電流シート放出による磁気リコネクション高速化の実験的解析

学生員 廣田 大輔* 正員 小野 靖*

非会員 有元 克行*

Experimental Analysis of the Fast Magnetic Reconnection with the Current Sheet Ejection

Daisuke Hirota*, Student Member, Yasushi Ono*, Member, Katsuyuki Arimoto*, Non-member

We confirmed significant increase in the magnetic reconnection rate caused by a new phenomenon called the current sheet ejection. We focused on the relation between the shape distortion of the current sheet and the reconnection rate (inflow velocity), and concluded that a new simple current sheet model explain our experimental results qualitatively using mass conservation law.

キーワード：電流シート放出, 磁気リコネクション率, インフロー速度, 質量保存則,

Keywords: current sheet ejection, magnetic reconnection rate, inflow velocity, mass conservation law

1. 序 論

磁気リコネクション現象は高導電率のプラズマ中で本来凍結されるべき磁力線が磁気中性点 (X 点) 付近の拡散によって互いにつながり変わってトポロジーを変化させる現象であり, 互いに反平行な磁力線間には電流シートと呼ばれる反転電流層が発生する。プラズマの磁場構造の変化や運動・熱エネルギーの変換に関わるこの現象は天体プラズマから核融合プラズマに至る広い分野で注目されてきた。しかし実際の現象を説明できるようなリコネクション速度を実現する理論モデルは未だ確立しておらず, 高速磁気リコネクションを説明するための研究が進められてきた。⁽¹⁾

そこで本論文では電流シートが拡散領域から放出される事でリコネクションが高速化する現象に焦点を当て, その現象を実験的に解析することでリコネクションの高速化機構を明らかにした。

2. 実験方法

本研究ではプラズマ生成装置 TS-3 によって一対のトーラスプラズマを合体させて磁気リコネクションを実現しており, 計測については二次元磁気プローブによって得た結果を計算して磁場・電流密度データを得ている⁽²⁾。リコネクション速度を測るための指標として (1) 式で定義される合体率 α_c を用いる。 Ψ_c は再結合したポロイダル磁束, Ψ_{p1} , Ψ_{p2} は合体する二つのプラズマのポロイダル磁束の最大値を表し, $\Psi_{p1} \simeq \Psi_{p2}$ である。

$$\alpha_c = \frac{\Psi_c}{\min(\Psi_{p1}, \Psi_{p2})} \times 100. \dots \dots \dots (1)$$

過去の研究からトロイダル磁場が強く低損失 (高温) の合体プラズマを外部磁場によって急速に圧縮すると電流シートが放出され易い事がわかっているため, それを実験条件として採用した。

図 1 ポロイダル磁気面 Ψ (等高線は 0.30 [mWb] 間隔) とトロイダル電流密度 j_t の時間推移

Fig. 1. Time evolutions of poloidal flux surfaces Ψ and toroidal current densities j_t .

* 東京大学大学院工学系研究科小野研究室
〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16
Ono lab, University of Tokyo
2-11-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032

図 2 合体率の時間変化

Fig. 2. Time evolution of common flux ratio α before and during the current sheet ejection.

3. 結果および検討

図 1(a) に外部磁場圧縮力が小さい場合、(b) に圧縮力が大きい場合のポロイダル磁気面を示す。色分布はオレンジが紙面手前向き・青が紙面奥向きのトロイダル電流密度であり、順に時間推移を示している。図中央の拡散領域に左右方向から流入してきた磁力線はリコネクションを起こして上下方向に抜けている。この時磁力線と共にプラズマも流入・流出していると考えられる。(インフロー・アウトフロー)

図 1(b) より、プラズマ電流と逆向きに流れる電流シートが時間の経過と共に拡散領域から上下方向に放出されて合体が進行していく様子が見て取れる。

図 2 は合体率 α の時間変化であり、77 μsec の電流シート放出を境にリコネクション速度 (合体率の傾き) が急上昇している事がわかる。これにより電流シート放出によるリコネクションの高速化を実験的に確認した。

電流シート放出に伴うシート形状の変化に注目し、電流シートの放出で生じたスペースに磁束と粒子が流入することで拡散領域へのインフローが増加、リコネクションが加速されるというモデルを構築した。

ここで電流シートがくびれて上下に放出されていく形状変化を図 3(a) のように平均化した長方形で近似する。図中に示す様に L , Δ をとりその初期値を L_0 , Δ_0 とし、電流シートの幅が狭まる速度を u 、電流シートの長さが伸びる速度を V_s とする。拡散領域外では磁束がプラズマに凍結されていると考え、インフロー速度は磁束の流入速度と考えられるのでリコネクション速度とみなせる。この時 u は通常の電流シート時のインフロー速度に加えて、電流シート放出に伴い上乗せされた速度増加分、 V_s はアウトフロー速度増加分を表すことになる。電流シートの減衰を考慮するとシート圧縮の影響は拡散領域面積の変化が 8% 程度とかなり小さいので、流入質量と流出質量の保存を (2) 式のように仮定して、 L , Δ は時間の関数として (3), (4) 式で表すことができる (L の時間変化は一次近似で仮定)。

$$uL = 2\Delta V_s, \dots\dots\dots (2)$$

$$L = \int V_s dt + L_0 = 2V_s t + L_0, \dots\dots\dots (3)$$

図 3 (a) 電流シート放出の物理モデル, (b) インフロー速度増分 u の時間変化 (理論値と実験値)

Fig. 3. (a) A model of current sheet ejection, (b) Time evolutions of inflow velocity increment u for theoretical (from approximate model) and experimental curves.

$$\Delta = \Delta_0 - \int u dt, \dots\dots\dots (4)$$

以上の式を解くと (5), (6) 式になり、放出直後にインフロー速度が急上昇した後時間と共にある速度に落ち着いていく電流シート放出モデルが導出される。

$$\Delta = \frac{\Delta_0 L_0}{L_0 + 2V_s t}, \dots\dots\dots (5)$$

$$u = \frac{2V_s L_0 \Delta_0}{(L_0 + 2V_s t)^2}, \dots\dots\dots (6)$$

この式に基づいて算出した u の時間推移 (放出時刻を $t = 0$ にとる) を実験値と比較すると図 3(b) になり、実験値の速度増分に理論値が概ね合致していることがわかる。

以上より、電流シート放出に伴うリコネクションの高速化を長方形近似モデルで定性的に説明することができた。
(平成 15 年 6 月 5 日受付, 平成 15 年 8 月 4 日再受付)

文 献

- (1) H. Ji, M. Yamada, S. Hsu, and R. Kulsrud: "Experimental Test of the Sweet-Parker Model of Magnetic Reconnection" *Phys. Rev. Lett.*, Vol.80, No.15, pp.3256-3259 (1998)
- (2) Y. Ono, M. Inomoto, T. Okazaki, and Y. Ueda: "Experimental investigation of three-component magnetic reconnection by use of merging spheromaks and tokamaks" *Phys. Plasmas*, Vol.4, No.5, pp.1953-1962 (1997-5)

廣 田 大 輔 (学生員) 1979 年生。2003 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。同年同大学大学院修士課程入学。現在在学中。

小 野 靖 (正員) 1959 年生。1983 年東京大学工学部電気工学科卒業。1989 年同大学大学院博士課程修了。1994 年同大学助教授。核融合プラズマ実験に従事。プラズマ・核融合学会, APS 会員。

有 元 克 行 (非会員) 1978 年生。2001 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。2003 年 3 月同大学大学院修士課程修了。