

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分
平成30年3月7日現在

2次元画像比較を駆使した超高磁場リコネクションの
巨大加熱・加速の解明と応用開拓

2D Imaging Study of High Power Heating / Acceleration of
High Magnetic Field Reconnection for Its Physics and Application

課題番号：15H05750

小野 靖 (ONO YASUSHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授



研究の概要 短時間に巨大な加熱・加速を生む磁気リコネクション現象。その謎の多いエネルギー変換機構を、高磁場化したトカマク合体実験で加速・加熱が十分大きく、損失を無視できるクリアな実験で解明する。イオン温度、電子温度・密度、磁場、電場の2次元高精細画像計測を開発し、粒子シミュレーション、太陽・磁気圏観測と実験を直接2次元画像で比較する手法を初めて用い、加速・加熱の候補を検証して機構解明し、巨大加熱の応用開拓に結びつける。

研究分野：プラズマ科学

キーワード：磁気リコネクション、高磁場プラズマ合体、加速・加熱、2次元画像比較

1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションはプラズマ中で反平行の磁力線同士がX状につながかわる現象である。局所現象でも巨視的磁場構造変化を決め、近年は巨大加熱を生むエネルギー変換に注目が集まっている。東大 TS-3 実験に始まる合体型磁気リコネクション実験は世界で10以上の類似装置が建設され、プリンストン大学MRX装置の後継Flareのように大型化がはじまる中、合体実験発祥の日本には次の流れが必要である。室内実験の問題はコイルの周囲のプラズマを合体させる10eV程度の実験がエネルギー変換研究に用いられることで、コイル・壁への損失、低Z放射損失の温度への影響が危惧される。一方、東大は英国との共同実験も含め、1keV達する高温合体実験で先行し、リコネクション加熱物理の解明に役立つ次の展開を見通してみたい。

2. 研究の目的

将来へのキーは大型化でなく、むしろ

- 1) 装置サイズを絞って高磁場化し、大きな加熱に対して損失が無視できる状況でクリアカットな実験をはかることであり、
- 2) 磁場、イオン温度、電子温度、電子密度の2次元高精細画像計測を開発、標準導入し、
- 3) イオンと電子の加熱・加速機構を2次元画像によって検証し、全体像を解明し、
- 4) 実験、太陽(磁気圏)観測、理論・計算との画像比較による統一理解を目指し、
- 5) 最後にリコネクションの巨大加熱、急速加熱の応用開拓を目指す。

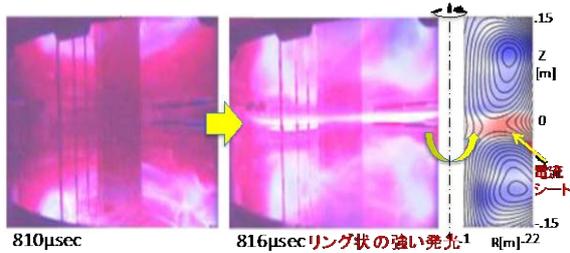
3. 研究の方法

TS-3Uには真空容器と高磁場コイルを新設して徐々に磁場を上げた実験を行い、TS-4U、UTST装置にも高磁場コイルを装着し、高速用(40kV)、中速(20kV)、低速コンデンサー電源(10kV)の整備を完了した。高磁場合体で加熱を増やし損失が無視できるクリアなリコネクション加熱・加速実験を開始した。

実験のキーであるドップラー型イオン温度・流速の2次元画像計測、2次元トムソン散乱の電子温度・密度画像、プローブによる2次元磁場・電場の画像計測を完成し、加速・加熱機構を一つ一つ検証し、A) MHD 解釈、B) 運動論的解釈、C) 非熱的粒子加速の全体像を明らかにしつつある。連携先する英国MAST(カラム研)やST-40(トカマクエナジー)の合体加熱実験にも東京大学のイオンドップラー計測装置を設置してデータ数を必要とするイオン加熱の比例則解明に活用する。

4. これまでの成果

1) 電源・コイル改修から高磁場実験開始とイオン加熱スケールング則の確認：再結合磁場向上のためコンデンサー電源を再整備し、総エネルギー1.4MJ、コイルも高磁場用とし、最大0.5Tの高ポロイダル磁場を作れるようになり、徐々にコンデンサーを増やす高磁場合体が実行可能になった。加熱パワーが損失パワーを2桁上まわる状況で、小型・高磁場のTS-3(R=0.2m)、大型・閉じ込めに優れたTS-4(R=0.5m)、外部コイルのみからなり改修が容易なUTST(R=0.4m)の特徴を生か



TS-3U の合体過程の光学写真 (左 2 枚, 電流シート) の強い発光, 磁気面とトロイダル密度(右)

した実験を行い, 粒子シミュレーションと太陽コロナ観測と緊密に連携しながら, リコネクション加熱機構解明を行っている。

まず, リコネクションのイオン加熱が再結合磁場の 2 乗に比例するスケール則を従来の 3 倍の範囲, 3 倍のデータ点で再検証し, その機構は, 電流シートをイオンラマ径まで圧縮して大きな異常抵抗を発生させると, 高速リコネクション=アルペーン速度並みのアウトフローが発生して, イオン加熱は再結合磁場だけで決まり, q 値 >1 (ガイド磁場比 1 以上) でガイド磁場によらなくなるためと判明した。プラズモイド放出がこのプロセスを助けており, 連携する計算とも一致した。

2) 2次元ドップラー温度計の高精細化: ホール効果で傾いたイオン加熱領域と静電ポテンシャル形成: ドップラートモグラフィ計測の計測点を 35 点から 500 点へ高精細化し, ガイド磁場によるホール効果で傾斜したイオンの下流加熱を初めてとらえ, 探針による静電ポテンシャル計測により電子はイオンより先行してリコネクション電場で加速され, 負ポテンシャルを下流に形成して, イオンはその静電場で下流へ巨視的に加速されることを見出した。

3) 2次元電子温度計測の開始・高精細化と X 点に局在した電子加熱の発見, 温度の異方性の計測へ: 東大独自の 2 次元電子温度計測をスタートし, UTST, TS-3U では強い電流シート発光と共に X 点に局在化した電子加熱を見出した。MAST 実験も一致し, X 点のベータトロニックな電子加速の可能性もある。

4) 2次元 X 線画像計測のスタートと X 点電子加速の発見: 非熱的粒子加速の検証を, フィルタをつけたマイクロチャンネルプレートで開始し, X 点のセパトトリクス付近で 100eV を越える (\gg バルク温度) 高エネルギー粒子の検出に成功した。セパトトリクス加速や波乗り加速を検出した可能性, PIC ではホール効果によってセパトトリクス付近に局所化した静電場が, 磁気モーメントの保存を破り, 磁力線に垂直な電子加速を生じた可能性もある。

5) 実験に連携する粒子シミュレーションと実験・観測の 3 分野間連携の進展: 実験条件を持ち込んだ粒子シミュレーションを開始し, 先行する電子が下流に作る静電場がイオンを

加速する機構を解明し, 実験とも一致する。太陽フレアで広く認められるリコネクション加熱との連携もドップラー計測同士の比較を中心に進み, ひので・実験室会議を機動的に開催して比較解析を機構解明につなげ, MR 国際会議を主催して連携の成果を発信した。

6) リコネクション加熱の核融合炉応用の急進展: 再結合磁場を 0.6T へ増加させると合体だけで(追加加熱無しに) 核融合反応開始の 10keV に到達できるとの提案論文に大きな反響があり, 核融合ベンチャー企業が結成されて経済的な合体型実験炉 ST-40 が建設された。日本政府主催の International Cool Earth Forum 初の核融合セッションに小野が招聘され, 核融合ベンチャーによるリコネクションプラズマ加熱・点火の新しい応用を紹介し, 新聞, 英国テレビでも報道がなされた。

5. 今後の計画

これまで 1) 局所的と信じられていたリコネクションによるイオン加熱が予想以上に巨視的で, 再結合磁場の 2 乗に比例する物理はほぼ解明した。2) 予想以上に局所的である電子加熱をトムソン散乱や軟 X 線の 2 次元計測により解明を進め, 今後は更に 3) イオンドップラーやトムソン散乱による温度計測を速度計測に拡張して高エネルギー粒子の検出につなげ, 高エネルギーでもパワーの小さな粒子加速は, 再結合磁場を引き上げて加熱・加速パワーを増やすことで検証を可能にする。4) 粒子シミュレーションと実験の連携は極めて重要で, 実験に近い磁束管合体を立ち上げて, 太陽を含めた目玉の 2 次元画像比較を本格化する。ひので・実験室会議も活用して, 特に非熱的粒子加速に焦点を合わせて実験・観測・理論の他にはない緊密な連携で粒子加速現象の解明を進める予定である。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[1] H. Tanabe, 3 人 M. Inomoto, R. Imazawa, M. Gryaznevich, 10 人 C.Z. Cheng, Y. Ono, the MAST team, "Recent progress of magnetic reconnection research in the MAST spherical tokamak (Invited)", Physics of Plasmas **24**, 056108 (2017).

[2] X. Guo, R. Horiuchi, C. Z. Cheng, Y. Kaminou and Y. Ono, "Energy Conversion Mechanism for Electron Perpendicular Energy in High Guide-Field Reconnection", Physics of Plasmas **24**, 032901 (2017).

[3] Y. Ono, H. Tanabe, 10 人 "High Power Heating of Magnetic Reconnection in Merging Tokamak Experiments (Invited)", Physics of Plasmas **22**, 055708 (2015).

田辺 博士, 「スカラー・ベクトルトモグラフィを応用したイオンドップラー温度・流速計の開発」, プラズマ核融合学会 第 20 回学術奨励賞, 2015 年 11 月 24 日