

5.4 学位論文

プラズモイド噴出を伴う太陽フレアの磁気流体シミュレーション： リコネクション率とリコネクションの継続時間は何によって決まるのか？ (博士論文)

本博士論文は、太陽フレアにおける磁気リコネクションの物理過程を、数値シミュレーションから明らかにしようとするものである。太陽コロナはフレアやジェットなどの爆発現象で満ちている。これらの爆発現象の起源は、プラズマ中の磁気エネルギーがプラズマの熱・運動エネルギーに突発的に変換されることによる。磁気リコネクション (図 a) は、磁力線のつなぎ替わりにより磁場のエネルギーを高速に解放するメカニズムであり、太陽フレアだけでなく、恒星、コンパクト天体、地球・惑星磁気圏など様々な場所・スケールにおけるエネルギー解放で重要な役割を果たしていると考えられている。その基礎物理過程の理解は、太陽物理学だけでなく、広くプラズマ物理学一般の重要課題である。

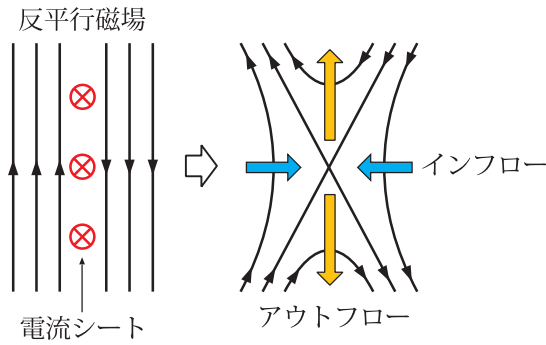
しかし、磁気リコネクションの物理過程にはまだ明らかにされていないことが多い。リコネクションにおいて磁力線がつなぎ替わる速度を決めるメカニズムとしては、リコネクション領域の外部の条件により決まるとする「駆動型リコネクション」と、リコネクション領域内部の物理により決まるとする「自発型リコネクション」が対立しているが、未だ決着はついていない。一方で、太陽フレアの観測からはプラズモイド（磁力線で囲まれたプラズマのかたまり）の噴出がリコネクションに深く関わっていることが示唆されている。この観測結果に基づき、柴田らはプラズモイドとリコネクションがカップリングすることで、結果として速いリコネクションが引き起こされるとする「プラズモイド誘導型リコネクション」モデル (図 b) を提唱したが、理論的にも観測的にもまだ十分な検証がなされていない。

本論文では、太陽フレアにおける磁気リコネクションの物理過程を明らかにするために、磁気リコネクションモデルに基づいた太陽フレアの2.5次元磁気流体シミュレーションを行った (図 c)。磁気リコネクションの速度とプラズモイドの上昇速度を独立にコントロールすることで、両者の依存関係を調べた。その結果、磁気リコネクションの速度とプラズモイドの上昇速度の間には正のフィードバックが働くことを示した。この結果はプラズモイド誘導型リコネクションモデルを強く支持する。本論文ではプラズモイド誘導型リコネクションモデルの観測的な検証も試みた。「ようこう」衛星により得られたフレアの軟X線イメージを解析し、プラズモイドの速度とリコネクションの速度の間に正の相関があることを確かめた。以上の結果から、理論、観測の両面からプラズモイド誘導型リコネクションモデルを検証することに成功した。

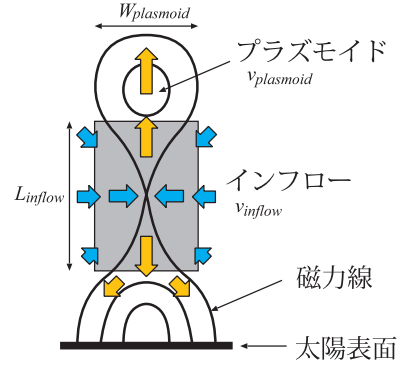
また、太陽フレアにおいて、リコネクションの継続時間が決定されるメカニズムもまだ明らかになっていない。本論文では、リコネクション領域に供給され得る磁束の量を制限したモデル (図 d) を構築し、2.5次元磁気流体シミュレーションを行うことで、リコネクションの継続時間はリコネクション領域に供給され得る磁束の量により決まっていることを示した。さらに、初期の磁気エネルギーの90%程度がリコネクションにより解放されることを明らかにした。

Reference: Nishida, Shimizu, Shiota, Takasaki, Magara & Shibata, 2009, ApJ, 690, 748

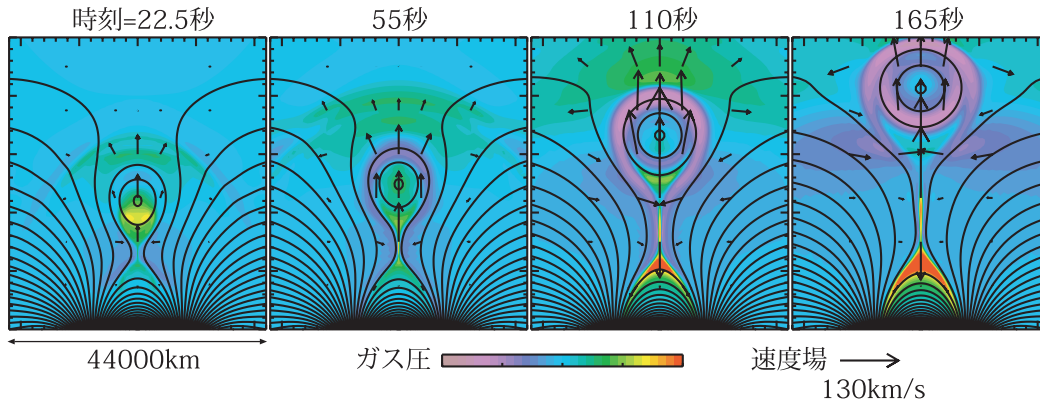
(a) 磁気リコネクション



(b) プラズモイド誘導型リコネクション



(c) 磁気流体シミュレーションの結果の例



(d) 磁場形状の異なるモデル

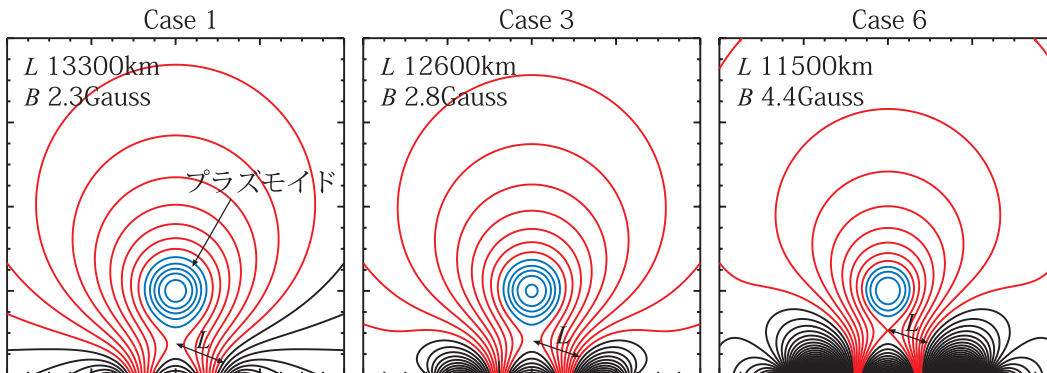


図: (a) 磁気リコネクションの模式図。(b) プラズモイド誘導型リコネクションの模式図。磁気リコネクションにより生じた上向きのアウトフローによりプラズモイドが加速される。一方で、プラズモイドが上昇することにより、質量保存則からプラズモイドの下部にはインフロー ($v_{\text{inflow}} \sim W_{\text{plasmoid}} v_{\text{plasmoid}} / L_{\text{inflow}}$) が励起され、速いリコネクションが起こる。(c) 2.5次元磁気流体シミュレーションの結果の例。時間が進むにつれ、磁気リコネクションが進行し、同時にプラズモイドが上昇していく。(d) リコネクション領域に供給され得る磁束の量を変えたモデル。プラズモイド (青い実線) が飛び出すためには、それを囲む磁力線 (赤い実線) が磁気リコネクションを起こすことが必要である。

(西田圭佑 記)