

## [28]全国共同利用研究成果報告

<https://hdl.handle.net/2324/7431320>

---

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 28, pp.1-, 2025-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



## 特定研究 2【分野融合】

研究テーマ：計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた統合診断（3年目）

Synthetic diagnostics combining measurement, simulation and modeling

統括責任者：糟谷 直宏（核融合力学分野）

Integrator : Naohiro Kasuya (Nuclear Fusion Dynamics)

概要：研究対象を計測することが対象理解の第一歩であるのはどの分野でも共通です。実験計測を行い、その信号の物理的意味を明らかにするうえで、様々なデータ駆動科学の手法やシミュレーションが利用されています。統合診断はシミュレーションデータを用いて計測結果を再現し、定量的解釈を提供するものです。例えばプラズマ乱流の大域的シミュレーションデータを用いたイメージングがあります。AI 技法との親和性が高く、また、理論解析が巨大なデータ空間内での道標となります。本特定研究では様々な分野で行われている実験計測、複合シミュレーション、データ駆動モデリングを組み合わせた統合的診断手法の共通性や応用性を探ることで、液体・気体・プラズマのマイクロ・マクロ的様相を理解するためのさらなる手法の進展を目指します。

## 計測との比較に向けた不純物輸送の統合モデリング

京都大学大学院工学研究科 本多充

## 目的

近年、核融合プラズマの輸送・閉じ込め研究領域において、不純物が着目されている。これまでの輸送研究では、粒子・熱輸送のいかに関わらず、電子やバルクイオンである重水素の輸送に注目が集まっていた。プラズマを構成する粒子の大半をそれらが占めることや、ソースの評価が比較的容易であることが理由として挙げられる。一方、不純物は主に壁やダイバータから侵入し、周辺プラズマを経て輸送によってコアへと運ばれることから、本質的にソースの種類やその分布が異なること、粒子輸送に関しては向きがバルクイオンと異なることに加え、2 価以上の価数を持っていることから、放射による熱損失を生じさせることなど、電子やバルクイオンと大きく異なった特性を持つ。一方で、通常、核融合プラズマ中に入射した中性粒子ビームと完全電離不純物イオンとの荷電交換反応に続く発光のドップラー広がりからイオン温度を、ドップラーシフトからプラズマ回転速度を計測するなど、計測分野において不純物は必要とされる存在になっている。計測される不純物イオンの代表は炭素であり、JT-60U をはじめ多くの装置では炭素の発光を計測している。実験解析においては炭素とバルクイオンの温度が等しいと仮定し、また炭素の回転速度はバルクイオンのそれと等しいとして回転速度を求めることが多いが、前者はともかくとして後者の仮定は妥当であるとは言いがたい。炭素は価数、質量数共にバルクイオンの代表格である重水素と隔たりがあり、そのためイオンが感じる衝突周波数は異なっている。ゆえに両者の間で新古典輸送特性が異なるため、ポロイダル回転、トロイダル回転共に、常に重水素と炭素の間には差が生じる。とりわけ、イオン温度勾配が急峻となる領域では、その差は無視できるものでは到底ないことが、理論、シミュレーション、実験解析から分かっている。このことから、シミュレーションと実験計測との比較を行う上で、バルクイオンとは異なる不純物の挙動を十分良く模擬できるモデリングが求められている。

## これまでの課題

水素同位体との違いに着目した、不純物種の輸送をシミュレーションコードで取り扱う上での課題は複数ある。本共同研究では以下の 2 つの課題に取り組んだ。

1. 複数価数状態を持つ不純物種の取扱い

不純物は壁から叩き出されてくる、意図的に目的を持って注入するなどの理由からプラズマに混入してくるが、プラズマ中に入ってきた瞬間は中性粒子であり、そこから背景プラズマとの衝突による電離や荷電交換といったプロセスを経て電子が剥ぎ取られイオン化する。1 価しかない水素同位体とは異なり不純物種は多くの価数状態を取り得る。輸送コードでは粒子種を流体として取り扱うため、価数ごとに輸送方程式を立てると方程式数が膨大な数に上るほか、プラズマ中での存在時間が短い価数の粒子種は極端に密度が低いことが予想されるため、直接扱うことは数値不安定性を引き起こす恐れがある。

2. 不純物存在下における新古典粒子束の両極性の成立について

軸対称系であるトカマクプラズマでは新古典粒子束、乱流粒子束ともに独立に両極性が成立することが知られている。意図せざる両極性の破れは偽のトルクや電場を生じさせるため、両極性は輸送モデリングにおいて満たすべき最も大事な性質の一つである。新古典輸送モデリングにおいて標準的に用いられるモーメント法の枠組みにおいて、両極性の成立について解析的には近似的にしか証明されていなかった。数値計算での成立性をいくら積み重ねても恒等的に成立することを示したことなくならず、モーメント法の厳密な体系において解析的に証明することが求められていた。

## 得られた結果

1. 複数価数のイオンを束ね（バンドルし）あたかも 1 つの粒子種として扱うことをスーパーステージと呼び、各価数状態間は準静的電離平衡にあると仮定する。現在の取り組みにおいては、中性炭素によ

るソース効果を適切に取り入れることが重要であったため、0-5 価までの炭素を束ね、擬中性炭素として扱うことにした。電離や再結合の断面積データは OpenADAS から取得しており、電子温度の関数となっている。0-5 価を束ねることの妥当性検証のために、中性炭素を 200eV の電子温度のプラズマに置いた際に、価数ごとの炭素密度の時間発展を、0-5 価まで束ねた場合と、全価数に対して割合方程式(rate equations)を解いた場合で比較した。すると、概ね 1ms 程度で両者の割合は一致した。すなわち、1ms 程度よりも長い時間スケールの現象を扱う上では、全価数を正確に取り扱う事と、0-5 価の擬中性炭素と 6 価の炭素イオンとして扱うことに差はほとんど無い、ということの意味する。擬中性炭素の密度方程式には、5 価から 6 価への実効電離と擬中性炭素と 5 価の炭素の比を表す関数の積がシンク項として、6 価から 5 価への実効再結合がソース項として働くことになる。6 価の完全電離炭素の密度方程式には、それらが逆符号で含まれることになる。0-5 価を束ねた擬中性炭素から各価数の比率を準静的電離平衡の仮定に基づき算出できるため、各価数の密度は計算できる。実装したモデルを流体型輸送シミュレーションコード TASK/TX に実装し妥当性を検証した。シミュレーションの結果、粒子種ごとの密度変化が落ち着く定常状態に到達することを確認した。現状では実験乾燥に合わせるための数値因子が必要ではあるものの、スーパーステージモデリングに成功したと言える。

2. 衝突演算子は線形化することで解析的に扱いやすくなるため、通常の数値計算では線形化された衝突演算子を用いる。しかし、線形化することで本来の演算子の有する性質のいくらかが近似的にしか成立しなくなり、何を重要視するかの違いから多くの線形衝突演算子のモデルが提案されてきた。各種コードにおいてどのモデルを用いるかは、そのコードが用いている物理的な境界条件に適しているかどうかで判断すべきであり、解析的な手法によって衝突演算子をもたらす性質をつまびらかにすることにより、モデルの選択に対する指針を与えることが可能になる。

モーメント法において解析的に扱いが困難な逆行列計算を、直接求めるのではなく行列の余因子を計算し、行列式はラプラス展開によって行列成分と余因子の積の和で表現される性質を用いて、所与の目的に必要な部分のみを抽出し代数的に証明することにした。代数計算の結果、バナナ・プラトー粒子束が両極性を満たすために必要な衝突演算子の性質は運動量保存のみである事が分かった。自己随伴性の成立は両極性とは無関係であった。また、フィルシュ・シュリユーター粒子束や古典粒子束に関しては、粘性が関与してこないため、解析的に簡単に同様の事実を示すことができる。

常に自己随伴性を満たす衝突演算子と、粒子間に温度差がある場合に自己随伴性が破れる衝突演算子を用い、自己随伴性を常に満たすことを保証しているモデルでなければ、自己随伴性が破れる条件でシミュレーションした結果、どちらの衝突演算子を用いた場合でも丸め誤差レベルで両極性が満たされていることが分かった。数値計算によっても、両極性の成立において自己随伴性を必要としないことを確認した。

## 今後の計画

研究代表者が中心となって開発している定常統合モデル GOTRESS+では粒子輸送を取り扱っていない。密度分布は計測によって比較が可能なものである上、原型炉の性能を左右する重要な要素となる。九州大学は不純物の密度分布を決定する割合方程式に関するコードと知見を有しているため、本共同研究で得られた知見を加え、粒子輸送のモデリング、粒子源のモデリング、熱輸送とのカップリング、そして粒子輸送を加えた上で安定かつ高速に数値計算が可能なスキームの確立、を順次進めていく予定である。

## 成果報告

本多充、糟谷直宏、藤田隆明、「計測との比較に向けた不純物輸送の統合モデリング」 応用力学研究所共同研究集会 九州大学応用力学研究所 2024 年 12 月 19 日

## データ駆動科学的手法を用いた非平衡開放系の時空間ダイナミクス研究

日本大学生産工学部 佐々木真

## 背景・研究概略

実験室プラズマをはじめ惑星大気や海洋現象など、エネルギーや粒子の流入・流出のある開放システムには、普遍的に揺らぎや乱流等の「時空間ダイナミクス」が存在する。そして、時空間ダイナミクスに起因する輸送によってそれぞれの系の発展が支配されている。このようなシステムの発展を予測・制御することは現代物理学の最先端の課題であり、それぞれの系における詳細な研究が精力的に進められている。本研究では、「時空間ダイナミクス」を共通の視点とし、マルチスケール乱流と構造形成・輸送の素過程のデータ駆動科学的手法の開発や理論的研究を推進し、データ駆動的モード分解、及びそのクラスタリング手法の開発、深層学習を用いた計測困難量の推定手法の開発などの成果を得る事ができた。本報告書では今年度の成果の中から、磁場閉じ込めプラズマや惑星・海洋乱流に普遍的に見られる帯状流・乱流相互作用の特徴的素過程の発見について報告する。

## 研究成果

惑星大気や磁場閉じ込めプラズマにおける準2次元乱流は Charney-Hasegawa 方程式と呼ばれる非線形偏微分方程式で記述される。本研究では、ドリフト波乱流の空間偏在を引き起こす物理機構の理解に焦点を当てた。これまで運動論シミュレーションをはじめ、流体シミュレーションでも多く、乱流の空間偏在性は観測され、乱流強度分布は帯状流の曲率符号に非対称である事が報告されてきた e.g. [1]。従来帯状流による乱流抑制理論[2]では、説明の困難であった。従来理論では、「流れシアの2乗で乱流が抑制される」というモデル化が行われてきたが、このモデルで予測される分布は帯状流の曲率に対称となってしまう。一方で、波動運動論による帯状流・乱流相互作用解析において、「乱流捕捉機構」と呼ばれる素過程が発見され、乱流捕捉によって、流れの曲率に非対称な分布を説明できる可能性が指摘されてきた[3]。波動運動論は多くの仮定に立脚した簡約モデルである為、実際の乱流現象で乱流捕捉が起こり得るのかを検討する必要がある。

そこで、本研究では2次元の Hasegawa-Wakatani モデルを基に、非線形シミュレーションを実施した。密度勾配を固定値として与え、断熱係数をショット毎にパラメタとして変化させた。断熱係数が小さな領域では、強い乱流状態が実現し、帯状流も励起されるものの、明確な乱流捕捉は実現しなかった。一方で、断熱係数を大きくしていくと、明確な乱流捕捉が得られた。乱流が捕捉される空間位置についても波動運動論が予言と一致することを確認した。捕捉された乱流が偏在する領域では、粒子輸送が空間的に変調され、密度分布に長寿命の凸凹構造が励起されることを観測した。この密度分布の corrugation についても[4]の予測と一致することを確認した。

- [1] G. Dif-Pradalier, + PRL, 114, 085004 (2015). [2] P.W.Terry, Rev. Mod. Phys. 72, 109 (2000). [3] M. Sasaki, +, Phys. Plasmas, 25, 012316 (2018). [4] M. Sasaki, +, Phys. Plasmas, 28, 112304 (2021).

## 機械学習を用いたマイクロ波イメージング再構成手法の研究

兵庫県立大学大学院工学研究科 古賀麻由子

## 1. 目的

核融合プラズマの閉じ込めにおいて重要な影響を及ぼすとされる乱流の物理を理解するためにはマイクロスケールの擾乱からマクロスケールの乱流成長まで高分解能で計測を行う必要がある。本研究では、高分解能を達成できる計測法としてレンズレスマイクロ波イメージングを開発している。

## 2. 実験方法

九州大学応用力学研究所糟谷直宏教授にご提供いただいた数値シミュレーションによる PANTA 装置の乱流構造データを用い、学習データを構築した。PANTA プラズマのうち 40mm 四方の領域を対象物体とし、300mm 離れた位置から 30GHz のマイクロ波を入射、反射したマイクロ波を受信器アレイ (10mm 角サイズ、17 個×17 個) で受信する設定とした。機械学習は CNN(Convolutional Neural Network) を用いた。

## 3. 実験結果および考察

Ar プラズマを学習したモデルと He プラズマを学習したモデルの予測結果を比較した。その結果、同じ学習量では He プラズマを学習したモデルの予測精度が低いことがわかった。これは、He プラズマの方がより細かい構造を持っており、特徴を掴みにくいためと考えられる。学習量を増やすと予測精度は向上するものの、15000 データ程度でその効果は頭打ちになることから、更なる精度向上のためには学習モデルの改良が必要と考えられる。

次に Ar プラズマ学習モデルに He プラズマのデータを、He プラズマ学習モデルに Ar プラズマのデータを解析させた。図 1(a) (b) に結果の例を示す。どちらの学習モデルも学習に使用したプラズマの特徴を反映した予測となっており、学習していないタイプのデータの予測精度は低いことがわかる。しかしながら、図 1(c) に示すように、両方のプラズマデータを学習させたモデルは、どちらのプラズマデータに対してもある程度の精度で予測が出来ていることがわかる。つまり、様々なプラズマ状態が起こり得る状況に対応させる場合には、学習データも様々なものを用意する必要があると言える。

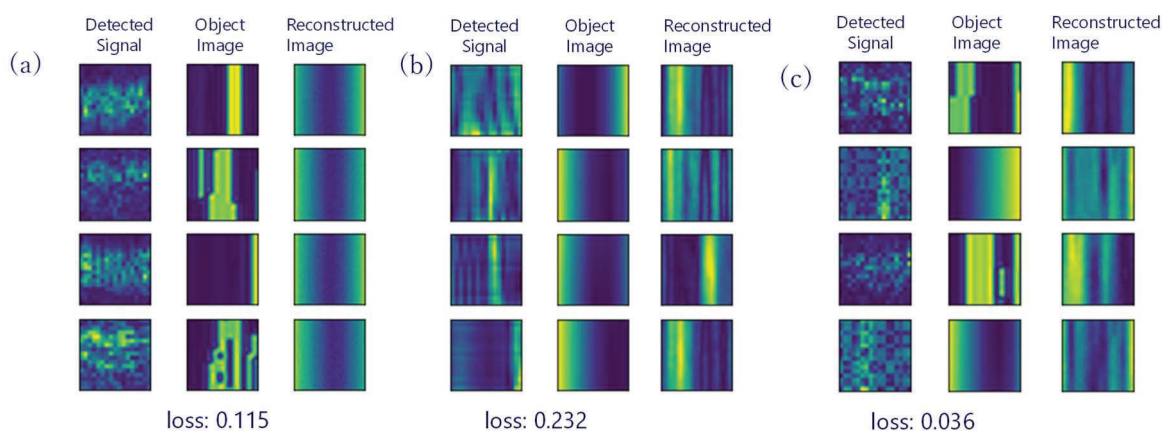


図 1 学習結果の一例 (a) Ar プラズマ学習モデルで He プラズマデータを解析  
(b) He プラズマ学習モデルで Ar プラズマデータを解析  
(c) 両方のプラズマデータを学習させたモデルで両方のプラズマデータを解析

## 第一原理シミュレーションとデータ科学、数値計測による プラズマ分布形成の定量的理解に向けた基盤開発

核融合科学研究所 研究部  
沼波 政倫

### 研究目的

磁場閉じ込め核融合において、炉の成否は高温プラズマの閉じ込めにかかっている。そして閉じ込め性能を左右するプラズマの熱や粒子の輸送制御は現在に至る重要課題である。輸送現象を正確に理解し予測するには第一原理に基づく運動論シミュレーションが有効で信頼できる手法となっているが、一方で、解像度や物理モデルの制約など現実的な予測に要求されるレベルには依然として隔たりがある。このような背景の下、応用力学研究所共同研究における数値計測手法の開発は、上述のシミュレーション結果に対する妥当性や信頼性を確立する上での一つの回答であった。本研究課題は令和4年度から6年度までの計画で、最近さまざまな分野で応用が進むデータ科学の手法を用いながら、上記の第一原理シミュレーションと数値計測手法を通じて、プラズマ輸送現象から結論づけられる密度・温度分布の形成に対して、その評価基盤手法の開発を行い、プラズマ分布形成と輸送現象の更なる理解を進めるものである。

### 研究方法

プラズマ輸送評価は上述の通り運動論シミュレーションが有用であるが、計算コストが課題であり高精度の輸送予測モデルを構築することが重要になる。ここでは、シミュレーション結果（解軌道）を理論空間上で表現し、その解空間構造の数理モデル化する。また、運動論シミュレーションによる静電ポテンシャル分布などを計測ツールで数値計測・定量解析を行う。輸送モデル構築と数値計測手法の開発を並行して進める。

### 研究成果

本研究課題の実施期間（令和4年度-6年度）で得られた成果は下記である。

**輸送モデルの予測精度向上と乱流の解空間構造による新しいモデリング** 運動論に基づく第一原理計算から得られる乱流輸送レベルを簡約して表現した従来の輸送モデルは外挿性に課題が残っている。既存モデルを修正して精度向上する方法や、シミュレーションで得られる乱流輸送現象の解軌道が束縛される解空間に注目した数理的な輸送モデルの表現を試みた。これまでの簡約モデルを基に解空間をモデリングし、その実効性も評価した。さらに解空間上で描く解軌道を食者捕食者の関係の方程式系でもモデリングを行い、軌道の特徴を抽出することができた。

**計測模擬と数値診断** モジュールで構成された統合乱流計測シミュレータ(iTDS)による複数のシミュレーションデータの統合解析の環境を構築した。LHD における大域的新古典輸送コード FORTEC-3D による電位分布の揺らぎに対して、重イオンビームプローブ模擬 (sHIBP) を適用し、揺らぎの経路積分効果の評価や異なる入射条件による分布計測を実施した。これらから、観測領域の評価や複数種の物理量の解析、大域的構造のダイナミクスへの局所計測からの指針を示すことができた。

### まとめ

本課題で得た成果を通じて、①計測シミュレータによる第一原理計算への数値計測の適用から、実験側への観測指針提供へ、②乱流輸送モデリング研究から、モデル高精度化や分布予測、基礎物理からのモデル拡張の指針へ、③本研究の波及研究から、第一原理乱流計算の高次元解析や計算結果の低次元モデル化へ、などの各アウトプットに繋がっている。今後は逆問題解析の手法などを用いた研究に発展させることを計画している。

## トロイダルプラズマにおける MHD 不安定性の非線形構造のシミュレーションデータ解析

核融合科学研究所 研究部 佐藤雅彦

核融合プラズマでは、MHD (磁気流体力学) 不安定性を抑制し、安定した高ベータプラズマを維持することが重要である。プラズマ中では複数の MHD 不安定性が発生し、これらが相互作用することで複雑な非線形発展を引き起こす可能性がある。本研究では、MHD 不安定性間の相互作用を理解するための解析ツールを開発し、シミュレーションを通じてその物理を明らかにすることを目的とする。

本研究では、九州大学応用力学研究所のトカマク実験装置 PLATO を対象とし、シミュレーション解析を実施した[1]。まず、統合輸送コード TASK/EQU モジュール[2]を用いて、内部キンクモードとバルーニングモードがともに線形不安定な MHD 平衡を構築し、その MHD 平衡に対して MIPS コード[3]を用いて MHD 不安定性の解析を行った。ここで MIPS コードは、MHD 方程式を空間方向に 4 次精度の有限差分法で離散化し、時間積分には 4 次精度のルンゲクッタ法を適用するシミュレーションコードである。図 1 に、MIPS コードによるシミュレーションから得られた、ポロイダル断面での圧力分布の時間発展を示す。時刻  $t = 250$  付近では、プラズマ周辺部でバルーニングモードによる圧力分布の変形が生じている。さらに、 $t = 425$  以降では内部キンクモードの影響が顕著になり、中心圧力が大きく減少する現象が生じていることがわかる。次に、動的モード分解の結果を図 2 に示す。ここでは、固有値の大きい順にモードを並べた。最も固有値が大きいモード ( $k = 1$ ) が主要モードであり、 $k = 11$  のモードは背景分布に対応する。 $k < 11$  のモードは時間とともに成長するモードであり、 $k > 11$  のモードは減衰するモードである。モードの特徴を解析した結果、 $1 \leq k \leq 4$  のモードはバルーニングモードに起因する圧力分布の変形を示し、 $5 \leq k \leq 8$  のモードは内部キンクモードの影響を反映していると考えられる。

本研究では、内部キンクモードとバルーニングモードがともに不安定な MHD 平衡に対して動的モード分解を適用し、それぞれのモードによる揺動圧力分布を抽出することに成功した。今後は、従来のフーリエ級数によるモード分解に加え、本研究の手法を併用することで、複数の MHD 不安定性の相互作用に対する詳細な解析を行っていく。

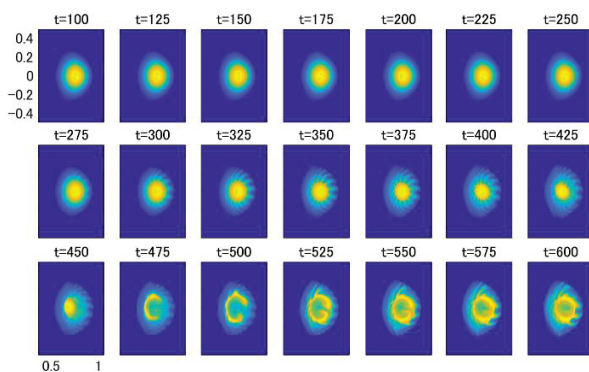


図 1. ポロイダル断面上での圧力分布の時間発展。

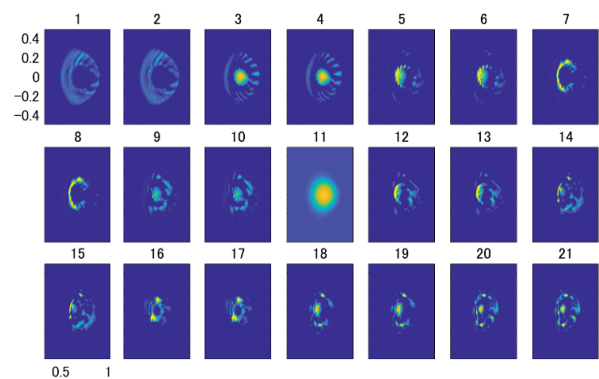


図 2. 動的モード分解により得られたモード構造。各図の上の数字はモード数(k)を表す。

[1] 川村, 糟谷, 佐藤, 佐々木, プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第 28 回支部大会(2024/12/21-12/22).

[2] <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>

[3] Y. Todo et al, Plasma Fusion Res. 5 (2010) S2062.

## 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

## 1. 目的

プラズマ乱流内では、ミクロな構造であるドリフト波が非線形結合をすることで、輸送に大きな影響を与えるゾーナルフローやストリーマーなどのメゾスケール構造が発生している。ゾーナルフローは輸送を抑制するのに対してストリーマーは輸送を増大させ、これらの構造の発生機構や制御・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も非常に重要である。

九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA では、放電条件を調整することでプラズマ乱流中のドリフト波が非線形結合をして生じた乱流の塊であるストリーマー構造が発生する。この PANTA 実験では、乱流の塊を形成するドリフト波（搬送波）が媒介波と呼ばれる波と非線形結合をし、乱流の塊であるストリーマーの包絡線と媒介波が同じ構造を持ちながら位相関係がロックされている様子を世界で初めて観測した。この成果は直線プラズマがトロイダルプラズマに比べて低温で近接性に優れることを活かし、トロイダルプラズマでは不可能な多チャンネルプローブ計測を積極的に行ってきた結果から得られたものである。またバイスペクトル解析という非線形結合の詳細を解析できる手法を多チャンネル計測結果に適用して、時空間的に非線形結合を調査してきたことも大きい。

PANTA の別の放電条件では、ドリフト波が非線形で長寿命な孤立波構造を生み出す。また同時に非線形結合により生じたゾーナルフローと同期して、孤立渦と呼ばれる構造も生み出す。さらに孤立渦に捕捉されてスプラッシュと呼ばれる細かくて高周波な微細構造も発生する。このように PANTA はメゾスケール構造の解析と現象解明に非常に有用な装置であり、様々な結果を生み出している。

今までの研究では周方向プローブアレーと径方向プローブアレーでの計測結果の相互相関を取り、ある周波数に着目してプラズマ断面内の相関の強さと位相構造を解析していたが、本研究では周方向プローブアレーにより揺動が周方向モード数ごとに分離できることに着目し、周波数と周方向モード数を同時に指定してプラズマ断面内の構造解析を行うという新解析法を開発した。これによりストリーマーや孤立波、スプラッシュなどのより詳細な構造計測が期待できる。

## 2. 実験装置

九州大学の直線プラズマ実験装置 PANTA に周方向 64 チャンネルプローブアレー（測定半径 40 mm）と径方向 10 チャンネルプローブアレー（測定半径 20 mm～65 mm、間隔 5 mm）を設置し、孤立波およびスプラッシュが発生する実験を行った。PANTA は軸方向の長さが  $z = 4000$  mm、内径  $r = 450$  mm の直線装置である。ソース部に付けられた内径 95 mm のガラス管に RF アンテナで 3 kW、周波数 7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生させることで真空容器内部に直径が約 100 mm の直線プラズマが発生する。その他の実験条件としては、軸方向の磁場は 0.09 T、内部に封入したアルゴンの圧力は 3 mTorr に調整した。このとき中心部の密度は  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  程度、電子温度は  $3 \pm 0.5 \text{ eV}$  のおおよそ平坦な分布である。

## 3. 実験結果と考察

64 チャンネルプローブのうちの 32 チャンネルと 10 チャンネルプローブでイオン飽和電流の揺動（電子密度揺動に相当）を計測し、フーリエ解析をした後にある周波数  $f$  での各々の相互相関を取り、実部をプロットすることでプラズマ断面内の相関と位相情報を求めた。このとき周方向 32 チャンネルプローブの計測結果に対しては 2 次元フーリエ展開を行い、ある周方向モード数  $m$  のみの成分を取り出した。10 チャンネルプローブの計測結果が 2 次元フーリエ展開を行っていない場合でも、両者の相関を取れば、指定した周方向モード数  $m$  の成分のみの相関が残ることになる。

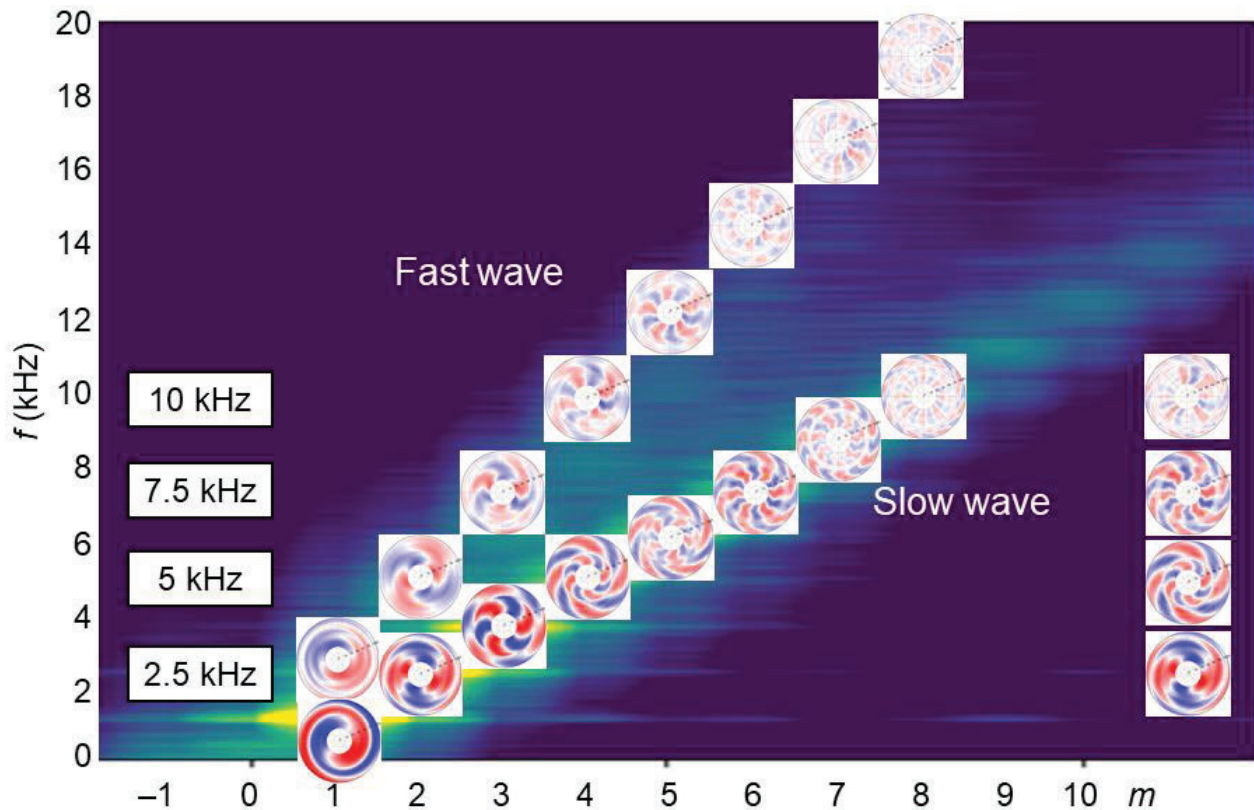


図1. 周方向64チャンネルプローブ（うち32チャンネル）と径方向10チャンネルプローブから求めたモード $(m, f)$ の密度揺動のプラズマ断面上の相互相関の実部を、2次元スペクトル上に重ねたもの。右の余白には従来の $f$ のみを指定した解析法での結果を示している。

このとき、周方向モード数ごとに展開するために毎度周方向32チャンネル全てのデータを用いているため、周方向の局所情報が失われていることになる。そのため周方向 $\theta$ に、まずはなるべくノイズが発生しないように単純な $(1+\cos\theta)/2$ の周方向フィルターをかけ、ある程度局所情報を復活させた。

図1の密度揺動スペクトルが示すように、回転速度1.25 kHzの孤立波に相当するSlow waveとその高調波、回転速度が2倍程度速く振幅の小さいスプラッシュに相当するFast waveとその高調波が現れた。Slow系列は断面上で相関が強く長寿命で安定なのに対し、Fast系列は相関が弱く、高調波成分で断面の左右で相関の強さにも差があるため、空間的にも時間的にも寿命が短い。また右の余白に周波数のみを指定した従来の構造解析の結果を示すが、2.5, 5, 7.5 kHzではSlow系列に埋もれていたFast系列が明らかになったことと、10 kHzでは周波数のみの解析結果がSlow, Fast両系列の特徴を合わせ持つことをよく表している。このように新しい周方向モード数分解した解析方法の妥当性が示され、今後この解析法により孤立波、スプラッシュ、ストリーマーなどの研究が進展すると大いに期待できる。

#### 4. 研究成果報告

- [1] T. Yamada *et al.*, “Investigation and wave number analysis of meso-scale structures formed in plasma turbulence”, 8th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, CD-7-TP7, Malacca, Malaysia (Nov 3-8, 2024).
- [2] 山田琢磨他, “直線プラズマにおけるメゾスケール構造の研究と波数解析”, 第41回 プラズマ・核融合学会 年会, 18P20, 東京 (Nov 17-20, 2024).

#### 5. 研究組織

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

### 特定研究 3 【分野融合】

研究テーマ：実験・計測科学と計算科学の融合による新しい研究分野の開拓（3年目）

Developing new research fields by integrating experimental/measurement science and computational science

統括責任者：弓本 桂也（地球環境力学分野）

小菅 佑輔（核融合力学分野）

寒川 義裕（新エネルギー力学分野）

Integrator：Keiya Yumimoto (Earth Environment Dynamics)

Yusuke Kosuga (Nuclear Fusion Dynamics)

Yoshihiro Kangawa (Renewable Energy Dynamics)

概要：これまでの科学研究では、研究対象を観測・計測し可視化する実験・計測科学と、物理・科学理論で構築された数値モデルで現象を再現・予測する計算科学がその発展に大きく寄与してきました。近年、機械学習や数理統計、データ同化の技術を用い両者を融合することで、おのおの単独では得られない知見の取得や、実験設定およびモデルパラメータの最適化が行われるようになってきました。本研究所は共同研究装置としてさまざまな実験・研究設備および大規模演算装置を有します。本特定研究では、これらの設備を利用しつつ、実験・計測および計算科学をベースとする研究者がコミュニケーションを取りつつ、両者を融合させた新しい研究分野の開拓を目指します。

## データ科学的アプローチによる設計可能な材料創製への計算手法の検討

久留米工業高等専門学校 材料システム工学科 小袋 由貴

## 1. 目的

最近、コンピュータ性能が格段に向上し、情報通信関連技術の進化が著しい。物質・材料の研究開発においても、実験だけではなく第一原理計算に代表される革新的な理論計算法を駆使して、構造や物性を電子レベルから本質的に理解しようとする研究事例が非常に増えてきた。さらには、マテリアルズ・インフォマティクス技術に代表されるように、実験や理論計算から得られた構造や物性データを集積してビッグデータ化し、それを AI に学習させて未知の物質や材料の構造や物性を予測することも可能になってきた。しかしながら、個々の蓄積されたデータがどのような精度で得られたのか正しく見極めることが何よりも重要である。本研究では、可視光線を吸収することによって黄色発色や光触媒機能を発現する  $\text{BiVO}_4$  に注目し、第一原理バンド計算によって実験データがどの程度まで再現できるのか検証したのでここに報告する。

## 2. 計算方法

検討対象には、単斜晶構造を持つ  $\text{BiVO}_4$  を選んだ[1]。第一原理バンド計算は、最も高精度のバンド計算法として知られている FLAPW 法を実装した WIEN2k コードを使用した[2]。交換相関相互作用は、一般化密度勾配法 (generalized gradient approximation, GGA) [3]の枠内とし、また交換ポテンシャルに改良型 Becke-Johnson 法 (modified Becke-Johnson, MBJ) の適用も試みた。FLAPW 法では、一電子の感じる結晶ポテンシャルを Muffin Tin (MT) 球と呼ばれる原子核を中心とした球形領域と格子間領域に分割して計算を進める。基底関数には、MT 球内において原子状波動関数、格子間領域では平面波を用いた。MT 半径 ( $R_{\text{MT}}$ ) は Bi, V, O に関してそれぞれ 2.50, 1.71, 1.55 a.u. とし、平面波のカットオフは  $R_{\text{MT}} \times K_{\text{max}} = 7.0$  とした。状態密度 (density of states, DOS) 計算では、第一ブリルアンゾーン内において 30 の  $k$  点を選択し、原子ごとの部分状態密度 (partial density of states, PDOS) も見積もった。また、 $\text{BiVO}_4$  の光学特性を調べるために、複素誘電関数  $\epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$  を計算した。複素誘電関数の実数部  $\epsilon_1(\omega)$  は、虚数部  $\epsilon_2(\omega)$  から Kramers-Kronig 関係を用いて算出した。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 には、GGA 法の枠内で得られた単斜晶  $\text{BiVO}_4$  の DOS を示す。エネルギー軸の原点は価電子帯の頂上とした。伝導帯は 3 つのエネルギー領域： I (2.18~3.21 eV)、II (3.27~4.90 eV)、III (4.93 eV 以上) に大別できる。領域 I と II は、主に V 3d 状態と O 2p 状態間の相互作用に帰属される。V に関する PDOS 解析から、領域 I では e 軌道 ( $dz^2$  と  $dx^2-y^2$ )、領域 II では  $t_2$  軌道 ( $dxy, dxz, dyz$ ) が主成分であり、 $\text{VO}_4$  四面体による結晶場分裂が認められる。領域 III は、Bi 6p 状態と O 2p 状態が混成していた。一方、価電子帯は、2 つのエネルギー領域： IV (-9.70~-8.86 eV) と V (-5.18~0 eV) 領域に分けることができ、それぞれ Bi 6s 状態と O 2p 状態が大きく寄与していることがわかった。一般に、GGA 計算では半導体や絶縁体のバンドギャップが小さく見積もられる。単斜晶  $\text{BiVO}_4$  のバンドギャップは 2.18 eV であり、実験値 (2.45 eV) よりも小さくなった。これに対して、MBJ 法ではバンドギャップが 2.51 eV と見積もられ、実験値に近い値が得られた。なお、高い精度を持つとされる混成汎関数 HSE06 でバンド計算を行

うと、BiVO<sub>4</sub> のバンドギャップが過大評価されるとの報告がある[4]。これらの結果から、BiVO<sub>4</sub> の固体電子構造解析では、MBJ 法が最も適していると考えられる。

Fig. 2 に、MBJ 法を適用して得られた単斜晶 BiVO<sub>4</sub> の複素誘電関数と光学吸収係数を示す。単斜晶 BiVO<sub>4</sub> は異方性を持つため、複素誘電関数のテンソル成分  $xx, yy, zz$  はお互いに異なる挙動を示した。光学吸収と関連付けられる  $\epsilon_2(\omega)$  に注目すると、3.0 eV 以下のエネルギー領域では  $xx$  および  $yy$  成分にピークが観察された。このことは、価電子帯-伝導帯間の電子遷移が  $x$  および  $y$  方向の異方性をもつことを意味している。V の PDOS 解析から、この吸収は、価電子帯頂上付近の  $d_z^2$  状態から、伝導帯底付近の  $d_{x^2-y^2}$  状態への電子遷移が関与しているものと考えられる。

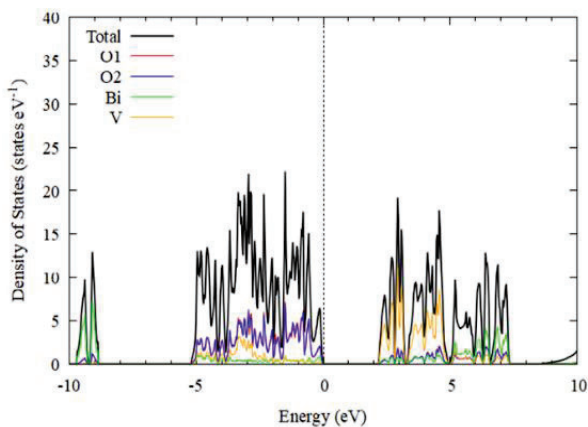


Fig. 1 DOS obtained with GGA for monoclinic BiVO<sub>4</sub>.

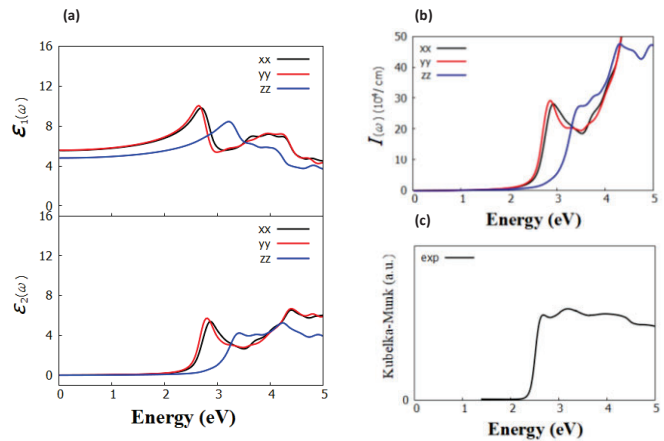


Fig. 2 (a) Real and imaginary parts of dielectric function and (b) absorption coefficient obtained by MBJ calculation, and (c) experimental UV-vis spectrum for monoclinic BiVO<sub>4</sub>.

#### 4. まとめ

本研究では、単斜晶 BiVO<sub>4</sub> について第一原理バンド計算を実施し、MBJ 法を用いることで実験的バンドギャップを再現できることを明らかにした。

#### 参考文献

- [1] A.W. Sleight *et al.*, *Materials Research Bulletin*, 14, 1571-1581 (1979).
- [2] P. Blaha *et al.*, *J. Chem. Phys.* 152, 074101 (2020).
- [3] J.P. Perdew *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 77, 3865-3868 (1996).
- [4] S. Lardhi *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, 122, 18204-18211 (2018).

#### 研究組織

小袋 由貴<sup>1)</sup>, 寒川 義裕<sup>2)</sup>, 草場 彰<sup>2)</sup>, 奥山 哲也<sup>3)</sup>, 古賀 紀后<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>久留米工業高等専門学校、<sup>2)</sup>九州大学応用力学研究所、<sup>3)</sup>九州大学大学院総合理工学研究院

## 乱流プラズマの輸送特性計測のためのマイクロ波センシング

核融合科学研究所・研究部・位相空間乱流ユニット 徳沢季彦

## 1. 目的

核融合プラズマ内部における乱流現象理解のため、プラズマと非接触なマイクロ波を用いた計測手法の開発を行っている。特に非等方な流れを観測することを目的とし、ドップラーレーダーとフェーズドアレイアンテナを組合わせた計測手法の実証を試みている。本研究では通常フェーズドアレイアンテナとは異なり、周波数を走査することで放射方向を制御する周波数走査型という手法を 3D 金属プリンタを利用することで実現し、前回、九州大学の QUEST 装置に適用することを試みたが、マイクロ波の周波数帯を低くする必要があったことが判明した。そこで今年度、新たに X-band (8-12GHz) のアンテナを造形しその特性を調べた。

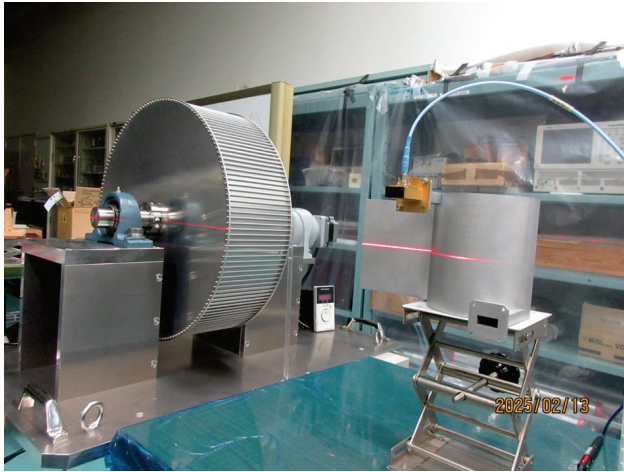


図 1：新たに造形した X-band フェーズドアレイアンテナ(手前)を用いたドップラーレーダー装置のプラズマ模擬試験の状況。奥のドラムを回転させてドップラーシフトを生じさせる。

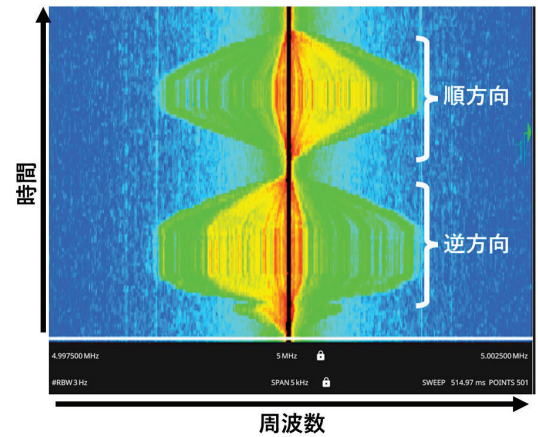


図 2：X バンドのフェーズドアレイアンテナを周波数を固定し、ドラムの回転速度を上下させた時に生じるドップラーシフトの様子。

## 2. ドップラーレーダーテスト

X-band フェーズドアレイアンテナの放射特性が周波数で制御可能であることを確認した後、ドップラーレーダーとして活用できるかを試験した。図 1 に試験の状況を示す。周波数を固定し、プラズマを模擬した回転ドラムの速度を変化させると図 2 に示すように明確な周波数シフトが観測された。次に、回転速度は一定にして、入射周波数を変化させると、図 3 に示すようにドップラーシフトが反転することが確認でき、プラズマ実験での実証試験が期待できる結果を得た。

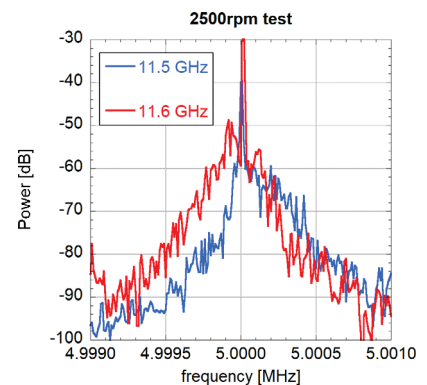


図 3：周波数を変え放射方向を反転させると、ドップラーシフトが反転することを確認した

## 3. 論文発表

1. T. Tokuzawa, M. Yoshida, *et al.*, “Preparatory study of feasibility for a vertical viewing electron cyclotron emission diagnostic for the JT-60SA tokamak”, *Rev. Sci. Instrum.* 95, 083531 (2024).
2. T. Nasu, T. Tokuzawa *et al.*, “Electron-scale turbulence characteristics with varying electron temperature gradient in LHD”, *Nucl. Fusion* 64 096008 (2024).

## 窒化物半導体超格子界面における原子拡散機構の解析

和歌山大学システム工学部 小田将人

## 【目的】

近年、次世代パワーデバイス材料として優れた物性を持つ窒化ガリウム (GaN) および窒化アルミニウム (AlN) が注目されている。これらを用いたヘテロ接合により、高電子移動度トランジスタ (HEMT) の開発が可能となり、通信基地局やレーダーなどへの応用が期待されている。しかし、GaN と AlN の格子定数の違いにより界面に欠陥や歪みが生じ、さらに欠陥を介した原子拡散による混晶化が問題となっている。デバイス性能を左右する界面の品質は、欠陥の存在や原子拡散に強く依存することから、本研究では AlN/GaN 界面における混晶化機構の解明を目的とし、複合欠陥の安定性を評価する。

## 【手法】

c 軸方向を成長方向とした AlN/GaN モデルを作成し、格子定数を GaN に固定した AlN on GaN モデルと、格子定数を AlN に固定した GaN on AlN モデルの 2 種類を対象とした。さらに、それぞれ III 族極性と V 族極性の成長を考慮し、計 4 種類のモデルにおいて、図 1 に示す界面近傍の複合空孔欠陥 ( $V_{\text{Ga}}$  or  $V_{\text{Al}}$ -VN) の形成エネルギーを算出した。エネルギー計算に際しては構造最適化を行い、最安定となる原子配置を求めた。全ての計算は PHASE/0 を用いた。k 点メッシュは  $3 \times 3 \times 1$ 、カットオフエネルギーは 30 Ry、構造最適化における力の最大値の閾値は  $0.9 \times 10^{-3}$  Hartree/Bohr とした。

## 【結果】

格子定数や成長面の極性によって、界面に形成される複合空孔欠陥のエネルギーに顕著な違いが見られた。特に、AlN 側に複合空孔欠陥が位置する場合にエネルギーが大きくなる傾向が確認された。今後は、複合空孔欠陥の拡散反応障壁を評価し、界面混晶化の詳細なメカニズムを解明する予定である。

## 【研究成果】

- [1] Jota Nakamura, **Masato Oda**, and Yoshihiro Kangawa, Phys. Stat. Solidi B, **2024**, 2024, 2400026.  
[2] 藤田 大輝、小田 将人、寒川 義裕、'AlN/GaN における混晶化機構の解明'、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、14p-P05-1、東京理科大学。

## 【研究組織】

小田将人(和歌山大学・准教授)：計算の実行、解析  
藤田大輝(和歌山大学・M1)：計算の実行、解析  
寒川義裕(九州大学・教授)：計算の実行、解析

## パターン形成を応用した工学分野における新しい揺らぎの制御手法の考察

広島大学大学院先進理工系科学研究科 鈴木康浩

## 目的

擾乱としての揺らぎは、工学・理学分野の至る所に現れる。例えば、流体中の変動成分としての乱流や不安定性、閉じた循環系における渋滞現象などがあげられる。揺らぎは、システムの不安定化やエネルギー損失をもたらすために、通常はフィードバックにより制御・安定化される。一方、揺らぎを「機能」として注目した場合、揺らぎの高次成分による流体の攪拌、熱伝導の増幅・減衰などを活用した、革新的な制御技術への展開が期待される。しかし、これまで用いられてきたフィードバック制御は、揺らぎを駆動する乱流や不安定性を完全に抑え込むことを目指した制御方法である。したがって、揺らぎの高次成分を生かしつつ、揺らぎそのものも制御するためには、これまでと全く異なる制御手法を新しく検討する必要がある。

自然界には一見乱雑に見える現象でも、よく調べるとある種の規則性、つまりパターンが見つかることがある。もし、パターン形成の仕組みを理解でき、かつ制御することが可能であれば、工学的に重要な揺らぎを直接制御することが可能になるかもしれない。そこで、本共同研究では、パターン形成のメカニズムを数値的・実験的に考察し、制御された揺らぎを定常発達できるかどうか考察する。

## 本年度の成果

令和6年度は、磁場閉じ込め核融合プラントの立ち上げ時に発生が予想される、熱的不安定性の制御について検討を行った。

図1にPOPCONプロットの例を示す。日本の核融合原型炉設計の値を用いて、中心温度（横軸）と中心密度（縦軸）に対し、到達 $Q$ 値の等高線を示した。POPCONプロットから、核融合プラントの立ち上げは温度・密度が共にゼロの状態を起点とし、時間をかけて温度と密度を上げていく物であると解る。さらに、 $Q$ の計算には定常状態を仮定しているので、 $Q$ =一定の等高線は熱平衡状態を表していると考えることが出来る。中心温度 $T_{e0}$ と中心密度 $n_{e0}$ が反比例の関係にあるために、POPCONプロットで密度を上げるには温度が下がる領域が出てくる。従って、熱的不安定な領域が現れる。まずは、0次元エネルギーバランスの式から熱平衡方程式を導出した。次に、この熱平衡方程式に温度揺動を加え、線形安定性解析を行った。解析の結果得られた線形成長率を、図1のカラーマップに示している。広い領域で、熱的不安定性が線形不安定になっていることが解る。

## 2. 熱的不安定性の非線形制御

熱的不安定性が発生した場合、中心温度が下がらないように強力に加熱する必要がある。しかし、そのような不安定性回避のための強力な加熱は、 $Q$ を高くするためには不利となる。そこで、熱的不安定性を回避するのに、単純に強力な加熱を加えるのではなく、2次以上の高次高調波の熱揺動を加えることで熱的不安定性を制御できるか検討した。

そこで、熱的不安定性を制御するために、線形信号、非線形信号を用いてフィードバック制御を行い、

熱的不安定性が制御出来るか考察した、非線形信号として、指数関数およびべき乗関数を採用した。その結果、非線形信号を用いた方が、単純な線形フィードバックよりも高速に熱的不安定性を制御出来ることが解った。図2 (a)に線形に加熱を加えた場合の熱平衡点へ帰還するまでの時間変化を密度毎に調べた図を示す。線形制御の場合、帰還までの時間が密度に依存することが分かる。一方、図2 (b)にべき乗関数を用いて加熱を入力した場合を示す。帰還までの時間が線形制御と比べて 1/10 に減少していることが分かる。

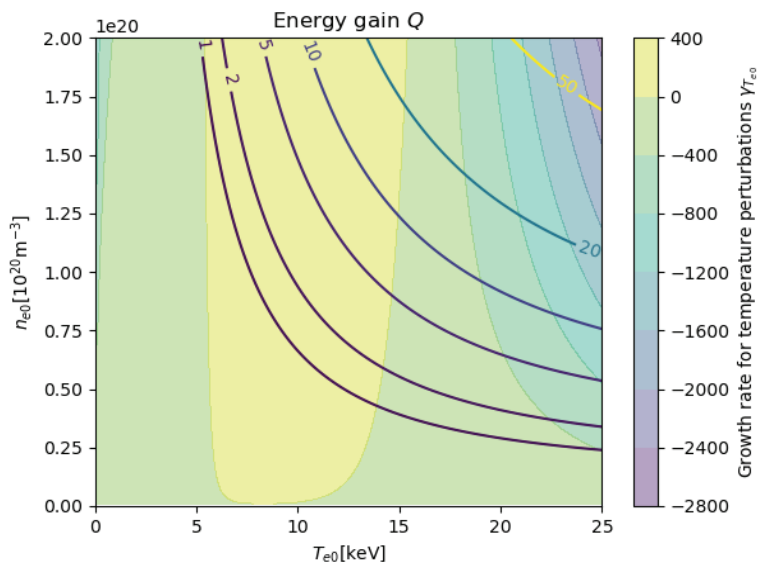


図1 POPCON プロットの例。エネルギー利得を等高線として表示した。カラーマップは、熱的不安定性の線形成長率を示す。線形成長率が正の場合は、熱的不安定な領域。

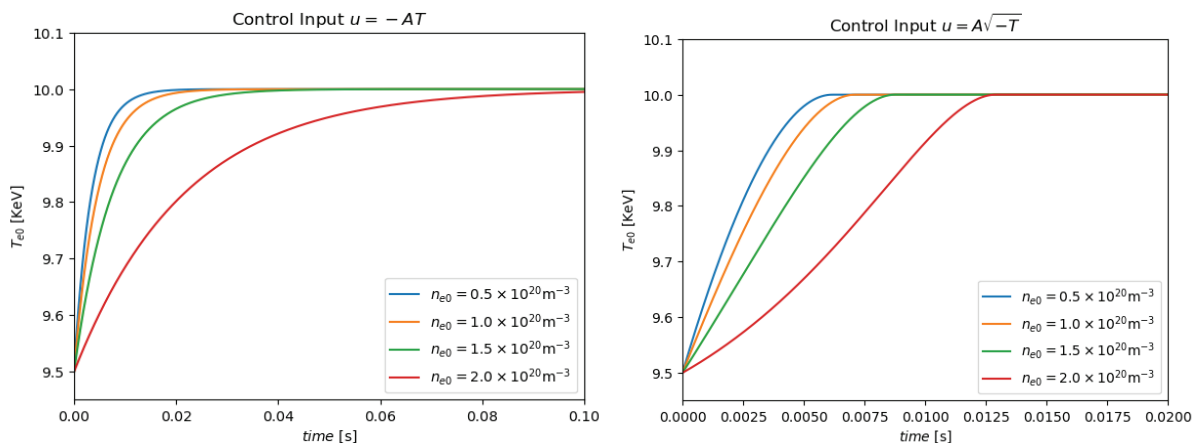


図2 熱的制御のフィードバック制御の例。(a)は線形制御、(b)はべき関数を用いた非線形制御。A は加熱入力[kW]。

### まとめと今後の展望

今後、今回の結果を数理モデル化し、パターン形成との関係について考察を進める。

## 特定研究 4 【分野融合】

研究テーマ：IoT とビッグデータを活用した情報処理プロセスの自動化と最適化（新規）

Data Processing Automation and Optimization using IoT and Big-Data Technologies

統括責任者：長谷川 真（核融合力学分野）

朱 洪忠（新エネルギー力学分野）

Integrator：Makoto Hasegawa (Nuclear Fusion Dynamics)

Zhu Hongzhong (Renewable Energy Dynamics)

概要：IoT（Internet of Things）技術の急速な普及と共に、世界中のデバイスやセンサーから大量のデータが生成されるようになりました。同時に、ビッグデータ技術も急成長し、これらのデータを収集、保存、解析するための効果的な手法も開発されています。これに伴い、情報処理プロセスの自動化と最適化は多くの分野で重要な課題となっています。

本特定研究では実験的な研究で培った様々な分野の制御手法と自動化技術を背景に、リアルタイムな情報処理など新技術の開発・蓄積と普及を推進する中核的な役割を果たします。本研究はデータ駆動型制御や洋上風力の開発など広範な領域でその応用が可能であり、革新的なアプローチや技術の普及を、分野をまたがり行うことで課題解決力と競争力の強化を促し、新しい知識と価値の創造を目指します。

# Development of a novel prediction model based on machine learning method for piston mode fluid resonance

日本大学工学部 譚 雷  
九州大学応用力学研究所 朱 洪忠

• Research Objectives:

Piston mode fluid resonance is a common phenomenon in ocean engineering which may occur in a moonpool, narrow gap between two side-by-side vessels, or oscillating water column devices. The large-amplitude resonance may hinder the normal operations of marine craft, but may also increase wave energy conversion efficiency. The prediction of resonant amplitude by traditional potential flow models is usually challenging due to the nonlinear damping effects. To address the issues, machine learning methods, which is famous for the predictive capabilities and computational simplicity, are utilized to develop a model for estimating viscous damping and fluid resonance.

• Research approach and results:

Firstly, experiments were conducted for preparing relevant data for training neural network algorithms. Two types of round buckets (with different diameters) and two types of square quadrangular buckets (with different side lengths) under various drafts were considered in the experiments. Free decay tests with various initial water column heights were performed and the water surface level during the oscillating was recorded. An experimental scene using a round bucket with a diameter of 250 mm is shown in Fig. 1(a), and two groups of free-decay results are shown in Fig. 1(b, c).

Based on the free-decay tests, a damping estimation method is developed to estimate the linear and nonlinear damping coefficients for each scenario. The damping estimation method is shown in Fig. 2. A comparison between experimental and numerical results is shown in Fig. 3.

• Conclusion and future work

Experiments with two types of buckets under various drafts and initial amplitude were conducted, and a damping estimation approach was proposed to estimate the linear and nonlinear damping coefficients. The comparison between experimental and numerical results demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

In future work, neural networks approaches are to be applied to establish the model of the damping coefficients as a function of geometry, draft, and oscillating amplitude. Since more datasets would lead to more accurate damping estimation and expand the scope of application, published data will also be collected to enhance this study.

• Publications

- 1) H. Zhu, C. Hu, L. Tan, A digital twin approach for damping estimation of a ship towing system with suction caissons, The 13th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (IWSH2025). (to be presented)

• Research regime

譚 雷、日本大学工学部助手 研究代表  
朱 洪忠、九州大学応用力学研究所准教授 研究提案とマネジメント

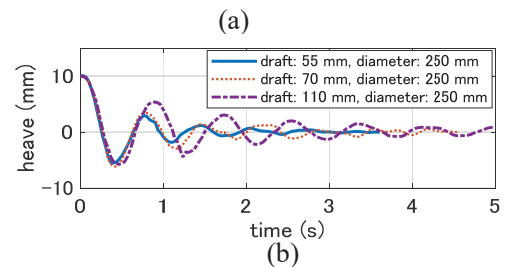
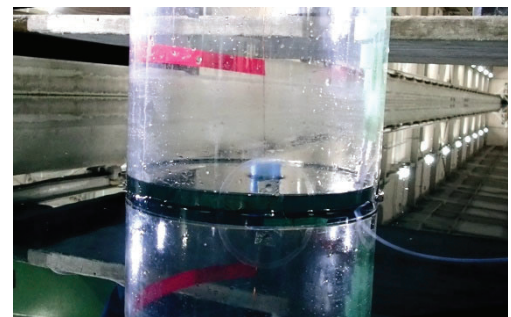


Figure 1. (a) Experimental setup for OWC free-decay tests; (b) Results with different draft.

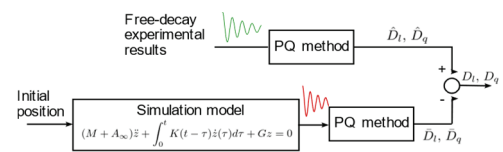


Figure 2. Damping estimation method.

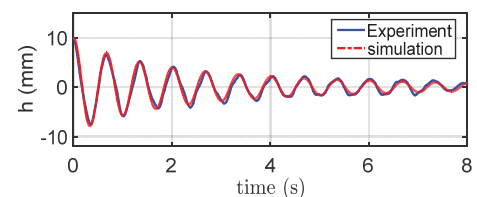


Figure 3. A comparison of experimental and numerical results.

## ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プラントの性能評価機能を有する 遠隔監視システムの開発

佐賀大学海洋エネルギー研究所 松田吉隆

**目的** 海洋温度差発電は、海洋表層の温海水と海洋深層の冷海水の温度差を用いて発電を行う。化石燃料等を用いずに海水のみを熱源としているため環境に優しい次世代の再生可能エネルギーとして重要である。海洋温度差発電プラントはその発電原理から僻地や海洋上などの遠隔地に設置されることが多いと想定されるため、遠隔地からプラントの監視・操作を行うことが必要となる。一方、水不足は世界的に喫緊の課題であるが、その解決方法のひとつとして海水淡水化がある。海洋温度差発電との複合利用を目的とした淡水化手法として、スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化プラントが検討されているが、この発電と淡水化を組み合わせる構成される、ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プラントの研究が近年進められている。本研究では、ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プラントの遠隔監視システムの開発に関する研究を実施した。

**方法** 本研究では、性能評価機能を有する遠隔監視システムを、先行研究のシステムに改良を加えることによって開発した。先行研究の遠隔監視システムは、佐賀県佐賀市にある佐賀大学研究室内 PC（クライアント）と沖縄県久米島にある佐賀大学海洋エネルギー研究所久米島サテライト PC（サーバ）で構成される。サーバ内には発電量制御シミュレーションのための発電量制御モデル、データのやり取りのためのテキストファイル、Web アプリケーションが保存されている。本研究において改良を施した遠隔監視システムの Web ブラウザ表示画面を Fig. 1 に示す。構成図の改良、画面サイズに対応したデータ表示機能の追加、グラフ表示機能の追加、性能評価パラメータの計算・表示機能の追加などを施した。

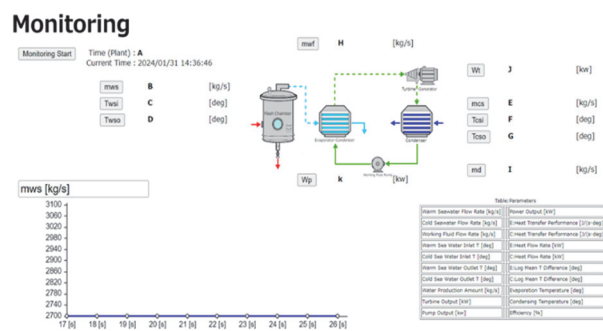


Fig. 1 遠隔監視システム Web ブラウザ開発画面

**結果** 本研究で開発した遠隔監視システムの動作を確認するために、遠隔監視実験を実施した。実験を通して、データ取得の正確性については十分であることが確認されたが、データ表示に関しては上手く表示されない場合があることが確認された。

**研究成果報告** 2024 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2024 年度(第 77 回)電気・情報関係学会九州支部連合大会にて発表

**研究組織** 研究代表者：松田吉隆（佐賀大学）、所内世話人：朱洪忠（九州大学）、研究協力者：後藤聡（佐賀大学）、杉剛直（佐賀大学）、江頭成人（久留米工業高等専門学校）、森崎敬史（佐賀大学）、安永健（大阪電気通信大学）、池上康之（佐賀大学）

## トムソン散乱計測のためのアライメント自動化

東京大学大学院新領域創成科学研究科 江尻 晶

## 1) 目的

九州大学の QUEST 装置では、本課題代表者らがトムソン散乱計測装置を構築、運用、解析し多くの研究者に電子温度と電子密度の空間分布データを提供してきた。QUEST の特徴である長時間放電実験では、6 時間程度の放電に対し YAG レーザー(近赤外:波長 1064nm)の正確なアライメントが求められる。現在は可視緑色レーザー(ガイド用)を基準として市販の小型白黒可視カメラを用いた自動アライメントシステムを構築、運用しているが、本課題では YAG レーザーを赤外線カメラで直接計測し、YAG レーザーを基準とした自動アライメントシステム構築のための試験を行う。

## 2) 方法

YAG レーザーのパワーは 1.6J, パルス幅 10ns, 繰り返し周波数は 10Hz である。緑色レーザーは 10mW/CW であり、カメラで撮影すると YAG レーザーが入射したフレームでは白飛び画像となり、画像解析では互いのレーザースポット中心の判別が不能となる(図 1: A ミラーフレーム, B YAG レーザー, C 緑色レーザー)。市販の小型赤外線カメラは高価であり、プログラミングで独自の制御システムを構築しても採用できるかどうか不明である。そこで Raspberry Pi に小型赤外線カメラモジュールを接続、比較的安価で制御しやすいカメラシステム(以下, Rasp. Camera)を自作し、YAG レーザーと緑色レーザーの撮影試験を行う。また、YAG レーザーは JIS C 6802「レーザー製品の安全基準」において Class 4 に該当しレーザー管理区域が設定され容易に使用することができない。よって YAG レーザーの模擬試験光として赤外 LED 光(中心波長 870nm)を 10Hz で点灯させる装置(以下, 模擬光装置)を別途製作する。

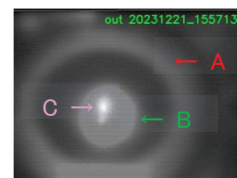


図 1 白飛び画像

## 3) 結果

図 2 に Rasp. Camera で撮影した画像を示す。紫色が YAG レーザー(一部はミラーのフレームで反射)で緑色レーザーのスポット中心(図 2 黒点線)の判別が可能となり、この画像ではほぼ一致していることがわかる。スポット中心付近のみを切り出して画像解析することで、それぞれのレーザースポット中心位置を正確に求めることができる。静止画撮影のタイミングによっては YAG レーザーのみ、緑色レーザーのみが撮影される場合もあった。また、模擬光装置を製作し Rasp. Camera で撮影したところ、図 2 と同様に明瞭な紫色で示され、YAG レーザーの模擬光として活用できることがわかった。

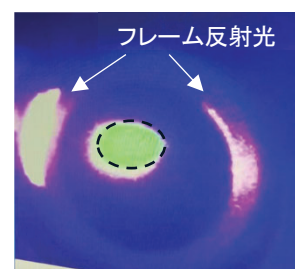


図 2 Rasp. Camera 画像

## 4) 考察及び今後の展望

Rasp. Camera により明瞭に 2 種類のレーザースポット中心の判別が可能となった。緑色レーザーを入切することで、YAG レーザースポットだけの画像も取得可能である。今後、露出調整を行い、プログラムを改良して現在稼働中の自動アライメントシステムへの採用を試みる。また、複数の Rasp. Camera の同時制御システムの検討・開発を開始する。製作した模擬光装置を活用し、最適なシステムの構築を目指す。

## 5) 成果報告(2024 年度学会発表)

河野香, 井戸毅, 木下稔基, Peng Yi, Jiang Zhengnan, 江尻晶, QUEST におけるスイッチドキャパシタ ADC を用いたトムソン散乱計測, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, タワーホール船堀, 18P53.

## クラウドを利用した QUEST 装置実験のデータ解析環境構

自然科学研究機構 核融合科学研究所 江本雅彦

## 目的

現在、核融合科学研究所では、プラズマ・核融合クラウド構想が進行中である。これは、LHD や QUEST 装置を含む、国内外に存在する核融合実験装置で得られた実験データや理論モデル計算のデータと、計算資源をシームレスに利活用できるプラットフォームの構築を行うものであり、研究成果の再利用化による核融合研究の促進を行うものである。本研究会の目的は、この構想実現のための環境の構築について議論を行う場を設けるものである。

## 成果報告

上記プラズマ・核融合クラウド構想実現のため、各研究所における実験データ環境の現状の把握、および問題点を洗い出すため、下記日程にて、研究会を開催した。尚、本会議は核融合科学研究所一般共同研究課題名『研究データエコシステム「プラズマ・核融合クラウド」構築と関連技術の高度化』との同時開催という形で行われた。

研究会概要

研究会名：研究データエコシステム「プラズマ・核融合クラウド」構築と関連技術の高度化 同時開催 九州大学応用力学研究所 研究会「クラウドを利用した QUEST 装置実験のデータ解析環境構築」

開催場所：自然科学研究機構 核融合科学研究所 4 0 1 会議室

開催日時：2025 年 2 月 25 日 10:00 ~ 16:30

参加者：会場参加 9 人、オンライン参加 17 人

発表内容

発表者は計 8 名で、下記のような発表が行われた。

氏名（所属）	タイトル・要旨
中西秀哉（核融合研）	「プラズマ・核融合クラウド」の概要と取組課題、並びに進捗状況
	プラズマ・核融合クラウド構想の趣旨・概要の説明、関連する研究データエコシステム構築事業ユースケー

	ス創出課題 ならびに令和6年度のオープンアクセス加速化事業における取り組みについて説明を行った。
佐竹真介（核融合研）	新プラズマシミュレータシステムの概要
	NIFS と QST が共同調達を行い、2025 年 7 月より運用開始するスーパーコンピュータシステムについて、その構成等の詳細説明が行われた。
山中顕次郎（情報研）	AWS NIFS-LHD オープンデータを活用したデータ転送の評価
	現在、AWS のオープンデータスポンサーシッププログラムにより公開されている LHD の計測データについて、各種ツールによる転送速度等の性能調査結果の発表
吉川正志（筑波大）	GAMMA 10/PDX における実験データ取得と NIFS へのデータ転送
	筑波大学の GAMMA10/PDX 装置及び同実験についての紹介と、SNET による核融合科学研究所との連携についての説明があった。また、超伝導ミラー装置 Pilot GAMMA PDX-SC についても紹介が行われた。
星健夫（核融合研）	計算と計測データの連携
	計測データからの逆問題解析フレームワーク2DMAT と、計算と計測データの連携を促して、NIFS の次期実験装置計画であるマイクロ集団現象観測プロジェクト（MCPoP）との関連および MS10 関連について、説明が行われた。
長谷川真（九州大）	QUEST 装置実験データ解析システムの新たな構築とその活用
	QUEST 実験の中でデータ解析システムにおけるリレーショナルデータベースの活用事例と、Pythonを用いたGUIツールの説明、GitLabによるコード共有等の説明が行われた
江本雅彦（核融合研）	Fusion Cloud 構想に向けた、ポータブルな解析環境の開発
	プラズマ・核融合クラウド構想の一部としてのオープンデータサービスの紹介と、これらの解析を行うための環境として、Dockerによるコンテナ技術や、推奨プログラム言語の提案等が行われた。
稲垣滋（京都大）	Heliotron J の実験データへのアクセスと解析ツール
	Heliotron Jの実験ネットワーク環境の説明と、データアクセス手法の説明および問題点が紹介され、今後のデータ公開に対する提案が行われた。

また、研究者発表後、総合討論が行われ、下記課題について話し合った。

- I. プラズマ・核融合クラウドおよび本研究会の今後の運用・活動形態について
- II. 教育と人材育成、交流の場の形成について
- III. 核融合（実験）データの共通・共用化、オープン化に向けた取り組みの統一と連携について
- IV. Data Free Flow with Trust の適用例としての核融合データ

## QUEST 装置における CHI プラズマ現象解明のための解析システムの開発

海上保安大学校 准教授 黒田 賢剛

トカマク装置ではトロイダル方向の電流を駆動させてプラズマを維持させる必要があり、装置のコンパクト化を目指した球状トカマク装置ではセンターソレノイドコイルを用いない非誘導の電流駆動手法を確立させなくてはならない。CHI は米国の球状トカマク装置 HIT-II 及び NSTX で開発された電流駆動手法である。両装置では、真空容器の中心壁と外周壁がセラミックにより絶縁されており、この絶縁された容器壁を電極として使用し、電極間に高電圧を印加させて電極からプラズマ中に kA オーダーの電流を入射させる。電極から、トロイダル磁場とポロイダル磁場によって形成される螺旋状の入射磁束に沿って電流が入射され、この入射電流により磁束は球状に発展して閉じ込め配位を形成する。CHI は直接的に電流を入射させる強力な電流駆動手法であり、パルスの大電流入射により劇的に変化するプラズマ現象は不明瞭な点が多く、学術的にも興味深い。装置導入にあたり複雑な電極構成が難点であったが、九州大学の球状トカマク装置 QUEST では真空容器内に簡易型の円環バイアス電極を設置し、真空容器に対してこのバイアス電極の高電圧を印加することで従来と同等の電流駆動を達成した。本件ではこの QUEST において生成された CHI プラズマ現象解明のための解析システムの開発に取り組んだ。

2024年度はQUESTの容器壁に設置した磁気センサーアレイで計測されるトロイダル磁場の変動値  $B'_{tor}$  から入射電流分布を求めてCHIの磁束発展の解析を行なった。電流が発展配位の磁力線に沿って流れる force-free 近似モデルを用い、 $B'_{tor}$  値から算出した入射電流分布とトロイダル電流の計測波形より図1に示すCHI磁束の発展過程が見積られた。磁束の磁力線(曲線)に沿って電流(赤矢印)が流れる見積もり配位はプラズマ画像とも一致し、その妥当性が示された。この手法を用いれば、様々な磁束条件や電極構成においてどのように入射電流が流れて磁束が発展するのか解析することが出来る。実験値との比較により、見積もり精度を向上させるためのいくつかの改善点が挙げられた。まず、この算出手法では容器壁間を連結する磁力線上に流れる電流が考慮されていないため、電流の流れない領域が算出されており、この領域の電流についての計測データを取得する必要がある。この領域に電流が流れている場合、センタースタックに入射電流と逆向きの負の流入電流が流れるはずであり、その詳細分布を調べるためセンタースタックの磁気センサーを増設した。またセンタースタック近傍では  $B'_{tor}$  値の数十倍高い垂直磁場の変動が生じることが示され、精度よくトロイダル磁場成分のみを検出しないといけない。電極近傍においては急峻な電流駆動により容器壁に数十 kA オーダーの渦電流が流れていることが示唆され、そのため実験値との磁束分布のズレが確認された。渦電流についてはフラックスループのループ電圧値から見積もり、算出コードに組み込む予定である。図1の  $t=0.2$  ms より前の初期段階の発展配位は見積もることは出来なかった。これ以前の、初期入射磁束が入射領域から急峻に噴出する立ち上がり過程は平衡や軸対称性などの仮定が成り立たない過渡状態にある可能性がある。今後の展望として、より正確な入射電流分布の揺動データが得られれば、それによる発展配位の変動の振る舞いを見積もることで磁束発展過程の機構を解き明かす手掛かりが得られると考える。

2025年度は上記の点について改善を試みる。

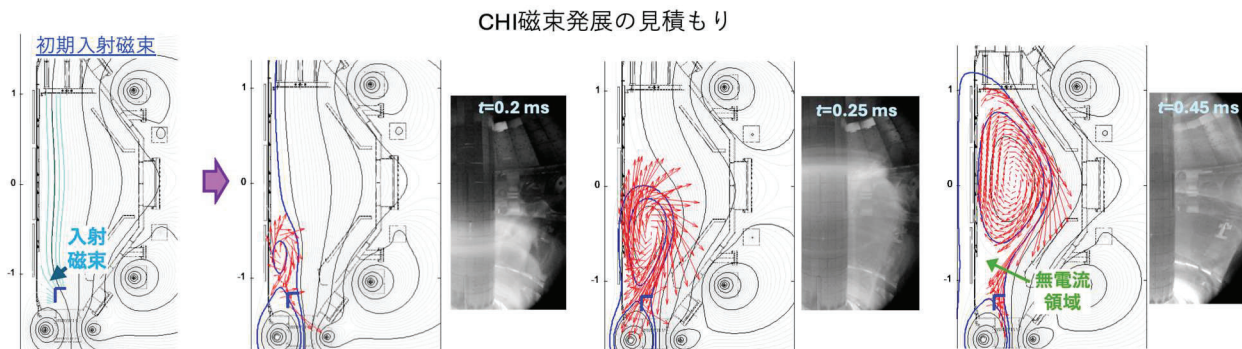


図1 磁気センサーアレイの計測データから算出した入射電流分布より force-free 近似モデルを用いて見積もった各時刻の CHI 発展配位とプラズマ画像との比較。