

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601  
研究種目：若手研究(A)  
研究期間：2017～2018  
課題番号：17H04863  
研究課題名(和文) 超解像時空間分解ドップラートモグラフィを用いた磁気再結合の微細構造形成過程の解明  
研究課題名(英文) Elucidation of fine structure formation process during magnetic reconnection using ultra-high resolution ion Doppler tomography  
研究代表者  
田辺 博士 (Tanabe, Hiroshi)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教  
研究者番号：30726013  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、太陽フレア等の爆発現象の素過程として知られる、磁気リコネクションに伴うエネルギー変換過程について、特にリコネクション平面に対して垂直成分のガイド磁場が存在する際にX点近傍で観測される、微細構造形成過程に焦点を当てた実験研究に取り組んだ。プラズマ合体によりリコネクションを駆動し、その急速加熱を応用して球状トカマクを生成する実験において、リコネクション電場が最大化するタイミングに同期してX点に局在化した微細構造が形成され、異常抵抗の成長とともに合体下流への間欠的排出現象が進行し、加熱構造はX点近傍に局所化した構造から合体プラズマ全体を包括した大域的な構造へ変換されることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
リコネクション加熱を核融合分野に応用した、世界最大の球状トカマク実験MASTをはじめとした高ガイド磁場実験で観測され、核融合・宇宙・実験室の分野の枠を超えて近年注目されている、X点近傍に現れる微細構造形成メカニズムを明らかにすることに成功した。リコネクション電場の成長とともに、X点近傍に局在化した加熱構造が生成され、高速リコネクションの発現とともにX点近傍にプロブ構造が現れるとともに同構造排出先の合体下流で巨大加熱が得られ、同領域に接続された合体プラズマを覆うグローバルな磁気面上でイオンが加熱されることを解明。核融合プラズマ応用シナリオの開拓として、後者の最適化が重要であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research project experimentally proceeds the investigation of fine structure formation through magnetic reconnection, which is known as the fundamental process of the explosive energy conversion phenomena such as in solar flare, under the influence of guiding field which is perpendicular to reconnection plane. In the merging spherical tokamak formation experiments which utilize reconnection heating, the fine structure was formed when reconnection electric field increases its maximum and it was observed that the structure is impulsively ejected toward downstream when the resistivity reaches the anomalous regime, and it was found that the microscopic localized heating structure around the X-point is finally converted to a global one which surrounds the whole flux surfaces of the two merging plasmas.

研究分野：数物系科学(プラズマ科学)

キーワード：プラズマ・核融合 磁気リコネクション プラズマ診 コンピュータトモグラフィ イオン加熱

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究課題は、太陽フレア等の爆発的エネルギー解放現象の基盤物理として知られる、対向する反平行な磁力線がつなぎ変わる際に発生する爆発的なエネルギー解放現象「磁気リコネクション」について、特にリコネクション平面に垂直成分となる「ガイド磁場」が存在する条件における、ガイド磁場リコネクションで観測される微細構造形成過程について焦点を当てるものである。同分野は工学的には核融合エネルギー開発分野の「球状トカマク」に関連する研究であり、その応用研究は英国カラム研究所の START・MAST および、東京大学 TS-3・TS-4・UTST において、トーラスプラズマ合体実験として開拓されてきた。同分野は、宇宙プラズマとの共通現象として、太陽フレアや磁気圏プラズマの衛星観測・理論・シミュレーションとの連携、あるいはプリンストンプラズマ物理研究所 MRX 等のリコネクション研究に特化された実験などでも開拓されてきた研究分野である。

2010 年頃までの実験研究は、空間 1 次元 6~8CH 程度の計測器配置が経済的との考え方が主流で、5×7CH あるいは 8×9CH などの分解能での実験が中心であったが、MAST において空間 284CH-Ruby・130CH-YAG トムソン散乱計測や、32CH イオンドップラートモグラフィ計測実施を通じて、X 点近傍に従来の空間分解能では検出できない微細構造が検出され、実験で開拓された新たなフロンティアとして大きな注目を集めた(H. Tanabe et al. Phys. Rev. Lett. 115, 215004, (2015))。MAST 実験ではその高エネルギー実験環境のため、X 点近傍に磁気プローブを挿入することによる、リコネクション中の磁場の直接計測ができず、加熱構造に関する詳細な議論ができない問題点が残っていたが、MAST 共同実験以後、東京大学において追実験として高速度カメラで試験的に X 点近傍を観測したところ、MAST で報告された微細構造形成と共通な X 点に局在化した高エネルギーライン光の発光リング構造等が報告され、同現象は高ガイド磁場条件(ガイド磁場  $B_t$  と再結合磁場  $B_{rec}$  の比  $B_t > 3B_{rec}$  等)のリコネクションで共通した現象であるとの確証を得た。以上の背景をもとに、磁気リコネクションによる微細構造形成現象は、磁場のその場測定が可能な東京大学の実験室環境を利用し、そこに MAST 規模の強力な画像計測を投入できれば、より詳細な理解を進めることが可能であるとして着想したものである。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、以上の背景で述べた高ガイド磁場実験環境において、磁気リコネクションのエネルギー変換過程を通じて形成される、X 点近傍の微細構造形成過程の解明を目的とする。MAST 共同研究では、リコネクション中の磁気計測の不在や測定系の時間分解能の制約があったため、これを改善した測定系としてマイクロ秒時間スケールの変化に追従できる高速プラズマ診断を導入するとともに、MAST 実験で重要な役割を果たした超解像二次元画像診断を実験室プラズマ研究で実現し、磁気リコネクションによるエネルギー変換を通じて時々刻々と時間変化しながら形成される、微細構造形成メカニズムの詳細な解明を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究に必要な環境は、高ガイド磁場リコネクション実験( $B_t > 3B_{rec}$ )が可能な実験装置および、マイクロ秒時間スケールの変化に追従できる高速プラズマ診断、リコネクション過程の検出で重要な指標となるイオンスキン長やジャイロ径オーダーの空間分解能を満たす計測系の導入である。本研究では東京大学のプラズマ合体実験装置 TS-3、および同装置をアップグレードした TS-3U(TS-6: 期間中に基盤 S15H05750 で建設)を用いて実験を推進。MAST に類似したガイド磁場比  $B_t \sim 5B_{rec}$  程度のもと、リコネクションによるマイクロ秒時間スケールの変化に追従できるプラズマ診断として、1MHz 磁気計測、最大 500kfps の光学診断を導入するとともに、空間分解能はジャイロ径を参考に最小で  $dr \sim 10\text{mm}$  で測定系を構築して研究を推進した。

図 1 に測定系概要図を示す。2017 年は主として TS-3 装置(2017 年 10 月シャットダウン)、2018 年は主として TS-3U 装置(TS-6: 2018 年春ファーストプラズマ)を用いて研究を推進した。ジャイロ径レベルの空間分解能と 2 次元計測の両立として、若手研究(B)で開拓した「マルチスリット分光法」・「イオンドップラートモグラフィ」の技術をさらに発展させ、96CH・320CH の超解像イオンドップラートモグラフィを開発。その他計測系(磁場, etc...)と連携して研究を推進した。

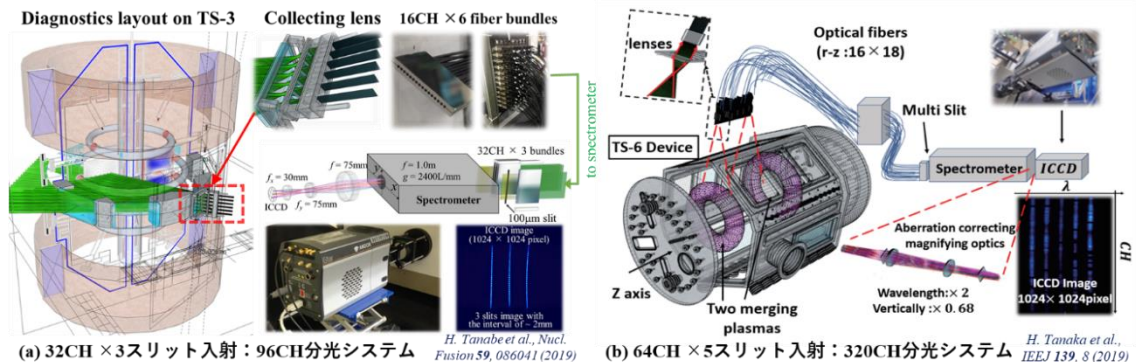


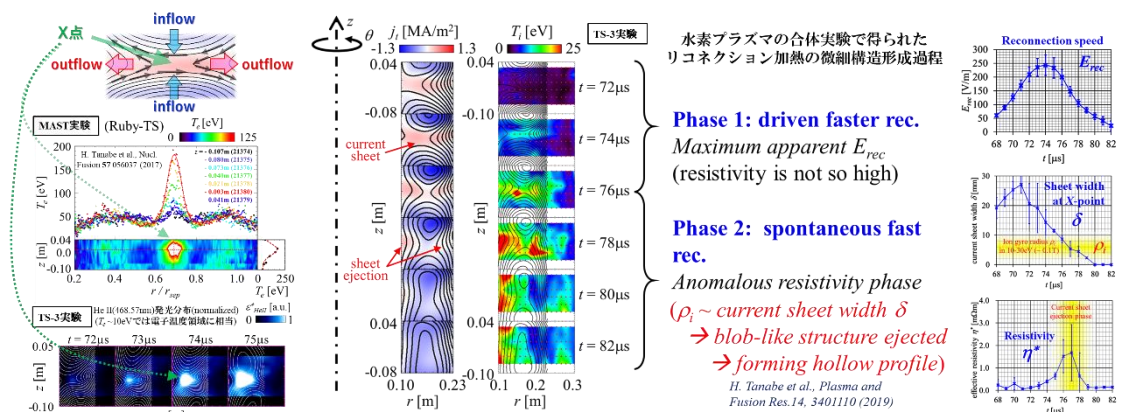
図 1 東京大学 TS-3/TS-3U(TS-6)装置に導入した 96CH・320CH イオンドップラートモグラフィ

#### 4. 研究成果

磁気リコネクションのエネルギー変換を通じた微細構造形成過程について、本若手研究(A)の助成を通じて以下の特徴を明らかにした。

- 高ガイド磁場条件では、磁気リコネクションの X 点近傍でトロイダル磁場のみが存在する状態となり、トロイダル方向に発生するリコネクション電場によるパラレル加速と対応して、ポロイダルフラックスの変化(リコネクション速度)に対応したトロイダル電場が最大となる時刻と対応して X 点近傍に微細構造を形成。
- 電流シート上に blob 上の構造が成長するとともに、X 点近傍で電流シート幅とジャイロ径が漸近し、異常抵抗が成長して自発的な高速リコネクションが発現。
- Blob 構造の排出領域であるアウトフロー領域で特徴的なダブルピーク型の加熱構造を形成。
- 高質量のガス種のプラズマでイオンスキン長・ジャイロ径を大きくとった実験を行うと、ホール効果の発現により、X 点近傍に形成される微細構造がポロイダル方向に傾いた。
- 合体下流で再結合磁場が形成する磁気面上へ熱エネルギーが伝搬し、合体プラズマのポロイダル磁気面を取り囲む、グローバルなリング型の構造を形成。

図 2 に、(a) MAST で観測された電子加熱の微細構造例(H. Tanabe et al., Nucl. Fusion 57, 056037 (2017))と TS-3 実験で観測された高エネルギーライン光の空間分布、(b)TS-3 実験で観測された電流シート構造と同期測定されたイオン加熱空間分布の微細構造、リコネクション電場・電流シート幅・抵抗の時間発展をまとめて示す(H. Tanabe et al., Plasma and Fusion Res. 14, 3401110 (2019))。TS-3 実験では、2 次元トムソン散乱計測の空間分解能は、ガイド磁場リコネクションの特徴をとらえるのに必要なジャイロ径スケールの空間分解能が足りないため、 $T_e \sim 10\text{eV}$  の低温プラズマでは高エネルギーライン光に対応する He II(468.57nm)の空間分布を 96CH2 次元分光システムでとらえて、トモグラフィを施して空間分布としたものが図 2(a)である。磁気面計測と合わせて比較した際、リコネクションの進行に伴って X 点近傍に極度に集中した発光分布が得られていることが確認できる。図 2(b)は同過程をさらに詳細に解析したものであるが、(a)でピーク構造が出現する時間帯と対応して X 点近傍に電流シートが現れるとともに、ポロイダルフラックスの時間変化に比例するトロイダル電場(リコネクション速度  $E_{rec}$ )が成長し、ポロイダル磁場が 0 でトロイダル磁場のみが存在する X 点近傍で磁力線方向へのパラレル加速とシート散逸が進行してまず電子加熱が先行し、イオン温度も X 点近傍で成長した構造を形成する。この Phase 1 は、合体法による駆動型リコネクションの特徴である外力による押し付けでリコネクション速度が最大化する時間帯に対応するもので、Phase 1 の段階ではイオンのジャイロ径は電流シート幅を大きく下回り、X 点近傍のプラズマの実効抵抗値も、古典抵抗  $\eta_{Spitzer} \sim 10^{-2} \text{m}\Omega\text{m}$  を大きく上回る異常抵抗が発現する前の段階であるため、自発的な高速リコネクションではなく外力の駆動が主としてリコネクション速度に貢献する時間帯に対応する。Phase 1 の過程を通じて、外力の押し付けによって電流シートは徐々に inflow 方向に圧縮され、電流シート構造は inflow 方向に薄く outflow 方向に長くなる形で縦横比のアスペクト比が変化を受ける。Phase 2 の時刻  $76\mu\text{s}$  から  $78\mu\text{s}$  にかけて電流シート幅は X 点近傍でイオンジャイロ径  $\rho_i$  のオーダーとなり、電流シートが分裂・排出されたような構造をとるとともに実効抵抗値が最大化し、粒子排出が進行して時刻  $78\mu\text{s}$  に outflow 領域に 2 つのクリアなスポット加熱が観測、同構造は径方向に移動した後に再結合磁場が蓄積する領域で捕捉され、ダブルピーク型のイオン温度構造を形成した。Phase 2 ではジャイロ径が電流シート幅と漸近することにより、運動論効果の発現と対応した異常抵抗の成長も確認され、自発的な高速リコネクションの phase に分類できる。このように駆動型・自発のリコネクションの 2 段階を経て時々刻々と微細構造が変化することが分かった。



(a) 電子加熱に関連した微細構造形成過程 (b) イオン加熱に関連した微細構造形成過程とリコネクション電場・シート幅・ジャイロ径の関係

図 2 X 点近傍に現れる微細構造の成長・変化の過程とリコネクション速度の分類

図 2 に示したように、X 点近傍および合体下流の outflow 領域において特徴的な加熱構造が形成されたが、図 3 に示すように、(a)前者はホール効果の影響が顕在化する条件では(電子・イオンの Mass 比を上げ、2 流体・運動論効果を発現しやすくする)加熱分布がホール電流  $j_{Hall} \times B_t$  の方向へ傾く極性効果の発現が確認され、また(b)合体下流のダブルピーク型のスポット加熱分布



は磁力線方向へ輸送される現象が確認された(H. Tanabe et al., Nucl. Fusion 59, 086041 (2019))。図 3(a)が示すように、紙面垂直方向手前側にガイド磁場がかかっている条件では、 $j_{Hall} \times B_i$  方向に電子が先行して堆積して四重極構造の静電ポテンシャル空間分布が生じイオン加速にも影響が現れる。イオンの質量が小さい水素の場合、イオンスキン長  $c/\omega_{pi} \sim 20\text{mm}$  ( $c$  は光速、 $\omega_{pi}$  はイオンサイクロトロン周波数)、イオンジャイロ径  $\rho_i \sim 5\text{mm}$  であり、図 2(b)の phase 1 に対応する時間帯ではホール効果の発現は確認されないが、ヘリウムプラズマの場合は  $c/\omega_{pi} \sim 40\text{mm}$  and  $\rho_i \sim 10\text{mm}$  となり、水素の場合は水平方向にほぼ直線型で得られた加熱分布がヘリウムプラズマの場合はホール効果の極性方向(反時計回り)に回転するように傾く構造が確認された。一方、図 3(b)は合体後半の図 2(b)で Phase 2 に対応して得られるダブルピーク型の加熱構造が受ける熱輸送効果について示したものである。ダブルピーク型のイオン温度分布では、イオン温度勾配  $-\nabla T_i$  は装置壁面方向を向く極性であることから、装置壁面方向に太陽風のように放出されてしまうことが危惧されるが、実際には合体後に生成された球状トカマク配位の磁気面上にトラップされて、ポロイダル方向に輸送されている状態が確認できる。これは高ガイド磁場条件の恩恵として、 $B_i \sim 5B_{rec}$  の効果で高 $\omega_{ci}$  が得られることにより、磁力線方向への熱輸送係数  $k_{\parallel}$  と磁力線垂直方向への熱輸送係数  $k_{\perp}$  の比  $k_{\parallel}/k_{\perp} \sim 2(\omega_{ci}\tau_i)^2 \gg 1$  の条件が満たされることによって達成されている。

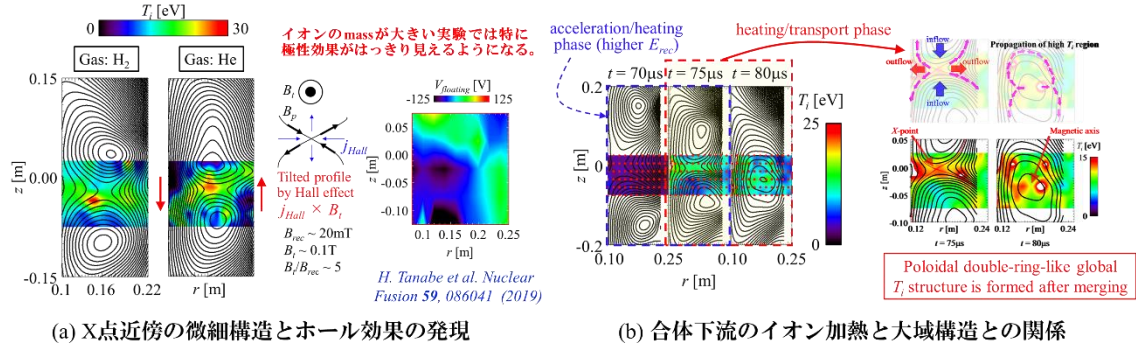


図 3 X 点近傍に現れる微細構造へのホール効果の発現と合体下流で形成される大域的構造

以上のように、本若手研究(A)では当初の研究計画の通り、磁気再結合現象の微細構造形成過程を詳細に明らかにすることに成功した。一方で、並行して基盤 S 研究計画(小野: 15H05750)によって、実験装置 TS-3 本体の大型アップグレードが遂行され、さらなる詳細な画像計測に柔軟な実験装置 TS-3U(TS-6)が建設されたことにより、本若手研究(A)は当初の予定を超えるさらなる研究成果を得ることができた。TS-3 実験では、測定用ポートが図 2 図 3 に示していた領域に限定されていたが、TS-3U 装置へのアップグレードを通じて計測系ポートの制約が撤廃され、合体する 2 つのフラックスチューブの磁気面全面を網羅した詳細な 2 次元計測を可能となったことを受けて、マルチスリット分光システムの空間分解能のさらなる拡充に着手。図 1(b)に示すような 320CH イオンドップラートモグラフィシステムをさらに開発し、96CH・320CH イオンドップラートモグラフィ計測を合わせた詳細な計測によって、ミクروسケールでジャイロ径分解能を満足しつつ、磁気面全面を網羅した full-2D の超解像二次元イオン温度計測が実験室プラズマにおける過去 30 年のリコネクション研究史上初めて実現。図 4 が示すように、図 3(b)の熱輸送モデルのよりクリアなイメージングとして、マイクロ秒時間スケールの有限時間の遅延を伴って高温領域が磁気面上に伝搬し、リコネクション物理と輸送の物理が組み合わさり、ポロイダル方向に磁気面を取り囲むグローバルな構造が形成される過程をクリアにとらえることに同実験史上初めて成功した。計測技術としても実験としても前人未踏の領域に到達した本研究は、2 年連続で核融合エネルギー連合講演会とプラズマ核融合学会での受賞の形で評価を受け、2017-19 年で計 10 件の招待講演につながるなど、当初計画を大きくこえる成果を得ることができた。

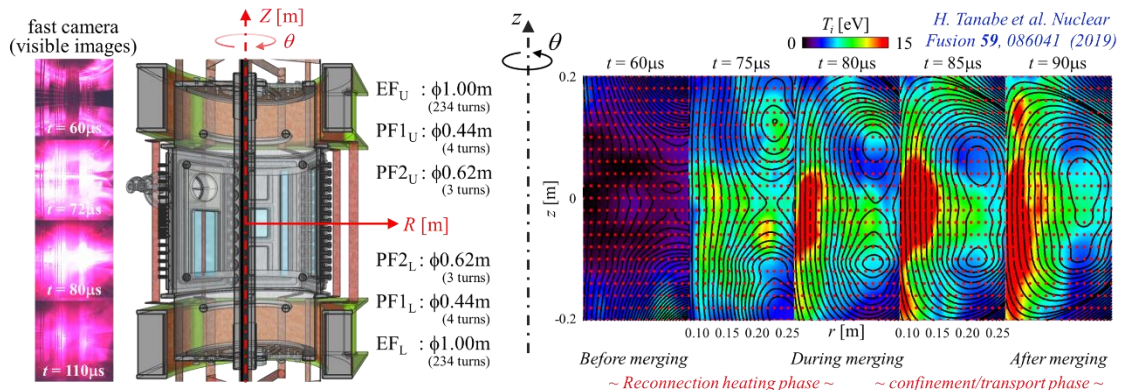


図 4 新実験 TS-3U(TS-6)の建設と磁気全面を網羅した full-2D 二次元イオン温度計測の達成

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Tanabe H., Yamada T., Watanabe T., Gi K., Inomoto M., Imazawa R., Gryaznevich M., Michael C., Crowley B., Conway N. J., Scannell R., Harrison J., Fitzgerald I., Meakins A., Hawkes N., McClements K. G., O'Gorman T., Cheng C. Z., Ono Y., MAST Team	4. 巻 24
2. 論文標題 Recent progress of magnetic reconnection research in the MAST spherical tokamak	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 056108 ~ 056108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1063/1.4977922">https://doi.org/10.1063/1.4977922</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanabe H., Yamada T., Watanabe T., Gi K., Inomoto M., Imazawa R., Gryaznevich M., Scannell R., Conway N.J., Michael C., Crowley B., Fitzgerald I., Meakins A., Hawkes N., McClements K.G., Harrison J., O'Gorman T., Cheng C.Z., Ono Y., The MAST Team	4. 巻 57
2. 論文標題 Investigation of merging/reconnection heating during solenoid-free startup of plasmas in the MAST Spherical Tokamak	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 056037 ~ 056037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6608">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6608</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 KONDO Kyohei, INOMOTO Michiaki, GUO Xuehan, USHIKI Tomohiko, SUGAWARA Takumichi, MIHARA Takumi, KAMIO Shuji, TANABE Hiroshi, ONO Yasushi	4. 巻 12
2. 論文標題 Separated Double-Current Layers in a High-Guide-Field Reconnection Experiment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202033 ~ 1202033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1585/pfr.12.1202033">https://doi.org/10.1585/pfr.12.1202033</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kirk A., Adamek J., Akers R.J., Allan S., Appel L., ..., Takase Y., Tamain P., Tanabe H., Tanaka H., ..., the MAST Team and the EUROfusion MST1 Team	4. 巻 57
2. 論文標題 Overview of recent physics results from MAST	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 102007 ~ 102007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa65e0">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa65e0</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanabe H., Cao Q., Tanaka H., Ahmadi T., Akimitsu M., Sawada A., Inomoto M., Ono Y.	4. 巻 59
2. 論文標題 Investigation of fine structure formation of guide field reconnection during merging plasma startup of spherical tokamak in TS-3U	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086041 ~ 086041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cdf">https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cdf</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 TANABE Hiroshi, CAO Qinghong, TANAKA Haruaki, AHMADI Tara, AKIMITSU Moe, SAWADA Asuka, INOMOTO Michiaki, ONO Yasushi	4. 巻 14
2. 論文標題 Recent Progress in High Resolution 2D Imaging Measurements of Reconnection Heating during Merging Plasma Startup in TS-3	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401110 ~ 3401110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3401110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Haruaki, Ono Yasushi, Tanabe Hiroshi, Cao Qinghong	4. 巻 139
2. 論文標題 First Global Doppler Tomography Measurement of Ion Heating of Merging Tokamak Plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 358 ~ 359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1541/ieejfms.139.358">https://doi.org/10.1541/ieejfms.139.358</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ono Y., Inoue S., Tanabe H., Cheng C.Z., Hara H., Horiuchi R.	4. 巻 59
2. 論文標題 Reconnection heating experiments and simulations for torus plasma merging start-up	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 076025 ~ 076025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab14a4">https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab14a4</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inomoto M., Ushiki T., Guo X., Sugawara T., Kondo K., Mihara T., Minami Y., Inai Y., Kaneko H., Yanai R., Takahata Y., Tanabe H., Ono Y., Sanpei A., Kamio S.	4. 巻 59
2. 論文標題 Effects of reconnection downstream conditions on electron parallel acceleration during the merging start-up of a spherical tokamak	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086040 ~ 086040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1e0f">https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1e0f</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 USAMI Shunsuke, HORIUCHI Ritoku, OHTANI Hiroaki, ONO Yasushi, TANABE Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Effective Proton Heating through Collisionless Driven Reconnection in the Presence of Guide Field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401025 ~ 3401025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1585/pfr.13.3401025">https://doi.org/10.1585/pfr.13.3401025</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Usami Shunsuke, Horiuchi Ritoku, Ohtani Hiroaki, Ono Yasushi, Inomoto Michiaki, Tanabe Hiroshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Dependence of the pickup-like ion effective heating on the poloidal and toroidal magnetic fields during magnetic reconnection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102103 ~ 102103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5099423	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akimitsu Moe, Ono Yasushi, Cao Qinghong, Masuki Ryota, Tanabe Hiroshi	4. 巻 138
2. 論文標題 Development of High-resolution Two-dimensional Magnetic Field Measurement System by Use of Printed-circuit Technology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 480 ~ 481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1541/ieejfms.138.480">https://doi.org/10.1541/ieejfms.138.480</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 AKIMITSU Moe, ONO Yasushi, CAO Qinghong, TANABE Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 High-Resolution 2D Magnetic Field Measurement of Magnetic Reconnection Using Printed-Circuit Board Coils	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202108 ~ 1202108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1585/pfr.13.1202108">https://doi.org/10.1585/pfr.13.1202108</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計21件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, R. Scannell, N. Conway, C. Michael, B. Crowley, T. O'Gorman, J. Harrison, I. Fitzgerald, A. Meakins, N. Hawkes, K. G. McClements, C. Z. Cheng, Y. Ono and the MAST team
2. 発表標題 Recent progress of magnetic reconnection research in high field merging experiment using 2D imaging diagnostics
3. 学会等名 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPP2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Tanabe, H. Koike, H. Hatano, T. Hayashi, Q. Cao, S. Himeno, T. Kaneda, M. Akimitsu, A. Sawada and Y. Ono
2. 発表標題 Development of a sub-cm high resolution ion Doppler tomography diagnostics for fine structure measurement of guide field reconnection in TS-U
3. 学会等名 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Tanabe, H. Koike, H. Hatano, M. Inomoto, Y. Ono and the MAST team
2. 発表標題 Development of a new 96 channel high resolution ion Doppler tomography dedicated for fine structure measurement of reconnection heating in TS-U
3. 学会等名 The 2017 International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 田辺博士, 波多野博法, 林拓巳, 曹慶紅, 姫野俊一, 兼田泰志, 秋光萌, 澤田明日香, Anup Borade, 洪重奉, Setthivoine You, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 トカマク合体を用いたリコネクション加熱分布計測
3. 学会等名 第25回ひので・実験室研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田辺博士, 波多野博法, 小池秀弥, 林拓巳, 曹慶紅, 兼田泰志, 秋光萌, 澤田明日香, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 超解像イオンドップラートモグラフィを用いた磁気再結合のマクロ・ミクロスケール加熱構造形成過程の研究
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, K. Gi, M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, the MAST team, H. Koike, H. Hatano, C. Z. Cheng and Y. Ono
2. 発表標題 実験室リコネクションのその場計測で見られる加速・加熱について
3. 学会等名 磁気リコネクション・粒子加速研究会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, M. Akimitsu, A. Sawada, H. Tanaka, S. Kamiya, S. You, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Investigation of ion heating/transport process during high guide field reconnection using full-2D ultra high resolution ion Doppler tomography
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 姫野俊一, 秋光萌, 澤田明日香, Anup Borade, Setthivoine You, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 TS-3U 装置における超解像イオンドップラートモグラフィ計測を用いた 合体リコネクション加熱輸送過程の研究
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tanabe, H. Tanaka, Q. Cao, M. Akimitsu, A. Sawada, S. You, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Investigation of ion heating/transport process during high guide field reconnection using ultra-high resolution ion Doppler tomography in TS-3U
3. 学会等名 US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tanabe, H. Hatano, T. Hayashi, Q. Cao, A. Sawada, M. Akimitsu, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Investigation of fine structure formation of guide field reconnection during merging plasma startup of spherical tokamak in TS-3U
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田辺博士, 田中遥暁, 曹慶紅, 秋光萌, 澤田明日香, Setthivoine You, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 新実験TS-3Uにおける超解像2次元画像診断を用いた合体・リコネクション加熱輸送過程の研究
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田辺博士
2. 発表標題 ドブラープラズマ計測の新展開
3. 学会等名 APET特別講演会「ITER時代の核融合プラズマ研究の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, M. Akimitsu, A. Sawada, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Fine structure formation by reconnection heating/transport process in toroidal plasma merging experiments
3. 学会等名 MAX PLANCK PRINCETON CENTER WORKSHOP 2019 (MPCC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 秋光萌, 澤田明日香, 田中遥暁, Tara Ahmadi, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 趣旨説明+リコネクション加熱実験~本郷新実験 TS-3U(TS-6)の動向その他
3. 学会等名 第26回ひので・実験室研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 発表標題
2. 発表標題 Experimental study of reconnection heating/transport process and its application to high temperature spherical tokamak formation
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas (EASW9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, M. Gryaznevich, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, C. Z. Cheng, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Ion and electron heating characteristics of magnetic reconnection in high field flux tube merging experiments
3. 学会等名 HINODE13/IPELS2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 田中遥暁, Tara Ahmadi, 秋光萌, Chio-zong Cheng, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 実験室リコネクションのドップラートモグラフィ計測
3. 学会等名 宇治リコネクションワークショップ2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, M. Akimitsu, T. Ahmadi, R. Someya, M. Inomoto, Y. Ono
2. 発表標題 Investigation of ion heating/transport process of magnetic reconnection during CS-free merging plasma startup of spherical tokamak in TS-6
3. 学会等名 International Spherical Tokamak Workshop (ISTW) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, M. Gryaznevich, T. O'Gorman, J. Wood, R. Scannell, K. G. McClements, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Micro/macro-scale ion heating and transport process of magnetic reconnection during merging plasma startup of TS-6 spherical tokamak
3. 学会等名 61th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 田辺博士, 曹慶紅, 田中遥暁, Tara Ahmadi, 秋光萌, Thomas O'Gorman, Mikhail Gryaznevich, 井通暁, 小野靖
2. 発表標題 超解像イオンドップラートモグラフィを用いた高磁場合体・磁気リコネクションのイオン加熱・輸送過程の研究
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanabe, Q. Cao, H. Tanaka, T. Ahmadi, M. Akimitsu, M. Inomoto and Y. Ono
2. 発表標題 Full-2D imaging measurement of ion heating/transport process during high field merging experiment in TS-6
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

小野・井研究室(所属機関) <a href="http://tanuki.t.u-tokyo.ac.jp">http://tanuki.t.u-tokyo.ac.jp</a> 第12回核融合エネルギー連合講演会 若手優秀発表賞 <a href="http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2018_08/jspf2018_08-439.pdf">http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2018_08/jspf2018_08-439.pdf</a> 第36回プラズマ・核融合学会年会 若手優秀発表賞(正会員部門) <a href="http://www.jspf.or.jp/jspf_annual2019/wakate2019.html">http://www.jspf.or.jp/jspf_annual2019/wakate2019.html</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小野 靖  (Ono Yasushi)  (30214191)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授    (12601)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	井 通暁  (Inomoto Michiaki)  (00324799)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授    (12601)	
研究協力者	G r y a z n e v i c h M i k h a i l  (Gryaznevich Mikhail)	トカマクエナジー/カラム研究所(英国、Oxfordshire)・Chief Scientist	