

太陽浮上磁場のレイリーテイラー不安定と磁気リコネクション

磯部洋明 (京都大学大学院理学研究科附属天文台; isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp)

1. 導入

太陽フレアは、コロナプラズマ中に蓄積された最大で 10^{32} erg もの磁気エネルギーが、数 10 秒から数 100 秒のタイムスケールで突発的に解放される、太陽系内最大の爆発現象である。フレアの発生は、高エネルギー放射線やフレアに付随するプラズマ雲と地球磁気圏の相互作用と通じて、人類の活動にも影響を与えている。また太陽と同様の磁氣的活動現象は、恒星、銀河、降着円盤など、あまねく天体で普遍的に起きていることが知られている。太陽フレアのメカニズムの解明は、他の天体の活動現象を理解する基礎を与えるという天文学的意義と、太陽地球環境擾乱の解明と予測という実用的意義をもっている。

太陽フレアの理論モデルとして有力なのは磁気リコネクションモデルである。磁気リコネクションとは、反平行成分をもつ磁力線の間で電流シート中で、有限の電気抵抗により磁場のプラズマへの凍結が破れ、磁場のトポロジーが変化することである。トポロジーの変化に伴い磁場がより低いエネルギー状態に遷移する際に、磁場のエネルギーがプラズマの熱エネルギー及び運動エネルギーに変換され、フレアが発生する。フレアで磁気リコネクションが起きているということは、1991 年に打ち上げられた日本の太陽観測衛星、“ようこう”を始めとする、人工衛星からの観測によりほぼ確立された（磁気リコネクションモデルと観測的証拠のレビューは、例えば Shibata 1999 など）。しかし、磁気リコネクションの物理そのものに分かっていないことが多い。

太陽コロナのような希薄で高温のプラズマは電気抵抗が非常に小さく、クーロン衝突による古典的な電気抵抗を用いて計算した太陽コロナの磁気レイノルズ数は約 10^{14} もの巨大な数になる。空間的に一様な電気抵抗を仮定した古典的な磁気リコネクションモデルでは、リコネクションの進行速度を表すリコネクションレート（アルフベン速度で規格化したリコネクション流入流の速度）が磁気レイノルズ数の $-1/2$ 乗で与えられる（Parker 1957）が、これではフレアの全エネルギーを解放するのに何年もかかってしまい、観測されるタイムスケールを説明できない。この問題を解決するため、Petschek (1964) は電気抵抗を局在化させ、磁気流体衝撃波を通じて磁場エネルギーを散逸させることにより、速いリコネクションを実現するモデルを提唱した。抵抗の局在化により速いリコネクションが実現されることは、その後の数値シミュレーションによる研究でも確かめられている（例えば Ugai 1992, Yokoyama & Shibata 1994 等）。抵抗の局在化の起源は未解決であるが、プラズマと波動の相互作用や不安定性など、プラズマの微視的な物理が関係しているはずである。しかし、太陽コロナに代表される多くの天体プラズマでは、プラズマの運動論的な効果が現れるミクロのスケールと、

現象を支配するマクロのスケールのギャップが非常に大きい。例えばイオンのラーモア半径は 10cm 程度であるのに対し、フレア全体のスケールは 1 万 km 以上もある。このスケール間のギャップをいかに埋めるかが、現在の磁気リコネクション理論の最も重要な問題の一つである。近年、ミクロとマクロをつなぐメカニズムとして、乱流やフラクタル的な構造を考えるアイディアがいくつか提唱されている（例えば Shibata & Tanuma 2001）。

2. 太陽浮上磁場領域の数値シミュレーション

太陽コロナで磁気リコネクションが最も頻繁に起きている領域は、太陽内部で作られた磁場が磁気浮力により表面に出現し、黒点を形成しつつある場所で、浮上磁場領域とよばれる。磁場が内部から浮上する際、上空に既存のコロナ磁場があると、浮上磁場とコロナ磁場の間で磁気リコネクションが起こり、フレアやジェットが発生する。図 1 は Yokoyama & Shibata (1996) による浮上磁場と磁気リコネクションの 2 次元磁気流体シミュレーションである。

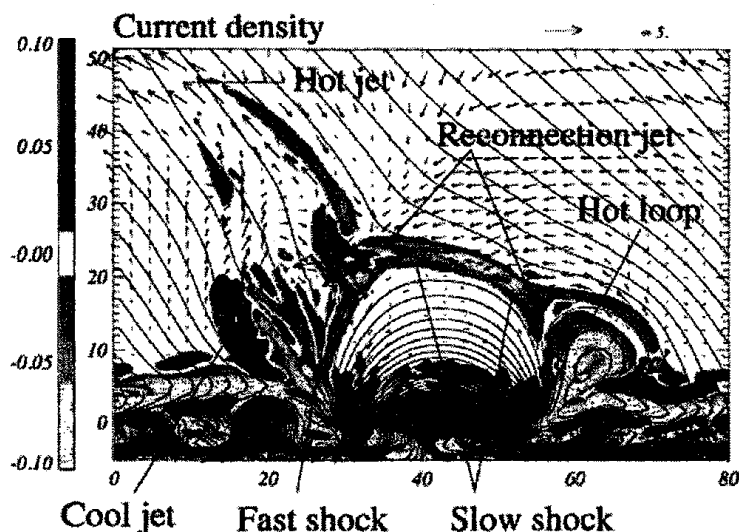


図 1 Yokoyama & Shibata (1996) による 2 次元磁気流体シミュレーション。実線は磁力線、グレイのコントアは電流密度、矢印は速度場を示す。

本研究で、我々は Yokoyama & Shibata (1996) を 3 次元に拡張したシミュレーションを行った。基礎方程式は 3 次元の圧縮性磁気流体方程式で、抵抗を局在化させるために、電流密度をガス密度で割った量 (ion-electron drift velocity) が、ある数値を超えた場所だけに強い電気抵抗が発生するような、異常抵抗モデルを採用している。初期条件は Yokoyama & Shibata (1996) とほぼ同じで、重力成層した大気を考え、初期の光球（表面）の下に磁気フラックスを置き、コロナに一樣な磁場をかける。光球下の磁気フラックスに摂動を与えると、磁気浮力不安定により図 1 にあるような Ω 型のループがコロナ中に浮上し、コロナ磁場とリコネクションしてフレアが発生する。以下では、図 1 で紙面に垂直方向の変化を許した 3 次元計算の結果を示す。なお計算には現時点で世界最高級の性能をもつスーパーコンピュータ、地球シミュレータを用いた。

3. 浮上磁場のレイリーテイラー不安定とパッチ状磁気リコネクション

図 2 はシミュレーション結果の 3 次元的可視化で、磁力線と、2 つの断面上の密度分布を示す。密度分布を注意深くみると、中央部の Ω 型の浮上磁場の頂上に密度の大きい層ができていることがわかる。これは浮上する磁場によって、コロナ中に持ち上げられた彩層の重いガスの層であり、重いガスを軽い磁場が支える構造になっているため、磁気レイリーテイラー不安定に対し不安定になっている。このため、磁場に沿ったフィラメント上の構造が自発的に発生する。

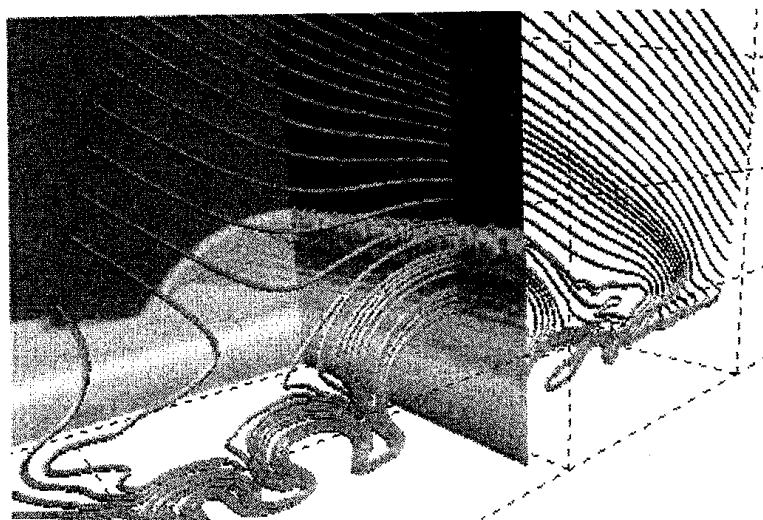


図 2

3 次元シミュレーションの結果。磁力線と断面の密度分布を示す。密度は色が明るい方が密度が高い。

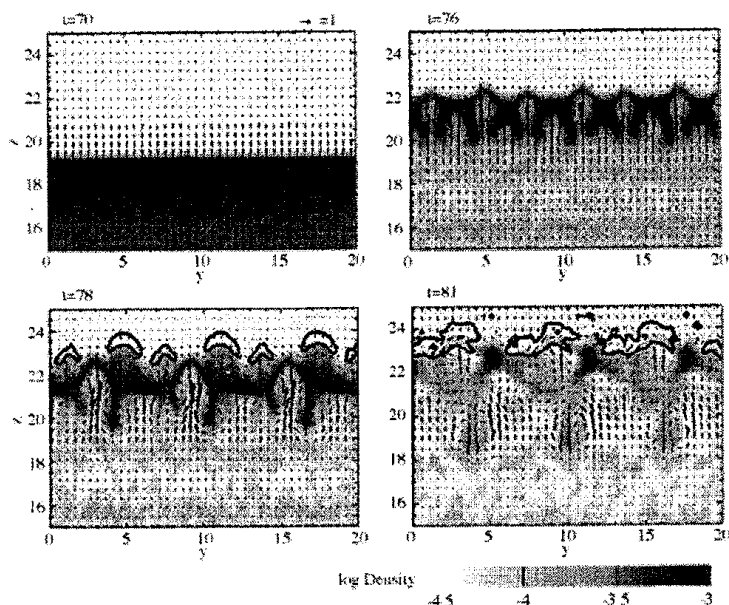


図 3

浮上磁場中央部分の密度（グレイコントラスト）と速度場（矢印）の時間発展。太い実線のコントラストは異常抵抗の分布を示す。磁場は紙面に垂直。

図 3 は浮上磁場中央部の断面の密度と速度場の時間発展を示す。磁場は紙面に垂直方向である。図中の実線は異常抵抗の分布を示す。異常抵抗は電流密度が大きくガス密度が小さい箇所で発生するが、レイリーテイラー不安定の上昇部分ではガス密度が低く、また上昇により

コロナ磁場との間の電流シートが圧縮をうけるので電流密度も高い。そのため異常抵抗は図3でもわかるように上昇部分で発生する。すると、リコネクションが異常抵抗の発生した箇所だけで局所的に発生し、リコネクション流入流がさらにレイリーテイラー不安定の非線形発展を促進し、それがさらに電流を強くして電気抵抗を大きくするという正のフィードバックがかかるため、一種の非線形不安定としてパッチ状のリコネクションが発達する。太陽フレアを高空間分解で観測すると、増光部分内部にさらに微細な構造が観測されるが、磁気レイリーテイラー不安定のようなインターチェンジ型の不安定に伴うパッチ状リコネクションは、観測される微細構造の起源の有力な候補となりうる。さらには、リコネクションする電流シートの中に、自発的に乱流やフラクタル構造を形成するメカニズムとしても有力である。

ここで示したようなレイリーテイラー型の不安定は、浮上磁場領域に限らず、地球磁気圏やトカマクプラズマでも、ダイナミックに進化し、実効的な加速度がかかっている系におけるリコネクションであれば、普遍的に起きている可能性がある。さらに解像度をあげたシミュレーションと、地上や磁気圏、太陽観測などの実験的な研究により、乱流、フラクタルリコネクションの物理の理解が進むことが今後期待される。

なおこの研究に関連して、磁気レイリーテイラー不安定による浮上磁場領域のフィラメント構造形成やコロナ加熱を説明する理論モデルを提唱した論文が、*Nature* 誌に発表されている (Isobe et al. 2005)。

参考文献

- Shibata, K. *Astrophysics and Space Science*, v. 264, p. 129 (1999)
- Parker, E. N. *Journal of Geophysical Research*, 62, 509 (1957)
- Petschek, H. E. in *Physics of Solar Flares*, AAS-NASA Symp. ed. W. N. Hess, p.425 (1964)
- Ugai, M. *Physics of Fluids B*, v.4, p.2953 (1992)
- Yokoyama, T. & Shibata, K. *Astrophysical Journal*, v.436, p.L197 (1994)
- Yokoyama, T. & Shibata, K. *Publication of Astronomical Society of Japan*, v.48, p.353 (1996)
- Shibata, K. & Tanuma, S. *Earth, Planets, and Space*, v.53, p.473 (2001)
- Isobe, H. Miyagoshi, T., Shibata, K. & Yokoyama, T. *Nature*, v.434, p.478 (2005)