

異極性スフェロマック合体におけるリコネクション面内電場の形成

非会員 神納 康宏* 非会員 井上 静雄*
正員 井 通暁* 正員 小野 靖*

Formation of In-plane Electric Field in Magnetic Reconnection in Counter-helicity Spheromak Merging Experiment

Yasuhiro Kaminou*, Non-member, Shizuo Inoue*, Non-member, Michiaki Inomoto*, Member,
Yasushi Ono*, Member

(2013年2月22日受付)

Structures of electrostatic potential and ion outflow at magnetic reconnection were measured in spheromak merging experiment in TS-4 device. In counter-helicity spheromak merging, reconnection of opposing toroidal magnetic fields generates the radial gradient of electrostatic potential which causes asymmetry in the radial ion outflow pattern.

キーワード: 磁気リコネクション, スフェロマック, プラズマ合体

Keywords: magnetic reconnection, spheromak, plasma merging

1. 序 論

宇宙プラズマや実験室プラズマで発生する無衝突磁気リコネクションでは電流シート内でイオンと電子の動きが分離することにより生ずる面内電場によるアウトフローの加速が起きうることが計算機シミュレーション等で知られている⁽¹⁾が、実験的に示した例は未だない。一方で実験室では互いに逆極性のトロイダル磁場を持つスフェロマックを合体させる異極性スフェロマック合体が可能であり、この場合にポロイダル磁場に加えてトロイダル磁場もリコネクションを起こすため Fig. 1 下に示すようにリコネクション電場が径方向成分を有しており、これはアウトフローと同方向の面内電場となると予想される。また、この径方向電場はトロイダル磁場の極性の正負、負正の組み合わせによって向きが決まる。なお、本論文では便宜上 Fig. 1 左下のケースを case-O、右下のケースを case-I と呼称する⁽²⁾。本実験ではこの異極性スフェロマック合体を用いて従来計測されていなかった異極性スフェロマックにおけるリコネクション面内電場の構造とそれがイオンアウトフローに与える影響を検証した。

2. 実験装置

TS-4 は装置両端のフラックスコアにより大半半径約 0.5 m、小半径約 0.2 m の 2 つのスフェロマックを生成し、装置中央で合体させる装置である (Fig. 1)。TS-4 装置の内部には R-Z 平面上に 10×9 チャンネル磁気プローブアレイが設置されて

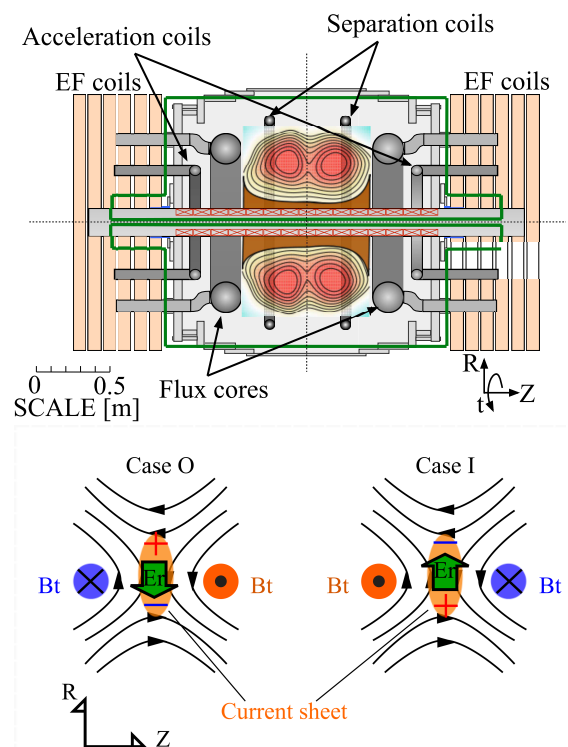


Fig. 1. Schematic view of TS-4 device and 2D illustrations of reconnecting magnetic field lines in cases O (left) and I (Right).

おり、磁場のトロイダル (t) 成分と Z 成分を計測できる。この磁場データからポロイダル磁束の等高線 (磁力線) を描くことができる。また、ミッドプレーン ($Z = 0$) にはマッハプローブと静電プローブが設置されており、R 方向フロー (M_r ;

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科
〒 113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16
Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo
2-11-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

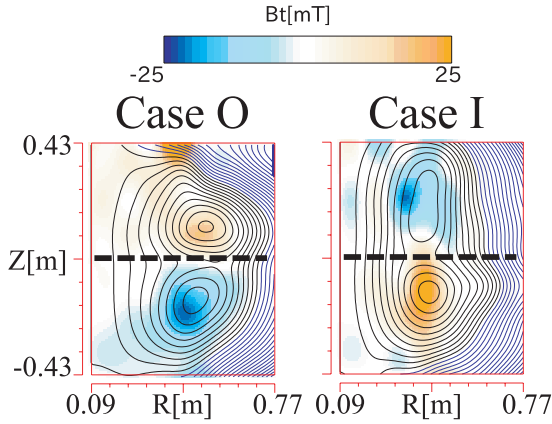


Fig. 2. Poloidal flux contour of case-O/I merging spheromak together with toroidal magnetic field indicated by color.

イオンマッハ数), および浮遊電位を計測することができる。本実験での主なプラズマパラメータは電子温度 $T_e = 10 \text{ eV}$, イオン温度 $T_i = 10 \text{ eV}$, 電子密度 $n_e = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度である。これよりイオン音速 $C_s = 7 \text{ km/s}$ である。

3. 実験結果

本実験では動作ガスとしてラーマー半径の大きいアルゴンガスを用い, X 点周辺の広い領域でイオンが非磁化となる条件で異極性スフェロマック合体実験を行った。Fig. 2 にリコネクション中の磁気面およびトロイダル磁場分布を示す。上側のトロイダル磁場が正, 下側のトロイダル磁場が負である異極性合体が case-O であり, 上側のトロイダル磁場が負, 下側のトロイダル磁場が正である異極性合体が case-I である。

このとき, 静電プローブ, マッハプローブにより計測した浮遊電位および径方向フローの径方向分布を Fig. 3, Fig. 4 に示す。各グラフの値は各々3回の放電の平均値であり, エラーバーは標準偏差を表している。トロイダル磁場のリコネクションに由来すると考えられる径方向の電位勾配が生じており, この電位勾配の向きはトロイダル磁場の極性に応じて case-O, I で逆向きとなっている (Fig. 3)。このように, トロイダル磁場の繋ぎ変わる異極性スフェロマック合体は径方向電場が生じるリコネクションであることが明らかになった。このとき, Fig. 4 に示すようにアウトフローに X 点の内と外で大きさに非対称性が生じている。Case-O では R 方向内側向きのフローが強く, case-I では R 方向外側向きのフローが強くなっている。Case-O, I ともに低電位側に向かってアウトフローが強くなっており, これはリコネクション領域の磁化されていないイオンが電位勾配による力を受けたためと考えられる。リコネクションインフロー側の磁場の R 成分は Case-O/I ともに $B_r = 10 \text{ [mT]}$ であるため, 古典的な Sweet-Parker モデルから予測されるアウトフロー速度であるインフロー側リコネクション磁場による Alfvén 速度は $V_A = 5 \text{ km/s}$ であるが, case-I では X 点内側, 外側のアウトフロー速度

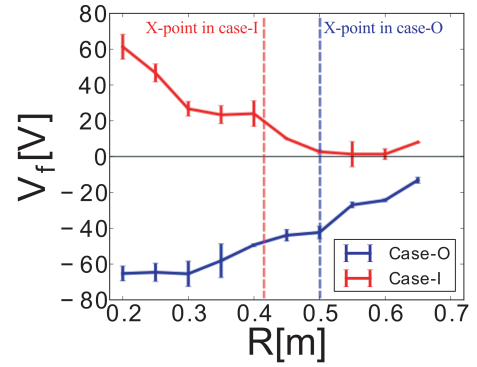


Fig. 3. Radial profiles of floating potential at $Z = 0$.

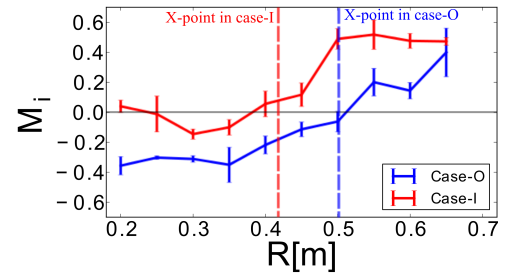


Fig. 4. Radial profiles of radial flow at $Z = 0$.

V_{out} は $R = 0.3 \text{ m}$, $R = 0.5 \text{ m}$ でのマッハ数からそれぞれおよそ $V_{out,inner} = 1.5 \text{ km/s}$, $V_{out,outer} = 3.5 \text{ km/s}$ であり, 高電位側でのアウトフローは Alfvén 速度に比べて大きく減速されている。同様に case-O では $R = 0.35 \text{ m}$, $R = 0.55 \text{ m}$ でのマッハ数から $V_{out,inner} = 3 \text{ km/s}$, $V_{out,outer} = 1.5 \text{ km/s}$ であり, 高電位側のアウトフローは低電位側に比べて低速となっている。このことから, 面内電場がリコネクションアウトフローを加速, 減速していることが示唆される。なお, 全体的にアウトフロー速度が Alfvén 速度よりも低速となっているのは, 質量数の大きいアルゴンイオンが短いリコネクション期間中に十分加速されていないためと推測される。

4. まとめ

トロイダル磁場の極性の組み合わせの異なる2つのケースの異極性スフェロマック合体実験を行い, ポロイダル磁場とともにトロイダル磁場の繋ぎ変わるリコネクションにおいてリコネクション電場を担う電位勾配が発現することが明らかになった。また, この電位勾配による非磁化イオンの加速によりリコネクションアウトフローの X 点に対する非対称性が生じることが明らかになった。

文 献

- (1) H. Karimabadi, W. Daughton, and J. Scudder: "Multi-scale structure of the electron diffusion region," *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, L13104 (2007)
- (2) M. Inomoto, S. Gerhardt, M. Yamada, H. Ji, E. Belova, A. Kuritsyn, and Y. Ren: "Coupling between Global Geometry and the Local Hall Effect Leading to Reconnection-Layer Symmetry Breaking," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.97, 135002 (2006)