

太陽活動現象の磁気流体シミュレーション

横山 央明

〈東京大学理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

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

太陽活動現象のエネルギー源は磁場であり、コロナ中の電離プラズマと相互作用することで、爆発したり、運動したり、発光したりする。本稿では、最近の太陽分野での磁気流体シミュレーション研究の一部を紹介する。

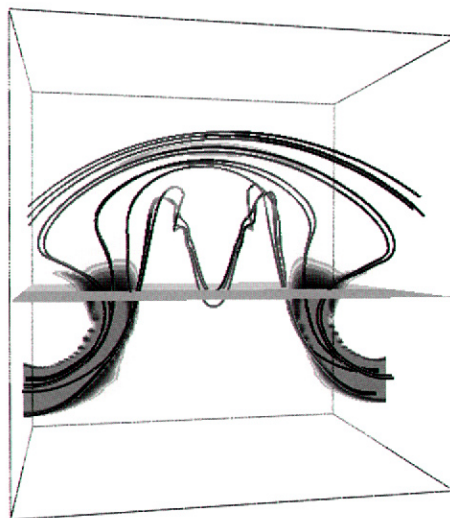
1. はじめに

太陽活動現象のエネルギー源は磁場であり、コロナ中の電離プラズマと相互作用することで、爆発したり、運動したり、発光したりする。このような現象は磁気流体力学 (MHD) で記述されるのであるが、その方程式は連立非線形偏微分方程式系であり、スーパーコンピュータ (スパコン) による数値シミュレーションがその力をもっとも発揮

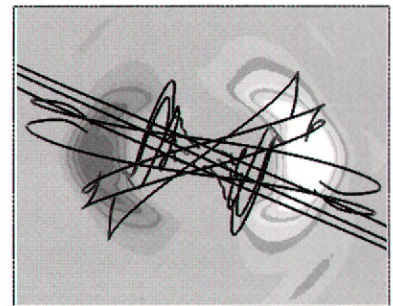
する領域である。本稿では、最近の太陽分野での MHD シミュレーション研究の一部を紹介する。

2. 最近の主な研究

太陽活動のエネルギー源である磁場は、対流層でダイナモ活動により増幅された後、磁気浮力によりコロナ中に浮かび上がってくる。図1は、その浮上を3次元シミュレーションで再現した結果を



Magnetic Lines of Field (3D view)



Magnetic Lines of Force & Bz on Photosphere (X-Y plane)

図1 太陽浮上磁場の3次元 MHD シミュレーションの結果¹⁾。線は磁力線を表している。左図は、下向きに重力がかかっている。水平な平面が太陽光球面を示していて、これよりも下の層は対流不安定。初期条件でこの対流不安定層に置いたねじれ磁束管が、磁気浮力で中心部だけが浮上して「Ω」字状の形状になる。右図は、上空から眺めた図で、濃淡は光球面での鉛直磁場強度の分布を示す (白がN極、黒がS極)。

示す¹⁾。ねじれた構造を内部にもった水平な磁束管が表面下に埋まっているのが初期状態である。この一部に擾乱を加えると、磁気浮力によりその部分だけが局所的に浮かび上がり、ギリシャ文字の「Ω」状の構造ができあがる。その足元の部分が黒点にやがて成長し、浮かび上がった部分がコロナ磁気ループとして太陽活動現象のエネルギー源となるのである。図のような3次元構造を再現するため

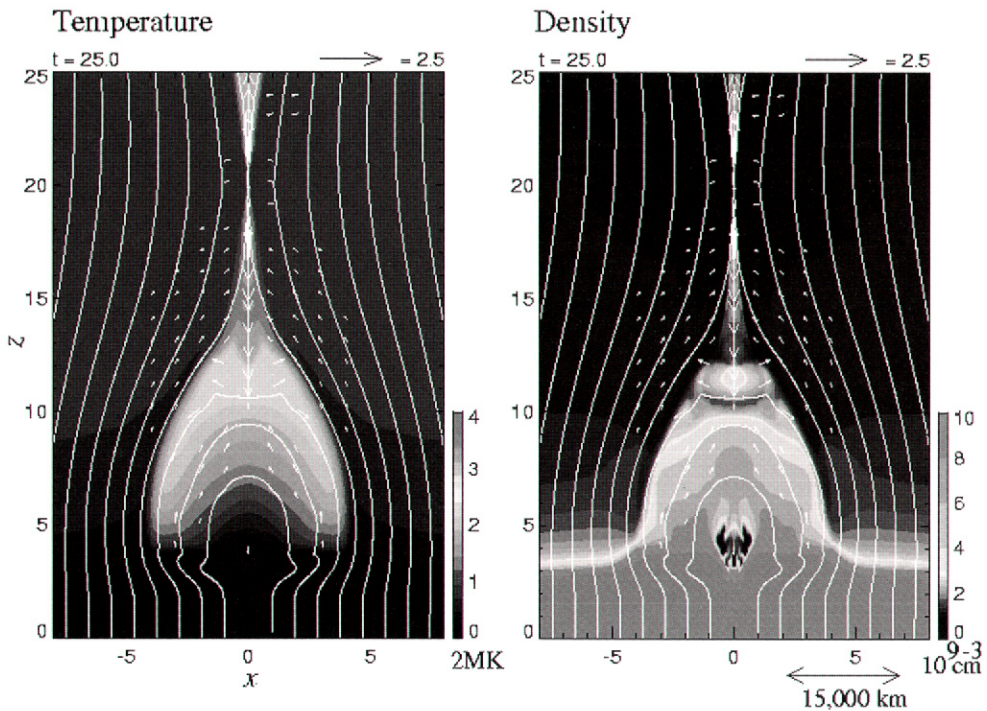


図2 フレアの2次元MHDシミュレーション²⁾。磁力線に沿った非線形非等方熱伝導効果が考慮されている。実線が磁力線で、濃淡は、温度(左)と密度(右)との分布を示す。矢印が速度分布。下端の高密度部分が太陽表面に近い彩層、それ以外がコロナ。初期に、左半分と右半分との磁場は互いに反対方向を向いていて、そのあいだに電流シートがある。座標 $(x, z) = (0, 20)$ 付近で磁気散逸を局所的に強めて磁気リコネクションを誘発した結果が示されている。

にグリッド点数 ($200 \times 200 \times 600$) を費やしており、スパコンの威力が発揮された計算例である。VPP5000の32PE並列計算で約5時間かかっている。

こうして浮び上がったコロナ磁気ループは、そのエネルギーを磁気リコネクションにより解放すると考えられている。向きの異なる磁力線どうしが接する個所で局所的に磁気散逸がおこり、その結果、磁力線がつながりかわることで、トポロジーが変化して、まわりのプラズマを巻き込んで運動を誘発したり、加熱現象をAlfven時間程度でひきおこす。図2は、磁気リコネクションによりおこるエネルギー解放のうち最大規模のものであるフレアについてシミュレーションした例である²⁾。この例では、太陽表面に対して垂直な互いに反対向きの磁力線を初期に置いておき、そのあいだで磁気リコネクション

が起こったあとの経過を追跡している。非等方非線型熱伝導の効果が考慮されていて、ともにフレアで重要な物理であるのに時間スケールが異なる、熱伝導と流れとを同時に解くための工夫がほどこされている。2次元の計算でグリッド数こそ少ないのであるが、この工夫のために重い(計算量が多い)計算になっており、スパコンを用いなければ結果を得ることができなかった。この問題は、フレアのシミュレーションが熱伝導なしのMHDで解かれはじめた直後1980年代ぐらいから、「解かねばならない」と言及されてきたのであるが、90年代後半にいたりスパコンの性能があがったおかげでようやく解くことができたのである。この計算については、計算時間の正確な記録が残っていないのであるが、初期条件が異なるが同じプログラムを使

った (500 × 550) グリッドでの計算が 16Gflops のマシンで約 20 時間で結果を出している。

上のふたつのシミュレーションではそれぞれ、エネルギー蓄積と解放とが個別に解かれていたが、現在ではその両方を同時に解いて、「エネルギー解放はどのようにトリガされるのか? どういう条件がととのえばフレアが開始するのか?」という問題を明らかにしようとする取り組みがすすみつつある。図 3 (=表紙・右下) は、コロナ中の磁気ループがつかってできた磁気アーケードの、磁気シア構造を徐々に変化させた結果、大規模なフレアがトリガされるという過程のシミュレーションである³⁾。アーケードの両足の境目の磁気的に中性な個所付近に、水平にシアする運動をかけて磁力線を変形している。その結果、複雑な磁気リコネクションがトリガされて、プラズマの放出と加熱がおこるといえるものである。この計算では、(256 × 256 × 1024) グリッド上でガス圧なし MHD 方程式 (運動が磁場のみによって誘起される) を解いている。核融合科学研究所の理論・シミュレーション研究センターのスパコン NEC/SX7 の 1 ノード (8CPU, 256Gflops, VPP5000 の 32PE 並列とほぼ同等の性能。) により 40 時間の計算である。

3. 将来への発展

前節で紹介した研究をふまえて、近い将来への発展とそのため必要な計算機資源とについてこの節では考えてみる。図 1 に示した浮上磁場の計算では、コロナ中には磁場が存在しないと仮定している。しかし実際はコロナは磁場が支配的な領域であり、浮上磁場との相互作用が期待される。コロナ磁場と浮上磁場との磁気リコネクションによりプラズマ加熱・流体加速が発生してフレア現象を起こすであろう。加熱・加速自体はすでに 2 次元で詳細な研究がなされているのであるが、3 次元にすることで新しくねじり Alfvén 波の発生を調べることができる。太陽物理の最重要課題のひとつに、コロナ加熱問題 (数千度の光球より外側

に存在する数百万度のコロナを加熱する機構を求める問題) があるが、リコネクションによって発生する Alfvén 波はコロナ加熱機構の有な候補になっている。その是非を決めるためには、Alfvén 波の総エネルギーとその周波数スペクトル分布とを調べなければならない。重力波の場合と同じで、波のエネルギーを正確に得るためには発生源から遠い個所で測定しなければならない。一方、高い周波数でのエネルギー分布を正しく得るためには、できるだけ高空間解像度が必要で、特にリコネクションを起こす磁気散逸領域近傍の分解が必要となる。実際の太陽と同じパラメータはとうてい無理 (必要な領域の広さは 1 万 km で、磁気散逸領域は 10 m 程度と信じられている) ではあるが、物理的な見通しを立てるためには 3 桁から 4 桁程度のダイナミックレンジがほしい。そのためには空間方向にそれぞれ現状の 10 倍程度ほしいのであるが現実的ではないので 3 倍ずつ (600 × 600 × 2000 グリッドを 60000 ステップ) でがまんしても必要な計算規模は 100 倍近くなる。仮に VPP5000 の 10 倍の性能のマシンを使っても 1 ケース走らせるのに約 50 時間かかる。メモリは 1 Tbyte あればよい。

図 3 (=表紙) にしめた計算では、実際にみられるコロナ磁場よりも単純な状況を考えているのであるが、このプロジェクトでは将来、観測的に得られた磁場分布とその時間変化とを境界条件として与えて、コロナ中での爆発現象を再現しようと計画している (「数値コロナ」プロジェクト)。エネルギー蓄積とその解放トリガとの研究は、いままとも盛り上がっている研究課題のひとつで、世界のいくつかのグループが並行してとりこんでいて競争になっている。この研究は、独自の理論的提案 (「ヘリシティ対消滅」モデル³⁾)、大規模シミュレーションによる肉付け、さらに観測データによる検証という点で他より抜きん出ていると考える。数年後にうちあげ予定の太陽観測衛星 Solar-B による、詳細ベクトル磁場観測との結合にむけて準備をと

とのえつつある。観測されたベクトル磁場を境界条件にした場合、活動領域をそれなりの解像度で含む必要がある。Solar-B 衛星と同等の分解能だと光球表面を (2048 × 2048) グリッドで、さらに鉛直方向を先の計算と同様にすると 1024 グリッドが必要になる。計算規模が 64 倍になり VPP5000 で 2560 時間 (!) ということになる。これはいささか現実的でないので光球面のグリッドを (1024 × 1024) とするとそれでも 16 倍で 640 時間になる。10 倍の速度の計算機でも 64 時間かかるが、重要な課題であることを考慮すればそのぐらいの価値はあるであろう。

最後の例として、「乱流リコネクション」の話題をとりあげる。図 2 で示したようなフレアのリコネクションにおいては、磁力線がつながりかわるために磁気散逸機構がはたしている。もしプラズマミクロ機構がその散逸を担っているとするならばその空間スケールはイオン Larmor 半径程度で、太陽の場合 10 m しかない。フレアの 1 万 km に対してあまりにも小さい。わずかに 10 m で起きていることが 1 万 km の現象を安定に制御しているとは信じられないので、その中間のスケールで乱流 (MHD 乱流) が起きていて、その乱流により実効的な散逸が起きている、という説がある⁴⁾。これを数値シミュレーションで調べる必要があるが、ことはそう容易ではない。本質的に 3 次元の現象であるし、ダイナミックレンジが最低 4 桁程度は必要といわれている。こちらは現在世界最高速のスパコンである地球シミュレータを利用してさえ現状では不可能であろう。しかし、この問題の解決なしにリコネクションの最終解決はないので、なにごしかの努力が必要であり、現状得られる計算機の能力を最大限に使ってこの課題にいとみづづける必要があると考える。

4. 国立天文台への期待

ここで紹介した 3 つの課題は、太陽物理分野でのシミュレーション研究のごく一部にすぎない。ほ

かにも多数のよい研究があるが紙面の都合で今回は見送らせていただいた。太陽物理分野では、わが国の理論・シミュレーション研究は質・量ともに世界のトップレベルにあるとあってよい。その背景には、ようこう・野辺山電波ヘリオグラフや地上可視光望遠鏡群などの、同じくトップレベルの観測があるが、それとともに忘れてはならないのが、国立天文台が提供するスパコンの計算機資源である。近い将来に打ち上がる Solar-B とともに、わが国の太陽物理研究を最先端でありつづけさせるためにも国立天文台のスパコンにかかる期待は大きい。天文学者が占有でき、かつ、世界最大規模の計算機を、これからも導入していただくことを強く期待している。

画像提供してくださった、宮腰剛広 (京都大学)・草野完也 (広島大学) 両氏に感謝します。

参考文献

- 1) Miyagoshi T., 2003, 総合研究大学院大学学位論文
- 2) Yokoyama T., Shibata, K., 2001, ApJ, 549, 1160
- 3) Kusano K., Miike H., Maeshiro T., Yokoyama T., Sakurai T., 2003, ApJ, submitted
- 4) たとえば Tajima T., Shibata K., 1997, Plasma Astrophysics (Addison-Wesley: Reading)

Magnetohydrodynamic Simulations of Dynamic Phenomena in the Solar Atmosphere

T. YOKOYAMA

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

Abstract: The magnetic field is the energy source of solar atmospheric activities. The interaction between the magnetic fields and the ionized plasma cause various dynamic phenomena such as explosions, brightenings, bulk motions and so on. Several topics are picked up from recent studies by MHD simulations in the solar physics.