

地球シミュレータを用いた太陽浮上磁場領域の大規模シミュレーション

磯部 洋明

〈東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: isobe@eps.s.u-tokyo.ac.jp

世界最高級の性能を誇る日本のスーパーコンピューター・地球シミュレータを用いた、太陽浮上磁場領域の大規模磁気流体シミュレーションの結果を紹介します。これまでにない高解像度のシミュレーション結果に基づき、浮上磁場領域で観測される筋状の構造が、磁気レイリー・テイラー不安定により自発的に形成されるという新しいモデルを提唱しました。また、磁気レイリー・テイラー不安定に伴いコロナ中に発生する電流シートによりコロナ加熱が非一様に起きること、磁気リコネクションがパッチ状に起きて、フレアやジェットの中に微細構造が発達することなど、観測を自然に説明できる新しい物理過程を発見することができました。

1. はじめに

表面の詳細な構造を空間分解して観測することができる太陽では、プラズマと磁場が複雑に相互作用するさまを、まるでアニメーションのように詳細に見ることができます。ダイナミックな活動現象を間近に見られることが太陽研究の魅力の一つですが、同時に太陽でわかったことはほかの天体、さらには実験室や地球磁気圏などさまざまな環境におけるプラズマの振舞いを理解する基礎にもなります。

太陽フレアやコロナ質量放出など、太陽活動現象の理解は90年代以降大きく進展しましたが、それには観測データの充実とともに磁気流体シミュレーションによる理論的研究の進展が大きな役割を果たしました^{1), 2)}。大型計算機による数値シミュレーションは、天文学研究において今や大

きな位置を占めており、天文月報でも2003年に特集が組まれています。計算機の能力の向上に伴い、今では3次元の磁気流体シミュレーションが当たり前のように行われるようになりました。ここでは、「地球シミュレータ」を用いた最新の研究成果を紹介します。

2. 地球シミュレータについて

地球シミュレータは横浜にある海洋研究開発機構・地球シミュレータセンターのベクトル並列型スーパーコンピューターです*1。2002年の完成時には、コンピューターの計算能力の指標の一つであるLinpackというテストでそれまで世界1位だったコンピューターの性能を5倍以上超える驚異的な性能をたたき出し、世界に衝撃を与えました。本研究のための計算が行われたのは2004年の夏でしたが、進化の速い計算機の世界において

*1 地球シミュレータセンターのホームページ

<http://www.es.jamstec.go.jp/>

地球シミュレータは Linpack のテストでも 2004 年の秋まで世界トップの座を保持していました。また地球シミュレータは実際の研究に使われているプログラムにおいて優れた性能を発揮することでも高い評価を得ており、実効性能では依然として世界最高級の性能を誇っています^{3), 4)}。

地球シミュレータの最大の使命は、大気、海洋、地球内部など、地球環境の変動の研究と予測にあります。地球シミュレータを使うことで画期的な成果を出すことが期待される分野にも計算資源が割り当てられています。天文分野の地球シミュレータ利用は、天文・宇宙分野地球シミュレータ利用懇談会が課題を取りまとめて地球シミュレータセンターに申請することになっています。幸いなことに平成 15 年から「宇宙の構造形成とダイナミクス（代表：松元亮治千葉大教授）」という課題名で 3 年続けて採択されており、太陽活動現象のほか、降着円盤、銀河進化などの大規模シミュレーションを行っています。

3. 浮上磁場とは

天文分野の地球シミュレータ利用者のうち、京大花山天文台と東大理・地球惑星専攻からなる太陽研究グループが地球シミュレータで行うべき課

題として決めたのは、「浮上磁場とコロナ磁場の間の磁気リコネクション」です。よく知られているように太陽の黒点とは強い磁場 (>1,000 ガウス) のある領域であり、高温 (100-1,000 万度) の大気であるコロナの加熱や、フレア、ジェット、コロナ質量放出などの爆発現象のエネルギー源は磁場のエネルギーです。磁場は太陽内部のダイナモ機構で作られ、磁気浮力^{*2}により表面に浮上します⁵⁾。光球面上で新たな磁場が浮き上がってきている領域は浮上磁場領域と呼ばれ、強いコロナ加熱と活発なフレア活動が起きていることが知られています^{6), 7)}。浮上磁場領域の物理過程の理解は、太陽活動現象のエネルギー蓄積、そして「何がフレアを引き起こすか」というトリガー問題を解決する鍵となるものであり、2006 年に打ち上げ予定の日本の太陽観測衛星、Solar-B の重要な観測ターゲットでもあります。それが、筆者らが地球シミュレータでのシミュレーション課題として浮上磁場を選択した一つの理由です。

図 1 に京大飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で撮られた浮上磁場領域の観測の例を示します。左は可視連続光像、右は同じ領域の H α 線像です。二つの黒点は光球の上に顔を出した磁力線の断面に相当し、したがってこの図からはわかりません

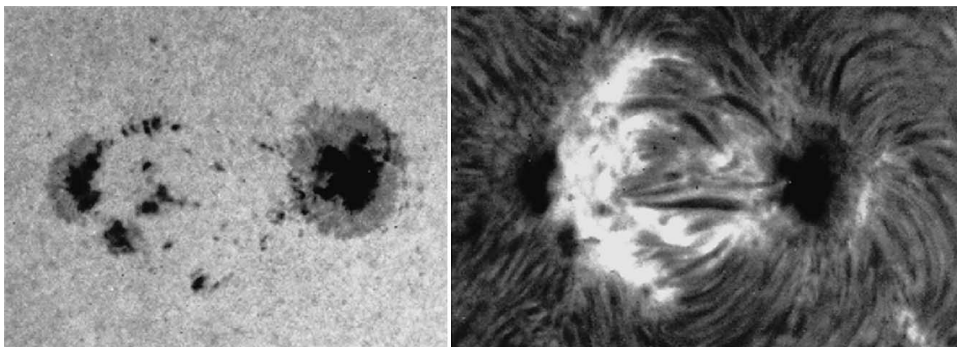


図 1 浮上磁場領域の可視連続光 (左) と水素 H α 線 (右) による像。京都大学大学院理学研究科附属天文台提供。

*2 磁場はプラズマに対して圧力を及ぼすため、圧力平衡を考慮して温度が一定だとすれば、磁場のあるプラズマは周囲の磁場のないプラズマより軽くなり、したがって浮力が働くことになります。

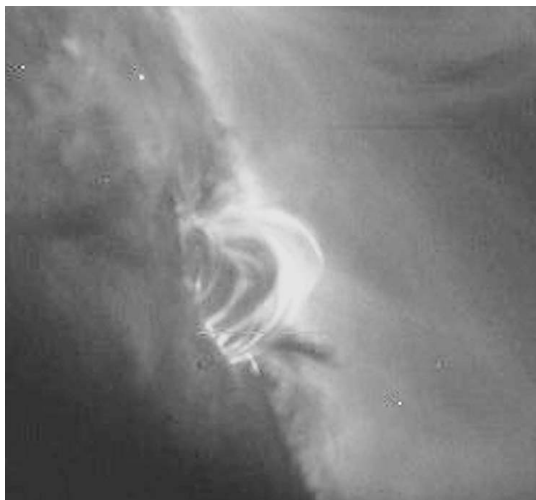


図2 TRACE 衛星による浮上磁場領域の極紫外線像.

が極性が異なります。H α 線は彩層で吸収を受けるため彩層の構造を反映した像が見えます。特徴的なのは二つの黒点をつなぐ筋状の構造です。このような彩層の筋状構造はアーチフィラメント⁸⁾と呼ばれ、黒点をつなぐ磁気ループに沿っていることは間違いありませんが、なぜ特定の磁力線にだけ H α を吸収する低温（約1万度）のプラズマがたまっているのかは明らかではありません。図2は米国の TRACE 衛星で撮像された極紫外線像です。太陽の縁近くの浮上磁場領域を観測しているため、ほぼ真上から見ている図1よりループ構造がよくわかります。注目して欲しいのは明るいループと暗いループが交互に存在していることです。明るいループは100万度程度の高温プラズマ、暗いループは1万度程度の低温プラズマに相当し、このことからコロナの加熱が空間的に一様ではなく、特定の磁力線が選択的に加熱を受けていることがわかります。またよく見るとループの足元からジェット状のプラズマの噴出も見えます。これは後で述べるように浮上してきた磁場と上空のコロナ磁場がリコネクションしていることを示唆しています^{9), 10)}。

4. 磁気レイリー・テイラー不安定によるフィラメント形成

まずはシミュレーションの概要を説明します。解いた方程式は3次元の磁気流体方程式（MHD方程式）で、電気抵抗のモデルとして異常抵抗モデルを採用しています。計算領域は直行座標系を

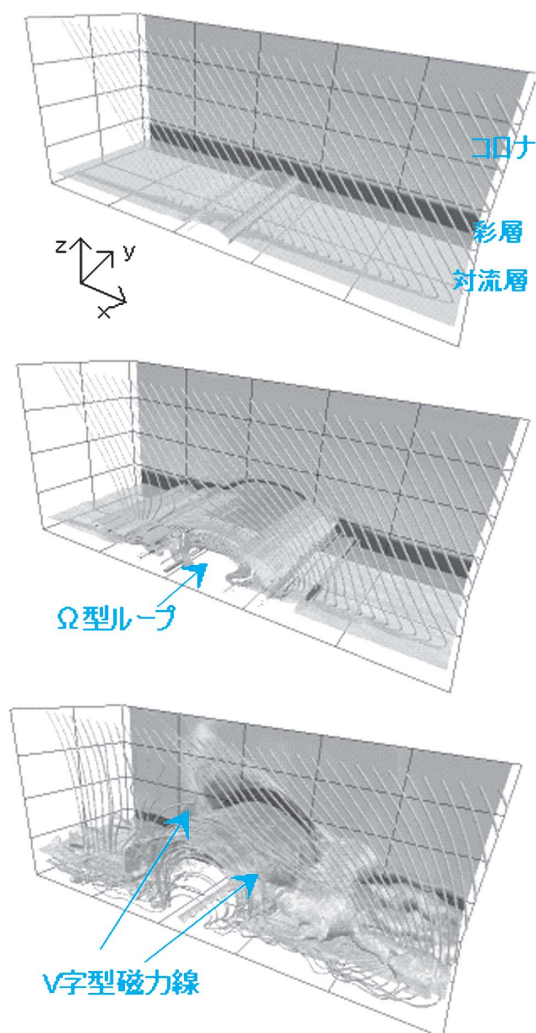


図3 シミュレーション結果の3次元的可視化。磁力線、磁場強度の等値面、側面の温度分布を示す。磁力線はある特定のx-z平面近くのものだけを描いてある。側面の温度分布は明るい領域ほど温度が高いことを示している。

用いた3次元のボックスで、対流層の上部からコロナまでを含んでいます。計算領域の大きさは、太陽の典型的パラメーターで計算すると約50,000 km×15,000 km×20,000 kmで、数十分程度の時間発展を追っています。Nature誌に掲載された論文¹¹⁾で使用した計算では、メッシュ数は800×400×620で50,000ステップ計算し、地球シミュレータの計算プロセッサ5,120個のうち160個を使用して約8時間かかりました。

図3はシミュレーション結果を3次的に可視化したもので、太い線は磁力線、半透明の面は磁場強度の等値面、側面のグレースケールは温度分布を表しています。初期状態は静水圧平衡にあり、対流不安定な温度勾配をもつ対流層、1万度程度で等温の光球・彩層、そして高温(約100万度)のコロナの3層からなります。初期の対流層には、図のx方向を向いたシート状の磁場があり、コロナにはそれと反対方向の向きをもった磁場が斜めにかかっています。磁気シートが浮上するメカニズムであるパーカー不安定性^{10), 12), 13)}を励起するため磁気シートの中央部に摂動を与えてあり、そのため磁気シートが少し盛り上がっているのが見えます。

その後の時間発展が図3の2番目と3番目で、磁気シートの中央部がコロナへ浮上、膨張し、Ω型のループを形成していることがわかります。3番目の図をよく見ると、V字型の磁力線ができています(V字型磁力線は図7を見るとよくわかります)。これは浮上してきたループと上空のコロナ磁場の磁気リコネクションによりできたもので、その結果、ループの頂上付近でプラ

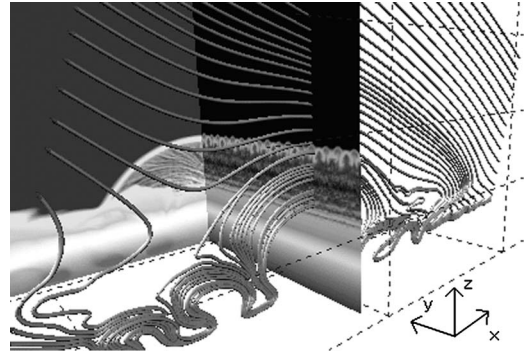


図4 磁力線と断面の密度分布. 明るい領域ほど密度が高い。(計算領域下部は除く)

ズマの加熱が起きていることが温度分布からも見て取れます。

さて、ここまでは以前の2次元シミュレーションでわかっていたことでした^{9), 10), 13)-15)}。しかし計算結果をよくみると、初期状態が2次元と同じにもかかわらず、y方向の構造、つまり3次元構造ができていたことがわかりました。それをよりはっきりと示しているのが図4です。図4は磁場が完全にコロナへ浮上した段階での磁力線の形状とプラズマ密度分布を示しています。二つの断面上のグレースケールで明るいほうが密度の大きい場所に対応します。側面にあたるx-z平面上の密度分布と磁力線の形状を比べてみると、浮上するΩ型ループの頂上にループ内部よりも密度の高い層ができていたことがわかります。このような密度の高い層ができる理由は、簡単に説明すると下から浮上してきたループが彩層の重いプラズマを希薄なコロナに持ち上げてきたためです^{*3}。

注目して欲しいのは中央部分のy-z平面の密度

*3 注意深い方は気づかれたかもしれませんが、実はこの説明は正確ではありません。ループの内部ももとは密度の高い場所にあった磁力線なので、ループの外側が内側より密度が高くなる理由はそれほど自明ではありません。浮上磁場の形状とプラズマ密度の進化を詳しく調べた結果、(1) 浮上磁場が全体としては膨張する一方、頂上部分は下から膨張してくる磁場とコロナの間で圧縮を受ける、(2) 浮上磁場中では内側の磁力線ほど曲率が大いため磁力線に沿った実効的な重力が強く、したがって内側ほど磁力線に沿ってガスがすべり落ちる効果が大い、などの複数の要因があることがわかりました¹⁶⁾。要因は複雑ですが、パラメーターを変えても同様の構造ができることはシミュレーションで確認しています。

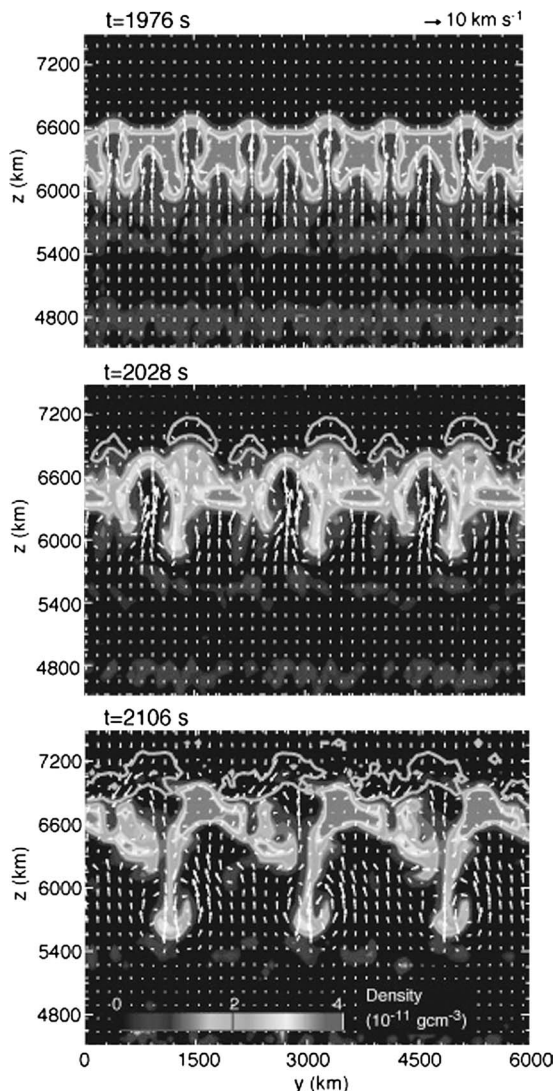


図5 浮上磁場頂上付近の密度の時間変化。矢印は y - z 平面内の速度場を示す。

分布で、 y 方向に細かい構造ができていくことがわかります。シミュレーション結果を解析した結果、このような構造が出現した原因は磁気レイリー・テイラー不安定であることがわかりまし

た。レイリー・テイラー不安定というのは、軽い流体の上に重い流体がのっているときに起きる不安定性で、天文分野では超新星爆発の際に起きることがよく知られています¹⁷⁾。磁場が重いプラズマを支えているために起きる同様の不安定性が磁気レイリー・テイラー不安定ですが、磁場による非等方性のため、磁場に沿った方向と磁場に垂直な方向で振舞いが異なります^{18), 19)}。この場合は波数ベクトルが磁場に垂直なインターチェンジモードと呼ばれるモードだけが不安定になって発達しているため、 y 方向にだけ細かい構造が発達しています*4。

図5は浮上磁場頂上付近の一部を拡大して、密度の時間発展を見たものです。色の明るい部分は浮上磁場頂上の密度の高い層にあたり、矢印は y - z 平面内の速度場を表していて、磁場は紙面にほぼ垂直です。インターチェンジモードは普通のレイリー・テイラー不安定と同じで波長が短いほうが線形成長率が大きいので、はじめは小さな構造が先に発達しますが、だんだん隣り合った構造が合体して大きな構造ができます。さらに、重くて下に沈みこんでいる部分では、周囲のプラズマとの速度差によりケルビン・ヘルムホルツ不安定が起きてマッシュルーム状の渦構造が発達しているのもわかります(図5の一番下)。非線型段階で大きな構造ができることや、ケルビン・ヘルムホルツ不安定により渦構造ができることは、2次元流体のレイリー・テイラー不安定と共通の性質です²⁰⁾。

図4の密度分布を見ると、磁力線とはほぼ平行な x - z 平面上では、 y - z 平面上で見られるような細かい構造が発達していないことがわかります。これは磁場に沿った方向(パーカー不安定)においては、波長の短いモードは磁場の張力により安定

*4 磁場浮上のメカニズムとして先にあげたパーカー不安定も磁気レイリー・テイラー不安定の一つで、波数ベクトルが磁場に平行なものをそう呼びます。パーカー不安定は波長の長いものしか不安定にならないので、浮上磁場の頂上ではインターチェンジモードだけが成長しています。

化されるためです。したがって結果としてできる構造は、磁力線に沿ったフィラメント構造ということになります。H α 線で観測されているようなフィラメント構造が、磁気レイリー・テイラー不安定により自発的に発生するということがこれで示されました。

実はこのシミュレーションでは初期条件、摂動ともy方向の変化は与えていませんでした。はじめは2次元シミュレーションと全く同じ結果を得ることを予想してテスト計算としてやってみたのですが、予想外に3次元構造が現れたのでよくよく調べてみると、コンピューターで計算する際に発生する、普段は無視できる程度の微小な数値ノイズが、磁気レイリー・テイラー不安定という物理的な不安定で発達していることを発見したというわけです。

5. 非一様なコロナ加熱

シミュレーションの結果から、コロナの加熱メカニズムについても面白いことがわかりました。図6は密度の等値面と磁力線、そしてグレース

ケールは断面上の電流分布を表しています。密度の等値面からは磁気レイリー・テイラー不安定によりアーチフィラメントによく似た細長いループ構造ができていることがわかります。断面の電流分布をよく見ると、フィラメントの側面に電流シートが形成されていることがわかります。これは重いプラズマが磁力線の間に入り込んでフィラメントを形成する際、磁場の变形とシアを引き起こすためです。

微細な電流シートの散逸がコロナを加熱するというモデル（いわゆるナノフレア説）は、磁気流体波のエネルギーで加熱するというモデル（いわゆるアルフベン波説）と並んで有力なコロナ加熱モデルです^{21), 22)}。筆者らのシミュレーションでわかったことは、単に磁気レイリー・テイラー不安定により電流シートが形成されるというだけではなく、冷たいフィラメントの側面にできた電流シートが散逸してコロナを加熱すれば、図3に見られるような熱いループと冷たいループが交互に存在することを自然に説明することができるということです。

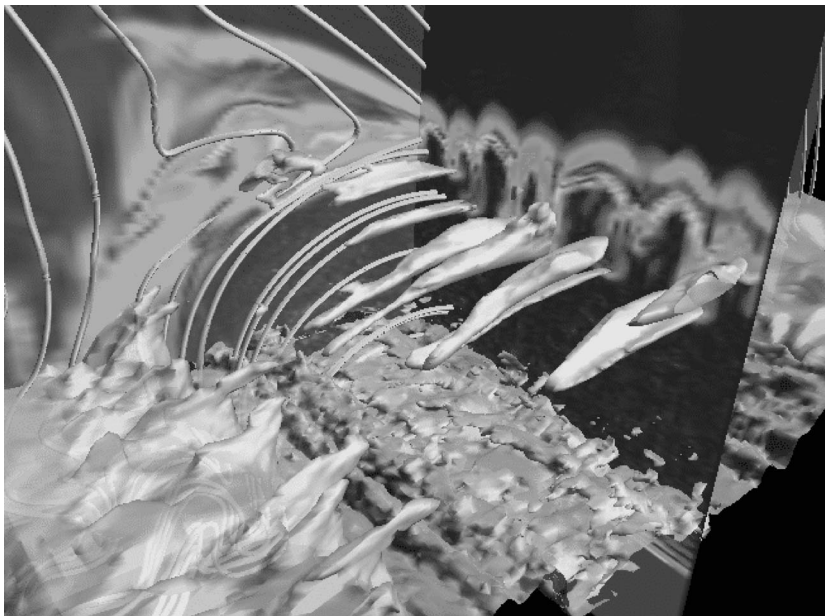


図6 磁力線，密度等値面，断面の電流分布。

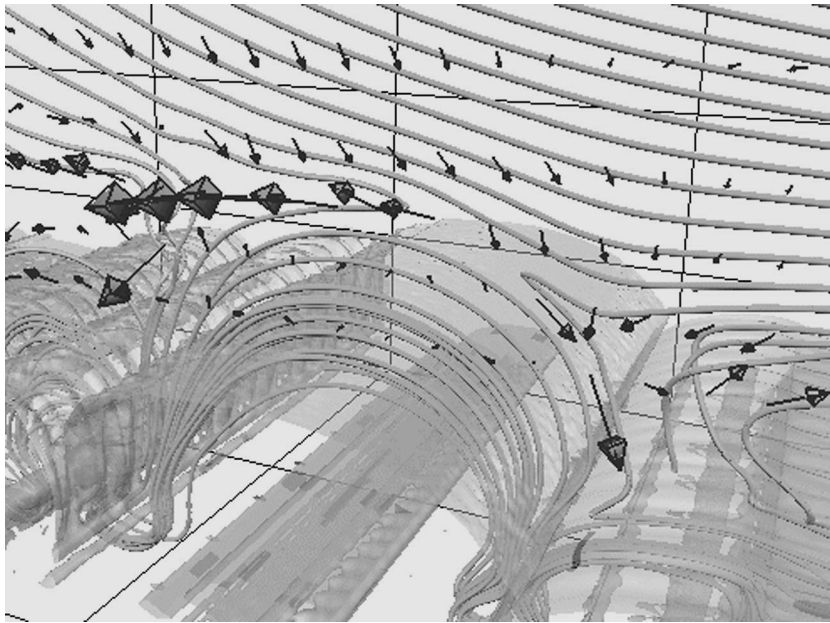


図7 磁気リコネクション近傍の磁力線と速度場（矢印），磁場等値面.

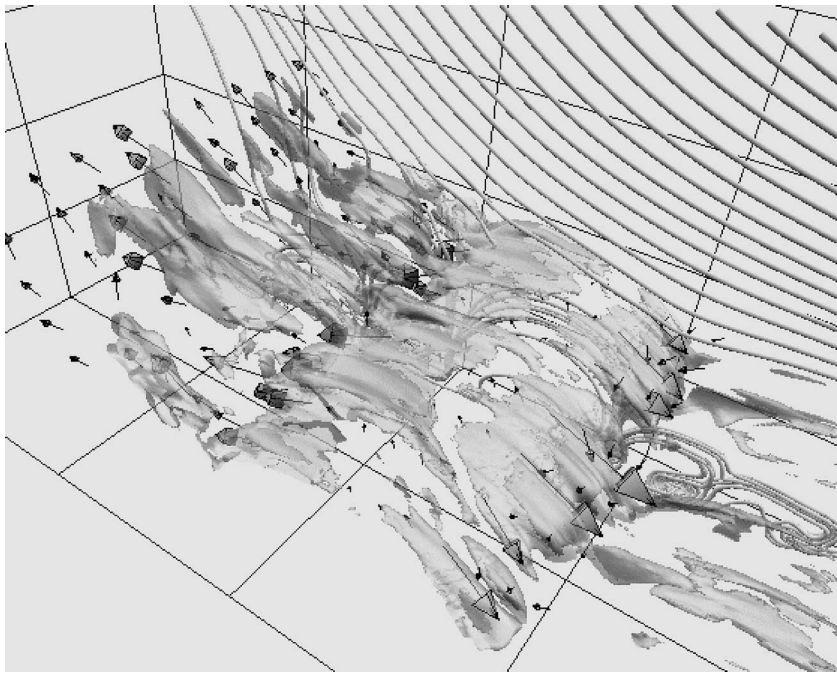


図8 パッチ状リコネクションにより発生したジェットの構造. 半透明の等値面は速度が 60 km/s, 不透明の等値面は速度が 120 km/s の面を示す. 矢印は速度場ベクトル, 太い曲線は磁力線.

6. パッチ状磁気リコネクション

光球から彩層，コロナへ浮上した磁場は，コロナ中の既存の磁場との磁気リコネクションによりフレアーやジェット噴出を起こします。磁気リコネクションとは，反対向きの磁力線が接する場所に電流が流れ，その電流が散逸し磁力線がつながり換わることで磁力線がパチンコのようにプラズマを加速・加熱する現象です。日本の太陽観測衛星ようこうの活躍により，太陽フレアーのエネルギー解放メカニズムが磁気リコネクションであることはほぼ確立しましたが，磁気リコネクションの理論そのものがまだ根本的な問題を抱えています。太陽フレアーや磁気リコネクションに関しては過去にも天文月報に記事が出ていますので詳しくはそちらを参照して下さい^{23), 24)}。

図7は磁気リコネクション近傍の磁力線と速度場，磁場等値面を示しています。Ω型の浮上磁場と上空のコロナ磁場の磁場がつながり換わってV字型の磁力線ができ，それがパチンコと同じ原理でプラズマを加速していることがわかります。紙面の都合で詳しくは説明できませんが，磁気レイリー・テイラー不安定とのカップリングにより，磁気リコネクションが電流シート中で一様ではなくパッチ状に局在化して起こり，その結果発生するジェットやフレアーにも微細構造が自発的に現れることがわかりました。図8にパッチ状リコネクションの結果できたジェットの構造を示します。

実際に観測されるフレアーやジェットは常に内部に微細な構造をもっていますが，シミュレーションで示されたような“パッチ状リコネクション”はこれらの微細構造の起源をごく自然に説明することができます。さらに，磁気リコネクションの理論において現在最大の問題は，異常抵抗が働くマイクロのスケール (<1 m) と現象のスケール (>1万 km) の間の膨大なスケール間ギャップをいかにして埋めるかということにあります。

この問題を解決する有力のアイデアとして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^{25), 26)}。レイリー・テイラー型の不安定は電流シート中に乱流を発生させるメカニズムとなりうるだけでなく，浮上磁場に限らずダイナミックに進化して実効的な加速度があるような系，例えば太陽フレアーや地球のサブストームにおける磁気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ります。

今のシミュレーションは浮上磁場全体を含んでいるため，高解像度と言えどもリコネクション領域の乱流まで分解するにはまだ足りません。そのため，リコネクション領域だけをクローズアップして高解像度シミュレーションを行い，乱流の発生とその磁気リコネクションへの影響を調べることを次の研究テーマとして現在検討しています。

謝 辞

この研究は京都大学大学院理学研究科附属天文台における筆者の博士論文研究の一部です。指導教官であった柴田一成教授，共同研究者である同天文台の宮腰剛広博士，東大理学系研究科の横山央明助教授に感謝します。また天文分野の地球シミュレータプロジェクトの代表である松元亮治千葉大教授，地球シミュレータセンター・連結階層アルゴリズム研究グループの草野完也グループリーダーには本稿の記述をチェックしていただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 柴田一成，福江 純，松元亮治，嶺重 慎，1999，活動する宇宙（裳華房）
- 2) 横山央明，2003，天文月報 96，530
- 3) Olikar L., et al., 2004, SC2004 High Performance Computing, Networking and Storage Conference
- 4) Olikar L., et al., 2005, Journal of the Earth Simulator, Vol. 3
- 5) Parker E. N., 1955, ApJ 121, 491
- 6) Kurokawa H., Wang, T., Ishii, T. T., 2002 ApJ 572, 598
- 7) Schmieder B., et al., 2004 ApJ 601, 530

- 8) Frazier E. N., 1972, Sol. Phys. 26, 130
- 9) 横山央明, 1996, 天文月報 89, 252
- 10) 宮腰剛広, 2003, 天文月報 96, 474
- 11) Isobe H., et al., 2005, Nature 434, 478
- 12) Parker E. N., 1966, ApJ 145, 811
- 13) Shibata K., et al., 1989, ApJ 345, 584
- 14) Yokoyama T., Shibata, K., 1995 Nature 375, 42
- 15) Miyagoshi T., Yokoyama T., 2003, ApJ 593, L133
- 16) Isobe H., et al., PASJ, 投稿中
- 17) Hachisu I., et al., 1990, ApJ 358, L57
- 18) Matsumoto et al., 1993, ApJ 414, 357
- 19) Tajima T., Shibata K., 1997, Plasma Astrophysics (Perseus Publishing, Massachusetts) p.156
- 20) Sharp D. H., 1984, Physica 12D, 3
- 21) 勝川行雄, 2004, 天文月報 97, 571
- 22) 鈴木 建, 2004, 天文月報 97, 276
- 23) 柴田一成, 1996, 天文月報 89, 60
- 24) 新田伸也, 2004, 天文月報 97, 107
- 25) Shibata K., Tanuma S., 2001, Earth, Planets and Space 53, 473
- 26) Lazarian A., Vishniac E. T., 1999, ApJ 517, 700

Large-Scale Magnetohydrodynamic Simulation of Solar Emerging Flux Using the Earth Simulator

Hiroaki ISOBE

Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: We present the results of three-dimensional MHD simulation of solar emerging flux. The simulation was carried out on the Earth Simulator with high resolution. We found that filamentary structure spontaneously arose in the emerging flux due to the magnetic Rayleigh-Taylor instability. Furthermore, filamentary current sheets were formed in the emerging flux, and magnetic reconnection occurred between the emerging flux and the pre-existing coronal field in a spatially intermittent way. These naturally explain the intermittent nature of coronal heating and the origin of fine structure in flares and jets.