

太陽コロナにおける磁気リコネクションの観測及び数値シミュレーションによる研究（博士論文）

磁気リコネクション（磁気再結合）とは、プラズマ中で反対向きの磁力線がつながり変わるによりパチンコの要領でプラズマを加熱、加速する現象で、太陽フレアにおけるエネルギー解放メカニズムとして広く受け入れられている他、地球のオーロラや地上の実験室プラズマの崩壊現象でも重要な役割を果たしていると考えられています。また最近では形成しつつある星やブラックホールの周りにある降着円盤、宇宙最大の爆発であるガンマ線バーストなど、様々な天体活動現象で磁気リコネクションが注目されています。

磁気リコネクションの物理において長年の大きな問題となっていることは、いかにして磁気リコネクションを速く起こすかということです。磁力線がつながり変わるためには電気抵抗が必要ですが、太陽コロナのような高温で希薄なプラズマ中では電気抵抗が極めて小さく、古典的な理論では磁気リコネクションの進行が遅くて太陽フレアのような爆発的な現象を説明できないことが知られています。この問題を解決する理論として、電子やイオンの運動などプラズマの微視的性質を考慮することにより、電気抵抗を小さな領域に局在化させることで磁気リコネクションを速くするという理論モデルがあります。このモデルは一定の成功はおさめています、プラズマの微視的運動の特徴的サイズ（約1m）と、現象の大きさ（太陽フレアなら約1万km）の間の膨大なギャップをいかにして埋めるか、というスケール間結合の問題が未解決の難問として残されています。

本博士論文研究の目的の一つは、太陽の現象の観測及び数値シミュレーションから、磁気リコネクションの基礎的な物理過程を解明することにあります。そのために本研究ではまず基本的な観測事実として、太陽フレアにおける磁気リコネクションの速さを観測データから定量的に導出する手法を開発しました。太陽コロナは希薄なため磁場や速度場の測定は一般に困難ですが、コロナ中の磁気リコネクションに伴う彩層の増光の変化（“太陽フレアリボンの成長とエネルギー解放”の頁も参照）やX線観測のデータ、さらに数値シミュレーションを援用することにより、磁気リコネクションの速さを定量的に導出し、既存の「速い」磁気リコネクションモデルと矛盾のない値を得ました。

次に数値シミュレーションによる研究について述べます。上述の「スケール間結合」の問題を解決する一つのアイディアには、磁気リコネクション領域の乱流を考慮するというものがあります。磁気リコネクション領域が乱流状態になっているとすれば、その結果観測される増光現象にも磁気リコネクション領域の構造を反映して微細構造が現れると期待されますが、実際に高空間分解の観測データでは、フレアやジェットなど磁気リコネクションに伴う現象のほとんどに微細構造が観測されています。本研究では日本の超大型スーパーコンピュータ、地球シミュレータを用いた高解像度数値シミュレーションにより、磁気リコネクションに伴う微細構造の形成を再現することに成功しました。（“地球シミュレータを用いた太陽浮上磁場領域の大規模数値シミュレーション”の頁も参照）

図1左にあるように、太陽の内部から光球を通して上空に浮上してくる磁場（浮上磁場）はコロナ中で既存の磁場と接し、磁気リコネクションを起こしてフレアやジェット噴出などの爆発現象を引き起こします。図1の右は数値シミュレーション結果を3次元的に可視化したもので、太い線は磁力線、矢印はプラズマの流れの速度場、半透明の表面は磁場強度の等値面を表しています。 Ω の形をした浮上磁場の頂上で磁気リコネクションが起こり、パチンコ効果でプラズマが加速されている様子が分かります。

図2の右は、シミュレーション中で磁気リコネクションにより発生したジェット構造を可視化したものです。細長いジェットがいくつも発生していることが分かります。図2の左は実際に飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡により観測されたジェットですが、シミュレーションは観測されているジェットの微細構造をよく再現しています。シミュレーション結果の解析から、このような微細構造の形成は、浮上磁場中の磁気レイリーテイラー不安定と呼ばれる現象により磁気リコネクション領域に乱流が発生していることが原因であることが分かりました。浮上磁場以外でも、フレアなどのダイナミックに運動する現象においては同様のメカニズムが働いている可能性があり、磁気リコネクション領域における乱流発生とフレアの微細構造の起源の新しいモデルとして提唱しています。

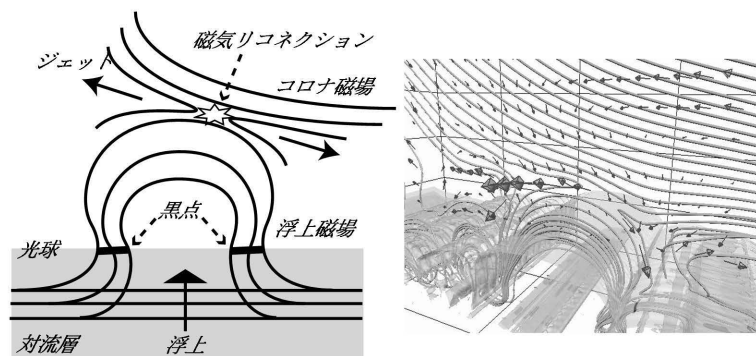


図1 左：浮上磁場領域の模式図。右：シミュレーション結果の3次的可視化。細い線は磁力線、グレーは低温高密度のガスの分布を示す。

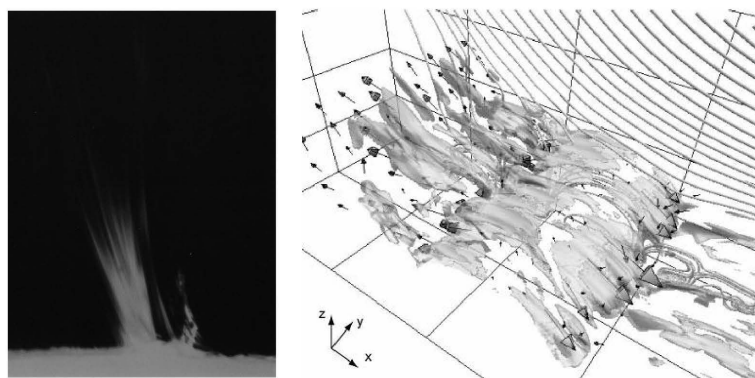


図2 左：太陽の縁で観測されたジェット。右：シミュレーション結果の3次的可視化。磁力線と速度の等値面を示す。磁気リコネクションにより発生したジェットの微細構造が分かる。

参考文献：

- Isobe, Takasaki, & Shibata, 2005, The Astrophysical Journal, 632, 1184
Isobe, Miyagoshi, Shibata & Yokoyama, 2005, Nature, 434, 478

(磯部洋明 記)