線は電子圧力  $(P_e)$ 、緑線は磁力線方向のイオン圧力  $(P_{iii})$ 、赤線は磁力線に垂直方向の電子圧力  $(P_{iii})$  を示している。振幅は電子圧力の(m,n)=(13,10)モードの振幅で規格化されている。

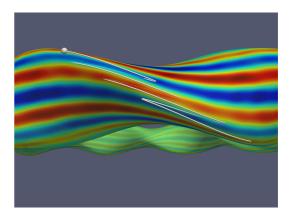


図2. 磁気面上の電子圧力の揺動成分の等値面、 および、捕捉イオンの軌道。赤、青の領域は、電 子圧力の揺動成分が正、負の領域に対応する。 捕捉イオンは、モードの振幅が正、負の両方の 領域を通過する。

先に述べた LHD プラズマの解析の他、トーラス装置 PLATO に対する MHD 不安定性の解析のため、PLATO の磁場平衡の構 築も行った[3]。 磁場平衡の評価には、統合輸送解析コード TASK の平衡解析モジュール EQU を使用した。EQU モジュールでは、 ポロイダルコイル電流を含めた自由境界プラズマの平衡計算を 行うことができる。このモジュールを用いて、ポロイダルコイ ル電流変化に対応したプラズマ形状パラメータ(楕円度  $\kappa$  や  $Z^{0.0}$ 三角度  $\delta$ )を評価した。図 3 に EQU モジュールを使用した PLATO 装置における平衡磁場配位の計算結果を示す。ここで は、プラズマ電流 75kA、三角度 0.5 程度、楕円度 1.7 程度を 仮定しており、PLATO 装置で標準的な条件での平衡磁場配位 に対応する。次に、三角度と楕円度を変化させた計算結果を図4 に示す。(A)は、図3に示す標準的な平衡磁場配位のコイル電流 のうち OH コイルを-45kA turn に下げることで三角度と精 円度を大きくした計算結果である。一方、(B) は反対に OH コイ ルを-70kA turn に上げることにより三角度と楕円度を抑えた 計算結果となっている。今後は、これらの MHD 平衡に対して MIPS コードを用いた MHD 安定性の解析を進めていく予定で ある。

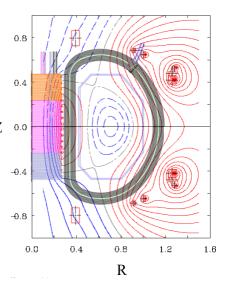


図 3. EQU モジュールより得られた、標準平衡配位である  $\kappa$  =1.7,  $\delta$  =0.5 とした時の平衡磁場配位。

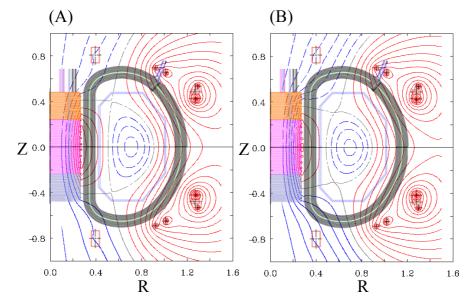


図 4. (A) 楕円度と三角度を大きくした場合 ( $\kappa$ =2.0,  $\delta$ =0.79) と(B) 楕円度 と三角度を小さくした場合 ( $\kappa$ =1.5,  $\delta$ =0.36) の平衡磁場配位。

- [1] M. Sato et al, Nuclear Fusion **57** (2017) 126023.
- [2] M. Sato et al, 27th IAEA Fusion Energy Conference (2018), TH/P5-25.
- [3] 富松修平他, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第22回支部大会 (2018), P-17.

### 水素プラズマスパッタ法で形成される多孔質金属膜への水素蓄積と透過挙動

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

### 【緒言】

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

スパッタ・成膜過程では、膜成長表面はワーキングガスである水素ガス、プラズマからの水素イオン、スパッタターゲットからの反跳水素等にさらされる。しかしながら、それぞれの水素が W 膜形成過程での水素捕捉にどのように寄与しているかについては明らかとなっていなかった。一昨年度の応用力学研究所との共同研究において、プラズマスパッタ装置内に基板設置ステージを取り付け、異なる環境下における W 膜と水素捕捉量を調査した。その結果、スパッタターゲットからの反跳水素の影響が支配的であることが示唆された。反跳水素が膜表面に衝突した後、プラズマ中に反射するもの、表面層に蓄積するもの、内部へ浸透するものが想定されるが、未だ明らかにされていない。昨年度の応用力学研究所との共同研究において、成膜過程で膜を透過する水素挙動を観測するための実験装置を作製した。本研究では、作製した実験装置を用いて、成膜過程での水素透過フラックスを測定するとともに、温度の効果について調べた。

### 【実験方法】

昨年度実施した共同研究において、既設のRF水素プラズマスパッタリング装置の接地電極を改造し、膜及び基板を透過した水素を質量分析計で測定できるようにした。本年度は温度効果を評価するために、側面石英窓に赤外線ランプを設置し、外部から透過部を加熱する仕組みを追加した。Fig.1 に改良した装置概略図を示す。

真空チャンバー下部フランジから 1/2 インチステンレス管を挿入し、金属ジョイントを介して ICF34 フランジ が溶接された 1/4 ステンレス管を取り付けた。ターゲットからの距離を変更することができるよう、金属ジョイントに挿入した 1/4 ステンレスは O リングにより固定し、可変かつ気密性が保持される構造とした。ICF34 フランジに、銅ガスケット、ニッケル基板を乗せ、最後に ICF34 穴あきフランジで挟み込んで締め付けた。ニッケル基板に

よってスパッタリング装置内の空間と接地電極内の空間とが物理的に隔絶されている。RF 電極には、タングステン板を設置した。ICF フランジ近傍にプローブを設置し流入する電流値を測定した。

ターボ分子ポンプによりプラズマ側及び透過側の真空排気を十分に行い、プラズマ側の真空ポンプをロータリーポンプに切り替えた。透過側に設置された四重極質量分析計 (QMS)を立ち上げて、信号の安定待ちを行った。その後、プラズマ側にマスフローコントローラーを介して水素ガスを導入しガス圧を調整した。また、この際供給した水素の透過側へのリークがないことを確認した。その後RF電極に13.56MHzのRF電力を印加して電極間にプラズマを点火し、ニッケル基板上への薄膜の形成をはじめた。標準的な放電条件は、RF電力100W、水素圧力10Pa、ニッケル基板厚み20μm、電極間距離6.5cmとした。

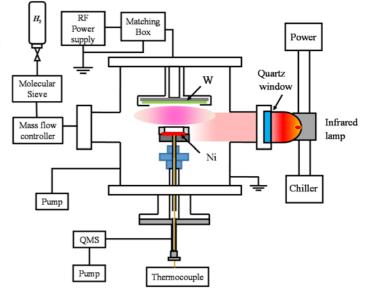


Fig.1 RF 水素プラズマスパッタリング装置

### 【結果及び考察】

標準放電条件において、赤外線ランプによる外部加熱を行った場合と行わなかった場合の水素透過フラックスとニッケル基板温度の経時変化を Fig.2 に示す。本実験により成膜過程において水素が W 膜及びニッケル基板を透過していることが明確に示された。このことは、膜の成長過程において膜表面層に入射された水素同位体は、入射位置付近に留まるだけではなく、80℃程度と比較的低温条件においても膜中を拡散移動していることを示す。

プラズマからの熱負荷のみでは、ニッケル基板温度は80℃程度まで緩やかに上昇した。赤外線ランプによる加熱を追加することで、140℃程度まで温度を上昇させることができた。温度が高い方が透過フラックスの立ち上がりが急峻であり、最大値も大きい。ある時間から透過フラックスは減少に転じ、時間に比例して低下を続けることがわかった。

放電開始後の急峻な増加は、ニッケル基板に直接入射さ れた水素が、プラズマ側表面に形成される W 膜によって プラズマ側への再放出を妨げられることに生じたものと 考えられる。ニッケル中の水素拡散係数は、温度の上昇と ともに増加することから、外部加熱を行った方が、透過開 始時間が早く、透過フラックスも大きくなったと考えられ る。時間とともに膜厚が増加し、水素の入射飛程を超える と、水素は W 膜に入射され、その一部は、ニッケル基板 へ拡散・浸透し透過する。W 膜中の拡散はニッケル中の拡 散に比べて遅いことから、水素の直接入射によってニッケ ル中に高い濃度で存在していた水素が透過側へ拡散・放出 されることで、透過フラックスがピークを示した後、徐々 に減少すると考えられる。10000sec 以降は、時間ともに 一定速度で透過フラックスが低下していることから、W 膜厚の増加に比例して透過フラックスが減少していると 考えられる。

プラズマ駆動透過による透過速度を決定するパラメータは、単純には拡散係数と再結合係数による。W 膜中の水素拡散係数については、これまでの研究において W 膜付きニッケル基板を試料とするガス駆動透過実験を通じて定量済みである。そこで、水素挙動解析コード TMAP を用いて、再結合係数をパラメータとする、実験結果へのフィッティングを行った。TMAP では膜厚の時間変化を模擬できないことから、ある時間での実験結果に対するフィッティングを行った。なお、ニッケル中の水素拡散係数、溶解度定数は Robertson らの値[1]を用いた。Fig.3 に示すように再結合係数の値によって透過フラックスが大きく異なり、プラズマ駆動透過速度を評価する上で、再結合係数が重要な物質移動パラメータであることがわかる。得られ

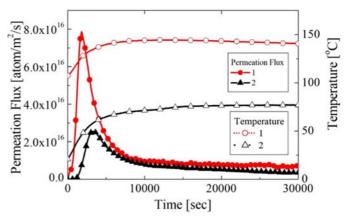


Fig.2 水素透過フラックスの経時変化(フラックス左軸: ▲外部加熱なし、●外部加熱あり、温度右軸: Δ:外部加熱なし、○:外部加熱あり)

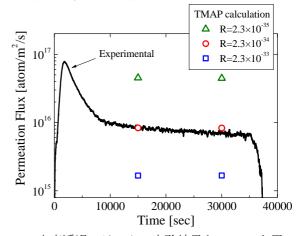
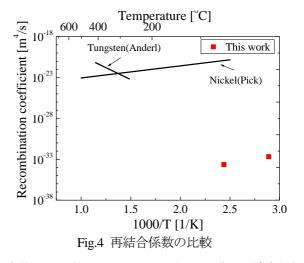


Fig.3 水素透過フラックス実験結果と TMAP を用いたフィッティング結果の一例



た再結合係数をタングステンバルク材[2]およびニッケルの報告値[3]と比較して Fig.4 に示す。W 膜の再結合係数は、温度が高い方が小さな値となることがわかった。今後、温度範囲を拡張して実験データを取得する予定である。

# 参考文献

- [1] W.M. Robertson, Z. Metallkde. 64 (1973), 436.
- [2] R.A. Anderl, et al., J. Nucl. Mater. 176&177 (1990) 683-689.
- [3] M.A. Pick, K. Sonnenberg., *J. Nucl. Mater.* **131** (1985) 208-220. 本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものである。

九州大学 応用力学研究所 平成30年度共同利用·共同研究 成果報告 30FP-29

### プラズマ乱流における非線形伝搬と、局地集中豪雨の統計解析への応用の研究

(Nonlinear Propagation Phenomena in Plasma Turbulence and Its Application to Statistical Analysis of Localized Torrential Rainfall)

杉田 暁¹、佐々木 真²、荒川弘之³

<sup>1</sup>中部大学 中部高等学術研究所 国際GISセンター、<sup>2</sup>九州大学 応用力学研究所、<sup>3</sup>島根大学

# 序論

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

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

### 方法

本研究で取り扱う気象データとして、気象庁・一般財団法人気象業務支援センターの配信する「高解像度降水ナウキャスト」を用いた。高解像度降水ナウキャストは、2014年8月7日から配信の始まった新しいデータで、5分間隔で配信される全国250mメッシュの格子データであり、そのサイズは、圧縮状態で1日あたり46GBにもなる大規模データである。全国20ヵ所のドップラーレーダー、気象庁・国交省・地方自治体の保有する全国10,000ヵ所の雨量計の観測データ、国交省XRAIN等を活用することで実現されている。本年は、この大規模データを用いて名古屋地区(緯度136.5~137.9、経度34.4~35.8)、期間(2016年8月21日~9月11日)について、突発的降雨

の時空間構造の抽出を行い、その統計解析を行った。

### 結果

2次元空間における空間分布を伴う降雨の時間発展から閾値を超える降雨の時空間構造を抽出した。閾値には強い降雨である 7mm/h を選択した。図1のように、空間2次元構造の閾値を超える降雨領域の時間発展について時間・空間の3次元的な「塊」としてその等値面を得た。抽出した時空間構造の一例を図2に示す。この3次元構造の起点の位置が、突発的降雨の発生した場所に対応し、この構造の時間発展から突発的降雨の伝播方向やその速度を知ることができる。図2の例では、太平洋側で発生した突発的降雨が伝播速度は20km/h 程度で北方向へ伝播し、その寿命が100分程度であったことが分かる。

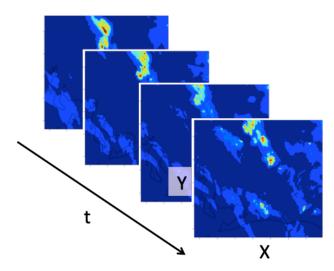


図 1 降雨量の時空間構造抽出方法

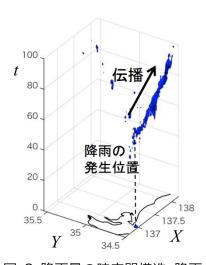


図 2 降雨量の時空間構造:降雨量 7mm/h の等値面(黒線は三河湾付近の海岸線)

# 展望

本研究の成果として得た伝搬の性質(伝搬方向・伝搬速度)を、地理空間と統合して解析することにより、具体的な応用を検討する。例えば、当該地域住民へのゲリラ豪雨対応のリードタイムを評価し、アラートに役立てることや、アメダス観測点等をモニタリングポイントとして、そこで大雨が観測された場合のその後の時間発展の予測を考慮したハザードマップ策定などに貢献することが考えられる。

### 謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所平成30年度共同利用・共同研究30FP-29、中部大学問題複合体を対象とする共同利用・共同研究IDEAS201831、及び文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(S1201030)の助成を受けたものです。

# 参考文献

- [1] S. Inagaki, et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 113006.
- [2] N. Kasuya, et al., Plasma Phys. Contrl. Fusion 57 (2015) 044010.
- [3] S. Sugita, et al., Plasma Fusion Res. 9 (2014) 1203044.
- [4] S. Sugita, et al., 5th Digital Earth Summit (2014) and 6th Digital Earth Summit (2016).

# プラズマ乱流現象に関する可視化手法の開発と応用

# 【研究目的】

核融合プラズマ研究において、プラズマの揺 動・乱流の現象を理解することは核融合発電実現 のための重要な課題の1つである。現在、応用力 学研究所では乱流プラズマ実験装置において、プ ローブや超高速度カメラを用いた測定およびシ ミュレーションにより揺動・乱流の解析が進めら れており、プラズマは3次元に複雑に動いている ことが判明している。 平成 29 年度の共同利用研 究において、ライトフィールドカメラを用いた画 像解析によるプラズマの揺動解析の手法の開発 を始め、x-v 平面の2次元においてプラズマの位 置を求める画像解析プログラムを作成した。本年 度はライトフィールドカメラの性能を確認し、画 像から奥行きであるz方向の位置情報を得ること を検討する。この手法が確立できればライトフィ ールドカメラの1枚の撮影画像からプラズマの 位置情報(3次元座標)を得ることができる。プ ラズマの乱流現象解析手法の1つとしての可能 性を検証する。

### **【ライトフィールドカメラについて】**

ライトフィールドカメラは、被写体からの光線を、三次元的な情報も含めて記録することが可能であり、イメージセンサーの前面にマイクロレンズアレイを配し、光線の明暗だけでなく、光線の入射方向に関する情報も記録するカメラである[1]。撮影後にピントを自由に移動させたり、被写体深度を変えたりした画像を出力することができる特徴を有している。本研究で使用したライトフィールドカメラは2014年に発売されたLYTRO社の「LYTRO ILLUM」である。ライトフィールドカメラはその構造から市販されている商品は限られていたが、LYTRO社は2017年にライ

### 有明工業高等専門学校‧一般教育科 竹内伯夫

トフィールドカメラに関するサービスおよび製造を終了した。現在は公式サイトも閉鎖し、オンラインヘルプや本体および LYTRO ILLUM 専用の P Cソフトウェアの操作マニュアルなども使用できない状況にある。

### 【検証方法】

本研究において、ライトフィールドカメラの特性およびPCソフトウェアを理解し、奥行きに相当する z 方向を特定する方法ついて検証する。図1に検証実験の様子を示す。



図1 検証実験の様子

ライトフィールドカメラの主レンズの先端から 5.0cm、10.0cm、15.0cmにある位置に被写体を置き、カメラでそれぞれの被写体にピントを合わせた際にカメラの液晶に表示される「スポット深度」の情報を調べる。その後、撮影した写真をパソコンに転送し、それぞれの画像に対してソフトウェアで3つの被写体にピントを合わせた「フォーカス」の値を調べる。カメラ本体に表示される「スポット深度」はソフトウェア上では表示されず、逆にソフトウェアで表示される「フォーカス」はカメラ本体には表示されないため、その関係についても調べることにした。

### 【検証結果および考察】

本検証で撮影した画像の例として、ピントを一番手前の被写体に合わせて撮影した写真を図2に示す。今回、3つの被写体に対して定点のライトフィールドカメラでピントをそれぞれ合わせた写真を撮影した。図の中の矢印はピントを合わせた位置を示す。前述の通り、それぞれの画像は後からピントを合わせることが可能であり、初めにカメラでピントを合わせた画像と、後からその場所にピントを合わせた画像はまったく同じになることを確認した。



図2 ライトフィールドカメラの撮影画像

また、被写体のカメラ主レンズの先端からの位置、スポット深度、フォーカスの値(それぞれ3回の測定の平均値)をまとめたものを表1に示す。

表 1 被写体位置、スポット深度、フォーカスの関係

| 被写体     | スポッ  | フォー    | フォー     | フォー     |
|---------|------|--------|---------|---------|
| 位置      | ト深度  | カス 1   | カス 2    | カス3     |
| 5. 0cm  | 16cm | -3. 07 | -16. 10 | -21. 04 |
| 10.0cm  | 21cm | 9. 53  | -3. 66  | -8. 79  |
| 15. 0cm | 27cm | 14. 80 | 1. 64   | -3. 85  |

カメラの液晶に表示されるスポット深度は被写体の奥行きを示すものである。主レンズの 先端からの位置に約 11cm を足した値となって いることが分かり、カメラで奥行き位置がほぼ 正確に測定できることを確認できた。ソフトウェアで表示されるフォーカスの値はピントを合わせた位置が-4.0であり、その値はピントを手前にすると小さく、奥にすると大きくなることが分かっている。スポット深度とフォーカスの間には相関はあるが、直接の関係は今回の測定では見つけることができなかった。

# 【まとめと今後の予定】

昨年度の研究によりライトフィールドカメラで撮影した画像から x-y 座標を、本年度の取り組みにより z 座標を特定、すなわち1枚の画像から対象となる物体の3次元位置情報を得ることができることを示した。今後は、座標特定の精度、実際のプラズマの画像での適用について検証していく予定である。一方でフォーカスについてはカメラに関する正しい知識も必要であることを感じた。また、LYTRO社のライトフィールドカメラ事業終了に伴い、別の3次元位置情報取得方法についても模索していく予定である。

### 【研究体制】

- •代表者 有明高専 一般教育科 竹内 伯夫
- ·協力者 有明高専 一般教育科 鮫島 朋子 有明高専 技術部 森田 恵一
- •世話人 九州大学 応用力学研究所 稲垣 滋

### 【謝辞】

昨年度に続き、ライトフィールドカメラについて共に調査した有明高専電気工学科 4 年の西村 勇輝氏と宇都隆史氏に感謝申し上げる。

### 【参考文献】

[1] 蚊野 浩「ライトフィールドカメラ Lytro の動作原理とアルゴリズム」第 127 回微小光学研究会, Vol.31, No.1, pp.17-22, 2013.

http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kano/pdf/paper/201 3%20MOC%20Lytro.pdf

### 長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程の解明と制御

九州大学応用力学研究所 中村一男

目的:QUEST および LHD における長時間放電を支配する壁排気について、タングステンに特化して その物理過程の解明と制御を目的とする。LHDにおけるヘリウム長時間放電では、Phase 1において高 い正の排気率を示し、Phase 2 において負の排気率に転じ、Phase 3 において再び正の排気率が復活す る。壁飽和と堆積層で解釈されている。QUESTにおける水素長時間放電では、Phase 1において高い 正の排気率を示し、粒子供給は時間とともに減少する。Phase 2 において粒子供給は停止したり再開し たりを繰返す。Phase 3 において粒子供給は全く行われなくなり、 $H_{\alpha}$ 一定制御不可となる。高温壁にお ける APS-W の壁排気で解釈されている。本共同利用研究では、APS-W の壁排気の物理素過程を解明 するとともに、その制御の方法の探索を目的とする。

序論:タングステン(W)は高融点、高熱伝導度、低熱膨張率、高質量密度を有する耐熱材料である。 Wコーティングは核融合炉における冷却配管、熱シールドなどの表面特性の改善に利用される。Wコー ティングの技術として APS (Atmospheric Pressure Spray)と VPS (Vacuum Plasma Spray)がある[1]。 溶射Wの壁排気の物理素過程を解明するには、溶射過程の解明、溶射Wの特性評価が必要である。溶射 Wの熱的特性評価として、電子ビームを熱源とした熱負荷装置を用いた熱負荷実験、市販ソフトウェア

ANSYS を用いた熱解析が共同利用研究でなされている[2]。ま た、タングステン(W)をITERや原型炉のダイバータ板とし て使用する計画である。その使用に際しては破壊靭性の評価が 必要である[3]。タングステン(W)の非等方性が破壊方向に及 ぼす影響について調査・検討したので、その内容について報告 する。

調査内容:身近な破壊の例としては、昨年9月6日に起きた「平 成30年北海道胆振東部地震」の際の土砂崩れがある。土とい う等方性材料に鉛直方向の重力が加重されれば、その重力は土 砂内に仮定した斜面に直角方向の圧縮応力度σと平行方向のせ ん断応力度 rに分解される。圧縮応力度 rに比例した摩擦力(せ ん断抵抗力) σtanθがせん断応力度と逆方向に働く。せん断応力 度がせん断抵抗力 $\sigma \tan \theta$ を上回ったとき土砂崩れが起きると考 えられる。そのクーロンの破壊基準をモールの応力円とともに 図1に示す。土の場合はせん断応力度が0でも、何らかのせん 断抵抗力 (粘着力) c が働く。したがって、モールの応力円がク ーロンの破壊基準と接するとき、すなわち、鉛直方向から 45 度 の方向より少し大きな角度φで、土がせん断破壊して、土砂崩れ が発生する。

金属の場合も、等方性金属材料に圧縮応力を加重すると、圧 縮方向から 45 度の方向に、せん断破壊による縞模様が見られ る(図2)[4]。金属内に仮定した斜面に働く垂直応力度および せん断応力度の角度依存性を図3に示す。45度の方向でせん断 応力度が最大となり、その角度でせん断破壊すると考えられ る。すなわち、延性材料の降伏条件としてよく用いられるトレ 図2. せん断破壊による縞模様

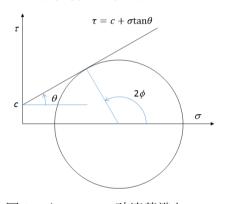


図1. クーロンの破壊基準とモール の応力円.



スカの最大せん断応力説「最大のせん断応力度 がある値に達すると降伏が起きる」と一致する。

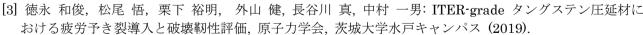
検討内容:タングステン(W)のように非等方性がある場合、破壊方向はどのように影響されるかを考える。ヤング率は非等方性を有している。しかし、その非等方性は応力・ひずみ関係式に影響を与えるが、モールの応力円には影響を与えない。すなわち、線形弾性論の範囲では、破壊強度(降伏強度)の非等方性に影響を与えるのみと考えられる。せん断破壊強度(降伏強度)が非等方性をもち、加重方向のせん断破壊強度が直角方向のせん断破壊強度の半分の場合を考える。せん断応力度の平行、直角のいずれかの成分がせん断破壊強度に達したときその方向に破壊すると考える。

$$\tau_{_{y}} = \min(\frac{\tau_{_{\perp}}}{\cos\phi}, \frac{\tau_{_{//}}}{\sin\phi}) = \min(\frac{\tau_{_{\perp}}}{\cos\phi}, \frac{\tau_{_{\perp}}}{2\sin\phi})$$

この破壊条件をモールの応力円とともに図4に示す。クーロンの破壊基準と似ているが、土砂崩れと逆に、加重方向から45度の方向より少し小さな角度φで破壊すると考えられる。参考までに身近な破壊の例として、木柱を繊維方向に圧縮した場合のせん断破壊写真を図5に示す。

非線形弾性論については今後の検討課題である。

- [1] O. Kovarik, P. Hausild, J. Siegl, T. Chraska, J. Matejicek, Z. Pala, M. Boulos: The influence of substrate temperature on properties of APS and VPS W coatings, Surface & Coatings Technology 268 (2015) 7-14.
- [2] 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, Journal of IAPS, Vol.24, No.2 (2016) 73-78.



[4] J. M. Gere, S. P. Timoshenko: Mechanics of Materials, Third SI Edition, Chapman & Hall (1995) 87.

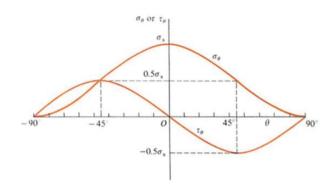


図3. 垂直応力度およびせん断応力度の角度依存性

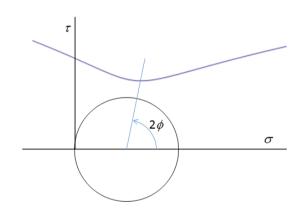


図4. 非等方性材料の破壊条件のモールの応力円



図5. 非等方性材料のせん断破壊例

# 酸化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

# 九大工 山口芳昭 (院), 吉岡 聰, 安田和弘, 松村 晶

CEA-Saclay Jean-Marc Costantini

## 1. 目的

蛍石構造酸化物セラミックスは放射線環境下において優れた耐照射損傷性を持つことが報告されている。二酸化ウラン( $UO_2$ )は軽水炉燃料としての実績があり、立方晶安定化ジルコニア(YSZ)は長寿命核種の核変換母相材料として期待されている。これらの材料中には核分裂片による高密度電子励起損傷が誘起され、イオン飛跡に沿ってイオントラックと呼ばれる柱状の照射欠陥が形成される。これまで、 $UO_2$ の模擬材料として同一の結晶構造と類似の物性値を持つ  $CeO_2$  中に形成されるイオントラックに関する研究が行われており、 $CeO_2$  中のイオントラックは蛍石構造を保持するものの、直径 2 nm 程度の領域で原子数密度が低下していることが明らかにされている (1), (2)。一方、YSZ は蛍石構造を呈する酸化物であるが、酸素副格子位置に構造空孔が存在し、また、室温から 1400  $^{\circ}$   $^$ 

#### 2. 実験方法

 $ZrO_2$  に  $Y_2O_3$  を 9.8 mo1%添加した板面(001)面の YSZ 単結晶、および 8 mo1%の  $Y_2O_3$  を含む YSZ 粉末から作製した焼結体を使用した。YSZ 粉末を一軸加圧および静水圧加圧により柱状ペレットに成形し、1600 K まで昇温した後、12 時間保持して室温まで冷却し、焼結体を作製した。焼結体を低速ダイアモンドカッター、SiC 耐水研磨紙で厚さ約 500  $\mu$ m にし、YSZ 焼結体および単結晶を直径 3 mm の円板に打ち抜いた。これらを回転研磨機により厚さ約 150  $\mu$ m にした。この試料に日本原子力研究開発機構のタンデム加速を用いて 340 MeV  $Au^{26+}$  イオン、200 MeV  $Xe^{14+}$  イオン、100 MeV  $Xe^{14+}$  イオン・10 MeV  $Xe^{14+}$  MeV  $Xe^{14+}$ 

#### 3. 結果および考察

100 MeV Xe<sup>14+</sup>イオン、200 MeV Xe<sup>14+</sup>イオン、340 MeV Au<sup>26+</sup>イオンを照射したYSZ中のイオントラックはフォーカス条件に依存して白黒反転するフレネルコントラストとして観察された。このことは、YSZ中イオントラックの中心領域において、原子数密度がCeO<sub>2</sub>と同様に低下していることを示している。図1 (a) $^{\sim}$ (c)は340 MeV Au<sup>26+</sup>イオンを(a)  $1\times10^{11}$  cm $^{-2}$ 、(b)  $5\times10^{11}$  cm $^{-2}$  (c)  $2\times10^{12}$ 

cm<sup>-2</sup>まで照射したYSZのTEM明視野像である。観察はイオントラックがスクリーンと平行になる方向から、 $+1.0~\mu$  mのデフォーカス条件で行った。イオントラックは黒いドット状のコントラストとして観察され、その平均直径は $1.8~\mu$  nmであった。 $100~\mu$  Kr<sup>8+</sup>イオンと $200~\mu$  WeV Xe<sup>14+</sup>イオンの場合、イオントラック直径はそれぞれ

1.3 nmと1.5 nmであり、CeO2のイ オントラック直径に比べ小さい値 となった。図1 (d)に100 MeV Kr<sup>8+</sup> イオン、200 MeV Xe<sup>14+</sup>イオン、340 MeV Au<sup>26+</sup>イオンを照射したYSZ中 のイオントラック数密度と200 MeV Xe<sup>14+</sup>イオンを照射したCeO<sub>2</sub>中 のイオントラック数密度(1)の照射 量依存性を示す。100 MeV Kr<sup>8+</sup>イオ ンの結果を除き、イオントラック 数密度は低照射量において照射量 にほぼ比例して増加しており、こ のことはイオントラックが電子励 起損傷から直接的に形成されてい ることを示している。また、イオ ントラックの形成効率が1以下で あることが分かる。100 MeV Kr<sup>8+</sup> イオンをYSZに照射した条件にお いては、イオン照射による点欠陥 が蓄積することによりYSZの熱伝 導度が低下し、ダメージ領域にお

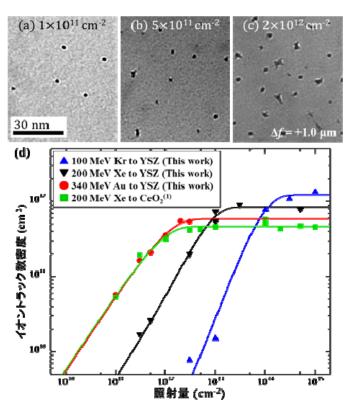


図 1 (a)~(c)340 MeV Au<sup>26+</sup>イオンを照射した YSZ の TEM 明 視野像、および(d) YSZ と CeO<sub>2</sub><sup>(1)</sup>中イオントラック数密度の照 射量依存性

ける形成効率は非ダメージ領域における形成効率よりも大きくなることが考えられる。一方で、 すべての照射条件において、イオントラック数密度は高照射量域において飽和しており、イオン トラックの形成と回復が平衡していることを示している。

図1の結果に基づいて、蓄積過程のモデリングを行った。その結果、イオントラック形成効率と回復影響領域は電子的阻止能値の増加に従って増大すること、およびYSZ中のイオントラック形成効率と回復影響領域の値はCeO<sub>2</sub>に比べて著しく小さい値を示した。以上の結果は、YSZ中のイオントラックでは溶融状態から回復が効率よく起こっていることを示唆している。

# 逃走電子の超高感度計測法の検討

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

## 目的

プラズマディスラプション時に発生する逃走電子は、真空容器内構造物に重大な損傷を起こしうる。そのため、ITERでも発生の抑制、または発生時の速やかな散逸方法などが求められ、様々なトカマク装置で研究がなされている。散逸方法を確立するうえで必要なのは、高感度でかつ応答時間が速い逃走電子の計測である。本研究では、逃走電子の高感度計測法としてプラズマからのRF放射計測を提案し、その有用性を検証する。

## 経緯と研究の重要性

LHDでは浦項工科大学との共同研究でイオンサイクロトロン放射(Ion Cyclotron Emission(ICE))やホイッスラー波の領域に相当するプラズマから数十 MHz~数 GHz の放射を計測し、高エネルギー粒子の研究を実施してきた。LHDにてポロイダルコイル電流を掃引する特殊な運転をした際、イオンサイクロトロン加熱及び中性粒子ビームの入射無しに、極めて強い RF放射が観測された。一方で、磁気計測には大きな変化が観測されておらず、プラズマ電流としては計測不可能なほどごく少数の逃走電子でも、強い RF放射を誘起していることが推測される。本観測結果は理論的な検討を要するものの、RF計測は逃走電子に対して感度が高く、RF放射計測は逃走電子の初期の成長段階で感知し、ペレットやガスパフの入射を速やかに行うことに資する可能性がある。更に、RF放射計測は簡易な金属製アンテナでも感度良く観測でき、設置場所の制約も少ないという利点がある。そのため、ITERのように一般的な計測器でも設置が困難で、極めて高い放射線環境下にある装置でも容易に設置ができる。

現在、QUESTでは稲垣教授を中心に Ion Cyclotron Emission (ICE) 計測の計画が進められており、それの一環として逃走電子の計測手法としての RF 放射計測の妥当性や有用性を検証する。

RF 放射計測は、ITPA Diagnostic Topical group meeting にて Action item の 1 つとなっている。RF 計測が LHD や KSTAR でなされているような高エネルギー粒子研究だけでなく、逃走電子の高感度検出も可能になれば、物理研究のための計測という位置付けだけでなく、装置運転のための計測という大きな価値も持つことになり、計測の重要、設置の優先度が高まる。特に ITER のファーストプラズマでは、ECH 加熱入射時に逃走電子の発生を抑えるため、干渉計で測定する電子密度が一定値以下であれば、ECH 入射を停止するというシナリオが考えられている。もし、高感度の逃走電子の計測が容易に行うことができれば、RF 放射強度を直接的な制御信号とすることができるため、ITER 運転や計測器検討に対するインパクトは大きいと考えられる。

# 検討結果

図1に、LHDでコイル電流スイープをした際に発生した RF 放射の観測結果を示す。この時の中心磁場強度は0.917 Tであり、QUESTの4倍程度である。LHDでのRF 放射計測は、フィルタバンクによる周波数毎の強度計測(図1右側)と、図2に示す高速サンプリングによる周波数スペクトル計測からなる。150~250 MHz 程度の周波数帯が t=3 秒程度から観測されている。3.3 秒には中性ガスの増加がみられるが、これは逃走電子が真空容器壁をスパッタしているためと推測される。図2(1)の周波数スペクトルは0,150,280,430 MHzの大きな構造に、4 MHzの高調波が重畳した構造になっている。4 MHzはプラズマ周辺での磁場強度に対応した、重水素のICE 基本周波数である。QUESTにて同様な運転を行うとすれば、磁場構造の違いはあるにしる、概ね1 MHz程度の高調波が観測されるものと考えられる。LHDでは、図2(2)観測に電流導入端子の先端にかぎ型の長さ30cmの無酸素銅製ダイポールアンテナを用いている。高調波成分の計測も考え、LHDと同様のアンテナで十分計測可能であると考えている。プラズマへの距

離が LHD よりも近くなることから、プラズマへの影響も懸念されるため、これを回避するのであれば、DIII-D の ICE 計測と同様に、絶縁体(DIII-D ではカーボンタイル、QUEST ではセラミックを検討)の裏側にループアンテナを設置することでも計測が可能と思われ、より設置が容易になる。

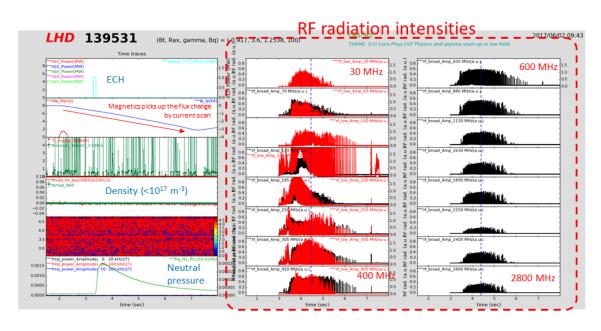


図1 LHD でのポロイダルコイル電流スイープ時に観測した RF 放射

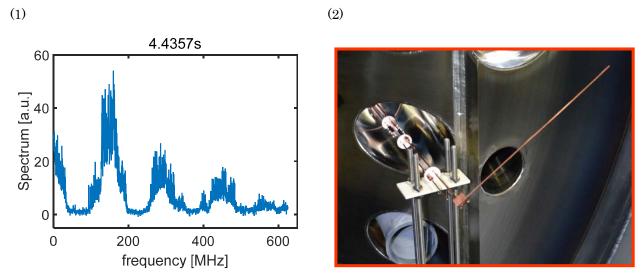


図 2(1) 図 1 の放電で観測した RF 放射の周波数スペクトル, (2) LHD でのダイポールアンテナ

# まとめ

LHDでの観測結果、及びアンテナ設計を参考に、QUESTでのRF放射計測系の検討を行った。LHDでの0.9 T低磁場運転で強い放射が観測されているため、逃走電子発生時には概ね同じオーダーの周波数帯で放射が予測され、同様の計測系を設置することで、通常の放電時のICEに加え、逃走電子に関連すると推測される放射を観測可能と考えられる。

# 研究組織

研究代表者:秋山毅志(核融合研)、Gunsu Yun(浦項工科大)、稲垣滋(応力研)

# プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究

京都大学大学院工学研究科 高木郁二

#### 1. 目的

プラズマに対向した固体表面における水素リテンション(保持量)は、プラズマの長時間維持に大きな影響を及ぼす因子である。本研究では、タングステン基板に蒸着したタングステン膜を、プラズマ対向壁における堆積層の模擬試料として、イオンを注入した蒸着膜における重水素のリテンションを実験的に調べた。

# 2. 方法

試料は九州大学片山先生に提供いただいた、タングステン板に水素プラズマ RF スパッタ法によってタングステン蒸着膜を生成した試験片である。試料の性状などを表 1 に示す。W や He イオンのエネルギーは、蒸着膜中に損傷が生成するように選んだ。W と He が生成する損傷が最大となる深さは、それぞれ、 $0.22~\mu m$  と  $0.35~\mu m$  である。

| 試料名   | 寸法                     | 蒸着W厚さ   | 照射イオン     | 平均損傷量   | 照射時温度 |
|-------|------------------------|---------|-----------|---------|-------|
| W-W01 |                        | 0.84 μm | _         | 0 dpa   | _     |
| W-W02 | 15x15x1mm <sup>3</sup> | 0.75 μm | 4.8MeV-W  | 0.3 dpa | 常温    |
| W-W03 |                        | 0.97 μm | 0.4MeV-He | 1.1 dpa | 250°C |

表 1 試料一覧

実験では、蒸着膜を重水素プラズマに曝し続けた状態で<sup>3</sup>He イオンを照射し、核反応を利用して蒸着膜中の重水素濃度の深さ方向分布を測定した。この測定方法では定常状態での重水素のリテンションを測定することができる。重水素のエネルギーは 1eV 程度であるため、蒸着層に損傷は生成させない。

## 3. 実験結果

図 1 に W を注入した W-W02 試料における重水素の深さ方向分布の例を示す。横軸は表面からの深さ、縦軸は重水素濃度である。深さ 0 に濃度のピークがあるのは表面に重水素が吸着しているためであ

る。120℃での測定は2回行ったが、常温から120℃に加熱した状態での濃度は図1に示すようにかなり低かった。次に280℃に加熱すると濃度は増加し、その後120℃に戻してから測定すると最初の状態よりもはるかに濃度が高くなっていた。濃度が高くなった深さはイオンが照射損傷を生成させた領域とほぼ一致した。これはイオン注入によって欠陥が生成し、加熱によって欠陥が水素のトラップとなったためと考えられる。蒸着膜中の平均重水素濃度は400℃までほとんど変化せず、トラップは比較的深いことが分かった。また、400℃でアニールしてもトラップは消滅し

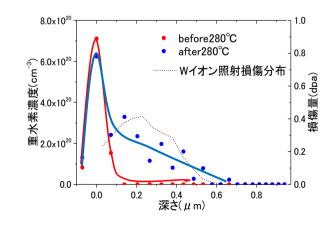


図 1 120℃の W 注入 W-W02 における重水素 の深さ方向分布

## なかった。

非照射の W-W01 試料でも He イオンを注入した W-W03 試料でも加熱によってトラップが生成した が、W-W03 試料の重水素濃度は他の 2 試料よりも高く、300℃まで加熱すると一部の重水素は脱トラップし、400℃のアニールによって一部のトラップが消滅した。

#### 4. 考察

生成したトラップの性状を表2に比較して示す。これらの情報と、空孔の移動温度、複空孔や転位の アニール温度などから総合的に考察した結果、次の結論を得た。

| 試料    | 照射 | トラップ |       | 平均トラップ密度                              |                                       |
|-------|----|------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|       |    | 生成温度 | 深さ    | アニール前                                 | 400℃アニール後                             |
| W-W01 | 無し | 280℃ | 深い    | 2×10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup>   | 0.8×10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> |
| W-W02 | W  | 280℃ | 深い    | 1.4×10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> | 1.4×10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> |
| W-W03 | Не | 250℃ | 比較的浅い | 3.3×10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> | 1.6×10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> |

表2 生成したトラップの比較

- (1) トラップは単空孔の移動によって生成する。
- (2) 空孔型の欠陥の安定性から判断すると、全ての試料について複空孔がトラップとして働いている。
- (3) He は空孔と複合体を形成してトラップとして働く。このトラップは複空孔よりも浅く、400℃で消滅する。

今年度の申請書に記載したように、1eV 程度の低エネルギー水素原子の反射に関する実験も行った。 詳細は省略するが、今までは、ある仰角と方位角に反射された水素のみを検出していたために全体の反 射係数を得ることが困難であったのに対し、今年度の実験では反射された水素原子を反射率の高い円筒 管で集めてから検出する方法を採用することによって、水素に覆われたホウケイ酸ガラス表面における 粒子反射係数が 0.93 という非常に高い値であることが分かった。

# 論文・学会発表リスト

# 学会発表

中野晋太郎、中川雄貴、高木郁二、「RF 放電管から飛来する水素原子の径方向分布」、日本原子力学会 秋の大会 1N18、2018/9/5-7、岡山市.

#### 研究組織

| 代表者   | 高木郁二  | 京都大学大学院工学研究科 | 教授   |
|-------|-------|--------------|------|
| 研究協力者 | 花田和明  | 九州大学応用力学研究所  | 教授   |
| 研究協力者 | 井上大起  | 京都大学大学院工学研究科 | 修士2年 |
| 研究協力者 | 中野晋太郎 | 京都大学大学院工学研究科 | 修士2年 |
| 研究協力者 | 中川雄貴  | 京都大学大学院工学研究科 | 修士1年 |
| 所内世話人 | 花田和明  |              |      |

2019年2月28日

株式会社 日立製作所 研究開発グループ 王昀

# 「2018年度 九州大学共同利用研究成果報告書」

**顧目:安定化元素を添加したオーステナイト系ステンレス鋼の照射特性評価** 

#### 1. 目的

沸騰水型原子炉(BWR)の炉内構造材を適用対象として、耐食性、耐応力腐食割れ(SCC)性並びに耐照射性を向上した材料の開発に取り組んでいる。本研究の一環として、安定化元素 Ta 添加を施した高 Cr 高 Ni のオーステナイト系ステンレス鋼の開発を進めている。本開発材の照射誘起粒界偏析(RIS)や照射硬化などの照射特性に及ぼす構成元素の影響を理解するために、重イオン照射後の試験片を対象に、照射欠陥の定量評価を実施した。

#### 2. 開発材の化学成分

耐照射性への添加元素影響を明確化することを目的として、安定化元素 Ta を添加した開発材を試作した。また、比較のため、現行材 SUS316L と市販の冷間圧延材 SUS310S を用意した。表 1 にこれらの開発材と比較材の化学組成を示す。

照射試験 開発材  $\mathbf{C}$ Mn Cu Ni Mo Nb Ta A1 0Base material H23-3 0.013 0.93 0.025 0.001 0.29 14.30 17.57 0.07 < 0.002 0.039 0.020 0.003 SUS316L  $\bigcirc$ 0.52 0.43  $\bigcirc$ H23-4 0.013 < 0.01 SUS310S 0.490.930.022 0.002 0.28 18.94 25.03 0.08 < 0.002 0.21 0.047 0.0210.0040 H23-5 0.013 0.50 0.92 0.023 0.002 0.29 19.36 25.03 0.08 < 0.002 0.030 0.020 0.007 SUS310S < 0.01 0.40 H23-6 0.013 0.51 0.93 0.024 0.001 0.28 21.52 20.94 2.2 0.08 0.00 0.047 0.019 0.004 γ 相安定化 SUS310S < 0.001 19 22 25 41 0.050 0.58 0.74 0.020 SUS316L 0.009 0.60 0.89 0.018 0.005 12.26 16.31 2.1

表 1 開発材の化学成分 (mass%)

# 3. 照射試験片

上記の各供試材から、 $\phi3mm \times 0.2mm^T$ の円盤試験片を作製して、「エメリー研磨→ダイヤモンドペースト研磨→コロイダルシリカ研磨→電解研磨」の順に、表面を仕上げた、代表例として、SUS316Lの照射試験片の外観と組織を図1に示す。

#### 4. 照射欠陥の観察と定量評価

温度 300° で照射量 1dpa の Fe<sup>2+</sup>イオンで照射した各供試材を対象に、照射欠陥の観察を実施した. 照射試験片から厚さ 100 nm 前後の電子顕微鏡観察用試験片を製作した. 照射欠陥の観察は、収差補正走査・透過電子顕微鏡 (STEM) JEM-ARM200F を用いて行った. STEM の電子線を照射表面近傍の断面に入射させ、深さ方向で微細組織分布を観察した. また、照射欠陥の数密度を求めるために、同 STEM 装置に搭載された電子エネルギー損失分光 (EELS) 装置を用いて、損傷ピーク深さ近傍領域での試験片の厚さを測定した.

代表例として, SUS310S と 0.4Ta+SUS310S (H23-5)の WBDF (Weak Beam Dark Field) 像を図 2 に示す. 照射欠陥は白いコントラストで観察された. また, EELS により両試験片の損傷ピーク深さ近傍領域で

得られた試験片厚さの評価結果を図 3 に示す。両者の厚さは 100 nm 以下となり,ほぼ同等であった。図 4 に上記 6 つの供試材から得られた深さ方向の照射欠陥数密度分布を示す。 Ta を添加した開発材は,全体的に照射欠陥の数密度の最大値は  $4\times10^{22}$ /m $^3\sim7\times10^{22}$ /m $^3$  となり,SUS316L と SUS310S に比べて低かった。

## 5. まとめ

Ta を添加した開発材を対象に実施した照射欠陥の定量評価結果から、Ta 添加により照射欠陥の数密度が低減し、優れた照射特性を得ることが実証された.

# 6. 今後の課題と対応

今後は拡散理論に基づき,今回得られた照射欠陥の定量評価結果から開発材の耐RIS性,さらにIASCC性向上のメカニズムを検討する予定である.

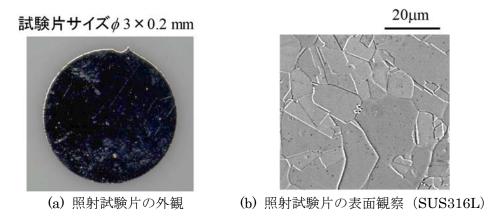


図1 照射試験片の外観と組織観察

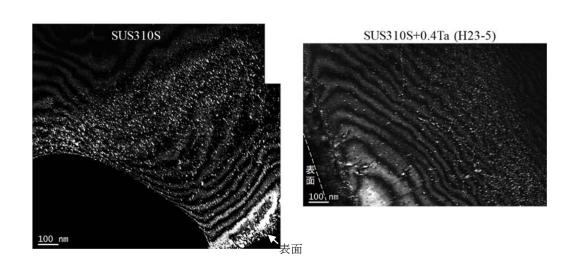


図2 照射試験片断面の WBDF 像

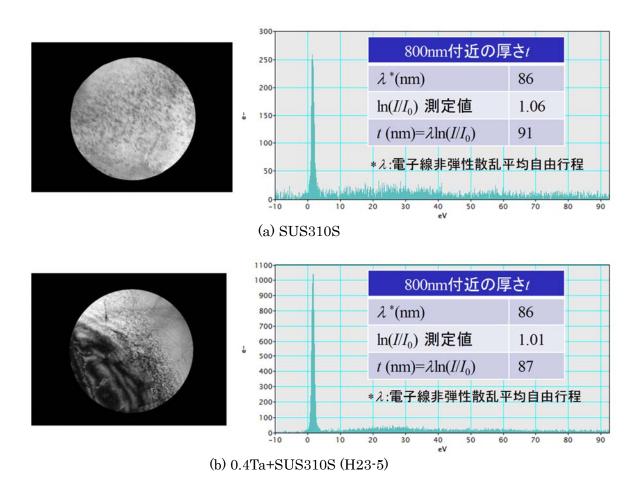


図3 EELSによる照射損傷領域の厚さ評価

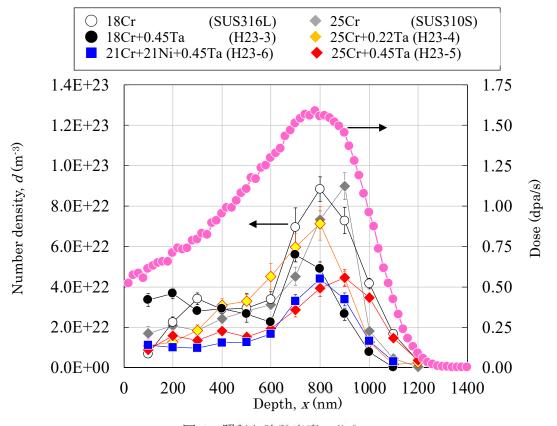


図 4 照射欠陥数密度の分布

複合照射環境下におけるタングステンの水素同位体吸蔵特性に関する研究

筑波大学数理物質系 坂本瑞樹

# 1. はじめに

プラズマを取り囲む材料の表面状態は、照射損傷、スパッタリング、再堆積、バブル形成等の様々なプラズマ・壁相互作用 (PWI) 現象に起因して変化する。さらに核融合炉におけるプラズマ対向材料は、中性子、水素同位体、ヘリウムの複合照射環境下に置かれることになる。このような複合照射環境下における材料の水素吸蔵特性に関するデータは数少なく、今後データベースを構築していく必要がある。本研究では、核融合炉のプラズマ対向材料の最有力候補であるタングステン材料に注目し、中性子を模擬した重イオンによる表面改質及び重イオンとヘリウムや水素同位体の複合照射による材料の表面改質が水素吸蔵特性へ与える影響を明らかにすることを目指した。本年度は、ヘリウムプラズマ照射が材料表面改質に与える影響に注目して実験を行った。

# 2. 実験結果及び考察

今回実験に用いた小型プラズマ生成装置 APSEDAS は、真空容器の周りに 2 個の磁場コイルが設置されており、真空容器中心で最大約 0.05T の磁場を発生させることが可能である。真空容器上部のヘリカルアンテナに 13.56MHz の高周波を印加することによって直径約 50mm のプラズマが生成される。APSEDAS の向かい合ったポートを用いて、キセノンランプ光源、ロッドレンズ、偏光子、試料、回転検光子、ズームレンズ、分光器となるように光学系が組まれ、分光エリプソメトリーシステムが構築されている。直線偏光光の入射角はタングステンの擬ブリュースター角に近い  $75^\circ$ である。また、偏光子の前後にスリットを設置し、キセノンランプ光が試料にのみ照射されるようになっている。さらに、プラズマ照射中のその場測定を行うため、プラズマ発光とキセノンランプ光源由来の試料反射光を区別できるよう、ロッドレンズと偏光子の間に光学シャッターが導入されている。試料を反射した p 偏光と p 偏光の位相差と振幅比を角度で表した p と p を測定する。

今回実験に用いた試料は ITER 仕様タングステン( $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ )で、プラズマ照射領域は中央の  $8 \text{mm} \phi$  である。照射したヘリウムプラズマの電子密度は約  $1.3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ であり、試料へのイオンの入射エネルギーは約 37 eV である。照射フラックスは約  $1.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、フルエンスが  $5.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ までプラズマ照射した。放射温度計で測定した照射中の試料表面温度は約 575-610 K であった。

図 1(a)及び(b)に、He プラズマ照射前と照射中の波長 450-800nm における  $\Delta$  と  $\Psi$  のスペクトルをそれぞれ示す。He プラズマ点火後、450-800 nm の波長範囲において  $\Delta$  は減少し、 $\Psi$  は増加し続けた。また、プラズマ点火後約 400 秒で  $\Delta$  と  $\Psi$  の変化量は飽和し一定となり、 $\Delta$  は約 6°下降し、 $\Psi$  は約 1.5°上昇することが明らかとなった。今回のヘリウムプラズ

マ照射ではヘリウムイオンのエネルギーと試料表面温度が低いため、これまでの結果から 表面形状等の変化は見られないが、材料表面では改質が起きていることが示された。今後、 このような試料に重イオン照射を行い、複合効果について調査していくことが課題である。

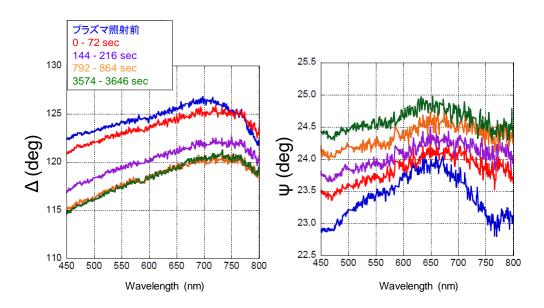


図 1 ヘリウムプラズマ照射前及び照射中における試料を反射した p 偏光と s 偏光の(a) 位相差  $\Delta$  と(b) 振幅比  $\Psi$  のスペクトルの時間変化

# 3. 研究組織

研究代表者:坂本 瑞樹(筑波大学・数理物質系・教授)

所内世話人:渡邉 英雄(九州大学・応用力学研究所・准教授)

共同研究者: 坂本 隆一(核融合科学研究所・教授、微細組織解析)

共同研究者:時谷 政行(核融合科学研究所・助教、微細組織解析)

共同研究者: 寺門 明紘 (筑波大学・数理物質科学研究科・D3、表面計測)

共同研究者:野尻 訓平(筑波大学・数理物質科学研究科・D3、プラズマ計測)

共同研究者:鈴木 佑 (筑波大学・数理物質科学研究科・M2、材料表面解析)

# 4. 成果報告

- (1) Y. Suzuki, M. Sakamoto, S. Ino, N. Ezumi, Y. Nakashima, "Diagnostics for Surface of Tungsten Exposed to Deuterium Plasma by Spectroscopic Ellipsometry", 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (2018.8.27-31, Tsukuba, Japan) P35.
- (2) 鈴木佑、坂本瑞樹、他 8 名、「プラズマ照射によるタングステン表面変化の分光エリプソメトリー測定」第 35 回プラズマ・核融合学会年会 (2018.12.3-6, 大阪大学吹田キャンパス) 4Pp79.

# 平成 30 年度 応用力学研究所 共同研究 報告書

QUEST 装置周辺プラズマに対する粒子リサイクリングと衝突輻射モデルの構築 Modeling of particle recycling and collisional radiation for edge plasmas in QUEST

慶應義塾大学大学院理工学研究科 畑山明聖, 星野一生, 巽瞭子, 坪谷友香 九州大学応用力学研究所 花田和明

## 1. 研究背景•目的

これまで、核融合炉のプラズマ対向材料として炭素 材が考えられてきたが、トリチウムの長時間吸蔵による 装置の早期放射化が問題となり、現在では金属材の使 用が見込まれている。

しかしながら, 長時間運転の際に, 金属材が持つ燃料粒子の短時間吸蔵(動的吸蔵)特性によって, 炉心への粒子放出が起こり, プラズマ密度制御が妨げられるという問題が生じる.

核融合炉長時間運転の実現にはプラズマ密度の制御が必要であるため、動的吸蔵特性が炉心プラズマ密度に与える影響を解析し、炉心プラズマとプラズマ対向壁間の粒子循環(水素リサイクリング)を理解することが重要である。

球状トカマク QUEST 装置はプラズマ対向材に金属が用いられ、プラズマ密度が比較的低いため、動的吸蔵が支配的であるという特徴がある[1,2]. そのため、長時間運転時の動的吸蔵特性に伴う水素リサイクリングの解析に適していると言える.

以上を踏まえ、本研究では、1) QUEST 装置周辺プラズマに対する粒子リサイクリングと衝突輻射モデルの構築を行い、2) 実験と比較することによりモデル妥当性を検討し、よって、最終的には、3) 今後の核融合炉の長時間定常運転に向けた水素リサイクリングおよび炉心プラズマ密度制御手法の検討に寄与することを目的とする。

## 2.モデルの概要

上で述べたように、本共同研究では QUEST 装置周辺プラズマとプラズマ対向壁との相互作用(Fig.1)を考慮したプラズマO次元モデルおよび周辺プラズマからの発光線強度計算モデルを構築し、水素リサ

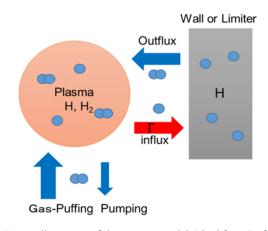


Fig.1 Overall concept of the present model (cited from Ref. [3])

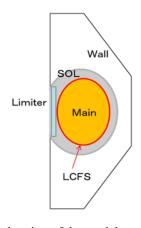


Fig.2 Schematic drawing of the model geometry including the main plasma. (cited from Ref. [3])

イクリングの解析を行い、球状トカマク QUEST 装置に おける実験との比較を行う。

より具体的には、QUEST装置をFig.2に示すように三つの特徴的な領域、すなわち、1)炉心プラズマ領域、2)周辺プラズマ領域(SOL 領域)、及び、3)プラズマ対向壁(第一壁およびリミタ)に分ける。さらに、各々の領域に対して空間的な平均密度を支配する、いわゆる0次元粒子バランスの式を基礎方程式とする。すなわち、以下に示す、0次元粒子バランスの式から、各領域の平均粒子密度を計算する:

## 1) 炉心プラズマ領域

$$\frac{d\overline{n}_{M}}{dt} = -\frac{\overline{n}_{M}}{\tau_{M}} + \overline{S}_{M}, \ \tau_{M} \equiv \frac{a^{2}}{2\alpha_{M}D_{M}}$$
(2.1)

ここで、 $\bar{n}_M$ 、 $\tau_M$ , a 、 $D_M$  及び $\bar{S}_M$ は、各々、炉心プラズマ平均密度、閉じ込め時間、プラズマ小半径、及び、イオン化粒子ソースを表す。また、 $\alpha_M$  は平均密度とプラズマ表面密度との比を表す空間分布ファクターを表す。

## 2) 周辺プラズマ領域(SOL およびリミタ領域)

$$\frac{d\overline{n}_{SOL}}{dt} = (1 - f_{wall})\overline{S}_{Diff} - \frac{\overline{n}_{SOL}}{\tau_{//}} + \overline{S}_{SOL}, \quad \tau_{//} = \frac{L_{//}}{2\alpha_{SOL}C_s}$$

ここで、 $\bar{n}_{SOL}$ 、 $f_{wall}$ 、 $\bar{S}_{diff}=\bar{n}_{M}$ / $\tau_{M}$ 、 $\tau_{//}$ , $L_{//}$ , $C_{s}$ ,及 び  $\bar{S}_{SOL}$  は、各々、周辺プラズマ平均密度、炉心プラズマから流出しプラズマのうちでプラズマ対向壁に輸送されるプラズマの割合、周辺プラズマ領域の磁力線 方向のプラズマ閉じ込め時間、 周辺プラズマ領域の磁力線の長さ、イオン音速及びイオン化粒子ソースを表す。また、 $\alpha_{SOL}$  は空間分布ファクターを表す。

また,上記,領域1),2)でプラズマ粒子種としては,電子(e),水素イオン( $H^+$ ),水素分子イオン( $H_2^+,H_3^+$ )を考慮する.

#### 3)プラズマ対向壁

$$\frac{d\overline{n}_{Wall}}{dt} = \frac{\Gamma_{Wall}}{d_{Wall}} - \frac{2k_{Wall}}{d_{Wall}} \overline{n}_{Wall}^2$$
 (2.3)

ここで、 $\bar{n}_{wall}$ 、 $\Gamma_{wall}$  、 $d_{wall}$  は、各々、第一壁(あるいは、リミタ)における水素原子平均密度、壁へのプラズマ粒子東密度、及び、粒子が吸蔵される壁(再堆積層)の厚さを表す。また、 $k_{wall}$  は壁における水素原子の再結合係数を表す。

モデルでは、プラズマ粒子に加えて、中性粒子(分子 $H_2$ ,原子H)についても以下の0次元粒子バランスの式を解く、ただし、中性粒子は磁力線には束縛されないため、 炉心プラズマ領域と周辺プラズマ領域とを区別しない。

#### a)中性分子

$$\frac{d\overline{n}_{\rm H_2}}{dt} = \overline{S}_{\rm H_2}^{\rm Gas-Puff} + \overline{S}_{\rm H_2}^{\rm Wall/Lim} + \overline{S}_{\rm H_2}^{\rm gain} - \overline{S}_{\rm H_2}^{\rm loss} - \overline{S}_{\rm H_2}^{\rm Pump} - \frac{\overline{n}_{\rm H_2}}{\tau_{\rm H_2}}$$

(2.4)

 $\text{CCC}, \ \overline{n}_{H_2} \ , \ \overline{S}_{H_2}^{\textit{Gas-Puff}} \ , \overline{S}_{H_2}^{\textit{Wall/Lim}} \ , \ \ \overline{S}_{H_2}^{\textit{gain}} \ , \ \ \overline{S}_{H_2}^{\textit{loss}} \ , \ \ \overline{S}_{H_2}^{\textit{Pump}} \ \textit{lt},$ 

各々,真空容器内の中性水素分子の平均密度,ガスパフによる粒子ソース,第一壁(あるいはリミタ)からの中性粒子リサイクリングソース,気相中における反応による分子生成ソース,同様に反応による分子損出(解離反応,分子イオン生成など),排気による粒子損出を表す.また, $\tau_{H_2}$ は分子の真空容器内の閉じ込め時間を表す.

#### b) 中性原子

$$\frac{d\overline{n}_H}{dt} = \overline{S}_H^{gain} - \overline{S}_H^{loss} - \overline{S}_H^{CX} - \frac{\overline{n}_{H_2}}{\tau_{..}}$$
(2.5)

ここで、 $\bar{n}_H$ , $\bar{S}_H^{gain}$ , $\bar{S}_H^{loss}$ ,及び, $\bar{S}_H^{cx}$  は,各々,真空容器内の中性水素原子の平均密度,気相中における反応による原子生成ソース,同様に反応による原子損出 (イオン生成など),及び,荷電交換反応による低温原子の損出を表す.また, $\tau_H$  は原子の真空容器内の閉じ込め時間を表す.

さらに、式(2.4)、(2.5)の基底状態の水素分子、原子密度に加えて、振動励起分子や励起原子をも考慮した衝突輻射モデル(CRモデル)を構築した。上のプラズマ及び壁に対するO次元モデルとこのCRモデルとを結合することで QUEST 装置における分光計測実験との比較が可能となる。すなわち、本研究で構築したモデルにより、実験で観測されるHa線の強度と中性粒子のイオン化量、炉心プラズマ密度やプラズマ対向壁への粒子入射束との関係を考察することが可能となる。

# 3.結果

2.で構築したモデル、及び、QUEST 装置パラメータを用いて計算した結果を次頁、Fig.3 及び Fig.4 に示す [3][4]. ただし、計算にあたっては、簡単のため、①第一壁とリミタの材料及び再堆積層の厚みは等しい、②リミタ前面でのリサイクリングによるイオン化ソースを無視する、③壁からの粒子放出係数  $k_{wall}$  をパラメータとして、二つの場合  $(k_{wall}=0.2\times10^{-38}~\text{m}^4/\text{s},$ 

1.0×10<sup>-38</sup> m<sup>4</sup>/s ) について, 計算結果を実験結果[4]と 比較した. その他の解析条件, 考慮した気相中での反 応過程などの詳細については, 文献[3]を参照されたい.

Fig.3(a) と(b)との比較からわかるように、初期

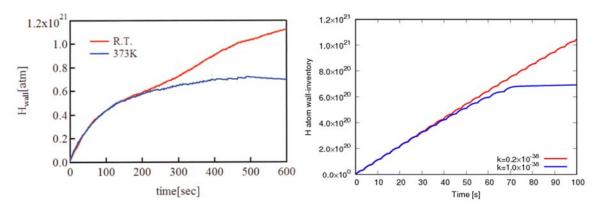
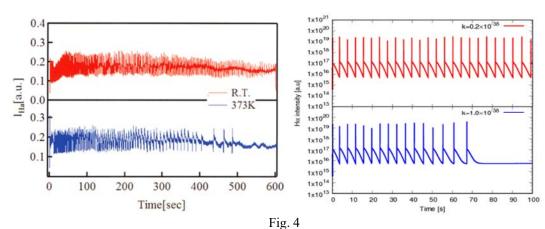


Fig. 3 Time evolution of the H atom wall-inventory. (Left: Experimental result [4], Right: Simulation result). Difference of the wall temperature in the experiments (Red: room temperature, Blue: 373K) is treated with difference of the  $k_{\text{wall}}$  in simulation. (cited from Ref. [3])



 $H_{\alpha}$  intensity observed in the experiment (Left) [4] and calculated with QSS-CR model (Right). (cited from Ref. [3])

的には壁への吸蔵粒子数には、差はみられない。しかし、長時間経過すると、実験では壁温度が高い程、計算では粒子放出係数 $k_{wall}$ が大きいほど、吸蔵粒子数の飽和が早い。壁温が高い程、粒子放出係数 $k_{wall}$ が大きいと考えられるから、実験と計算とは定性的に良い一致が得られている。また、吸蔵粒子数飽和レベルは、粒子放出係数 $k_{wall}$ の値に依存するが、計算で用いた粒子放出係数 $k_{wall}$ の値は、非現実的な値ではなく、他の実験から示唆される現実的なオーダーの範囲にある[5]。

実験では、プラズマからの Ha 線発光強度がある閾値を下回ったら外部からガスパフを行うことによってプラズマの密度制御を行っている[4]. Fig.4(a)と(b)との比較から、計算結果は Ha 線発光強度に関する実験結果を定性的によく再現していると考えられる. すなわち、放電時間が長くなるにしたがって、Ha 線発光強度のピーク間の周期が長くなること、

また、壁の温度が高い程(粒子放出係数 $k_{wall}$ が大きい) ほど、この傾向が顕著に現れている.

以上のように本研究で構築したモデルは、定性的には、実験と概ね良い一致をみている。しかしながら、定量的には壁が飽和に達するまでの時間が実験結果に比較して、短いなどの問題もある。

上で述べたように、上記、文献[3]の解析では、①実質的に第一壁とリミタの区別をせず、壁全体を同一に扱っていた、また、②リミタ前面でのリサイクリングの効果を無視してきた、最近、これらの簡単化を行わず、さらに、プラズマ及び中性粒子の空間分布の効果を表すファクターをより現実的な値にすることで、定量的にも実験により近い値を得ることが可能になってきている[6].

#### 4.結論と今後の課題

本研究で構築したモデルは、上で説明したように

QUEST 装置における粒子リサイクリング特性の理解に役立つことは、もちろん、今後の核融合炉長時間運転におけるプラズマ対向壁への粒子吸蔵特性を含むグローバルな粒子リサイクリング特性の理解や、炉心プラズマ密度制御についての知見を得るための有用な解析ツールになり得ると考えられる.

今後は、ASDEX-U、JET などの、さらに大型かつ高密度プラズマ条件下における長時間放電に対しても、本研究で構築したモデルを適用する。よって、さらなるモデル妥当性検証とモデル改善を継続するとともに、ITE Rや原型炉クラスの核融合炉の長時間運転、炉心密度制御の検討に寄与していきたい。

#### 参考文献

- [1] K. Hanada, *et al.*, Plasma Science and Technology **18**, 1069 (2016).
- [2] K. Hanada et al., Nucl. Fusion 57, 126061(2017).
- [3] K. Okamoto, *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **58**, 602(2018).
- [4] T. Honda, Department of Advanced Energy Engineering Science, Kyushu University, Master's thesis (2014).
- [5] T. Murakami, *et al.*, Int. Conf. Fusion Reactor Material (ICFRM2017), Aomori, Japan, Nov. 5-10, 2017 (poster presentation).
- [6] S. Kitaoka, Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University, Graduation Thesis (2019).

#### 本研究に関連する成果発表

- 1. 学術論文(査読有)
- (1) K. Okamoto, R. Tatsumi, K. Abe, A. Hatayama and K. Hanada, "Modeling of Plasma and Its Wall Interaction for Long Term Tokamak Operation", Contributions to Plasma Physics, **58**, 602-607 (2018).
- (2) Y. Tsubotani, R. Tatsumi, K. Hoshino, and A.Hatayama, "Analysis of Molecular Activated Recombination in Detached Divertor Plasmas", Plasma and Fusion Research, (2019) in Press.

## 2. 国内学会発表

(1) 坪谷友香, 巽瞭子, 星野一生, 畑山明聖, 「非接触ダイバータプラズマにおける ELM 発生時の

分子活性化再結合の解析」,第12回核融合エネルギー連合講演会,ピアザ淡海(滋賀県立県民交流センター),2018年6月.

# QUESTにおける水素原子密度空間分布の分光計測

京都大学大学院工学研究科 四竈 泰一

#### 目的

トカマク周辺部のイオン流れは、プラズマ不安定性や粒子輸送等の制御因子であることが明らかになっている。このためイオンのトロイダル・ポロイダル速度の空間分布計測にもとづく流れの駆動・散逸機構の解明に向けた研究が世界的に進められている。このような状況の中で、QUESTでは電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)単独で維持された、イオンへの直接の運動量入力が無いプラズマにおける流れの研究が進められている。

代表者等は、多視線分光を用いた  $C^{2+}$ 、 $O^+$ 不純物イオン速度の空間分布計測システムを開発し、流れの駆動・散逸機構の研究を進めてきた。本課題では、散逸の一因と考えられている、プラズマ中に侵入した水素原子とイオンの荷電交換による運動量損失を実験的に明らかにするために、水素原子発光線強度を空間分解計測し、原子の励起発光過程のモデリングを用いて水素原子密度の空間分布を算出した。

#### 方法

QUEST の 28 GHz ECH 放電(#35787、プラズマ電流-80 kA)を用いて実験を行った.MH16 ポートを利用し、中央平面上に設置したトーラス中心からの距離が 0.25-0.96 m の範囲の 16 視線を用いて水素原子バルマー $\gamma$ 線(主量子数 n=2-5、波長434 nm)の発光を集光した.集光した光は光ファイバで伝送し、既設の分光器(Andor AM-510;焦点距離 1 m,回折格子 1800 本/mm)により分光し、CCDでスペクトルを計測した.スペクトルの波長範囲は約 12 nm,波長分解能は視線に応じて変化し、約 20-40 pm であった.スペクトル強度は標準光源を用いて絶対感度校正した.電流が立ち上がる途中の t=2.25-2.55 s(フレーム 2),2.7-3.0 s(フレーム 3)の 2 つの時間帯のデータを解析した.

# 結果

バルマーγ線スペクトルから放射輝度を求め,平滑化スプライン関数で補間した後にアーベル逆変換を用いて放射率の径方向分布へと変換した.フレーム3のデータに対する逆変換結果を図2に示す.

次に、放射率から励起上準位の水素原子密度を 求め、トムソン散乱計測で得られた電子温度・密 度を入力とする衝突輻射モデル計算(K. Sawada and T. Fujimoto, *J Appl. Phys.* 78, 2913 (1995))を行って基底準位の水素原子密度を求めた.この際、 水素イオンの再結合および水素分子の解離により 生成する励起原子は無視した.後者の寄与は不明 だが、主量子数が大きくなるほど小さくなる.

水素原子密度の径方向分布を図3に示す. エラーバーは発光強度および電子温度・密度の誤差を 考慮して評価した. センタースタック近傍では電

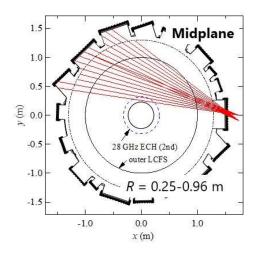


図 1. 観測視線

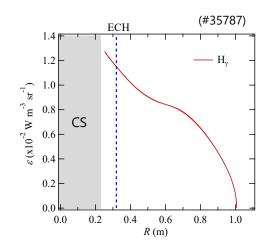


図 2. バルマー γ 線放射率の径方向 分布 (フレーム 3)

子温度・密度のデータが無いため解析を行っていないが、水素原子密度はセンタースタックに向かって増加していると考えられる.

求めた水素原子密度の妥当性を確認するために、フレーム3の解析結果を真空容器壁に

設置されている高速電離真空計で 計測した水素分子圧力と比較した. 温度 300 K を仮定して圧力を水素 分子密度に換算した値, また, 最 も外側の位置 (R = 0.92 m) で求 めた水素原子密度を2で割った値 を図3中に実線で示す.これらの 値はファクター2 程度で一致して おり, プラズマ中の水素分子密度 が不明なため定量的な議論はでき ないが, 求めた水素原子密度のオ ーダーは妥当だと考えられる. ま た、フレーム2の水素原子密度は 周辺部で1桁程度小さくなってお り、時間変化のメカニズム解明が 求められる.

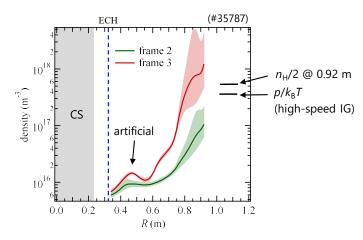


図 3. 水素原子密度の径方向分布

図3の結果から、フレーム3の時間帯ではR>0.7mの領域に水素イオンと同程度の密度で水素原子が存在しており、荷電交換による水素および不純物イオンの運動量損失が有意になっている可能性があることが分かった.

## 成果報告

- [1] N. Yoneda, <u>T. Shikama</u>, H. Zushi, *et al.*, "Spectroscopic measurements of impurity ion toroidal and poloidal flow velocities and their dependence on vertical magnetic field in QUEST toroidal ECR plasmas" *Plasma Fusion Res.* **13**, 3402087 (2018).
- [2] <u>T. Shikama</u>, K. Hanada, K. Nii, *et al.*, "Measurement of the ion species dependence of the intrinsic edge rotation in spherical tokamak QUEST", 23rd Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices No.297, 2018/6 (ポスター).
- [3] <u>四竈 泰一</u>, 「QUEST における不純物イオントロイダル回転の発光分光計測」RIAM フォーラム 2018 2018/6 (招待).
- [4] 米田 奈生, 四竈 泰一, 花田 和明, 他,「QUEST ECH プラズマにおける不純物イオントロイダル流れの磁場配位依存性」第 35 回 プラズマ・核融合学会年会 5p72 2018/11 (ポスター).

# 共同利用研究集会

# 第16回トロイダルプラズマ統合コード研究会

# 16th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

研究代表者 京都大学 村上定義 所内世話人 糟谷直宏

# 1. 研究集会の開催目的

応用力学研究所においては、これまで京都大学との共同研究により核燃焼プラズマ統合コード構想を発足させ、活動を行ってきた(http://p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/)。このプロジェクトは、科研費「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」(2004~2006)、「統合コードによるITER プラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」(2007~2010)、「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発」(2008~2012)等によって部分的に支援されてきた。各年度の活動状況および次年度の活動計画を含めて研究会を毎年開催している。今回で第 16 回目となるが、第 11 回よりトロイダルプラズマに対象を拡大し、炉心プラズマと周辺プラズマ、MHD 現象と輸送現象、高エネルギー粒子と乱流輸送、加熱・電流駆動と長時間運転等の複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションについて、包括的なアプローチとして議論している。第 2 回~第 8 回と第 11 回~第 15 回は応用力学研究所の共同研究集会として開催してきた実績がある。

# 2. 開催日時

開催日程: 2018 年 11 月 29 日 (木) - 30 日 (金) 開催場所: 九州大学応用力学研究所 2 階大会議室

講演数:19 件、参加者数:27 名

# 3. 研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの進展について議論するため研究集会を 2 日間にわたって開催した。外国(韓国)からの参加者も含めて講演 19 件の申し込みが集まった。件数は前年度と同程度であり、他の学会も同様な時期に集中しているので参加を見合わせた研究者がいたことを考慮するとまずまずの件数といえる。初日午前の核融合フォーラムサブクラスターとの合同会合で内外の研究情勢の報告と今後の研究方針の議論の後、午後よりこの一年の研究進展を紹介する講演を行った。内容別に分類するとトーラス統合シミュレーション 5 件、加熱 3 件、輸送モデリング 3 件、高エネルギー粒子 1 件、乱流 6 件、材料 1 件であった。便宜上分類をしたが複数の分野にまたがる内容も多い。どれも質の高い研究成果報告であった。統合コードスキームにビックデータ解析などの新たな手法を適応することで研究の幅が広がってきている印象がある。今回のプログラムの特徴は初日午後に統合シミュレーションに関する横断的セッション、および 2 日目午前に乱流輸送に関する英語セッションを設けたことである。ま

た、乱流、運動論効果、材料特性などに関して、プラズマ複合現象のシミュレーションの 基盤となる基礎研究の発表が数多くあり、幅広い研究内容を含む研究会とすることができ た。このように毎年新たな話題も随所に加えながら研究会の数を重ねることができている。 さらに本年はポスドク・学生による講演が7件あり、例年以上に若手の活躍が見られたこ とも印象的である。以下に講演内容を抜粋して説明する。

本年度の研究講演最初のセッションは統合シミュレーションにおける各要素についての横断的な構成とした。林はコア輸送について、2020年より稼働予定のJT-60SAトカマク装置の運転シナリオ統合モデリングの成果を報告した。日欧共同でコードのベンチマークを行い、さらにトロイダル回転制御の各要素を取り入れながらモデルを進展させた。そしてJT-60SAの高ベータ定常運転シナリオについて、回転制御と不純物パフによりダイバータ熱負荷も規定内に収めた形で提示した。矢本は周辺輸送について、SONICコード開発の進展を報告した。複数種の不純物輸送を扱えるようにすることで、JT-60SAにおけるネオン・アルゴン混合注入効果の定量的評価を行い、ダイバータ熱負荷低減への有効性を示した。本多はコア輸送の大域的解析について新しい数値手法を提示した。遺伝的アルゴリズムを用いて方程式の定常解を求めるコードを発展させプラズマ分布の定常解を得た。そして統合コードスキームに組み込み、JT-60SAの高ベータ放電解の高速算出を可能とした。福山は加熱解析について、運動論効果を含む波動コード開発の進展について報告した。積分形の誘電テンソルを用いて、電子サイクロトロン波のモード変換における有限ラーマ半径効果を評価した。

2日目午前は外国からの参加者も含めて、乱流輸送に関する英語セッションを構成した。 矢木は密度分布が中心でくぼみを持つ場合の、勾配が正となる領域で起こる粒子ピンチ効果について報告した。イオンミキシングモードと電子ドリフト波の競合について、理論解析を含めて説明した。小菅はストリーマの引き起こす密度変動が周波数変動を通じて乱流に作用し、ストリーマ成長をもたらす機構について報告した。ストリーマと帯状流の選択性に言及した。Choi は電磁的ジャイロ運動論シミュレーションを行い、磁気揺動熱流束の向きと大きさについてモード構造の対称性に着目した分類を行った。非線形流束が準線形流束を凌駕して熱流束の向きを変える場合があることを示した。

その他にも多くの課題について、様々な観点からの研究が報告された。登田はジャイロ運動論コードより導出した熱拡散係数および準線形粒子流束モデルを用いて LHD プラズマにおける輸送解析を行った。成田はジャイロ運動論コードよりニューラルネットワークを用いた粒子輸送モデルを構築し、輸送計算の高速実行を可能とした。そして、JT-60Uプラズマの解析を行った。村上は電子サイクロトロン加熱により非軸対称プラズマで生じるトロイダル流についてドリフト運動論コードを用いた評価を行った。磁場リップル捕捉電子の径方向運動がトルク生成に寄与する。リップル構造と熱電子捕捉時間の関係からトルクの大きさが決まる。続いて山本は HSX ヘリカル装置での電子サイクロトロン加熱によるトロイダル流生成について評価した。準ヘリカル対称配位とミラー配位時の比較を行い、実験と傾向の一致を見た。大澤はタングステン中の空孔存在下の水素吸蔵に関して報告した。第一原理計算により、それぞれの水素原子個数時の結晶構造中における水素位置を示した。沼波は LHD における複数種粒子を含む粒子輸送に関する研究成果について報告した。 記流および新古典不純物粒子フラックスのパラメータ依存性を示し、粒子バランスについ

て議論した。奴賀は中性子発生量の評価を通じて LHD における高エネルギー粒子の閉じ込めについて議論した。前田は LHD の熱フラックスに関するニューラルネットワークモデルの構築について報告した。凌は LHD 型核融合炉の輸送解析結果について報告した。森下はデータ同化手法を LHD の輸送解析に適用した結果について報告した。佐々木は円筒装置における密度勾配駆動及び流れシア駆動不安定性の競合とその結果現れる流れパターンの分岐について報告した。糟谷はジャイロ流体モデルを用いた円筒プラズマにおけるイオン温度勾配モードの不安定化条件とトーラス装置の統合乱流シミュレーション計画について講演した。

来年度も第 17 回研究会を九州大学で開催するべく応用力学研究所共同研究に応募する こと、プロジェクト内での共同研究を活性化すること、来年度の研究会形式や日程等を議 論して、閉会した。

# 4. 研究集会プログラム

(18 min talk+7 min discuss or (15 or 10) min talk+5 min discuss)

# 11月29日(木)

9:10-12:30 核融合エネルギーフォーラムサブクラスターとの合同会合

12:30 - 13:30 昼休み

13:30-13:40 はじめに 村上 (京大)

(座長:村上)

13:40-14:05 講演 1-1 林 (量研)

Predictive integrated modelling of plasmas and their operation scenarios towards exploitation of JT-60SA experiment

14:05 – 14:30 講演 1-2 矢本 (量研)

Extension of SONIC code toward mixed-impurity seeding capability

14:30 – 14:55 講演 1-3 本多 (量研)

Development of the integrated model with the iterative solver GOTRESS

14:55 – 15:20 講演 1-4 福山 (京大)

Progress in kinetic full wave analyses in fusion plasmas

15:20 - 15:40 休憩

(座長:林)

15:40-16:05 講演 1-5 登田 (核融合研)

Modeling of turbulent particle and heat transport in helical plasmas based on gyrokinetic analysis

16:05 – 16:30 講演 1-6 成田 (量研)

Particle transport modeling based on gyrokinetic analyses of JT-60U plasmas

16:30-16:55 講演 1-7 村上 (京大)

Simulation study of toroidal flow generation by ECH in non-axisymmetric tokamak plasmas

16:55 – 17:15 講演 1-8 山本 (京大)

Effects of electron cyclotron heating on the toroidal flow in HSX plasmas

17:15 散会

18:30-21:00 懇親会 (炙り炉端 山尾 博多駅前にて)

# 11月30日(金)

9:30 - 9:35 事務連絡

(座長:糟谷)

9:35 – 10:00 講演 2-1 Yagi 矢木 (量研)

Revisit ion-mixing mode

10:00 – 10:25 講演 2-2 Kosuga 小菅 (九大)

How pattern is selected in drift wave turbulence: role of parallel flow shear (tentative)

10:25 – 10:45 講演 2-3 Gyung Jin Choi (Seoul Univ.)

Gyrokinetic simulation study of parity dependence of magnetic transport

10:45 - 11:05 休憩

(座長:登田)

11:05-11:30 講演 2-4 大澤 (九大)

Stable structure of hydrogen in tungsten di-vacancy and its isotope effect

11:30-11:55 講演 2-5 沼波 (核融合研)

Kinetic simulations for particle transport of multi-species plasmas in LHD

11:55 – 12:20 講演 2-6 奴賀 (核融合研)

Analysis of energetic particle confinement in LHD using neutron measurement and Fokker-Planck codes

12:20 – 13:30 昼休み

(座長: 矢木)

13:30-13:50 講演 3-1 前田 (京大)

Modelling of heat transport in LHD using neural network with non-dimensional input parameters

13:50 – 14:05 講演 3-2 凌 (京大)
Integrated simulation study of LHD type fusion reactor by TASK3D

14:05 – 14:20 講演 3-3 森下 (京大)
Integrated transport simulation of LHD plasma using data assimilation

14:20 – 14:45 講演 3-4 佐々木 (九大) Chirality of helical flows in plasma turbulence

14:45 – 15:10 講演 3-5 糟谷 (九大)
Study of plasma instability by numerical simulations in basic experimental devices

15:10-15:30 まとめ 糟谷 (九大)

15:30 散会

# 国際プラズマ乱流データ解析ワークショップ

応用力学研究所 稲垣 滋

# 目的と背景

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

## 研究集会の開催

開催日時:2018.5.21-23

開催場所:九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長:稲垣 滋

# 予算の執行

Max-Planck 研究所からの 1 名(Hallatschek), Warwick 大学からの 1 名(Dendy)の招聘旅費に執行した。

## 本研究集会の特徴

本研究集会は実作業を重要視する。招待者らによる話題提供、問題定義の後、各テーマの詳細講演を行う。その後データ解析作業を行い、参加者全員が一同に会し途中結果の報告及び議論を行う。最終日には作業結果をレビューし、サマリーを行う、という形式で行われた。今回は更に招聘者の所属先(Warwick 大学)への派遣についても議論した。

## 研究集会のまとめ

本研究集会では乱流、MHD、高速粒子の相互作用の理解をテーマとし、これらに深く関わる測地線音波モード(GAM)、ICE、ドリフト波について議論を行った。以下に具体的な課題と議論の内容を示す。

# 1. Progress of GAM simulation

ジャイロ運動論コード CGYRO と 2 流体コード NLET を用い、同一のパラメータで得られる輸送を比較し、流体近似の検定を行った。衝突パラメタが大きい場合は衝突性バルーニング乱流を、低い場合はコア・エッジ境界領域のイオン温度勾配乱流の領域を考えた。この中で、例えば GAM の周波数特性の違いにも着目し、乱流と GAM の相互作用を含めた輸送について、流体モデルの適用範囲を明らかにした。

# 2. Particle-Wave Interaction

ICE は高エネルギー粒子とプラズマとの相互作用により生じる。この理解には波動と粒子との相互作用の観測が重要である。応用力学研究所に今年度着任された池添准教授は、アルフベン波とイオンの相互作用に関する実験観測を筑波大学の GAMMA10 装置で行ってきた。その成果を発表し、ICE の専門家の Dendy 教授と議論を行った。並せて、JT-60Uにおける ICE 計測結果についての検討も行われた。

また、期間が別となるが Dendy 教授の共同研究者である Chapman 氏の来日に合わせ、 ICE bursts during ELM in KSTAR tokamak と題したセミナーを行うとともに、本ワークショップの続きとしてデータ解析を行った。

# 3. Turbulence Intermittency

ドリフト波乱流が示す突発性について議論を行った。近年用いられるようになったハースト数をPANTAプラズマについて求め、その結果を議論した。ハースト数は解析の時間窓の長さに対して依存性を持つ結果が得られ、短時間の解析では値が十分収束していない可能性が指摘された。時間窓を比較的長く設定し、ハースト数の半径方向分布を求め、乱流揺動が長期記憶を持つ領域を観測した。今後、この解析を進めドリフト波乱流の突発的現象との対応関係をまとめることとなった。

来年度は佐々木助教がWarwick大学に半年ほど滞在する予定であり、この間に国際的なデータ解析のネットワーク作りに着手する予定である。

# International Workshop for Advanced Data Analysis of Plasma (May 21<sup>st</sup>- 23<sup>rd</sup> at RIAM Kyushu Univ.)

# 5/21 (Mon.)

10:00 Inagaki: Welcome and Introduction

10:15 Scientific session:

30 min. Inagaki: Recent Progress of PANTA Experiment

30 min. Hallatschek: Progress of Gyro-simulation of GAM

30 min. Sasaki (presented by Inagaki): Theoretical progress on GAM

# Lunch

# 13:30 Scientific session:

30 min. Kosuga: Phase Space Turbulence

# 14:00 – Working session: Hallatschek, Inagaki, Kosuga technical aspects of ICE, PANTA tour, etc.

# 5/22 (Tue.)

# 10:00 Scientific session:

30 min. Boyu: Hurst analysis of turbulence in PANTA

30 min. Dendy: Simulation of ICE in a tokamak/LHD plasma I

30 min. Discussion

# Lunch

# 13:30- Working session: Hallatschek, Dendy, Inagaki

Scientific stay at Warwick Univ., future research plan

# 5/23 (Wed.)

# 10:00 Scientific session:

30 min. Dendy: Simulation of ICE in a tokamak/LHD plasma II

30 min. Ikezoe: Interaction between wave and high energy particles in magnetized plasmas

30 min. Discussion

Lunch

13:30- Working session: Ikezoe, Dendy, Inagaki

Technical aspects of ICE, QUEST tour, budget application etc.