ユニット成果報告会

位相空間乱流ユニット

2024 (R6)年度研究成果の概要	徳沢 季彦	10
オーロラ観測プロジェクトの成果報告	吉沼 幹朗	15
二次元イメージング計測を駆使した磁気リコネ クションの粒子加速・加熱実験	田辺 博士(東京大学)	15
センサーフュージョンプロジェクトの成果報告	小林 達哉	15
磁気回転乱流における慣性領域の解像	川面 洋平(宇都宮大)	15

4. ユニットの研究目的と目標



- 位相空間マニュピュレータとしての電磁波加熱の利用
- 実験研究実績のある基礎装置におけるプローブ計測

理論・シミュレーション研究から指針を得て、速度分布関数を 空間多点同時計測し、位相空間構造の観測を目指す

位相空間プラズマ揺動

の実験的検証が鍵

非平衡・非線形プラズマ物理の学理構築

プラズマの粒子性が顕著になる

- ・ レーザー・プラズマ相互作用
- 磁気圏プラズマの挙動研究 と相補的な研究展開

5. アカデミックプラン

異常輸送研究

の未解決問題

戦略:計測器の発展や解析技術の進歩、シミュレー ションの大規模化が進んだ現在でも、プラズマ位相 空間揺らぎの情報を得るための手法は限られている。 ユニットでは位相空間揺らぎが顕著に現れ、かつ計 測手段が想定されるケースをあげ、「アカデミックプラ ン」として共有している。これらの研究テーマに所内 外のメンバーで協力して取り組み、成果をあげる。

位相空間乱流の核融合へのインパクト

$$Q = \frac{P_{\text{OUT}}}{P_{\text{IN}}} = \frac{5P_{\alpha}}{P_{\text{loss}} - cP_{\alpha}}$$

Losses by transport α -heating

- 高いQ値を得るためには P_{loss}の抑制と cP_aの増 加が必須
- ・ <mark>位相空間揺らぎは輸送、加熱のどちらのプロ</mark> セスにも重要

<f>

- 実験研究が少なく理論検証が不十分
- 観測が困難









7. 特筆される成果

位相空間揺動は、輸送や流れ・電流駆動などプラズマのマクロスコピックな性質に寄与すると予測されていながら、 検出が困難であったため実験的なアプローチが採られてこなかった。実験・シミュレーション・理論研究者が一堂 に会する本ユニットでの研究連携により実験検出が系統的に行われることにより、これまで得られなかった新たな 知見が得られることが見込まれる。

受賞等:	タイトル	学会	受賞者
	データ同化手法を用いた核融合プラズマのデジタルツイン 予測制御システムの開発	核融合学会 第29回技術進歩賞	森下侑哉(京大), 釼持 尚輝
	超高温プラズマにおける非線形創発現象の実験研究	AAPPS-JPS Award	小林達哉
	Self-organized plasma structure formation through utilizing novel statistical analysis techniques.	AAPPS-DPP Young Researcher Award	小林達哉
	Causality of potential and temperature responses on a local electron heating in H and D plasmas of the LHD	AAPPS-DPP Poster Prize	西浦正樹
	Development of hyperspectral camera for auroral imaging (HySCAI)	地球電磁気・地球惑星圏学会 Earth, Planets and Space (EPS) 2024年ハイライト論文	吉沼、居田、 海老原(京大)

7. 特筆される成果

- オーロラ観測プロジェクト:北欧に設置した高分解分光オーロラ観測装置を行い、3つの大きな成果が得られた。
 - オーロラ爆発に伴う降り込み電子エネルギーの増加(0.5 -> 1.5keV)を観測
 - 窒素分子イオンN2+の高度分布を計測、予想値(120km)を超えた高高度(200km)での存在を観測
 - 極域拡大時のオーロラ発光強度の増加による大気の加熱(400 -> 800K)を観測
- ・ 磁気圏宇宙プラズマとの共同研究
 - 準定常磁気圏対流は磁気圏内に蓄積した空間電荷が駆動するのではなく、太陽風--磁気圏相互作用の結果
 生じる準定常的なプラズマの運動が作ることを示した。
 - ・ プラズマシミュレータよりもさらに大規模な計算が可能な富岳を用いた史上最高解像度シミュレーションによる 磁気回転乱流の慣性領域の解像に成功した。
- 「プラズマ位相空間」へのアプローチ方法:データ科学の適用が進展した。
 - 量子プロセスユニットや統計数理研等と協力
- データ同化手法: LHDプラズマの多変量分布の同時制御に成功した。
 - 位相空間構造や乱流状態の制御も行うことが可能、今後さらに重要なツールとなることが期待される。
 - ・ プラズマ・核融合学会第29回技術進歩賞「データ同化手法を用いた核融合プラズマのデジタルツイン予測制御システムの開発」を受賞した。(構造形成・持続性、プラズマ量子プロセス、可知化センシング、複合帯域シミュレーションユニットと共同)

7. 特筆される成果

- ・ 位相空間の歪みによってプラズマの輸送・閉じ込めなど実空間のマクロなパラメータへの影響を調べるための技術 開発も進展した。
 - 電子の速度分布のマクスウエル分布からのずれの検証と電子温度異方性を観測することを目指したトムソン 散乱計測装置の開発が進展。新しい9CHと12CHのポリクロメーターを開発し、LHD実験において、開発した 新しいポリクロメーターが過誤なく動作すること、種々の較正データの信頼性を検証。非マクスウエル分布の 兆候を示す結果も得られた。
 - 高エネルギーイオンの磁場に対する速度分布の歪みによって、バルクイオンの輸送方向が外向きから内向きに変化する新現象を発見した。この現象については、電子密度・温度揺動や乱流との関連性を実験的に調べ、他のユニットとも連携し理論解析や国際連携によるモデル化を進めている。
 - ・ 位相空間の構造変化も関与する微小スケールの乱流の非線形発展やスケールの異なる乱流間の相互作用 についてLHD実験にて乱流渦構造の分岐現象の観測に成功した。
 - 輸送障壁の物理機構について、電子温度と電位ポテンシャルの因果関係を実験的に調べることにより、電子 ITB内では電子温度の変化に追随するポテンシャルの変化が見られ、ITBの外では線形関係を保っているという新事実を見出し、熱・粒子輸送のモデルを構築する必要があることが分かった。
 - ・ プラズマ合体・リコネクション研究においても、磁気リコネクションのX点近傍の高周波揺動計測の準備が進展し、加熱運転と準定常運転連結シナリオにおける加熱・輸送現象の理解が進むことが期待できる。

プレスリリース①

高エネルギーイオンによる高温プラズマの 自発的な流出入状態を発見



【論文情報】

雑誌名:Physics of Plasmas

題名: Core density profile control by energetic ion anisotropy in LHD 著者名: M. Nishiura、 A. Shimizu、 T. Ido、 S. Satake、 M. Yoshinuma、 R. Yanai、 M. Nunami、 H. Yamaguchi、 H. Nuga、 R. Seki、 K. Fujita、

M. Salewski

DOI: <u>10.1063/5.0201440</u>



プレスリリース②

光を細かく分光したオーロラの二次元画像の 取得に成功



- オーロラ爆発に伴う降り込み電子エネル ギーの増加(0.5 -> 1.5keV)を観測
- ・窒素分子イオンN2+の高度分布を計測、
 予想値(120km)を超えた高高度(200km)
 での存在を観測
- 極域拡大時のオーロラ発光強度の増加
 による大気の加熱(400 -> 800K)を観測

【論文情報】DOI: <u>10.1186/s40623-024-02039-y</u>

- 雜誌名: Earth, Planets and Space
- 題名: Development of Hyperspectral Camera for Auroral Imaging オーロライメージ用ハイパースペクトルカメラの開発

<mark>詳細は後に続くトークで</mark>

11

著者名:吉沼幹朗¹、居田克巳¹、海老原祐輔²(1位相空間乱流ユニット,2京都大学生存圏研究所生存圏開発創成研究系)

プレスリリース③

データ科学で未踏空間「プラズマ位相空間」に迫る

3次元位相空間トモグラフィ



3次元空間トモグラフィでは、複数角度の撮像画像から被写体の3次 元構造を推定する。一方、今回開発した位相空間トモグラフィでは、 (A)速度と空間、(B)速度と時間、(C)時間と空間にそれぞれ高分解計 測したデータを組み合わせ、プラズマ位相空間分布を推定する。

【論文情報】DOI: <u>10.1073/pnas.2408112121</u>



- 雜誌名:The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)
- 題名: Detection of bifurcation in phase-space perturbative structures across transient wave –
- particle interaction in laboratory plasmas
- 著者名:Tatsuya Kobayashi, Mikirou Yoshinuma, Wenqing Hu, and Katsumi Ida
- 詳細は後に続くトークで

「短時間加熱によりプラズマの熱と乱流の伝達が高速化」する 現象を発見

Naoki Kenmochi *et al.*, "Fast nondiffusive response of heat and turbulence pulse propagation", Scientific Reports, 14 (2024)13006.



新高性能計測器により超微小スケールの乱流の特性を明らかに

那須(総研大)他, "Electron-scale turbulence characteristics with varying electron temperature gradient in LHD", Nucl. Fusion 64 096008 (2024).

- 超微小スケール(電子ジャイロ半径程度のスケール)の乱流は、温度勾配を増大させると急激に成長することを実験的に明らかにした。
- 同時に、弱い勾配においても一定強度の乱流が存在 することも明らかに

● 謎の候補:
 ✓スケール間乱流相互作用

→ 新たな謎 を提示

T. Tokzuawa et al., submitted to Comm. Phys.





新しいプラズマ内部状態の解析手法:非線形ガウス過程トモグラフィを 開発 上田(COE)他 "Nonlinear Gaussian process tomography with imposed non-negativity constraints

on physical quantities for plasma diagnostics", Mach. Learn.: Sci. Technol. 6 015061 (2025).



- ・ベイズ推定による**事前分布**として"対数"ガウス過程を導入
- **事後分布**として非負制約を満たした自然なプラズマ分布を推定可能
- 従来のトモグラフィ手法より高い再構成精度を実現

準定常磁気圏対流の形成について

京都大学生存圈研究所 海老原祐輔

- 磁気圏は地球の固有磁場が支配的な宇宙空間で、独自のプラズマ環境が形成されている。
- 磁気圏を循環するプラズマ流は磁気圏対流と呼ばれ、ホイッスラー・モード波動のエネルギー源となる 高温電子を地球近くに輸送するなど、磁気圏ダイナミクスにとって重要である。
- これまで、朝側に(+)、夕側に(-)の空間電
 荷があり、それらが作る静電場が磁気圏対流を^本
 駆動していると考えられていた(図1)。
- グローバルMHDシミュレーションで磁気圏対流を 再現することができるが、朝側に(一)、夕側に (+)の空間電荷が磁気赤道面にあり、電荷の 極性が予想とは逆であった(図2)。
- 対流電場は分極によるものではなく、プラズマ運動の結果である可能性がある。
- 準定常状態であっても、太陽風から地球の極 域に向かう磁場エネルギーの流れが常にあり、 磁気圏対流と対応していると考えられる。



9. 自己評価と今後についての考え

- ・現時点では位相空間計測や、位相空間構造制御のためのマニピュレータの整備は十分ではなく、開発段階にあるため、位相空間構造の計測に基づく直接的な位相空間乱流の研究成果は限られている。一方で、CHDや他装置での計測・マニピュレータシステムの開発が着実に進んでおり、今後の研究の進展が期待できる状況にある。
- ・学際研究展開として、低温プラズマ研究者、データサイエンス、との国際連携も始めている。
- 国際連携(核融合) :
 - ・ウィスコンシン大との連携を開始した。
 - 計測器データへのベイズ推定(w/ 量子プロセス)
 - 突発現象(w/可知化)
 - ステラレータ最適化(w/構造形成)
 - ・ 高速トムソン (w/ 可知化, 量子プロセス)
 - NSTX-U:ECH加熱物理の連携
 - ・ UCLA, MIT, IPP:マルチスケール・マルチフィディリティ乱流物理実験
 - Julich:ファイバーブラッググレーティングフィルタ(FBG)の開発
 → CHDのCXSに応用。MCPoP研究の国際化に寄与

実績まとめ

- 査読付き論文:36編
- •国内外の主要な研究会における研究発表:64件
- ・セミナー:8件
- •競争的資金獲得(新規):16件

メンバー

 戦略会議メンバー 	居田克巳、釼持尚輝、小林達哉、徳沢季彦、西浦正樹、矢内亮馬、山田一博、吉 沼幹朗
	江尻晶(東京大学)、海老原祐輔(京都大学)、川面洋平(宇都宮大学)、佐々木真(日 本大学)、田辺博士(東京大学)、沼田龍介(兵庫県立大学)、藤澤彰英(九州大学)
所外メンバー	久保伸(中部大),井通暁(東大),小菅佑輔(九大),西村征也(QST),斎 藤晴彦(東大),永島芳彦(九大),井戸毅(九大),立松芳典(福大),福成 雅史(福大),岡村昌宏(BNL),西澤敬之(九大)、田村直樹(IPP) ₁₈

プログラム

2024 (R6)年度研究成果の概要	徳沢 季彦	10
オーロラ観測プロジェクトの成果報告	吉沼 幹朗	15
二次元イメージング計測を駆使した磁気リコネ クションの粒子加速・加熱実験	田辺 博士(東京大学)	15
センサーフュージョンプロジェクトの成果報告	小林 達哉	15
磁気回転乱流における慣性領域の解像	川面 洋平(宇都宮大)	15

2025/5/28 ユニット成果報告会

位相空間乱流ユニット

オーロラ観測プロジェクト

オーロラ観測のためのハイパースペクトルカメラとその成果

吉沼幹朗、居田克巳、(核融合科学研究所) 海老原祐輔(京都大学 生存圈研究所)

内容

1. はじめに 2. ハイパースペクトルカメラと観測例 3. 観測データを利用した成果 5. まとめ

はじめに

オーロラは磁気圏の粒子が超高層大気に降り込むことでおこる自然現象である。粒子の加速機構を考える上で磁気圏プラズマ中の波動と粒子の相互作用の重要性が指摘されている。

磁気圏プラズマ(磁場に閉じ込 ↔ 荷電粒子(電子、イオン)のエネルギー ↔ オーロラの発光 められたプラズマ)の振る舞い 色(スペクトル)や空間分布

(位相空間ダイナミクス)



全天モニタ画像(2023年10月20日夜~21日朝)



オーロラ帯に設置されたハイパースペクトルカメラ

北緯67度57分にあるオーロラを高い頻度で観測できる都市 キルナ近くのエスレンジ宇宙センターの光学観測サイト KEOPSに、開発したハイパースペクトルカメラを設置した。



観測小屋



小屋の中に設置された装置



日本から遠隔で操作し、データを取得している

ハイパースペクトルカメラ(HySCAI)

市販のハイパースペクトルカメラでは、波長分解能や感度がオーロラ観測には不十分



魚眼レンズ(8mm F/1.8) => (2.7mm F/1.8)

回折格子 500本/mm (広波長域の観測) 300nm <- 540nm -> 764nm 逆分散 35.2nm/mm 0.46nm/px

回折格子 1500本/mm (狭波長域の観測) 474nm <- 540nm -> 597nm 逆分散 9.34nm/mm 0.12nm/px



鏡を動かしながらオーロラ発光の波長スペクトルを取得し、 2次元画像を再構成する 観測例

ケオグラム



窒素と酸素からの光の空間分布



ハイパースペクトルカメラのデータを利用した成果

複数のラインペアから電子のエネルギーを推定

居田克巳、吉沼幹朗、海老原祐輔

ハイパースペクトルカメラによるオーロラ共鳴散乱スペクトルの観測 名古屋大学 塩川教授との共同研究

640-690nmに現れる窒素のスペクトルから回転温度(大気の温度)を推定

チェコ科学アカデミープラズマ物理研究所(IPP-CAS) Milan Šimek博士, Jiří Fujera博士との共同研究

複数のラインペアから電子のエネルギーを推定



N₂⁺の共鳴散乱から窒素分子の高度分布を評価



窒素のスペクトルから回転温度(大気の温度)を推定



窒素のスペクトル形状から回転温度を推定した

2.

された

オーロラの発光強度の増加に伴い、回転温度の上昇が観測

17:37 UI .7:41 UT 2.017:43 UT Inrtensity (kR/nm) .5 OI (¹D) (630.0nm) 1.0 N₂ 1PG (5,2) 0.5 (670,1nm) 0 150 190 170 180 200 160 time (min) 1000 17:37 UT rotation temperature (K) :**41 UT** 800 117:43 UT 600 400 200 **Y**50 160 170 180 190 200 time (min)

2.5

まとめ

- (1) LHD装置で培った分光技術を利用して、オーロラ観測のためのハイパースペクトルカメラ (HySCAI)が開発され、スウェーデン・キルナのエスレンジ宇宙センターの光学観測サイト KEOPSに設置し、オーロラの観測を開始している。この成果は、Earth, Planets and Space に て発表された。
- (2) ハイパースペクトルカメラ(HySCAI)のデータを用いた共同研究が進んでいる。
 - ・複数のラインペアから電子のエネルギーが推定された
 - ・N₂⁺の共鳴散乱から窒素分子の高度分布を評価された
 - ・窒素のスペクトルから回転温度(大気の温度)を推定された

二次元イメージング計測を駆使した 磁気リコネクションの粒子加速・加熱実験

東京大学 田辺 博士 (所外)

2024年度の成果:

①Nucl. Fusion 64, 106008 (2024)出版、IAEA-FEC2025 oral推薦 (TS-6・ST40実験) 他:

プラズマ合体・リコネクション加熱運転と準定常運転連結シナリオにおける加熱・輸送 ②位相空間乱流ユニット共同研究(TS-6実験):

磁気リコネクションのX点近傍の高周波揺動計測:予備実験用プローブ試作・テスト実験開始

2024年度成果の概要

~合体・リコネクション加熱研究と合体完了後のシナリオ連結過程の研究~

論文リスト (主要論文誌6編+IAEA、その他省略)

- 1. H. Tanabe, et al., Nucl. Fusion 64, 106008 (2024)
- 2. Y. Ono, H. Tanabe and M. Inomoto, Nucl. Fusion 64, 086020 (2024)
- 3. M. Inomoto et al., Nucl. Fusion 64 086060 (2024)
- 4. T. Ahmadi, Y. Ono, Y. Cai and H. Tanabe, Nucl. Fusion 64, 086043 (2024)
- 5. T Ahmadi, Y Cai, Y Ono and H Tanabe, Plasma Phys. Control. Fusion 67, 025004 (2025)
- 6. Y. Ono, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 67, 055018 (2025)
- 7. 同一組織4名IAEA-FEC2025採択 (①小野 (oral推薦)、②井、③Tara、④田辺 (oral推薦))

国内外の研究集会における研究発表 (以下主著のみ:招待講演4件 + α) 1. H. Tanabe et al., **IPELS-16**, **Plenary/79 (invited)**, Munich, Germany, 2024年8月 2. H. Tanabe et al., **ICPP2024**, **Tu2.A.I2 (invited)**, Ghent, Belgium, 2024年9月 3. H. Tanabe et al., **ISTW2024**, oral, Oxford, UK, 2024年10月 4. H. Tanabe et al., **AAPPS2025**, **B-5-I22 (invited)**, Malacca, Malaysia, 2024年11月 5. 田辺博士 他, **プラ核2024**, 20Da10 (oral), タワーホール船堀, 東京, 2024年11月 6. 田辺博士他, **CTRFP2024**, oral, 駿河台, 東京, 2024年12月 7. H. Tanabe et al., **MR2025**, **invited**, Princeton, USA, 2025年3月

競争的資金獲得(2024年度, 2025年度, 代表, 分担)

1. 23KK0246 (代表:**国際共同研究加速基金(国際共同研究強化))**, 2024-2026 2. 22H01193 · 23K22464 (代表:**基盤研究(B)**), 2022-2024 3. 20KK0062 (代表:**国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B)**)), 2020-2024 4. 20H00136 (分担:**基盤研究(A**)), 2020-2024



英国トカマクエナジーST40共同実験



5. NIFS25KIIM005 (代表:一般共同研究), 2025-2027
6. NIFS24KIIS008 (代表:一般共同研究), 2024-2026
7. NIFS22KIIF004 (代表:一般共同研究), 2022-2024 (NIFS→東大参加型共同研究: 矢内さん・川手さん)





磁力線がつなぎかわる過程を通じて、再結合磁場が進行するアウトフロー方向へ 粒子が爆発的に加速・加熱される共通の高エネルギー現象:磁気リコネクション

2024年度成果の概要

~2024年度は実験室における2次元計測環境がさらに進展~

東大学内実験:リコネクション中領域の2次元計測整備の進展

- イオンドップラートモグラフィ計測 (NIFS 川手さん共同研究): ICCD: 2次元96CH/320CH (toroidal)、 200CH (poloidal)、 連続撮像: 1次元45CH 2~5µs/frame
- ●1次元128CHイオンドップラープローブ(IDSP:大学実験室でビーム不在でもCXRS代用できる局所計測)
- 2次元140CH 往復反射型YAGトムソン散乱計測稼働開始
- 2次元**SXR**トモグラフィ計測(~10µs/frame (MCP + フレーミングカメラ))
- 2次元磁気プローブ計測: **200CH** (ピックアップコイル) + **280CH** (PCB) 1MHz
- 2次元走査型 1次元9CHマッハプローブアレイ(~1MHz)
- 2次元走査型 1次元21CH電位計測(シングルプローブアレイ(~1MHz))
- ~200MHz 高速電位揺動計測 (NIFS 矢内さん共同研究)

東大から全て機材持ち込み

検出器・光学系・フィルタ

<u>英国トカマクエナジーST40共同実験:</u>

- ●1次元30CHトムソン散乱計測稼働開始 (2023)

→イオン系・電子系データが揃ったことで、合体加熱・定常連結時の詳細理解が進展

合体・リコネクション加熱を介したイオン温度分布の大域的構造 ~合体下流のアウトフロー領域で、運動 → 熱エネルギー変換、磁気面上で熱輸送~

TS-6実験におけるポロイダル対称性仮定無しの "磁気面全面" 2次元イオン温度計測



太陽フレア等のケースと異なり、再結合磁場の形成する閉じた磁気面上で合体加熱を捕捉

以下では合体直後のイオン温度勾配は磁力線垂直成分が1keV/mレベルに至るが 高ガイド磁場(B_t ~ 5B_p)では磁気面を横切る輸送はκⁱ / κⁱ / ~ 2(ω_{ci} τ_{ii})² >> 1で制御可能



合体で急速立ち上げ後にソレノイド低速ランプ・準定常運転に接続する ハイブリッド運転はTS-6・MAST・ST40などで技術的に確立(以下はTS-6)



径方向外側へのアウトフロー噴出・熱化が熱源のため閉じ込めが不安視されがちだが 捕捉領域が閉じた磁気面内部である限り合体後の配位に有効に取り込むことができる

リコネクション加熱に起源をもつため合体で生成した 球状トカマクはホローなイオン温度分布構造で立ち上がる



(b) Time evolution of T_i profile (movie) (c) 2D poloidal flux profile during merging startup (d) Time Evolution of 2D T_i profile

径方向外側へのアウトフロー噴出・熱化が熱源のため閉じ込めが不安視されがちだが 捕捉領域が閉じた磁気面内部である限り合体後の配位に有効に取り込むことができる
リコネクションを介して得られる加熱は再結合成分の磁場B_{rec}の2乗に比例 工学的には合体駆動電流I_{PF}あるいはプラズマ電流I_pの2乗で加熱が増大する



合体加熱効果は合体前の上流のプラズマのポロイダル磁場のr方向成分 B_r (= 再結合磁場 B_{rec})で決まる。 $\rightarrow \Delta T_i \propto B_{rec}^2$ ということは、 $B_{rec} \propto I_p \propto I_{PF}$ だから加熱性能は初期 I_p や I_{PF} ベースで工学的に設計可能に。

ST40における合体生成球状トカマク実験 ~MASTの合体加熱世界記録を更新 & NBI追加熱で1億度達成~

M/C heating/startup scenario $U_0 = 0.4 - 0.0$ MA and ~ 1 keV by M/Ci















2023年度からST40では30CHトムソン散乱計測が稼働開始 CXRSによるイオン温度検定に続き電子温度計測の信頼性も確立



現地常設CXRS(T_i計測)はポート配置の制約で空間数点計測のみのため 東大から96CHドップラートモグラフィ計測系を現地輸送・現地立ち上げ

トムソン散乱計測窓横の微小スペースを活用: ● 2023年:32CH 1次元計測稼働開始(16CH:midplane / 16CH:off-axis) ● 2024年:96CH 2次元計測稼働開始(16CH (radial)×6 arrays (vertical))



イオンスキン長50mm~100mm程度に対して、インフロー方向85mm内に6視点確保

First 2D imaging measurement of T_i in ST40 ~ Rec. heating is clearly detected with the 2D imaging ~



リコネクション加熱で得た1keV弱のイオン温度は合体後も維持、 準定常運転と連結時間後、このプラズマをターゲットとしてNBI運転に連結



M/C startup is successfully connected to semi-steady/lamp-up scenarioi

イオン温度同様、電子温度も5-10ms程度の時間帯に急速な変化を検出 ~中心(X点近傍?)加熱の成長・アウトフロー流領域の電子密度上昇を確認~



 $n_{\rm s}$ profile shows radial motion at t = 5ms and 6ms



MAST同様に電子・イオン加熱の同時評価が可能な実験環境が整備完了 ~電子は中心部で加熱、イオンは下流領域で加熱、密度も同様の構造を形成~



H Tanche Cial., PPL. 115 215004 (2015) 16

MAST-ST40でトムソン散乱と連携した加熱スケーリング評価が実現 ~再結合磁場の2乗 B_{rec}^2 比例測が、 ΔT_i でなく ΔU_i で評価可能となった~



Full pressure profile measurement also allows ΔU_{e} evaluation: \rightarrow 2 ~ 3MW/m³ around X-point first and then in the outflow region



MAST実験でとらえたX点近傍に局在化した電子加熱は ST40でもトムソン計測視野の垂直位置がピークと一致した時に検出



MAST-like clear peak structure of *T_e* was observed when TS diagnostics is "on axis"



- • In ST40, there is strong guide field: *B_t ~* 2T
- E_l= E·B/|B| has huge deposition from E_{rec} = E_t which is parallel to the guide field direction

• MAST: $T_{g} \sim \underline{1}$ keV & $n_{g} \sim \underline{1} \times 10^{10}$ m³ • ST40: $T_{g} \sim \underline{1}$ keV & $n_{g} \sim \underline{3} \times 10^{10}$ m³ The record pressure is updated: 合体加熱と径方向圧縮で得た1.5keVの電子温度は合体後も数十ms程度維持(~*r^Eei*程度) → ソレノイド負荷を抑える有効なシナリオとして確立(ソレノイド無しでも1keV確認済み)



2024年度成果のまとめと結論

プラズマ合体・磁気リコネクションを介した粒子加熱・輸送・構造形成過程について その詳細理解とともに実用プラズマシナリオとして次期装置計画が視野に入り始めた。

リコネクション加熱物理:

- イオンは合体下流のアウトフロー領域 電子はX点近傍に特徴的な加熱構造を形成する
- ポロイダル平面上にインパルス生成された特徴 構造が時間遅れを持って伝搬・変化する現象が 実験でとらえられるようになってきた



- 加熱スケーリング熱エネルギー評価が実現:ΔU_i ∝ B_{rec}²
 特筆事項:
- ●国内大学のST・CT実験と同程度の、大半径約40cmのコンパクト装置でkeV実験が切り開かれた
- ・センターコイル構成でソレノイド容量を抑えてTF集中投資でB_t=2T実験のリスクとなる 立ち上げ問題を合体加熱で解決、1keV急速立ち上げ → 合体完了後即NBI連結シナリオ確立 (ECが使える規模のB_t → かつてUTSTで計画された合体生成 + 非誘導電流駆動シナリオ連結が視野に)
- 立ち上げ性能のスケーリングは非常にシンプルであり $\Delta U_i = \frac{2}{2} \Delta (n \kappa_B T_i) \propto B_{rec}^2 \propto B_p^2 \propto I_p^2 \propto I_{MC}^2$ すなわち合体駆動コイル電流 I_{MC} をもとに急速立ち上げのプラズマ電流 I_p や加熱性能を計画可能

ユニット報告会 位相空間乱流ユニット 2025/5/28

波動-粒子相互作用による位相空間 摂動の観測

小林達哉

謝辞:胡文卿、吉沼幹朗、居田克巳

背景

- 波動-高エネルギー粒子相互作用 とバルクプラズマ加熱
- ミクロスケールな位相空間乱流





$${}_{1}^{2}\text{D} + {}_{1}^{3}\text{T} \rightarrow {}_{2}^{4}\text{He} (3.52 \text{ MeV}) + {}_{0}^{1}n (14.08 \text{ MeV})$$

N. J. Fisch, M. C. Herrmann, Nucl. Fusion 35, 1753 (1995)

- 高エネルギー粒子からバルクプラズマへの 波動を介した無衝突エネルギー移送
- 電子加熱を介さず*T_e > T_i*の状況を回避



波動-粒子相互作用の理解の進展と課題

- MEGA code: MHD-kinetic hybrid simulation
- 高エネルギー粒子とバルク プラズマの無衝突エネル ギー移送
- ▶ EPチャンネリング
- 速度分布関数摂動に<u>位相空</u> 間クランプ構造、時間発展
- 加熱効率は位相空間摂動構 造に依存
- 実験観測が望まれている



H. Wang et al. Nucl. Fusion 59, 096041 (2019).

実験観測の進展と課題





位相空間摂動構造分岐の発見



- 2種の分布関数摂動(+V_{res}, ±V_{res})
- 摂動パターンを定量化するため、**V<0** での加速粒子数をカウント

$$N_{\rm NR} \equiv \int^{V_{\rm b,-}} \delta f(V) dV$$

- それぞれに対応するPDFピーク
- 実験条件を変えるとシングルピーク





• 位相空間分岐は共鳴波動の選択的発生による

発光スペクトルをもとにした速度分布関数の推定

• これまでの議論では発光スペクトルが速度分布関数の近似値とみなされていた



- 逆問題解析は、速度分布関数が非マクスウェルである場合、非自明・不良設定問題
- 問題設定:任意形状の速度分布関数を誤差付きで推定
- アプローチ:ベイズ推定による逆問題解析 T. Kobayashi+, submitted to Nucl. Fusion (2025)
- 位相空間トモグラフィの高精度化、一般化にも適用可能

より一般的な計測器連携に向けて:センサフュージョン



✓ ミクロ集団現象観測プロジェクト (MCPOP) にて計測器および順問題ルーチン群の整備を進めている

まとめ

 波動-粒子相互作用やアルファチャンネリングは核融合プラズマ研究の中心的課題、 高速計測器の開発によりプラズマの非衝突加熱が実験観測された

K. Ida+, Communi. Phys. 5, 228 (2022)
M. Yoshinuma+, Plasma Fusion Res. 19, 1402037 (2024)
T. Kobayashi+, Rev. Sci. Instrum. 96, 033502 (2025)

- ・背景物理をより詳細に理解するため、(1)分解能トレードオフと(2)発光スペクト ルをもとにした速度分布関数の推定が課題であった
- 分解能トレードオフ解消のため、位相空間トモグラフィを開発し、LHD実験に適用した
 T. Kobayashi+, Phys. Plasmas 30, 052303 (2023)
- 位相空間摂動構造分岐が発見された。共鳴波動の選択的発生によると考えられる

T. Kobayashi+, PNAS **121**, e2408112121 (2024)

- 観測から速度分布関数を得るため、ベイズ推定による逆問題解析を実施した T. Kobayashi+, submitted to Nucl. Fusion (2025)
- 計測器連携によるミクロ集団現象観測プロジェクトの遂行が見込まれている

磁気回転乱流における慣性領域の解像

川面洋平 (宇都宮大学)

- YK & Kimura, Science Adv. (2024)
- YK et al., J. Plasma Phys. (2022)

- 共同研究者:木村成生さん(東北大)
 - YK et al., PNAS (2019)
 YK et al., Phys. Rev. X (2020)
 - NIFSユニット成果報告会 2025.5.28

Magnetorotational turbulence in accretion disks

- Accretion disks of black holes \rightarrow The most powerful engines in the universe
- No accretion if angular momentum is conserved
- Turbulence can transport angular momentum
- Magnetorotational instability (MRI) drives turblence

- Dissipation of turbulence at small scales \rightarrow Plasma heating \rightarrow EM wave emission \rightarrow Observation
- (Balbus & Hawley '91)





Event Horizon Telescope







Hot accretion flows

- Low luminosity accretion flows ($\dot{M} \ll \dot{M}_{Edd}$)
- Free energy turns into internal energy of plasma, not radiation
- Geometrically thick and optically thin disks
- No collisional thermal relaxation between ions and electrons $l_{mfp} > 10^8 r_s \rightarrow T_i \neq T_e$
- Only electrons can emit radiation
- Relevant to EHT sources (M87 & Sgr A*)

Which is heated more strongly, ions or electrons?



Gyrokinetic simulations (YK+ PNAS '19; YK+ PRX '20)





What is ϵ_{compr} & ϵ_{AW} in the inertial range of MRI turbulence?

In the solar wind, $\epsilon_{AW} \gg \epsilon_{compr}$





No observation of inertial range in MRI turbulence







Walker+'16 10010k



No observation of inertial range in MRI turbulence















k

Research Question

What does the inertial range turbulence look like when MRI is driving it?

- What is AWs vs SWs?

Ultra-high resolution simulations at 富岳

• What is the scaling of spectra? ($E_u \sim k^{-?}, E_B \sim k^{-?}$)



Setup

- Incompressible MHD in a shearing box $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}_0 + \mathbf{u}) \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla P + \mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B} - 2\Omega \hat{\mathbf{z}} \times \mathbf{u} - \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}_0$ $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{u}_0 + \mathbf{u}) \cdot \nabla \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \nabla (\mathbf{u}_0 + \mathbf{u})$ $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$
- Pseudospectral code CALLIOPE (YK ApJ '22; github.com/ykawazura/calliope)
- Initial condition = uniform B_0z + random fluctuations
- Box size $L_x \times L_y \times L_z = 4\lambda \times 8\lambda \times 2\lambda$ (where $\lambda = 2\pi v_A/\Omega$)
- ≈112M CPU-hrs for 1 run @ 富岳





• 8192×8192×4096 grid points (previously, 1024×1024×512 was the highest) (Walker+ '16)







Result 1: Cross scale energy flux

- Cross scale energy flux $\Pi_{g^{>}}^{f^{<}}(k) = \sum \mathcal{T}_{fg}(Q, K).$
- Constant energy flux is observed
- Proof of the resolved inertial range!



 $|\mathbf{k}| < Q |\mathbf{k}| > K$





Result 2: Energy transfer analysis

• Transfer functions

$$\mathcal{T}_{uu}(Q, K) = -\int d^3 \mathbf{r} \left[\mathbf{u}_K \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}_Q) \right]$$

$$\mathcal{T}_{BB}(Q, K) = -\int d^3 \mathbf{r} \left[\mathbf{B}_K \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{B}_Q) \right]$$

$$\mathcal{T}_{uB}(Q, K) = \int d^3 \mathbf{r} \left[\mathbf{B}_K \cdot (\mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{u}_Q) \right]$$

$$\mathcal{T}_{Bu}(Q, K) = \int d^3 \mathbf{r} \left[\mathbf{u}_K \cdot (\mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B}_Q) \right].$$

- In the inertial range,
 - Transfer is local
- In the injection range,
 - Transfer is non local
 - Some inverse cascade


Result 3: Slow waves vs Alfvén waves

- Slow waves ≈ 2×Alfvén waves
 - Ions are (at least) twice more heated than electrons
- Transition of spectra in the deep inertial range

$$\circ E_u \sim E_B \sim k^{-3/2}$$

- Never observed in MRI
- Consistent with MHD turbulence theories



Result 3: Slow waves vs Alfvén waves

- Slow waves ≈ 2×Alfvén waves
 - lons are (at least) twice more heated than electrons
- Transition of spectra in the deep inertial range

$$\circ E_u \sim E_B \sim k^{-3/2}$$

- Never observed in MRI
- Consistent with MHD turbulence theories



Summary

- shearing box simulation
- Slow waves $\approx 2 \times \text{Alfvén waves} \rightarrow \text{Preferential ion heating}$
- The spectra is consistent with MHD theoretical predictions $E_u \sim E_B \sim k^{-3/2}$
- The results are consistent with Reduced MHD (YK+ J. Plasma Phys. (2022))

YK & Kimura, Science Adv. (2024)

• We resolved the inertial range of MRI turbulence via ultra-high resolution

14