

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820434

研究課題名(和文)核融合炉に近い条件における球状トカマク合体生成時の加熱効果の検証

研究課題名(英文)Verification of the heating effect at spherical tokamak merging startup in conditions close to the nuclear fusion reactor

研究代表者

山田 琢磨 (Yamada, Takuma)

九州大学・基幹教育院・准教授

研究者番号：90437773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：イギリスカラム研究所の世界最大の合体実験装置であるMASTと、磁場コイルが真空容器外に設置されている東京大学のUTSTは、最も核融合炉に近い条件の球状トカマク合体実験装置である。これらの装置において、球状トカマク合体生成時の電子とイオンの加熱を観測した。合体のX点近傍では、ガイド磁場に依存して電子とイオンが合体の誘導電場によって加熱されることが分かった。合体のアウトフロー領域においては、イオンが加熱されてその後電子にも熱が移行することが分かった。これらの観測により、合体生成法による加熱の有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The world-largest merging device MAST (Culham Science Centre, UK), and UTST (Univ. Tokyo) which has all the magnetic coils out of the vacuum vessel, are spherical tokamak merging devices in conditions close to the nuclear fusion reactor. In these devices, electron and ion heating during spherical tokamak merging startup was observed. At around the merging X-point, the electrons and ions were heated by the electric field induced by the reconnection, depending on the amplitude of the guide field. The ions were heated at the reconnection outflow region, and the heat was soon migrated to the electrons. From these observations, the heating effect of the merging startup was verified.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：炉心プラズマ 球状トカマク 磁気リコネクション 国際研究者交流 イギリス

## 1. 研究開始当初の背景

トカマクとはプラズマを磁場で閉じ込める配位の一つであり、プラズマを高温・高密度で長時間閉じ込める必要がある核融合炉の実現に最も有力視されている。球状トカマクは通常のトカマクに比べてアスペクト比が小さく(2以下と定義される)単位磁気圧あたりに閉じ込め可能なプラズマ熱圧力(ベータ値)が大きくなるのが利点である。より経済的な核融合炉の実現のために球状トカマクに期待が寄せられていることは、大型核融合実験炉 ITER のアスペクト比の設計値が当初に比べて下がり3程度に近づいていることから明らかである。アスペクト比を下げれば下げるほど球状トカマクの特徴が活かされるが、更なる低アスペクト比化を実現するためには中心軸をなるべく細く設計しなければならず、プラズマの加熱に有効なセンターソレノイドの場所を確保するのが難しい。そこで、センターソレノイドを使わない、もしくは最小限に抑えた球状トカマクの生成・維持が世界中で研究されている。センターソレノイドに頼らない球状トカマクの立ち上げ法の一つとして、合体生成法がこれまでに START/MAST (英国カラム研究所)、TS-3/TS-4/UTST (東京大学) 等で研究されてきた(引用文献)。合体生成法では、合体時に磁力線が再結合することで磁気エネルギーがプラズマ、特にイオンの運動・熱エネルギーに変換され、非常に高ベータ(50%にも及ぶ)な球状トカマクが短時間のうちに生成されることが特徴である。これらの装置の中で MAST および UTST が最も核融合炉の実際の条件に近く、経済的な炉設計の実現に貢献しているが、いまだに解明されていない事象も多かった。例えば、合体時は主にアウトフロー領域においてイオンが加熱されるといことは以前から分かっていたが、合体時に電子が電流シート内の何処でどのように加熱されるかはまだ解明されていなかった。電子加熱が、イオン加熱と比べてどの程度プラズマ加熱に寄与するかを知ることは重要である。

(1) 球状トカマク装置 MAST (英国・カラム研究所) は、世界で行われているプラズマ合体実験装置の中で最も大規模で、最も磁場の高い実験装置である。また空間 130 点トムソン散乱計測などの信頼できる計測器も充実している。MAST では前身の START の時代から立ち上げ時に内部コイルを用いて 2 つの初期プラズマを誘起し、中心部に押し出すという方式を行っている。理由は主にセンターソレノイドの磁束を節約できるためであり、半ば慣習的に行われているもので、その物理はあまり解明されていなかった。そこで MAST を用いた合体実験の解析が、球状トカマクの合体立ち上げの有効性を飛躍的に解明できる可能性に着目した。

(2) 球状トカマク合体実験装置 UTST (東京大学・柏キャンパス) は、他の実験装置が真空容器内のコイルを利用して合体実験を行っているのに対し、合体に用いるポロイダル磁場コイルが真空容器外にあり、コイルがプラズマにさらされないため核融合炉により近い条件下で合体生成実験を行っている。真空容器外のポロイダル磁場コイルによって真空容器内に 2 つの磁気中性点を生成し、そこで生じた 2 つのプラズマを中心部に押し出し、合体させる。UTST では、世界に先駆けて初めて真空容器外のコイルによる球状トカマクの合体生成に成功した。しかし初期プラズマの磁気エネルギーが予想より小さかったため加熱効果は期待したほどではなく、イオン・電子加熱も実証されなかった。そこで UTST ではトロイダル磁場コイルの増強や新しい平衡磁場コイルの増設などの改造が行われ、実験環境が整いつつあった。

## 2. 研究の目的

(1) 英国の MAST を用いた研究では、主に空間 130 点トムソン散乱計測を用いて合体前後の電子温度・密度の上昇とプロファイルの変化を解析する。プロファイルは、垂直位置制御コイルを活用することにより、複数ショットを用いて 2 次元分布を求める。そこから電子が合体の電流シート内でどのように加熱されているかを探る。イオン温度に関しては、細かい空間分解能で合体面付近を装置内部まで測定するためのイオンドップラー分光器を新たに設置する。これらの電子およびイオン計測により、合体による電子・イオン加熱の詳細な描像およびメカニズムを明らかにする。球状トカマクの合体時に起きる電子・イオン加熱がプラズマ加熱に有効であることが証明されれば、合体生成法が将来的な核融合炉に適用できる可能性を示せる。

(2) 東京大学の UTST を用いた研究では、真空容器外ポロイダル磁場コイルを用いた高ベータ球状トカマクの合体生成と維持を目標とする。UTST は平成 23 年の秋にトロイダル磁場コイルの増強と新平衡磁場コイルを増設したため、プラズマ電流は従来の 200 kA 弱から 300 kA まで増やすことを目指す。さらに、中央部付近にセパレーションコイルを取り付け、初期プラズマが十分成長するまで合体を阻止し、合体の過程で初期プラズマを一気に押し出し、リコネクション過程を促進することで加熱効率の上昇と、合体プラズマの長寿命化を目指す。測定系に関しては、従来からの多チャンネルピックアッププローブとイオンドップラー分光器に加えて新たに 2 次元トムソン散乱計測、多チャンネル静電プローブを導入し、プラズマの電子温度・密度を正確に測ることで合体時の電子温度の加熱やシート放出を測定し、ガイド磁場等に対する依存性などを明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) MAST に設置されている空間 130 点 YAG トムソン散乱計測器を用い、合体時の中心面の電子温度・密度・圧力の径方向分布を測定する。垂直位置制御用の真空容器内部コイル対を用いることでプラズマを装置軸方向に移動させ、複数ショットを用いることで径方向と軸方向の 2 次元分布を導出する。このトムソン散乱計測器には 8 本レーザーがあり、それぞれが 30Hz (33ms) で測定が可能だが、8 本のタイミングを調整することで自由に時間分解能を設定できる。そこで合体時の詳細な電子温度・密度の分布変化を探るために 0.1ms の時間分解能で測定を行う。合体中のプラズマの電子温度・密度分布の時間変化や、ガイド磁場・中性粒子圧力による依存を調べ、電子の加熱機構を解明する。

MAST には装置内側付近までイオン温度を測定する計測器がなかったため、イオン温度の計測のために中心面のセンターソレノイド付近まで測定することが可能な新たなイオンドップラー分光器システムを構築し、MAST に導入する。視線は 32 チャンネルで、接線位置が 0.25 ~ 1.1m と MAST プラズマのほとんどの領域を見ている。分光された信号は、512x512 ピクセルの高速カメラによって受信され、コンピュータトモグラフィによって線積分信号から局所信号に変換される。実際の測定では主に炭素の CVI 信号 (波長 529.05nm) が用いられた。合体中のイオン温度分布の変化を測定することで、合体時のアウトフロー領域におけるイオン加熱を観測するだけでなく、電流シート内でもイオン加熱が起きているかなどを調査する。

(2) UTST の真空容器外の中央寄り上下に新たにセパレーションコイルを設置し、合体の効率化、プラズマの長寿命化を目指す。初期プラズマの形成にかかる時間がリコネクション時間よりも長いために、リコネクションによる加熱がスイートパーカーモデルで予測されるより小さくなることが分かっている。これを解決するためには、初期プラズマの形成時にセパレーションコイルによって合体を妨げ、十分に初期プラズマが成長してから孤立したトカマク同士の合体を高速化させて最大の加熱を引き出す方法が有効である。

UTST には 290 チャンネル磁気プローブアレイとイオンドップラー分光器が設置され、稼働中である。磁気プローブアレイによりポロイダル磁気面や電流密度、プラズマの圧力を測定することができる。これにより合体領域での電流シートの評価や合体による加熱効率やベータ値の計算が可能となる。磁気プローブアレイは直接プラズマ領域にあるため、MAST では平衡計算により推測するしかないポロイダル磁気面が、UTST では直接計測できることが特徴である。イオンドップラー分光器は 8 視線を持ち、視線を自由に設定できる。分光された信号は 8x8 マルチフォトダイオー

ドで受信され、測定には主にヘリウムの HeII 信号 (波長 468.58nm) が用いられた。

UTST には電子温度を測定する手段がなかったため、新たにプラズマ中の電子温度・密度を局所測定するための 2 次元 YAG トムソン散乱計測器を導入した。レーザーを半径一定の装置軸方向に入射し、合体領域を含む電子温度・密度・圧力の軸方向分布を測定する。また入射・集光系全体を径方向にスライドすることで複数ショットを用いて電子温度・密度・圧力の径方向分布も求め、軸方向・径方向の 2 次元測定を可能にする。

また、径方向静電プローブアレイを新たに設計・設置し、合体時の電流シートでの浮遊電位を測定し、構造を解析する。

### 4. 研究成果

(1) MAST における合体実験では、合体の初期から X 点で電子が直接加熱され、空間的に鋭い電子温度ピークを形成することが分かった。これは、合体の X 点近傍ではトロイダル方向の相関長が長く、電子が誘導電場により強く加速されるためである。このピークは合体初期では径方向にも軸方向にも幅が 1cm 以下と非常に細く、空間 130 点トムソン散乱計測とプラズマの細かな垂直位置制御によってようやく捉えることができた[図 1(a)]。電子温度のピークは合体後に徐々に太くなり、数 ms 後には幅が数 cm まで広がった。ピークの高さはガイド磁場に比例することからも、電子が X 点近傍で誘導電場により加速されていることがわかる。

また X 点のピークとは別に、合体終了後にアウトフロー領域で加熱されたイオンを介して電子が加熱され、ポロイダル平面でピークを囲むような円形な構造を形成することが分かった。この円形構造は磁気面と一致することから、アウトフロー領域での加熱が磁気面に沿って広がっていることが分かる。円形構造は合体後約 5ms 後に現れ、これはイオンと電子の緩和時間に相当する。円形構造はガイド磁場には依存せず、中性ガス圧が低いほど大きくなる。これは、後述するようにアウトフロー領域のイオン加熱がガイド磁場に依存せず、中性ガス圧が高いとプラズマの外側の高温構造体がダンプされるためである。このようにして、プラズマの合体時に 2 種類の電子加熱、すなわち 1 つは X 点近傍での直接加熱と、もう 1 つはアウトフロー領域で加熱されたイオンを介しての加熱が観測された。合体時の電子の加熱機構が実験的に初めて明らかになった。

また、電子密度の測定では、合体時における電流シート内の密度のパイルアップと、径方向内向きと外向きへの電流シートの放出 (fast shock) が観測された[図 1(b)]。この現象は、電流シートへのインフローがアウトフローを超えて密度のパイルアップが発生し、それがある閾値を超えると一気に電流シートの放出として起きる。

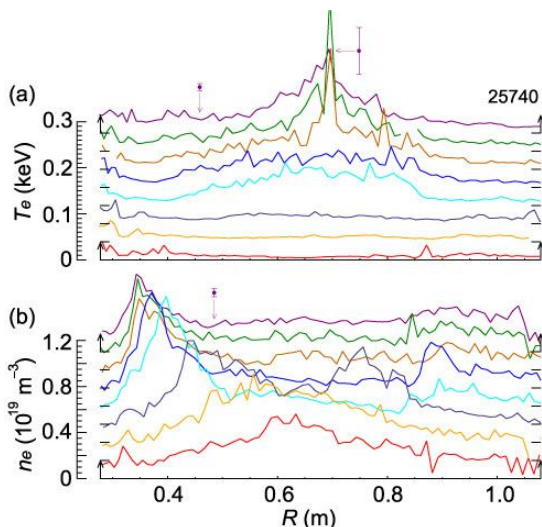


図 1 MAST 合体時の (a) 電子温度、(b) 電子密度の径方向分布の時間発展 (0.1ms 刻み)

32 チャンネルイオンドップラー分光器を用いたイオン温度測定では、合体中のアウトフロー領域でのイオン加熱が観測されただけでなく、合体の初期から X 点近傍でもイオンが直接加熱されていることが確認され、径方向にイオン温度のトリプルピークが形成されることが分かった。アウトフロー領域のイオン加熱はガイド磁場の強さに依存しないが、X 点での加熱はガイド磁場に依存し、電子加熱の機構と矛盾しなかった。

このようにして、MAST における実験により、合体による電子とイオンそれぞれの加熱機構が世界で初めて明らかになった。

(2) UTST における合体実験では、新しく増強・設置されたトロイダル磁場コイルと平衡磁場コイルにより、センターソレノイドを用いない合体実験では合体後のプラズマ電流 80kA、センターソレノイドを併用した合体実験ではプラズマ電流 310kA を達成した。この改造により、典型的な合体時のポロイダル磁場は、4mT から 17mT まで増加した。

また、合体立ち上げによって生成された球状トカマクを維持し、閉じ込めを改善するために、真空容器外に設置したセパレーションコイルを用いた。これにより真空容器の上下中央寄りの厚肉部に発生する誘導電流をキャンセルし、プラズマが壁に衝突する事を回避することで長寿命化に成功した。

実験環境が整った UTST において、8 チャンネルイオンドップラー分光器を用いて合体前後のイオン温度を計測したところ、合体前におよそ 15eV だったイオン温度が、合体によって短時間(およそ 5 $\mu$ s)で 50eV まで上昇することが確認できた。また、計測装置全体を径方向にスライドさせることで 2 次元計測を実現した YAG トムソン散乱計測装置を用いることで、MAST と同じようにプラズマの合体中に磁気リコネクションによる X 点近傍にて局所的に電子が 10eV から 30eV まで急速に加熱されることを確認した(図 2)。

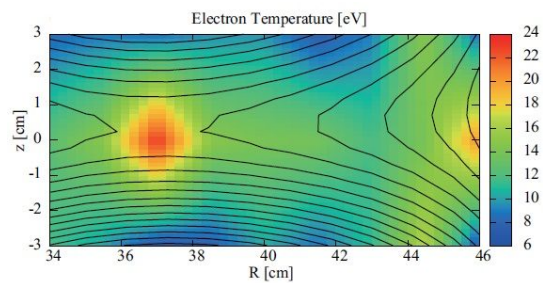


図 2 UTST 合体時の電子温度分布

静電プローブアレイを用いた計測では、合体中に二流体効果によってアウトフロー領域に急峻な径方向電場が形成され、イオン加熱に寄与していることが分かった。またガイド磁場が高い UTST では、合体時に誘導電場による分極と強い外部磁場により、合体の X 点付近で浮遊電位の四重極構造が急激に生じていることが分かった。計算によるとガイド磁場が強いほど、X 点での電子へのエネルギー付与が大きい。

このようにして、UTST において合体時のイオン・電子加熱が観測された。真空容器外に磁場コイルを設置するという核融合炉に近い条件の合体実験装置で、合体時の温度上昇を観測したのは世界で初めてである。UTST と MAST の実験結果は矛盾無く説明することができた。今後も両装置を使用することで合体時の加熱機構の更なる解明が期待でき、核融合炉において合体生成法が有効であることを立証できる。

#### <引用文献>

A. Sykes *et al*, First results from MAST, Nucl. Fusion Vol.41, No.10, 2001, 1423-1434

Y. Ono *et al*, High-beta characteristics of first and second-stable spherical tokamaks in reconnection heating experiments of TS-3, Nucl. Fusion Vol. 43, No.8, 2003, 789-796

#### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, 他 16 名, Application of Tomographic Ion Doppler Spectroscopy to Merging Plasma Startup in the MAST Spherical Tokamak, Plasma Fusion Res. 査読有 Vol.11, 2016, 1302093/1-4  
DOI: 10.1585/pfr.11.1302093

H. Tanabe, T. Yamada, T. Watanabe, 他 17 名, Electron and Ion Heating Characteristics during Magnetic Reconnection in the MAST Spherical Tokamak, Phys. Rev. Lett. 査読有 Vol.115, No.21, 2015, 215004/1-5

DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.215004

K. Yamasaki, S. Inoue, S. Kamio, 他 9 名 (10 番目), Laboratory study of diffusion region with electron energization during high guide field reconnection, Phys. Plasmas 査読有 Vol.22, No.10, 2015, 101202/1-5  
DOI: 10.1063/1.4932345

Y. Ono, H. Tanabe, T. Yamada, 他 8 名, High power heating of magnetic reconnection in merging tokamak experiments, Phys. Plasmas 査読有 Vol.22, No.5, 2015, 055708/1-8  
DOI: 10.1063/1.4920944

F. Kin, T. Yamada, S. Inagaki, 他 12 名, Evaluation of Non-Linear Mode Coupling During End-Plate Biasing Experiment in PANTA, Plasma Fusion Res. 査読有 Vol.10, 2015, 3401043/1-4  
DOI: 10.1585/pfr.10.3401043

M. Inomoto, T. Watanabe, K. Gi, 他 14 名 (7 番目), Centre-solenoid-free merging start-up of spherical tokamak plasmas in UTST, Nucl. Fusion 査読有 Vol.55, No.3, 2015, 033013/1-9  
DOI: 10.1088/0029-5515/55/3/033013

山田 琢磨, 今日からはじめる磁場閉じ込めプラズマ実験 コラム 7, プラズマ・核融合学会誌 査読無 Vol.90, No.11, 2014, 740  
[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2014\\_11/jspf2014\\_11-740.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2014_11/jspf2014_11-740.pdf)

T. Yamada, S. Inagaki, T. Kobayashi, 他 12 名, End plate biasing experiments in linear magnetized plasmas, Nucl. Fusion 査読有 Vol.54, No.11, 2014, 114010/1-5  
DOI: 10.1088/0029-5515/54/11/114010

S. Kamio, T. Watanabe, K. Yamasaki, 他 4 名 (5 番目), Experimental Results of Ion Heating by Magnetic Reconnection Using External Coils, Plasma Fusion Res. 査読有 Vol.9, 2014, 3402038/1-4  
DOI: 10.1585/pfr.9.3402038

T. Watanabe, Y. Ono, T. Yamada, 他 7 名, Plasmoid-Induced Pull Reconnection Experiments in University of Tokyo Spherical Tokamak, Plasma Fusion Res. 査読有 Vol.8, 2013, 2401148/1-4  
DOI: 10.1585/pfr.8.2401148

K. Yamasaki, S. Kamio, K. Takemura, 他 6 名 (7 番目), Experimental Study of

Two-Fluid Effect during Magnetic Reconnection in the UTST Merging Experiment, Plasma Fusion Res. 査読有 Vol.8, 2013, 2401130/1-4  
DOI: 10.1585/pfr.8.2401130

T. Yamada, M. Sasaki, N. Kasuya, 他 7 名, Streamer Structures in Experiment and Modeling, Plasma Fusion Res. 査読有 Vol.8, 2013, 2401022/1-5  
DOI: 10.1585/pfr.8.2401022

[学会発表](計 8 件)

山田 琢磨, 直線プラズマ装置 PANTA におけるストリーマーと媒介波の構造, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016/3/21, 東北学院大学 (宮城県・仙台市)

山田 琢磨, PANTA におけるエンドプレートバイアス時の構造形成の変化, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015/3/21, 早稲田大学 (東京都・新宿区)

T. Yamada, Streamer and Nonlinear Coupling with Turbulence (招待講演), 4th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, 2014/6/12, 九州大学 (福岡県・春日市)

山田 琢磨, PANTA におけるエンドプレートバイアス実験, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014/3/30, 東海大学 (神奈川県・平塚市)

山田 琢磨, 揺動の 2 次元断面構造の推定法, プラズマ・核融合学会 第 30 回年会, 2013/12/5, 東京工業大学 (東京都・目黒区)

T. Yamada, Formation of streamer in linear magnetized plasmas, 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport, 2013/10/2, 九州大学 (福岡県・春日市)

山田 琢磨, メソスケール揺動の非線形機構, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/26, 徳島大学 (徳島県・徳島市)

山田 琢磨, PANTA におけるストリーマー構造の形成条件, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/25, 徳島大学 (徳島県・徳島市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 琢磨 (YAMADA, Takuma)  
九州大学・基幹教育院・准教授  
研究者番号: 9 0 4 3 7 7 7 3