

# トカマク合体実験を用いた磁気リコネクション中の 磁場構造変化の検証

学生証番号 47216081 氏名 土井 久瑠美  
(指導教員 小野 靖 教授)

Key Words : magnetic reconnection, tokamak, magnetic probe, plasmoid

## 1. 研究背景

### 1.1 磁気リコネクション

持続可能なエネルギー源として核融合発電が注目されている。実用化に向けて高温・高密度のプラズマの閉じ込めを可能とする装置の経済性が課題となっている。そこで2つのプラズマを合体させる磁気リコネクションによる加熱手法が提案されている。

磁気リコネクションは図1(a)のように反平行の磁力線が接近してX状につながり変わる現象である。つながり変わりが起こるリコネクション領域で形成されるシート状の電流を電流シートといい、リコネクションが起こる磁気中性点をX点と呼ぶ。プラズマは図1(a)中の左右方向のインフローとして中心に集まり、X点で磁力線がつながり変わると図中の上下方向に磁力線の張力によって加速されながらアウトフローとして放出される。この際、磁場エネルギーがプラズマの熱エネルギーや運動エネルギーに変換され、プラズマの加熱に寄与する。

Sweet-Parkerモデルでは二次元定常状態で非圧縮性、抵抗率一定を仮定してリコネクション速度を求めているが、実際に観測されるタイムスケールはこれよりも速い。高速リコネクションが起こる理由としては、異常抵抗や電流シートの放出などが考えられている<sup>[1]</sup>。電流シート内部には閉じた磁気島であるプラズモイドが生成されることがある<sup>[2]</sup>。また電流シートは一様ではなく複数の塊

(プロブ) を内部に含むことも観測された<sup>[3]</sup>。プラズモイドやプロブの生成機構を明らかにし、リコネクションの高速化へ与える影響を明らかにすることが重要である。

## 2. 本研究の目的

本研究では高精細な磁場計測システムを用いてリコネクション中心における磁場・電流構造を計測することで、プラズモイドや複数のプロブ形成がリコネクションに与える影響を考察する。インフロー速度やインフロー駆動位置を変化させた場合で実験を行い高速リコネクションの条件を探る。リコネクション機構の解明は天文プラズマの理解や核融合発電の早期実用化に貢献する。

## 3. 手法

### 3.1 トカマクプラズマ合体実験装置TS-6

本研究ではTS-6という実験装置を用いた。TS-6装置では円筒型の真空容器内にポロイダル磁場を生成するコイル (PF)、容器を貫くように一周しているトロイダル磁場コイル (TF)、容器外部の平衡磁場コイル (EF) によって、図1(b) のような2個のトカマクプラズマを生成できる。PFコイルは2種類あり、コイル間距離、半径が異なる。トカマクをz軸方向に合体させることでR-Z平面における磁気リコネクションを観察した。

### 3.2 磁場計測システム

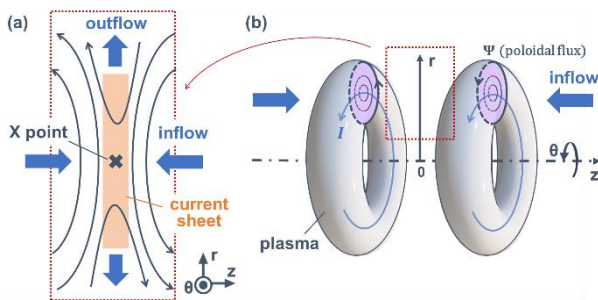


図 1 : (a) 磁気リコネクションにおける磁力線。  
(b) 2 個のトーラスプラズマの合体の模式図。

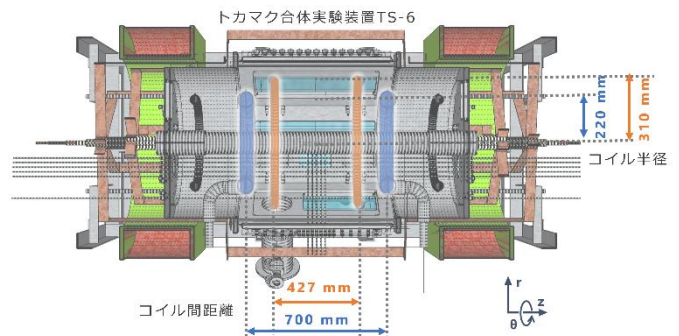


図 2 : トカマク合体実験装置 TS-6

実験装置TS-6内部に磁気プローブを挿入し、プラズマのポロイダル方向（R-Z平面）の磁場計測を行った。磁気プローブとは、磁場の時間変化による誘導起電力を円形状に巻いたピックアップコイルで計測する計測手法である。z軸対称性を仮定するとz方向磁場 $B_z$ からポロイダル磁束を計算した。さらにポロイダル磁束から径方向磁場 $B_r$ 、R-Z平面に垂直方向のトロイダル電流密度 $J_t$ とトロイダル電場 $E_t$ も求めた。本研究ではプリント基板に微小なコイルパターンが印刷されたPCB型磁気プローブを用いた。これは最小分解能5 mmで磁場の微細構造を計測するために開発された<sup>[4]</sup>。従来では合体中心領域のみにしか挿入されていなかったが、今回新規で200 chの磁気プローブを製作して計測範囲を広げたことで、インフロー、アウトフローの全領域が計測できるようになった。

## 4. 結果

### 4.1 ブロブ生成とリコネクション高速化

インフローが強い場合の実験において、トカマク合体中心の電流シートが従来考えられていたような薄いシートではなく、図3(a)のように複数の電流密度の塊であるブロブを含むと分かった。図3(b)より、左右からのインフローによって薄い電流シートが複数のブロブに分裂するとリコネクション電場が増加し、それに伴いリコネクション速度も増加した。複数のブロブが生成されることでリコネクションが進行する拡散領域も複数形成されるためリコネクション高速化に寄与していると考えられる。

### 4.2 プラズモイド生成とリコネクション高速化

図2で示された2種類のコイルを用いて、インフロー駆動位置を変えた実験を行った。

図2青色で示されたコイルを用いてインフロー駆動位置が遠い場合のリコネクション中の磁気面を計測すると図4のようになった。電流シート中心にプラズモイドが生成され、その時刻から合体速度が急増した。これはインフローが遅いため電流シートが圧縮されずパイルアップによってプラズモイドが生成されて、拡散領域が増加することでリコネクションが急速に進行していくと考えられる。

図2橙色で示されたコイルを用いてインフロー駆動位置が近い場合のリコネクション中の磁気面を計測すると図5のようになった。インフローで電流シートが強く圧縮されて分裂・放出されることで合体速度が急増した。

## 5. まとめ

インフロー駆動位置が近く強い場合では電流シートが強く圧縮されることでシート分裂・放出が

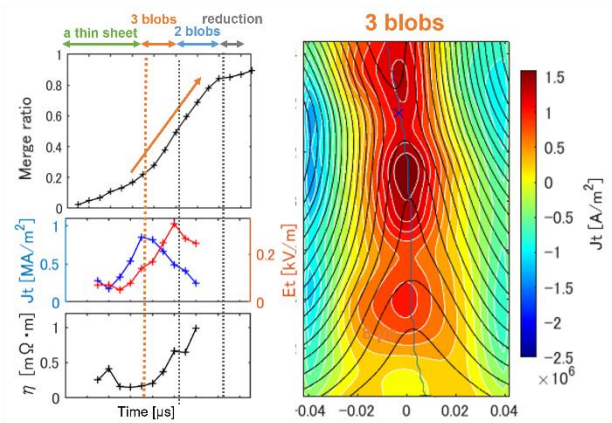


図 3 左図：二個のトカマクプラズマの合体率，X点における電流密度，電場，抵抗率。右図：合体中のトカマクのポロイダル磁気面（黒線）と電流密度分布（カラー表示）。

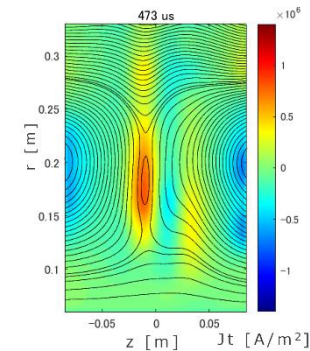


図 4：インフロー駆動位置が遠い場合で、プラズモイドが観測されたときの合体中のトカマクのポロイダル磁気面（黒線）と電流密度分布（カラー表示）。

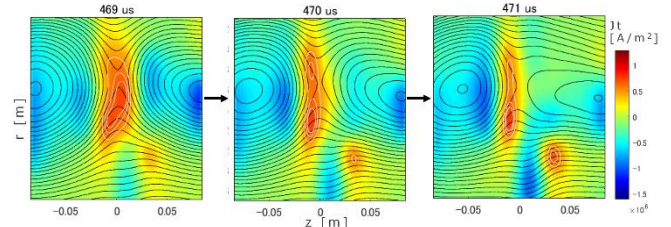


図 5：インフロー駆動位置が近い場合の合体中のトカマクのポロイダル磁気面（黒線）と電流密度分布（カラー表示）。470 μs でシートが分裂している。

起こり、合体が高速化した。インフロー駆動位置が遠い場合は中心にプラズモイドやブロブが生成され、拡散領域の増加によってリコネクションが高速化した。異常抵抗が生じない場合の高速化機構としてプラズモイドとブロブ生成の効果が明らかになった。いずれの場合もトカマク合体による核融合加熱に応用できる結果であった。

## 7. 参考文献

- [1] Y. Ono et al., Phys. Plasmas 18, 111213 (2011).
- [2] Q. Cao et al., IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng. 15, No. 9 (2020).
- [3] 秋光萌，東京大学博士論文 (2022).
- [4] M. Akimitsu et al., Plasma Fusion Res. 13, 1202108 (2018).