

# 論文内容の要旨

## 論文題目 Studies of Magnetic Reconnection in the Presence of Strong Guide Field by Multi-channel Spectroscopic Measurement

(多点分光計測を用いた高ガイド磁場下の磁気リコネクションの研究)

氏名 神尾 修治

### 1. 背景

磁気リコネクションは磁気圏物理や太陽物理の分野で盛んに研究されている現象であり、磁力線が繋ぎ変わる際に磁気エネルギーがプラズマの熱エネルギーに非常に短い時間内に変換される。プラズマ中のイオンは、繋ぎ変わった後の磁力線の張力により X 点から外側に向かってアルヴェン速度まで加速され、この加速されたイオンが熱化することにより、磁場のエネルギーがイオンの熱エネルギーに変換される。このプラズマ加熱現象は実験室プラズマでも、東京大学 TS-3/4 装置において磁気リコネクションを伴う球状トカマク (ST) 合体実験により急速加熱が報告され[1]、英国カラム研究所 MAST 装置においても、センターソレノイド (CS) コイルの磁束を節約するため合体立ち上げ法の研究がおこなわれている[2]。

このように磁気リコネクションによる加熱は報告されているが、合体法による ST 立ち上げをおこなう上で磁力線によるイオンの加速に関する物理を実験室で明らかにすることは非常に重要である。さらに、ガイド磁場が強く、粒子衝突頻度が小さい磁気リコネクションにおいては X 点近傍に発生するリコネクション電場により電子が効率的に加速されるというシミュレーション報告[3][4]はあるが、実際に観測された報告例はない。磁気リコネクション加熱を用いた ST 立ち上げを目標とする上で、また宇宙物理の観点からも、磁気リコネクション物理の解明は重要な課題である。

### 2. プラズマ合体装置 UTST

図 1 (a)に示す ST 合体実験装置 UTST では、外部磁場コイルのみを用いるプラズマ合体法による磁気リコネクション加熱により高ベータ ST の立ち上げを目的としている[5][6]。図 1 (b)のように外部ポロイダル磁場 (PF) コイルに流す電流を正から負に反転させたときに生じるフラックススイングによって誘導電場を加え、図 1 (c)のように PF 電流を反転させた際に上下に孤立したプラズマを生成し、中央に押し付けることによってミッドプレーンで合体させる。UTST 装置では、プラズマ合体の際に生じる磁気リコネクション現象を観測し、実験実証されていない物理を解明し、磁気リコネクションによる高ベータ

ST 立ち上げ法を確立するために、真空容器内部に多点磁気プローブ、ロゴスキーコイル、静電プローブが設置され、真空容器外部からは高速度カメラによるイメージング、イオンドップラー分光計測 (IDS) が行われている。

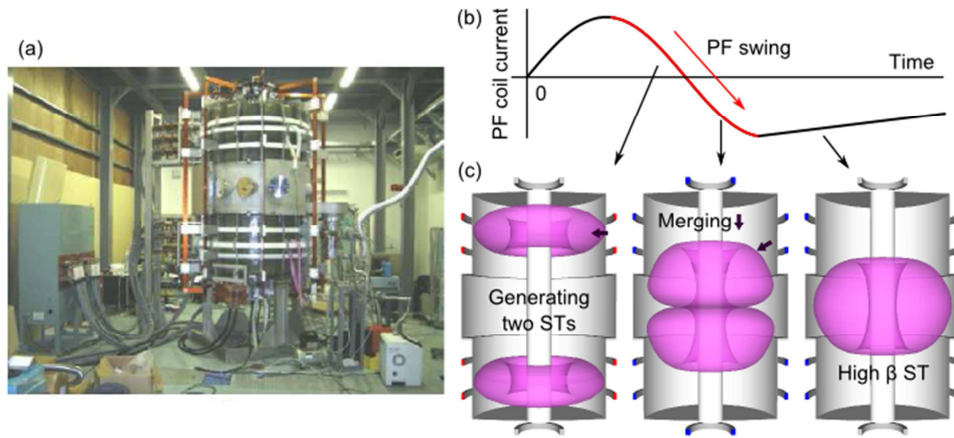


図 1 : (a)UTST 装置の写真、(b)プラズマ合体生成に用いた外部 PF コイルの典型的電流波形、および(c)UTST 装置におけるプラズマ合体の概要。PF コイル電流を急激に立ち下げることで、上下に ST を誘導生成し、中央に押し付けることでプラズマ合体をおこなう。

### 3. 8 チャンネル時間発展 IDS システムの開発

本研究では磁気リコネクションの計測を行うため、IDS を用いた新たな計測システムを開発した[7]。

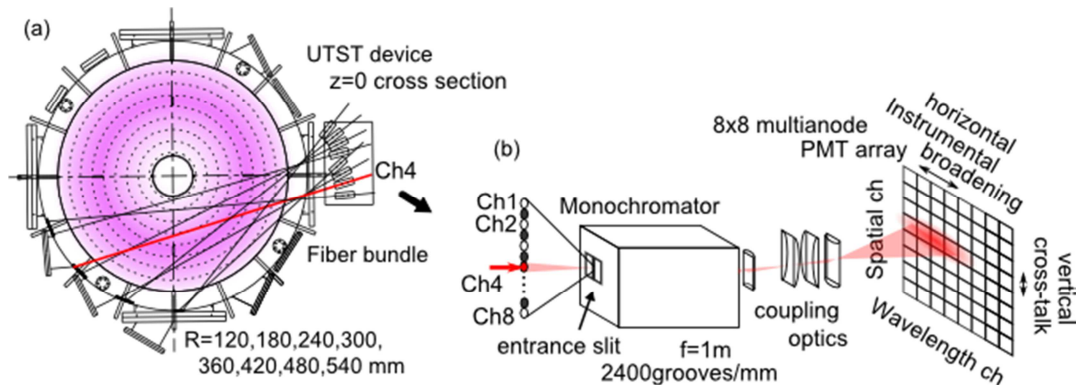


図 2 : (a)UTST 装置 z=0 断面と計測視線例、(b)システムの概略図。分光器から出射された光は 4 枚のレンズにより拡大・集光される。

図 2 に、開発したシステム概要を示す。このシステムでは、8×8 チャンネル光電子増倍管 (PMT) アレイを用いることにより、波長方向に 8 チャンネル、空間 8 地点の時間発展計測を行うことが可能である。通常 8 地点の時間発展計測を行う際に 8 台の分光器が必要だが、このシステムでは 1 台の分光器で多点計測ができるので、安価で高時間分解能なシステムが実現できる。図 2 (b)に示すように、出射側から出た光をレンズで拡大・集光することにより適切な位置へと焦点を結びせ、PMT により各チャンネルの光量を計測する。このシステムにより、図 2 (a)に示すような UTST 装置内の 8 方向の温度・流速を同時に計測することができる。UTST 装置のイオン温度は 5~20 eV と比較的低い温度であるため温度によるドップラー広がり小さく、流速によるドップラーシフトが相対的に顕著に現れるため磁気リコネクションによってアルヴェン速度程度にまで加速されると言われているイオンの流速計測をする上では都合が良い。そのため、倍率を適切に調節することで波長方向に 8 点の計測点であっても温度であれば 5~50 eV、流速は 40 km/s 程度の流速を 5~15 %の誤差で精度よく計測することができ、また波長 16 チャンネル

PMT システムを用いればさらに細かく調べることもできる。このシステムは、 $1\mu\text{s}$  以上の時間分解能を有している。また、このシステムを日大 NUCTE-III 装置の FRC 流速計測にも応用することで、さらに幅広く運用できるシステムであることを示した。

#### 4. 磁気リコネクション電子加速実験結果

図 3 に UTST プラズマ合体実験結果を示す。UTST 装置が建設され初めてプラズマが点いてから 5 年余りになるが、コンデンサバンクやコイルの拡充や予備電離装置ワッシャーガンの拡張などを経て、上下対称で安定した ST 合体実験が可能となった。プラズマ電流は CS なしで  $60\text{ kA}$  以上を達成し、プラズマは、イオン温度・電子温度は  $15\text{ eV}$  程度、電子密度は  $3 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$  というパラメータになっている。ポロイダル磁場の 10 倍以上の強いガイド磁場下でのリコネクション実験であり、ST への応用を視野に入れた磁気リコネクション加熱の研究を行っている。

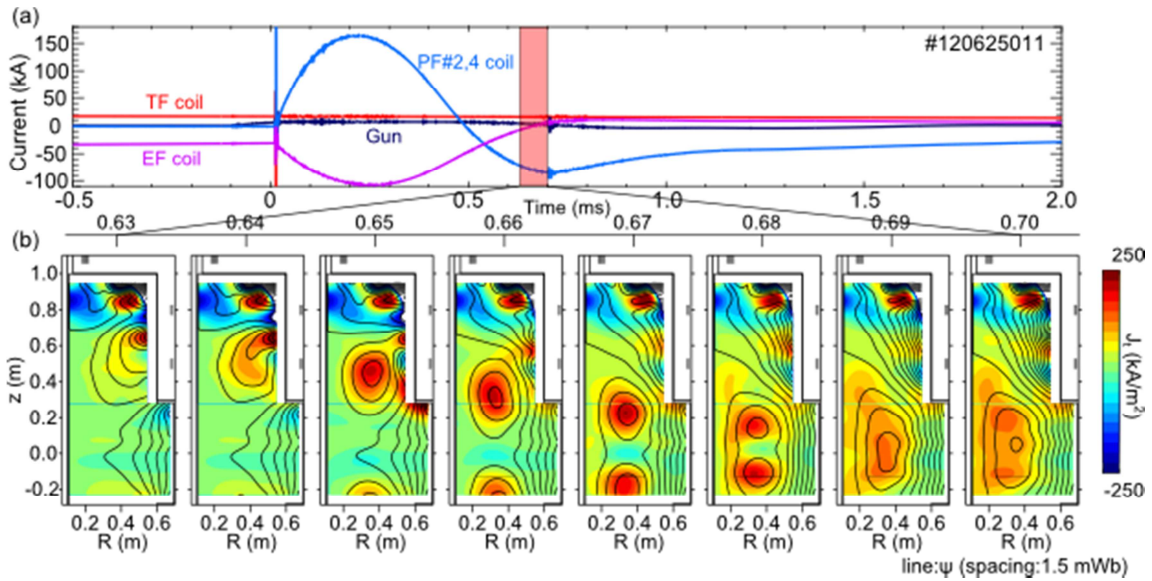


図 3 : (a)UTST プラズマ合体実験における外部コイルの電流波形、(b)内部磁気プローブにより得られた ST の合体の磁気面。

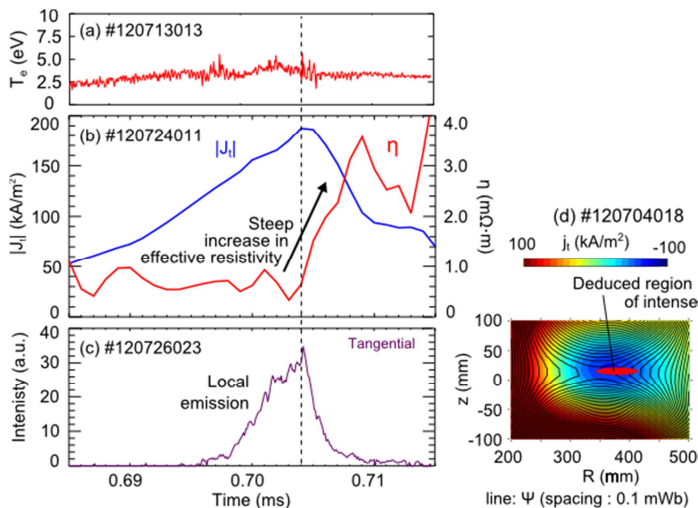


図 4 : (a)電子温度  $T_e$ 、X 点における (b)トロイダル電流密度  $j_t$ 、および抵抗  $\eta$ 、(c)He II 発光強度時間発展計測結果。(d)磁気プローブで計測した磁束密度および発光領域。

図 4 (b)に示すように、合体時にプラズマ電流と反対方向に駆動される電流シートの電流密度が観測された。この電流シートでは磁気リコネクションの X 点付近において、ポロイダル磁束の急峻な変化により駆動された  $-100\text{ V/m}$  以上のトロイダル方向の電場が観測されている。合体時、2 つの ST が近づく際にその間にトロイダル方向に流れる電流シートが形成され、ST が近づいたことによる磁束の変化によって生じた電場を受け、ポロイダル磁場が 0 となるリコネクション X 点において電子が加速され、電子加熱が起こると考えられる。このような低密度、最大で磁気軸  $0.2\text{ T}$  のガイド磁場の存在下の磁気リコネクションでは、X 点付近に存在した電子は電場の影響を受けてトロイダル方

向に加速され続ける。

そのような中、今回開発した IDS システムにより、プラズマ合体時にエネルギー準位の高い HeII ライン(468.58 nm)の発光が観測された (図 4 (c)) [8]。この発光はヘリウムプラズマ電子が N 殻(51.0 eV)から M 殻(48.4 eV)に落ちる時の発光で、静電プローブで計測した電子温度 (図 4 (a)) では発光することはない。多チャンネル同時計測により求められた発光領域 (図 4 (d)) から、磁気リコネクション X 点において局所的に加速された電子による励起であると考えられる。

## 5. 磁気リコネクションイオンアウトフローおよびイオン温度計測実験結果

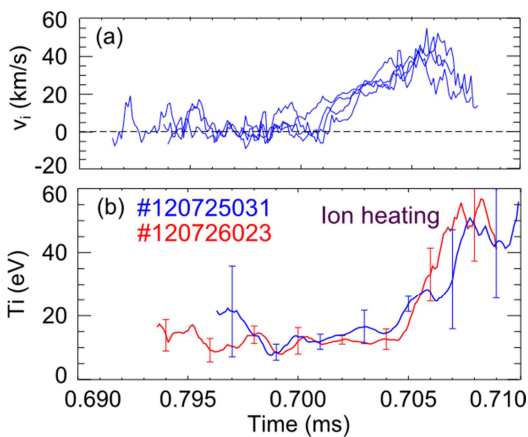


図 5 磁気リコネクション X 点における He II の (a) イオンアウトフロー時間発展、速度の+はブルーシフト、すなわち観測者方向、(b)イオン温度時間発展。

ST に対し垂直の視線のドップラー計測によりアルヴェン速度に近い流速が観測された[9]。しかしこの結果は視線積分データから得られたものであるため、速度の種類を限定するなどの仮定が必要であった。そこで、開発したシステムを用いて前章で観測した X 点近傍の局所発光を用いてイオンの流速を測定したところ、径方向の視線においてのみ図 5 (a)に示すようなドップラーシフトが観測された。この値は、シート電流が最大になる 0.705 ms 付近で最大 40-50 km/s を観測し、この値はこの時間帯におけるアルヴェン速度 50-60 km/s に近い値であ

る。図 5 (d)の発光位置が示すように、加速された電子による発光は X 点よりわずかに外側で起こっていることが原因であると考えられる。また、この時間帯にイオンの温度上昇も観測された。この結果は接線方向の視線により得られた温度であ

るため、速度の影響ではなく、温度が上昇したと考えられる。UTST 装置の通常の ST のイオン温度は 10-20 eV であり、磁気リコネクションを介して初めて 20 eV 以上の温度を達成した。

## 6. 結論

PMT2 次元アレイを用いることで安価な 8 チャンネル同時時間発展計測が可能なイオンドップラー分光システムの開発に成功し、実際に運用することで一定の性能が得られた。プラズマ合体時に、高ガイド磁場下の磁気リコネクションにおける電子加速をイオン励起発光により初めて実験的に明らかにした。また、その発光を有効に用いることで磁気リコネクションにおけるイオンアウトフロー速度の局所計測、磁気リコネクション効果によるイオン温度上昇の計測に成功した。

## 7. 参考文献

- [1] Y. Ono *et al.*, Phys. Plasmas 7, 1863 (2000)
- [2] A. Sykes *et al.*, Phys. Plasmas 8, 2101 (2001)
- [3] Paolo Ricci *et al.*, Phys. Plasmas 11, 4102 (2004)
- [4] P. L. Pritchett *et al.*, J. Geophys. Res. 109, A01220 (2004)
- [5] R. Imazawa *et al.*, IEEJ Trans. FM 130, 4 (2010)
- [6] T. Yamada *et al.*, Plasma Fusion Res. 5, S2100 (2010)
- [7] S. Kamio *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 83, 083103 (2012)
- [8] S. Kamio *et al.*, Electr. Eng. Jpn. 133, 4 (accepted)
- [9] S. Kamio *et al.*, Plasma Fusion Res. 6, 2402033 (2011)