

スフェロマック異極性合体時の磁気リコネクションにおける二流体効果

Two Fluid Effects on Reconnection during Counter-helicity Merging Experiment

井 通暁 [1]; Yamada Masaaki[2]; Ji Hantao[2]; Gerhardt Stefan[2]; Ren Yang[2]; Belova Elena[2]

Michiaki Inomoto[1]; Masaaki Yamada[2]; Hantao Ji[2]; Stefan Gerhardt[2]; Yang Ren[2]; Elena Belova[2]

[1] 阪大・工・原子分子; [2] PPPL

[1] CAMT, Grad Sch of Eng, Osaka Univ; [2] PPPL

天体あるいは実験室プラズマにおいて観測されている磁気エネルギーの急激な散逸過程には、無衝突プラズマにおける磁気リコネクション現象が深く関与していると考えられ、天体観測・シミュレーション・実験等による研究が行われている。近年では、Xポイント付近での電子とイオンの運動の乖離によって引き起こされる二流体効果に関して、人工衛星での観測やシミュレーション研究による有力な結果が報告されている [1-4]。

MRX装置(プリンストン大学プラズマ物理研究所) [5] では、真空容器内の一対のフラックスコアを用いてスフェロマックプラズマを装置中心軸上に2個同時に生成し、これらを合体させる際に発生する磁気リコネクションの観測を通じて、Sweet-Parkerモデルやイオン加熱機構、波動・乱流の効果等の検証を行ってきた。最近では、合体したプラズマを再びフラックスコアに引き戻す際に発生する磁気リコネクション(null-helicity merging)において、つなぎ変わる磁力線に垂直方向の四重極磁場構造が自発的に形成される現象が観測されており [6]、これは磁気リコネクション時にホール効果が強く発現していることを示唆するものである。このnull-helicity mergingにおいては、ガイド磁場(トロイダル磁場)は存在せず、ポロイダル磁場のみによるほぼ理想的な二次元リコネクションとなっており、観測された四重極磁場の構造は、シミュレーション結果との良い一致を示している。

このnull-helicity mergingと同様の、ガイド磁場の存在しない磁気リコネクションを実現するもうひとつの方法として、スフェロマック異極性合体(counter-helicity merging)がある。これは、互いに逆向きのトロイダル磁場を有するスフェロマックを合体させる際に発生するリコネクションであり、ポロイダル/トロイダル双方の磁場成分がつなぎ変わることで、初期の磁気エネルギーの大部分がプラズマの熱エネルギーへと変換される過程である。このスフェロマック異極性合体を磁気リコネクションの観点からみると、初期状態での反並行な磁場成分 B_{\parallel} に沿って並行な電流 j_{\parallel} が流れていると考えることができる。この j_{\parallel} が作る磁場 B_{\perp} もまた、Xポイントにおいて反並行となるため、結果としてガイド磁場のないリコネクションが発生することになるが、このとき駆動されるリコネクション電界 E は、初期状態の B_{\parallel} に垂直方向ではなく、ある角度を有することがnull-helicity mergingとの相違点となる。

異極性合体においては、初期スフェロマックプラズマの有するトロイダル磁場の組み合わせによって、リコネクション電界の向きが方位角方向に対して内側に傾く場合と、外側に傾く場合の2種類が存在する。MRX装置での異極性合体実験では、このトロイダル磁場の違いに応じて、リコネクション開始後にXポイントが径方向に内向きあるいは外向きに移動する現象が新たに観測された。この現象は無衝突領域のプラズマにおいて顕著に見られることから、以下に示すようにホール効果によって引き起こされるものと考えられる。すなわち、無衝突プラズマではホール効果によってリコネクション磁場に垂直方向に四重極磁場構造が現れるが、これはつなぎ変わる磁力線が電流シート内の電子電流に凍結し、引っ張られることによる変形とみなすこともできる。同様の現象が異極性合体においても発生していると仮定すると、つなぎ変わる磁力線は、方位角方向に対して内側ないし外側に傾いているリコネクション電流方向に引っ張られることになり、結果的にXポイントは径方向内向きあるいは外向きに移動することになると考えられる。

このようなXポイント位置の変化に伴って、電子密度分布の径方向分布にも変化が観測された。Xポイントが内向きに移動するケースでは、径方向外側でピークする電子密度分布が得られたのに対して、Xポイントが外向きに移動するケースでは、逆に電子密度分布が径方向内側で極大値を持つことがわかった。これは、Xポイントの径方向への移動の結果、リコネクション領域からのアウトフローに非対称性が生じたことに起因すると考えられ、ホールMHDシミュレーションと定性的に一致する結果となっている。

本研究は、米国エネルギー省、国立科学財団、航空宇宙局および日米科学技術協力事業(核融合分野)の援助を受けて実施されたものである。

[1] F.S. Mozer et al, Phys. Rev. Lett. 89, 015002 (2002).

[2] P.L. Prichett, J. Geophys. Res. 106, 3873 (2001).

[3] L. Yin and D. Winske, Phys. Plasmas 10, 1595 (2003).

[4] P. Ricci et al., Phys. Plasmas 11, 4102 (2004).

[5] M. Yamada et al., Phys. Plasmas 4, 1936 (1997).

[6] Y. Ren et al., Phys. Rev. Lett. 95, 055003 (2005).