

高速磁気リコネクションにおける乱流効果 Effects of turbulence in fast magnetic reconnection

東森 一晃^{1*}, 横井 喜充², 星野 真弘¹
Katsuaki Higashimori^{1*}, Nobumitsu Yokoi², Masahiro Hoshino¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻, ² 東京大学生産技術研究所

¹University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Science, ²University of Tokyo, Institute of Industrial Science

宇宙空間での磁気レイノルズ数 R_m は非常に大きく、例えば太陽風や地球磁気圏をはじめ、一般に乱流状態であることが多い。そして乱流は磁気リコネクションや衝撃波での統計加速など、様々な現象で重要な役割を果たすと考えられている。我々が注目するのは、乱流と磁気リコネクションの関係性である。

磁気リコネクションは、磁場のエネルギーを効率的にプラズマの熱・運動エネルギーに変換する特有の現象として1960年頃から注目され研究されている。磁気リコネクションに関する代表的な理論 [Sweet, 1958; Parker, 1957] から、磁気リコネクションのエネルギー変換効率は磁気レイノルズ数に依存 ($R_m^{-1/2}$ に比例) することがよく知られているが、磁気レイノルズ数が大きな宇宙空間では、観測される高効率のエネルギー変換を説明できないという大きな問題であった。近年、この問題を解決する候補の一つとして乱流が注目されている。例えば大規模な数値計算によって、高磁気レイノルズ数下で乱れが存在すると、リコネクション効率の磁気レイノルズ数依存性がなくなることがわかってきた [Loureiro+, 2009]。また乱流理論の観点から、磁気リコネクションで自発的に発達する乱流の重要性が指摘されている [Yokoi and Hoshino, 2011]。ここでは、対称性の破れによって生じるクロスヘリシティ（マクロに定義された乱流の物理量）の効果によって、リコネクション効率が劇的に上昇するという理論的予測がある。

我々は、乱流と磁気リコネクションの関係性を明らかにするために、MHD 乱流モデル [e.g., Yoshizawa, 1990] に基づいたレイノルズ平均型のMHD 乱流シミュレーションコードを開発した。開発したシミュレーションコードでは、通常のMHD 方程式系に加え、クロスヘリシティと乱流エネルギーの時間発展方程式を解く。そしてこれらマクロに定義された乱流の物理量が Ohm の法則中に現れる乱流起電力を介して、磁場や速度場などの平均場と相互に影響しあうシステムとなっている。シミュレーション結果によると、理論的予測と同様に、リコネクションアウトフローに沿ったクロスヘリシティの生成が見られた。そしてこのクロスヘリシティの空間非一様性により、リコネクション点付近に実効的な乱流拡散が局在化し、効率の良い磁気リコネクションに発展することがわかった。本講演では今回用いた乱流モデルの概要と、高効率の磁気リコネクションでの乱れの輸送と局在化の重要性について、シミュレーション結果を基に議論する。

キーワード: 磁気リコネクション, 乱流, クロスヘリシティ, 層流, リコネクション効率, シミュレーション

Keywords: magnetic reconnection, turbulence, cross-helicity, laminar flow, reconnection rate, simulation