

# 7. 研究協力者の成果

## 太陽浮上磁場領域の3次元磁気流体シミュレーション

磯部洋明

太陽フレア、コロナ質量放出など、太陽の磁氣的活動現象の源泉である磁場は、内部のダイナモ機構で生成され、磁気浮力で表面に浮上してくる。太陽表面で磁場が出現し、黒点が形成されつつある領域は浮上磁場領域と呼ばれ、強いコロナ加熱が起きている他、フレアやジェットなどの爆発現象が頻繁に観測される。浮上磁場はこれらの爆発現象に至るまでのエネルギー蓄積と、突発的なエネルギー解放を引き起こすトリガーの両面において重要な役割を果たすと考えられており、浮上磁場の物理過程の理解は、太陽、さらには他の天体の磁氣的活動現象を解明する上で鍵となるものである。本研究では、地球シミュレータ等の大型計算機を用いた3次元磁気流体シミュレーションにより、I. 浮上磁場領域のフィラメント構造の起源、及びII. 浮上磁場と対流の相互作用、の2点について特に詳しく調べた。

### I. 浮上磁場領域のフィラメント構造の起源

図1aは京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で撮像された、浮上磁場のH $\alpha$ 線像である。左下の黒点と右上のプラージュと呼ばれる明るい領域をつなぐ筋状の構造はアーチフィラメントとよばれ、異なる極性をつなぐ磁力線の構造を反映している。図1bはTRACE衛星により撮像された太陽リム付近の浮上磁場の極紫外線像で、明るい部分は100万度程度の高温プラズマ、暗い部分は1万度程度の低温プラズマを見ている。中央のループ構造は浮上してきた磁気ループで、明るいループと暗いループが交互に存在していることから、浮上磁場領域ではコロナ加熱が非一様に起きていることを示唆している。

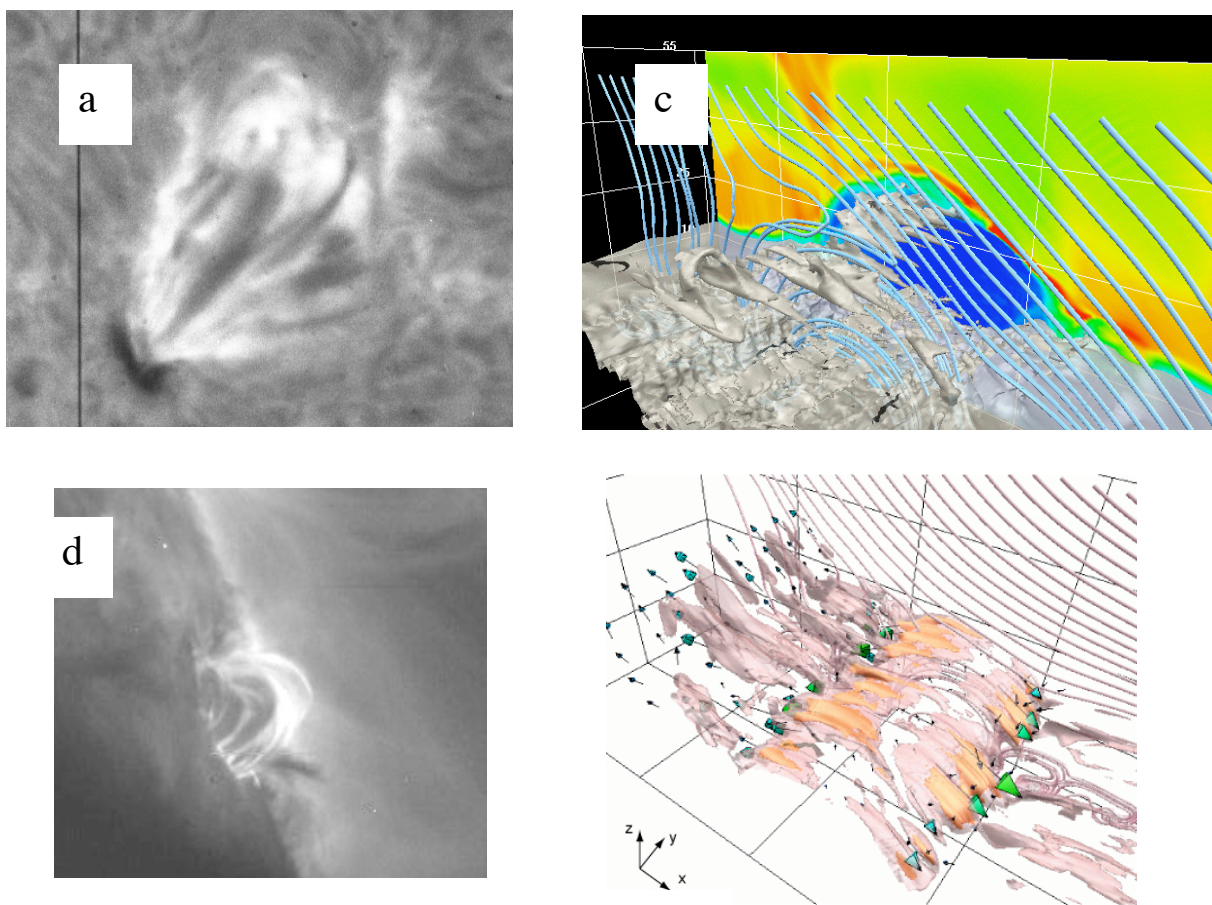


図1

図1cはシミュレーション結果の可視化で、グレーは密度の等値面、青い線は磁力線、側面のカラーは温度分布を示す。密度の等値面から、コロナ中で密度の濃い低温のガスが、磁力線に沿ったフィラメント状の構造を形成し、 $H\alpha$ で観測されるアーチフィラメントによく似た形状をしていることがわかる。シミュレーション結果の詳しい解析から、これらのフィラメント構造は、浮上磁場中で重い彩層のガスが磁場に支えられ、磁気レイリーテイラー不安定に対し不安定になったことにより形成されることが分かった。磁力線は浮上磁場の頂上でV型の構造をしているが、ここから浮上磁場が上空のコロナ磁場と磁気リコネクションを起こし、ガスが加速、加熱を受けていることが分かる。図1dは磁力線と速度場(矢印)、速度の等値面を示す。半透明は速度約60km/sの等値面、オレンジは速度約120km/sの等値面で、磁気リコネクションにより加速されたガスの流れを表す。浮上磁場が磁気レイリーテイラー不安定によりフィラメント構造を形成したのに伴い、磁気リコネクションも浮上磁場中で非一様に起きており、図1bに示されるような、非一様なコロナ加熱の起源をよく説明できる。このようにシミュレーション結果に基づき、浮上磁場領域のフィラメント構造形成と非一様なコロナ加熱を説明する新しい理論モデルを提唱することに成功した。

尚、この計算は世界最大級のスーパーコンピュータである地球シミュレータを用いて行われており、結果は2005年3月24日発売の英科学誌Natureに掲載された。

## II. 浮上磁場と対流の相互作用

I.のシミュレーションを含め、これまで行われている浮上磁場の数値シミュレーションでは、光球の下の対流運動の効果が考慮されていない。実際には、浮上磁場と対流の相互作用は、浮上磁場の構造形成や、コロナ加熱につながる波動の発生に重要な役割を果たすと考えられている。図2は光球でガスを冷却することにより対流が継続して発生している条件で、孤立した磁束管の浮上の様子をシミュレーションしたもので、磁場の等値面を示す。水平の断面は光球面に相当し、グレースケールで垂直方向速度場を表している。磁束管は、対流で変形を受けながらも、対流のない計算と同様にコロナへ浮上し、図左にみられるようなループ構造を形成するが、対流が数回転する程度の時間がたつと、図右のように磁場は乱流的な対流運動にばらばらに壊れてしまう。実際の観測では磁場のループ構造は長時間継続してみられるため、磁場がコヒーレントな構造を保つために必要な条件等を明らかにしていくことが今後の課題である。

### "Filamentary Structure on the Sun from the Magnetic Rayleigh-Taylor Instability"

Isobe, H., Miyagoshi, T., Shibata, K., and Yokoyama, T.,  
Nature, 434, 478 (2005)

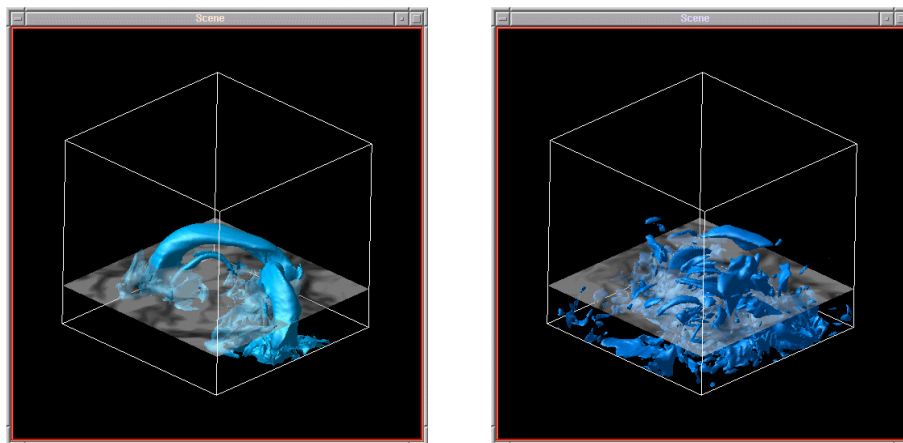


図2

# 日本学術振興会 日英共同研究 報告

犬塚修一郎（京大・理・物理2）

## 1. 英国訪問報告

本事業により、平成15年8月5日から8月20日（帰国は21日）まで英国を訪問した。8月6日から10日まではカーディフ大学のA. Whitworth教授を訪問し、星形成現象に関連するさまざまな問題について議論を行った。また、同大学の天文学教室にて星間媒質中での熱不安定性と分子雲形成に関するコロキウムを行った。8月11日～8月17日にはケンブリッジ大学DAMTPを訪問し、J. Stone教授と天体MHD現象についての議論を行った。特に、MHD数値計算法の種々の問題点について議論を深めた。また、MHD Slow Shockの不安定性について議論し、その問題の天体物理における重要性について研究を行った。8月18日～19日にはロンドンのクイーン・マリー・カレッジ応用数学科を訪問し J. Papaloizou教授及びR. Nelson助手と原始惑星系円盤でのMHD現象や希薄ガス中での熱不安定性などについて議論した。また、分子雲形成に関するセミナーを行った。全体で17日間の長期出張であり、移動が多くて忙しかったが、学問的にはたいへん有意義であった。

## 2. 主な研究成果

### (ア) 原始惑星系円盤における電離度の計算と、磁気回転不安定性の効果の研究

原始惑星系円盤は惑星形成の現場として非常に重要であるが、その進化を探る観測結果が（断片的にはあるが）集まってきた。しかし、惑星形成理論の骨格は直接観測による情報の無かった時代に構築されたものであるため、観測結果を考慮したものにはなっていない。その標準的惑星形成モデルはいくつかの内的矛盾を含んでおり、その解決のために盛んに理論的研究が進められている。特に重力不安定性による微惑星の形成の準備段階となる塵粒子の赤道面への沈殿現象は、乱流等の無い静かな円盤を仮定しているが、この仮定に矛盾する不安定性が避けられないことが分かって来た。この場合、重力不安定性を導く状態に至らないため、惑星の起源となる微惑星が形成できず、塵粒子が中心星に落下してしまうという困難が残っている。この問題について、矛盾を含む惑星形成モデルを抜本的に見直すため、理論の再検討を行った。特に、標準的惑星形成モデルでは磁場の効果をほとんど無視したものであるが、この根拠となる電離度の計算を再検討した。既に我々は差動回転円盤内で卓越する磁気回転不安定性による磁気乱流の飽和状態を詳しく研究している（佐野・犬塚・ターナー・ストーン *ApJ* 2004 等）が、この飽和状態における電離度の維持機構について新たなメカニズムを発見した。具体的には、磁気乱流の飽和状態におけるエネルギー散逸率の一部が僅かに存在する電子の一部の異常な熱化を導き、それが電離度の維持に有効に効くというメカニズムである。このメカニズムが有効に働けば、これまで信じられていたものとは異なり、原始惑星系円盤は磁気乱流状態にあり、惑星形成のシナリオを大きく変更を受ける可能性があるため、さらなる詳細な研究が必須である。この内容については現在、論文投稿準備中である（佐野・犬塚2005）。

### (イ) 熱的に不安定なガスにおける相転移境界面の不安定性の研究

星間ガスに普遍的に観測される超音速乱流の起源を理解することは星間媒質の物理を理解するだけでなく、その中で起こる星形成過程を理解する鍵となると思われる。この乱流の起源については、我々は希薄なガスの熱的不安定性に基づくモデルを提唱している（小山・犬塚2002等）。我々は、この熱不安定に駆動された乱流状態におけるエネルギー注入メカニズムの鍵となるプロセスは、低温相と中温相の境界相を横切るガスの流れがある場合の動的不安定性であるという視点に立ち、研究を進めている。この相転移境界相の不安定性は実は、Landau-Darriues 不安定性と呼ばれる燃焼波面の不安定性や磁気流体力学における遅い衝撃波の corrugation 不安定性とメカニズムの類似が見られる。この後者の不安定性については、（当時）ケンブリッジ大学DAMTPのJ. Stone教授が専門家であったため、非常に有益な議論を行うことができた。それに刺激され、現在は、相転移境界相の不安定性の線形解析を行っており、今回の日英協力事業の有益な成果だと考えている。

# 日本学術振興会日英共同研究報告

草野完也

広島大学大学院先端物質科学研究科

・海洋研究開発機構地球シミュレータセンター

## 1. 概要

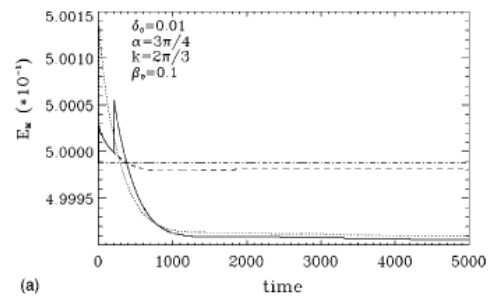
日本学術振興会日英共同研究の一環として、駆動型磁気リコネクションの非線形過程に関する理論共同研究をシェフィールド大学、及びマンチェスター工科大学と進めると共に、ケンブリッジ大学アイザックニュートン研究所で開かれた共同研究プログラム「Magnetic Reconnection Theory 2004」に参加し磁気リコネクションに関する共同研究と情報交換を実施した。

## 2. 駆動型磁気リコネクションに関する共同研究<sup>1</sup>

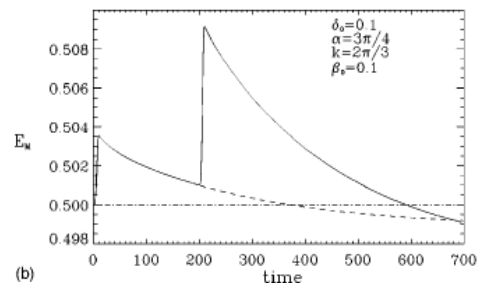
磁気リコネクションは磁場中に蓄積された自由エネルギーの解放機構として様々なプラズマシステムで重要な役割を果たすと考えられている。我々は、シェフィールド大学のDr.R.Jainおよびマンチェスター工科大学のDr.P.Browningと共に、リコネクションによるエネルギー解放に対する時間変動パルスの影響を、数値シミュレーションを用いて共同研究した。その結果、図1に示すように複数のパルスが電流シートに入射された場合、単一のパルスが入射される場合よりも効果的に電流シートに蓄えられた自由エネルギーを解放できることを明らかにした。これは、図2に描かれているように先行するパルスの入射によって電流シート内に局所的に強いシート状電流が形成されるため、電流シートがより不安定化しエネルギーを効果的に解放する結果であると理解することができる。この過程は電流シートによる太陽コロナ過熱の効率を高める新しい機構として期待される。

## 3. 太陽コロナのシグモイド形成機構<sup>2</sup>

太陽活動領域においてシグモイドと呼ばれるS-字状の構造がフレア発生の前に軟X線でしばしば観測されており、フレア前兆現象の一つであると考えられているが、その形成機構は未だに統一的に説明されていない。我々は磁気シア反転



(a)



(b)

図1: 電流シートにパルス擾乱を与えた場合の磁気エネルギー変化。2つのパルスを与えた場合、最終状態のエネルギーは初期状態よりも明確に低くなる。bは初期フェーズの拡大図。

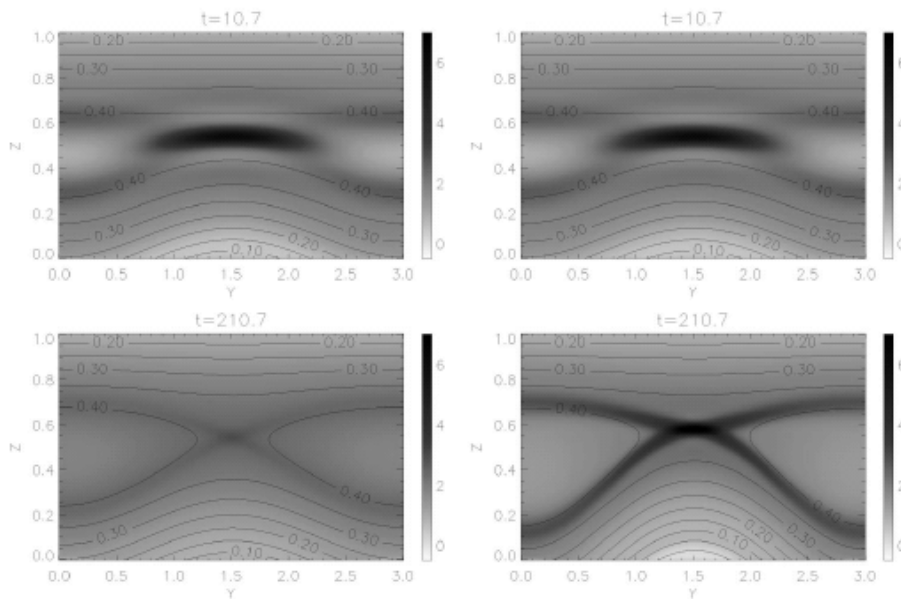


図 2 : パルスを受けた電流シートの磁束 (等高線) と電流密度 (グレースケール) の分布。左は単一パルス、右は 2 つのパルスを与えた場合の時間変化を示す。

に伴うテアリング不安定性がフレア発生の原因であるとする「シア反転フレアモデル」を提唱すると共に、このモデルに基づきシグモイド形成を電磁流体力学的緩和現象として説明することに成功した。

#### 4. 渡英報告

2004 年 8 月 1 日より 15 日まで渡英し、ケンブリッジ大学アイザックニュートン研究所で開かれた共同研究プログラム「Magnetic Reconnection Theory (MRT) 2004」に参加した。この間、太陽フレアの発現機構として我々が提唱する「磁気シアフレアモデル」をセミナーにて紹介すると共に、3 次元リコネクションの非線形ダイナミクスに関して St Andrews University の Prof. E. Priest, および Dr. Galsgaard, K らと議論を重ねた。その成果は Cambridge University Press より出版されるテキストとしてまとめられており、草野は太陽フレアの章を執筆担当した。

3

#### 参考文献

1. Jain, R., Browning, P., and Kusano, K. "Solar Coronal Heating by Forced Magnetic Reconnection: Multiple Reconnection Events" *Physics of Plasmas* (2005, January) 12, 012904
2. Kusano, K. "Simulation Study of the Formation Mechanism of Sigmoidal Structure in the Solar Corona" submitted to *The Astrophysical Journal*.
3. Kusano, K., Solar Flares in "Reconnection of Magnetic Fields: MHD and Collisionless Theory and Applications to the Sun and Magnetosphere" J. Birn and E. R. Priest, Editors (Cambridge University Press)

# リコネクション・ジェット内の多重衝撃波

田沼俊一

## 概要

太陽フレアで作られる高エネルギー電子がリコネクション・ジェットの内部衝撃波で加速されているのではないかと、我々は提案する。本研究では、その可能性を確かめるため、高空間分解のMHDシミュレーションを行い、リコネクション・ジェットに内部衝撃波ができる様子を調べた。その結果、散逸領域におけるセカンダリー・テアリング不安定性が発生し続けることで、非定常的なBurstyリコネクションが発生した。そして、磁気リコネクションジェット内部で、多重衝撃波が作られることが分かった。我々は、太陽フレア内でこのような多重衝撃波が作られ、そこで粒子加速が起こっているのではないかと提案する。

## イントロダクション-太陽フレアにおける粒子加速

太陽フレアは磁気リコネクションによって発生すると考えられている。その際、短時間のうちに磁気エネルギーが解放され、高温ガスや高エネルギー電子が作り出される。それらが放射するX線や $\gamma$ 線は、YohkohやRHESI衛星などによって観測されている。特に高エネルギー電子から出る硬X線源は、磁気ループの頂点(ループトップ)と足元に分布している(Masuda et al. 1994)。しかし、高エネルギー電子がどのようにして加速され、ループトップと足元閉じ込められるのかについては、いまだに分かっていない。例えば、Tsuneta & Naito (1998)は、ループトップのファストショックが斜め衝撃波になると、スローショックであらかじめ10-20 MKに加熱されたガスは、1次のフェルミ加速によって瞬時に加速可能であると提案した。しかし、いずれのモデルを使っても、すべての太陽フレアの高エネルギー電子の生成・振る舞いを完全に説明できるわけではない。

そこで我々は、ジェットがループトップのファストショックにたどり着く前に、ジェットの内部で衝撃波を作る(そして、その結果粒子加速が起こる)のではないかと考え(図1)、高分解の2次元MHDシミュレーションを行なって調べた。

## 数値シミュレーション

初期条件として $B_x = B_0 \tanh(y/1.0)$ ,  $B_z = 0$ ,  $p_g = p_0 + (B_0^2/8\pi)[1 - \tanh(y/1.0)^2]$ で与えられるハリス型の電流シートを作った。プラズマ $\beta$ (=ガス圧/磁気圧)は、 $\beta = 8\pi p_0/B_0^2 = 0.2$  ( $|y| \gg 1$ )。全圧(ガス圧+磁気圧)・温度・音速は全体で一様、ガス圧・密度・磁場強度は電流シートの外側で一様である。計算領域は $(L_x, L_y) = (208.0, 20.8)$ 、メッシュサイズは $(\Delta x, \Delta y) = (0.013, 0.013)$ (一様メッシュ)、メッシュ数は、 $(N_x, N_y) = (16000, 1600)$ とした。境界は、上下が対象境界、左右が周期境界である。本研究では、計算領域を広く取り、境界の影響を防いでいる。この計算では異常抵抗モデルを仮定し、ドリフト速度( $v_d = |j|/\rho$ )が閾値 $v_c$ を越えると、その部分に局所的に大きな電気抵抗が働くようにしてある。具体的には、 $\eta = \eta_0$  (if  $v_d < v_c$ ),  $\eta = \eta_0 + \alpha(v_d/v_c - 1)^2$  (if  $v_d \geq v_c$ ) という式で与え、 $\eta_{max} = 1$ を越えないようにした。パラメータは、 $\eta_0 = 0.005$ ,  $v_c = 20$ ,  $\alpha = 10$ である。ここで、 $\eta_0$

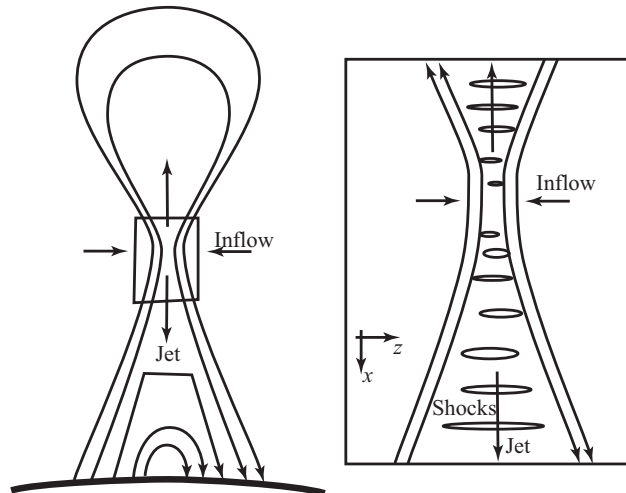


図1:太陽フレアのリコネクションジェットの内部衝撃波の模式図。

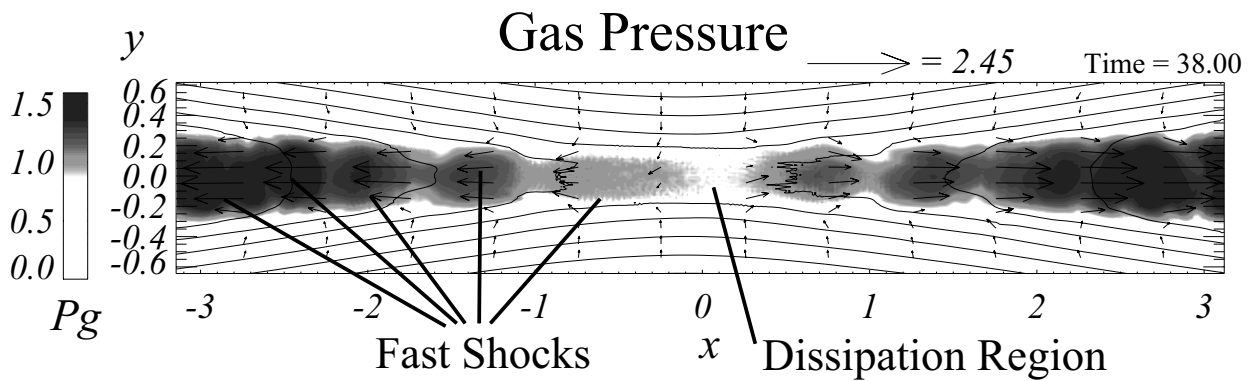


図 2: 散逸領域周辺のガス圧の分布図。

の値は数値誤差から来る数値的電気抵抗よりも大きく取っている。磁気レイノルズ数は、 $R_m = L_x V_A / \eta_0 \sim 10^5$  である。そして初期摂動として、電流シートの中心部分に短時間だけ電気抵抗を与えた。

その結果、電流シートは、(i) テアリング不安定性による電流シート thinning、(ii) その非線形段階における Sweet-Parker リコネクション、(iii) 細長くなった電流シート中でのセカンダリー・テアリング不安定性と、プラズモイドの発生・噴出、(iv) プラズモイド噴出直後の異常抵抗の励起と、Petschek リコネクションの開始、という順に変化した (Tanuma et al. 1999, 2001, 2003)。

そして、このとき、散逸領域中でセカンダリー・テアリング不安定性が発生し続けた。その結果、リコネクションは Bursty で非定常なものになり、リコネクションジェット中の多重衝撃波が発生した (図 1; Tanuma & Shibata 2005)。

## まとめと議論

本研究により、世界で初めて、リコネクションジェットの内部衝撃波を分解できた (Tanuma et al. 2001 などにも現れているが、初期摂動として電流シートの外側に点源爆発をひとつ置いている上、今回よりメッシュが粗い)。本研究では、こうしてジェット内部の多重衝撃波が作ることが明らかになった。また一部のパラメータではリコネクション・アウトフローがケルビンヘルムホルツ (KH) 不安定性的に振動することも分かった。このような KH 的振動は、これまでハイブリッドシミュレーション (Arzner & Scholer 2001) や high- $\beta$  での MHD シミュレーション (Biskamp et al. 1998) の結果に現れており、太陽フレア内部で実際に発生すれば、粒子加速をとって重要な現象となる。しかし、この KH 的振動の原因に関しては、今後詳しく調べる必要がある。またさらに他のパラメータを使った計算では、散逸領域で出来た大きなプラズモイドが電流シートに沿って飛ばされる際、その全面にバウショックを発生させることも分かった。この現象も今後詳しく調べる予定である。

こうして作られる衝撃波が実際の太陽でも作られているとすれば、太陽における粒子加速に効くはずである。そして、この結果は Tsuneta & Naito (1998) などの提案を補うものになる。また、最近 TRACE 衛星によって、磁気ループ上空からダウンフローが間欠的に降り注いでいる様子が観測されている。このような現象は、磁気ループ上空で発生したリコネクションによって、プラズモイドが間欠的に噴出されるために発生している可能性がある。また、このようなリコネクションジェットの内部衝撃波は、太陽と同様にリコネクションが起こっている地球磁気圏や銀河の粒子加速にも効くはずである。

## 参考文献

- Arzner, K. & Scholer, M. 2001, JGR, 106, 3827
- Biskamp, T., Schwarz, E., & Zeiler, A. 1988, Phys. Plasmas, 5, 2485
- Masuda, S. et al. 1994, Nature, 371, 495
- Tanuma, S., Yokoyama, T., Kudoh, T., Matsumoto, R., Shibata, K., & Makishima, K. 1999, PASJ, 51, 161
- Tanuma, S., Yokoyama, T., Kudoh, T., & Shibata, K. 2001, ApJ, 551, 312
- Tanuma, S., Yokoyama, T., Kudoh, T., & Shibata, K. 2003, 582, 215
- Tanuma, S. & Shibata, K. 2005, accepted by ApJ (astro-ph/0503005)
- Tsuneta, S. & Naito, T. 1998, ApJ, L67

本共同研究において、分担者「太陽大気における水平磁気シートの三次元磁気浮力不安定の非線形発展の三次元 MHD シミュレーション」という課題を行った。

太陽内部の対流層から表面に浮上する磁場は、黒点のように「孤立した磁力管」であることがよく知られているが、内部において「孤立した磁束管」がどのように形成されるかはあまりよくわかっていない。そこで本研究では磁気浮力不安定が働く磁気シートから磁場が浮上する MHD シミュレーションを行なった。

初期に磁場のある対流不安定なプラズマ中に磁氣的静水圧平衡にある水平磁気シートを考え、磁気シアアの有無の条件で、三次元 MHD 非線形シミュレーションを行った。計算の空間は3次元としデカルト座標系  $(x, y, z)$  を用い、 $x$  は太陽の緯度方向、 $y$  は経度方向、 $z$  は鉛直上方を向いているものとした。

その結果、初期に与える摂動をランダムまたは、 $x, y$  の水平方向に  $10 - 20H$  (ここで  $H$  は圧力スケールハイト) 程度を与えた場合、光球の圧力スケールハイトはコロナや対流層に比べ短いため、光球に浮上した磁場が、Parker mode ( $B \parallel k$ 、ここで  $k$  は波数ベクトル、 $B$  は磁場ベクトル) より、interchange mode ( $B \perp k$ ) の不安定が成長しやすいために、水平方向への膨張が急激に発生し、コロナまで膨張しない。また、磁気シアアがある場合は、線形の段階では短波長成分の成長がおさえられて、より大きな構造ができ、また非線形の段階でも非線形効果で大きな構造ができるが、磁気シアアの効果はあまり顕著ではない。

光球で膨張する磁気ループ中での鉛直方向の磁場分布、密度分布は静水圧平衡で決まる分布になる。すなわち2次元では  $B \propto z^{-1}$ ,  $\rho \propto z^{-4}$  であったが、3次元では  $B \propto \exp(-2z/H_r)$ ,  $\rho \propto \exp(-z/H_r)$  となっていた。ここで  $H_r$  は、磁場を考慮した静水圧平衡の場合の圧力スケールハイトで、 $(1 + 1/\beta)H$  で与えられる (ここで  $\beta$  はプラズマベータ)。このように上昇した磁場が光球中に膨張し、コロナ以下の領域が磁場で満たされた状態になることがわかった。

”Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of Nonlinear Magnetic Buoyancy Instability of the Flux Sheet with Magnetic Shear”, Satoshi Nozawa, submitted to PASJ (2005).

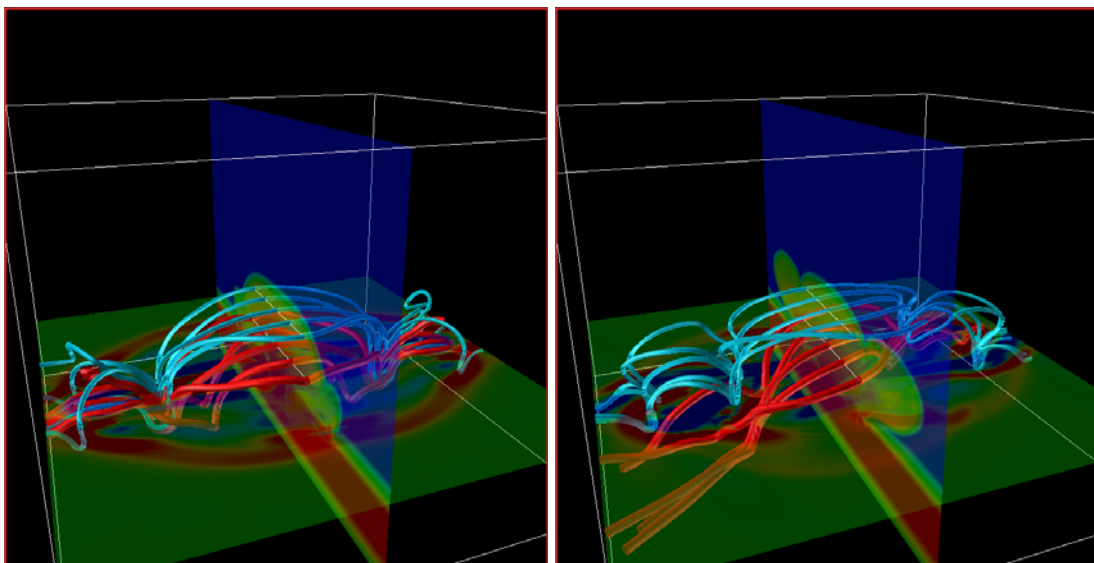


図1 左側が磁気シアアの無い場合、右側がある場合、両者とも光球中で磁場が水平に広がってしまう



本共同研究では降着円盤、銀河円盤等の差動回転円盤における磁気不安定性の時間発展と磁気乱流の生成、磁場強度と磁場構造の時間発展を大局的な 3 次元磁気流体シミュレーションによって調べてきた。

## 1 英国訪問報告

本事業により、2003 年 11 月 23 日から 11 月 30 日まで英国を訪問した。11 月 24 日～11 月 26 日にはケンブリッジ大学 DAMTP を訪問し、Weiss 教授、Proctor 教授と天体 MHD 現象についての議論を行った。また、G. Ogilvie 博士と降着円盤における磁気流体現象について議論した。DAMTP 宇宙流体グループのセミナーにおいて、松元と加藤成晃（当時は大学院生）が降着円盤と宇宙ジェットの MHD シミュレーション結果を紹介し、出席者と議論した。

2003 年 11 月 27 日～11 月 28 日に、松元は Leeds 大学を訪問した。同大学の Hughes 教授らと降着円盤の磁気乱流ダイナモ、差動回転する円筒状プラズマにおける磁気回転不安定性の成長について議論し、流体グループのセミナーで研究紹介を行った。また、同大学の S. Komissarov 博士と天体磁気圏の force-free シミュレーション、相対論的 MHD シミュレーションについて議論した。

## 2 研究成果

### (1) 輻射冷却が無視できるブラックホール降着円盤の時間発展

一般相対論的効果を擬ニュートンポテンシャルを用いて近似し、初期に弱いトロイダル磁場に貫かれた回転トーラスの時間発展を円筒座標系 3 次元の磁気流体コードを用いてシミュレートした。得られた降着流の構造は遠方で  $\beta = 0.01$ 、ブラックホール近傍で  $\beta = 0.1$  程度の移流優勢な 1 次元遷音速定常解と良く一致した (Machida et al. 2004, PASJ 56, 671)。赤道面での対称性を仮定しない計算も実施した。磁気乱流が十分発達した後のトロイダル磁場は  $r-z$  面内でセクター状の構造を示すことがわかった。

### (2) ブラックホール降着流における光学的に薄い状態から光学的に厚い状態への遷移

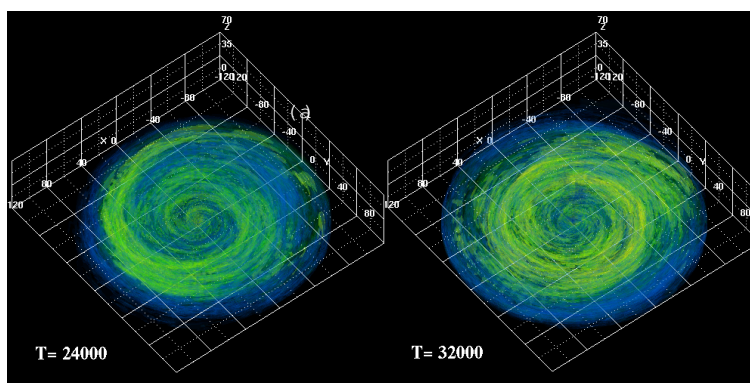


図 1: 状態遷移前（左）と遷移中（右）の  $\beta = P_{gas}/P_{mag}$  の分布。黄色い領域で  $\beta < 1$  になっている。

降着円盤にガスが溜まり密度が臨界値を超えると輻射冷却が卓越するようになり、光学的に厚い低温円盤への遷移が起きる。熱制動放射による輻射冷却を含めた 3 次元 MHD シミュレーションによってこの過程を追跡した。その結果、温度低下に伴って円盤が鉛直方向に収縮しても磁場は完全にはキャンセルせず、むしろトロイダル磁場強度が増加すること、他方ガス圧は温度低下によって減少し、円盤は磁気圧優勢 ( $\beta = P_{gas}/P_{mag} < 1$ ) な状態に移行することがわかった。図 1 に  $\beta$  の分布を示す。熱不安定性の成長に伴って low- $\beta$  領域が広がっていることがわかる。円盤は磁気圧によって支えられ

るため温度が下がっても鉛直方向には収縮しなくなり、光学的に薄い状態が維持される (Machida et al. 2005, submitted to ApJL)。円盤に蓄積された磁気エネルギーが解放されることによりジェット噴出など激しい活動性が期待できる。

(3) 降着円盤から噴出する磁気流体ジェットの散逸性磁気流体数値実験

鉛直方向の大局磁場に貫かれた降着円盤から磁気流体ジェットが噴出する過程を一般的な電気抵抗を含めた CIP-MOCCT 法にもとづく軸対称散逸性 MHD シミュレーションによって調べた。その結果、加速領域では磁気遠心力によってプラズマが加速されていること、系はほぼ定常解に一致する状態に至ることが示された (Kuwabara et al. 2005, ApJ, 621, 921)。

(4) 磁気タワージェットの形成

中心天体と降着円盤を結ぶ磁力線が円盤の回転によって捻られ、膨張し、回転軸方向にコリメートされた磁気タワーを形成する過程を軸対称 MHD シミュレーションによって明らかにした。鉛直方向のエネルギー輸送はポインティングフラックスが卓越すること、タワーの根元では磁気リコネクションが繰り返し発生してタワー中に高温プラズモイドが inject されることがわかった (Kato et al. 2004, ApJ 600, 338)。

(5) Force-free 磁気圏の時間発展

中心天体と降着円盤が磁気ループで結ばれている場合の時間発展を相対論的 force-free 方程式を HLL 法を用いて解くことによってシミュレートした。円盤が回転する場合、中心天体が回転する場合いずれにおいても磁気ループがほぼ光速で膨張することが示された (Asano et al. 2005, PASJ in press)。

(6) 銀河円盤の大局的 3 次元 MHD シミュレーション

銀河円盤の重力ポテンシャルとして軸対称な宮本ポテンシャルを採用し、この重力場中におかれたガストラスの時間発展を 3 次元 MHD シミュレーションによって調べた。初期にトーラスを弱いトロイダル磁場が貫いている場合について計算を行った結果、磁気回転不安定性の成長に伴って円盤磁場が増幅され  $\approx 10 \sim 20$  で飽和することがわかった。また、トロイダル方向の平均磁場が 10 回転程度のタイムスケールで方向を反転しながら振幅を増大させていくこと、赤道面付近と円盤コロナでトロイダル方向の平均磁場の向きが逆転していることなどが明らかになった (図 2)。以上のように、現象論的なダイナモパラメータを導入しない直接計算によって、円盤磁場が平均場ダイナモ理論から期待されるような時間発展をすることがわかった (Nishikori et al. 2005, submitted to ApJ)。

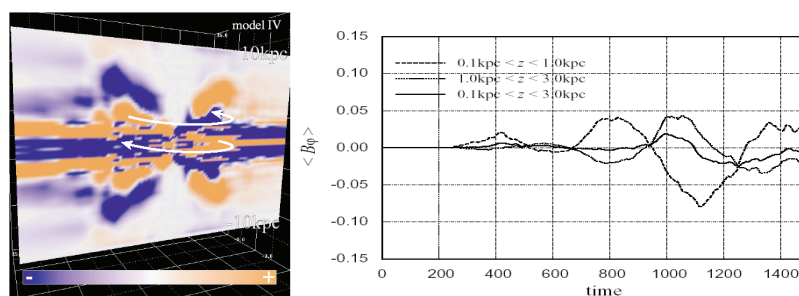


図 2: 左:  $\approx 1000$  のトーラスを初期条件とした場合の 50 億年後のトロイダル方向の平均磁場  $\langle B_\phi \rangle$  の分布 (赤: プラス、青: マイナス)。右: トロイダル方向に平均した  $\langle B_\phi \rangle$  の時間変化。時間の単位は約 400 万年。

(7) 熱伝導効果を含めた銀河団の磁気流体シミュレーション

チャンドラ X 線衛星によって発見された、銀河団中を運動するサブクラスター前面に形成される温度分布の不連続面 (コールドフロント) の形成機構を磁場方向に依存する非等方熱伝導の効果を含めた MHD シミュレーションによって調べた。その結果、フロントに沿う方向に強められた磁場を横切る熱伝導が抑制されることにより、コールドフロントが維持されることを示すことができた (Asai et al. 2004, ApJL 606, 105)。サブクラスターの運動に伴う磁場増幅、磁気リコネクション、磁気乱流生成などを調べる大局的な MHD シミュレーションにも着手した。

# 日本学術振興会日英共同研究報告書

宮腰剛広 (京都大学大学院理学研究科附属天文台)

太陽大気において、磁束管の浮上は黒点およびコロナ磁場構造の形成、磁気プラズマ爆発現象のトリガーなどの役割を果たしていると考えられており、太陽面での活動現象を理解する上で極めて重要なものである。本共同研究では、3次元磁気流体数値シミュレーションにより、これらの現象を調べた。

## 1 捻りの強さを变化させた場合の浮上磁束管の進化について

光球下からコロナへの捻れ磁束管の浮上の3次元数値シミュレーションは、我々の他にも世界で2-3グループほどが研究を行なってきたが、これまで行なわれた研究は全て、浮上領域で1-数回転以上するような非常に強い捻れを仮定して計算が行なわれていた。一方観測からは、捻れはそれよりもずっと弱い事が示唆されている。そこで、捻りが強い場合から0に至るまで、段階的に変化させてどのように磁束管の進化過程が変化するかを、世界で初めて3次元磁気流体数値シミュレーションにより調べた。

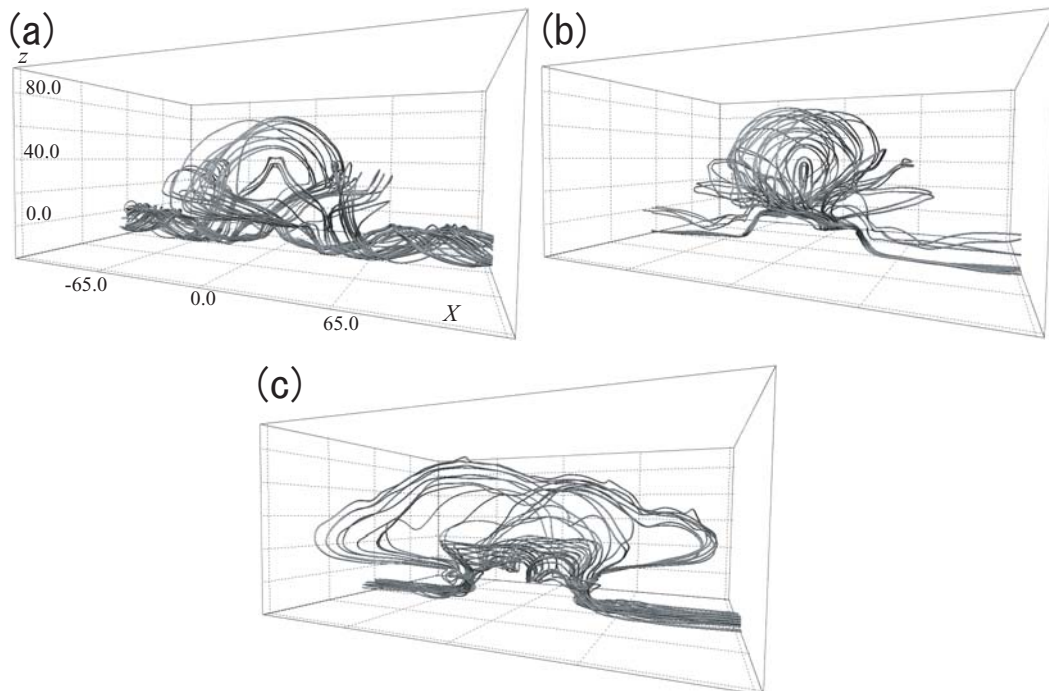


図 1: 浮上磁束管が形成するコロナ磁場構造の様子。(a) $q=0.1$ 、(b) $q=0.05$ 、(c) $q=0.005$  ( $q$ は捻りの強さを表すパラメータで、大きいほど捻れが強い) の場合を表す。

図1は、捻りの強さを变化させた場合のコロナ中磁場の3次元構造を表す。捻れが弱くなるにつれ、管がばらばらに分裂した構造を取る様子が分かる。

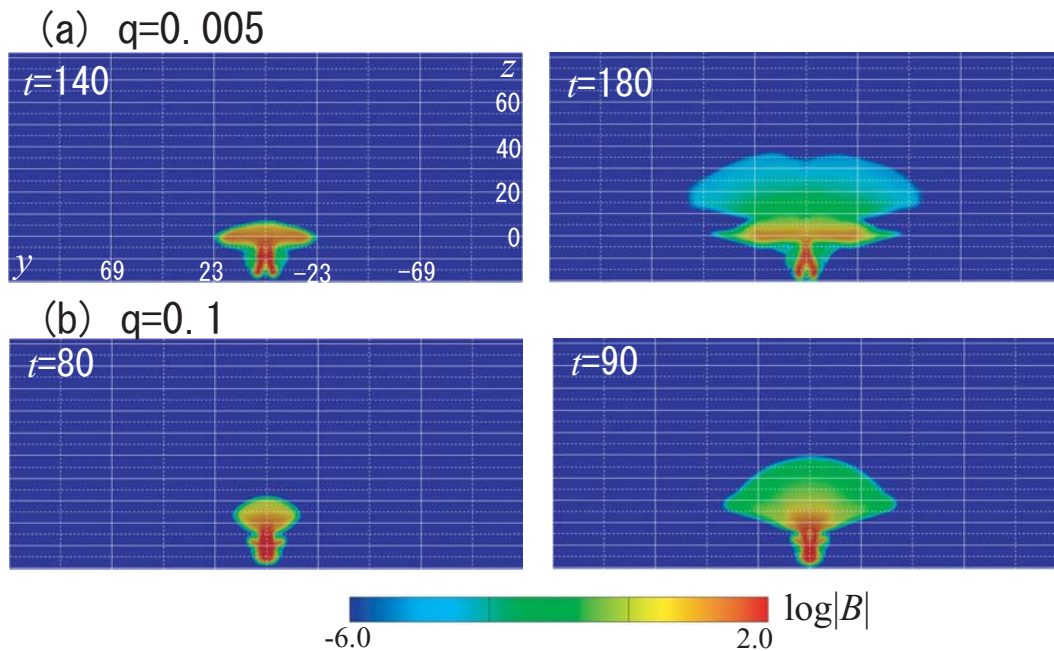


図2: 磁束管断面の磁場強度の時間発展の様子。(a) $q=0.005$ 、(b) $q=0.1$ の場合である。 $z=0$ が太陽表面に相当する。

図2は、管断面の磁場強度の時間発展を、2つの異なる捻れの強さの場合について見たものである。捻れが弱い場合、光球面で一旦管はばらばらになり浮上が止まるが、その後2回目の浮上開始が起こり、コロナへ向けて浮上していく事が分かる。一方捻れが強い場合は、そのような事は起こらず、管は一体的な構造を保ったまま浮上していく。我々のシミュレーション結果は、捻れが弱い場合ばらばらになった磁場が光球面でパーカー不安定の成長に必要な空間領域を満たした後に再浮上を開始する事、光球面付近で浮力と重力が釣り合う位に捻れが弱くなると顕著にばらばらになる事、ある捻れの強さ以下ではコロナ中磁気エネルギーはほぼ一定値を取る事等、これまで分かっていた多くの重要な過程を明らかにした。この結果を日本物理学会第60回年次大会(2005年3月)において発表を行なった。

## 2 浮上磁束管に伴う低温ジェット発生について

浮上磁束管はすでに先行して浮上している磁場と相互作用を起こし、さまざまな活動現象を引き起こすと考えられている。コロナで浮上磁場と既存磁場が磁気リコネクションを起こした場合、コロナでは低 $\beta$ なので磁気エネルギー解放により数千万度の高温プラズマが発生する事、さらにその熱エネルギーにより彩層蒸発ジェットが発生することが、我々の非等方熱伝導効果を考慮に入れた2.5次元MHD数値シミュレーションにより確かめら

れた。シミュレーション結果から導かれたジェット密度のスケーリング則は「ようこう」観測の X 線ジェットの特徴をうまく説明できる事が分かった (詳しくは、参考文献 [1][2] を参照)。

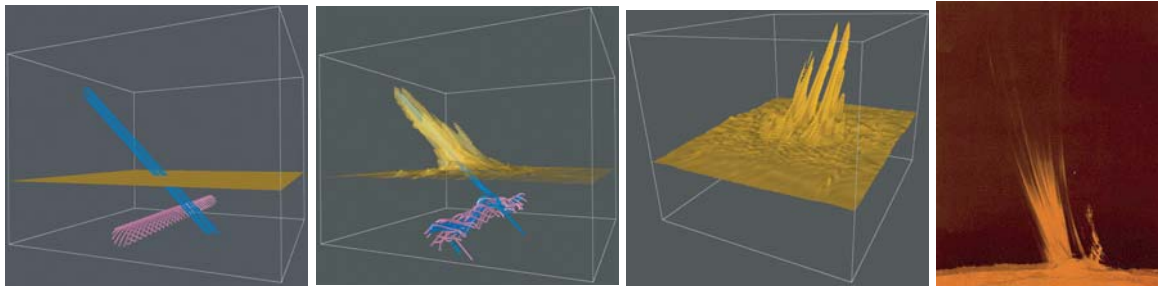


図 3: 左から順に、初期条件、時間発展後 (管は磁場、面は遷移層のプラズマを表す)、発生したジェットを別角度で見たもの、京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台で観測されたサージ ( $H\alpha$  線の観測) を表す。

一方、図 3 は、彩層下で捻れた浮上磁束管と既存磁場が相互作用を起こした時に発生する低温ジェットの 3 次元 MHD 数値シミュレーション結果である。コロナ上空に向かって磁力線に沿ってジェット流が発生している。浮上磁束管と既存磁場の一部が遷移層下で磁気リコネクションを起こしている。この相互作用により、波動が発生する。このうち Alfvén 波のモードは、一部が非線形効果により slow mode 圧縮波にモード変換される。これと最初から励起される slow mode の振幅は、伝播方向への密度減少により波が伝搬するにつれて振幅が増大する。その結果、コロナ手前でガス圧力が上昇し、これが遷移層の低温プラズマをコロナへ向けて噴出させている事が分かった。このような低温ジェットは、太陽大気中ではスピキュールもしくはサージとして観測されるであろうと考えられる。図 3(右) は、京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台で観測された、サージ現象である。我々のシミュレーション結果からは低温ジェットの速度はコロナ中で  $\sim 40\text{km/s}$  で、これは観測されているサージの速度とほぼ一致することが分かった。この結果を、日本天文学会 2004 年秋期年会、2005 年春季年会、国際会議 Magnetic Reconnection 2005 (2005 年 3 月) 等において発表を行なった。

## 参考文献

[1] Miyagoshi, T., and Yokoyama, T. 2003, ApJ 593, L133

[2] Miyagoshi, T., and Yokoyama, T. 2004, ApJ 614, 1042

2005.03.01 横山 央明

本共同研究において、報告者は「有限振幅擾乱影響下での磁気リコネクションの3次元シミュレーション」という課題に取り組んだ。

太陽フレアのエネルギー解放の物理機構が磁気リコネクションであることは、観測的には確立しつつある。しかし、磁気リコネクションのかなめともいべき拡散領域が、大きな磁気 Reynolds 数のもとでどのような構造をしているのかがまだ明らかになっていない。フレアのリコネクションでは、ミクロ過程が効くスケールと、ループのスケールとの中間のスケールに、磁気流体乱流で実効的に拡散が強くなっている拡散領域がおそらく存在すると考えられている。本研究では、磁気リコネクションが、乱流的な擾乱によってどのような影響を受けるのかを、磁気流体シミュレーションによって調べた。まずは、2次元シミュレーションをおこない、「有限振幅擾乱を与えてもリコネクションによるエネルギー解放はほとんど影響を受けない」という結果を得た。これはおそらく擾乱の自由度が2次元に限られているせいであると考えられる。これを3次元に拡張して、磁力線のからまりの効果をいれることで小さなスケールの電流シートをつくりやすくすれば、エネルギー解放がより効率よくなると期待される(図1)。予備的な結果によると、乱流擾乱をあたえたケースでもエネルギー解放率は非擾乱ケースに比べて大きくは変わらないことがわかった(図2)。この成果を、報告・議論するために、2004年8月8日から14日まで、イギリス Cambridge 大学で開催された研究集会「Magnetic Reconnection Theory」に参加した。また、日本天文学会年会(2003年秋季 愛媛大学、2003年春季 東北大学)にても報告した。

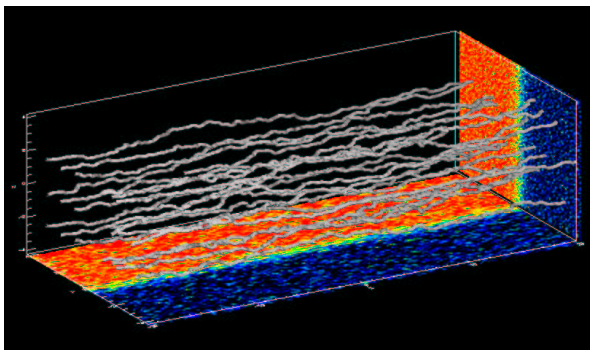


図1：シミュレーションの初期状態。曲線は磁力線。壁面に  $B_x$  の分布を描く。

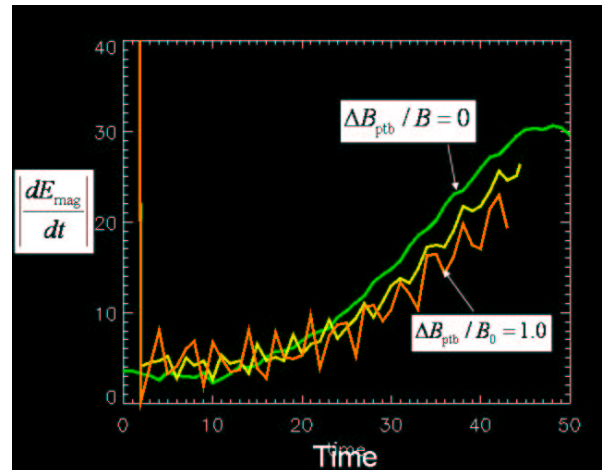


図2：エネルギー解放率(磁気エネルギーの減少率)の時間変化)