

太陽磁気活動の大規模シミュレーション



1. 研究目的

本研究の目的は、太陽表面に代表される天体大気中での輻射磁気流体力学大規模計算への適用をめざし、東京大学情報基盤センターFX10(と理化学研究所「京」と)の並列化性能を引き出せるようなコードを開発すること、またあわせて科学計算を実施すること、が大きな柱である。数値計算技術面からの目的は、輻射輸送スキームの効率化をめざす。開発したコードを使って目指す科学的には、太陽彩層における、プラズマ・磁場・輻射が織りなす物理現象について数値シミュレーションを用いて解明し、Solar-C 衛星観測計画のための理論的裏付けを準備することである。

具体的には、非局所熱力学平衡状態 (non local thermodynamic equilibrium 以後NLTE と記述) の輻射輸送を含む多次元磁気流体シミュレーションコードを構築し、(1) 彩層中の波動生成・伝播・熱化過程や、(2) スピキュールと呼ばれるジェット現象の解明、(3) 彩層加熱の問題、(4) 太陽大気中でのさまざまな現象(プロミネンス形成・磁気リコネクションなど)への応用に取り組む。このような輻射磁気流体コードの開発は国内では初めてであり、世界的にみてもほとんどない。本研究では、最新の数値流体力学の知見を使って、最適化されたコードを開発し、従来のものより大規模な計算を実施して、実観測の解釈に役立てる。

2. 磁場のソレノイダル条件を満たす高解像度磁気流体コードの開発

磁気流体方程式では磁場はソレノイダル条件(磁場ベクトルの発散がゼロという条件)を拘束条件として満たしながら計算することが必須となる。もしこの条件が満たされない場合、運動方程式及びエネルギー方程式において磁場の発散由来の人工的な付加項が発生し、非現実的な力や加熱が発生する。特にこの影響は磁気エネルギーがプラズマの内部エネルギーより強いコロナなどの太陽大気中において強く、その計算においては磁場のソレノイダル条件を満たすことは必須である。

磁場のソレノイダル条件を満たす方法として現在まで提案されている方法は、(1) コロケートメッシュと中央差分法の組み合わせによる方法、(2) 微小なソレノイダル条件の破れを許し逐次除去する方法、(3) スタッガードメッシュによる方法 (Constrained Transport法, CT法) の3つである。しかし、(1)は偶数奇数デカップリングが避けがたく、(2)は磁気エネルギーが支配的な太陽大気中では微小な誤差でも大きいエラーとなるため適当でない。よって我々は有限差分法、有限体積法のどちらにも適用でき、丸め誤差まで磁気ソレノイダル条件を満たす事のできる(3)のCT法が太陽大気計算に最適だと考える。

太陽大気、特に太陽表面対流からコロナにかけては、非常に乱流的な太陽対流層から、対流に奮起された衝撃波に満たされた彩層、アルフベン波の非線形相互作用による乱流が発達したコロナまで、いずれも高い空間解像度を必要とする領域である。そのため、スキームの高次精度化は必須である。また、マッハ数が高く不連続が起こりやすい彩層ではスキームの単調性が重要な性質になる。よって、本研究ではCT法と高次精度近似リーマン解法に基づく有限体積磁気流体コードを開発した。

現行の有限体積CT法による磁気流体スキームのほとんどは2次精度に限られる。ほぼ唯一の例外がBalsaraら(2009)によるRIEMANコードであるが、それも最高で4次精度であった。CT法の最大の問題は、セル境界面平均で定義された磁場からどのようにセル平均磁場やセル境界面の数値フラックスを求めるかという点である。BalsaraらはCWENOに基づく多次元的リコンストラクションを用いてこれを克服した。しかし、彼らの方法はMP5やWENO5など他の1次元リコンストラクションには適用しにくい形式であった。我々は彼らの手法を単純化することで、より広いリコンストラクションに使える多次元リコンストラクション法を開発した。これにより、ほとんど付加コスト無く多くの高解像度スキームをCT法で構成出来るようになった。表1は2次元アルフベン波伝播問題を用いた精度解析の結果である。WENO-Z5では5次精度が出ていることが確認出来る。開発したコードのロバストさにより磁気エネルギーがガスの内部エネルギーの数千倍を超えるような場所でも安定に計算が続けられるようになった。

3. 局所熱力学平衡による太陽対流層コロナ結合系の2次元シミュレーション

太陽対流層から彩層、コロナまでを含む結合系のシミュレーションには磁気流体、輻射輸送、非平衡電離、非等方熱伝導が必要である。このうち、非平衡電離を現在実装中で、その他の効果は実装済みである。彩層の輻射輸送はNLTEであり正確に輻射冷却率を見積もるにはライン毎の輻射輸送を解く必要があるが、既存の手法と計算機の組み合わせではあまりに計算量が大きくなりすぎる。そのため、まずは局所熱力学平衡(LTE)と経験的な輻射冷却項を用いて太陽対流層からコロナまでを一つのボックスに含む2次元輻射磁気流体計算を行った。

計算では磁気流体計算、輻射輸送計算、非等方熱伝導計算が計算コストのほぼ全てを占める。特に、輻射輸送および熱伝導は並列度が上がるとスケールを妨げる要因となりうる。そこで、1グリッド辺りの解像度および計算量の大きい高解像度磁気流体スキーム(節5.1参照)を開発し、これを使用した。また、前年度までの成果を参考に、非等方熱伝導をSuper Time Stepping法(STS法)を用いてとした。これは陽解法的な解法であり、比較的並列効率に与える影響は小さい。また、輻射輸送の解法では比較的並列計算に向いていると言われるShort Characteristic法を用いた。その結果、グリッド数を768×768×576に固定したストロングスケールでは、FX10上における1536コアと3072コアの間で領域分割方法により96%から98%の並列効率を達成した。これは現状の並列度での運用を考える限り、十分高い数値である。数万コアのより並列度が大きい計算では計算時間において通信が占める割合が大きくなると予想される可能性があるため、より大規模な問題を計算するには通信の隠蔽化なども含めて検討していきたい。

以上の輻射磁気流体コードを用いて太陽対流層コロナ結合系の2次元シミュレーションを行った。その結果、図2のような多数のジェット構造を作り出すことに成功した。このような構造は観測されているスピキュールと呼ばれる構造に寿命、高度、軌道共によく一致している。これらの構造は彩層中の衝撃波がコロナへ突入する際に、彩層-コロナ遷移層(接触不連続面)と衝撃波が相互作用することで遷移層に運動量を与え、ジェットを駆動していることを明らかにした。また、衝撃波が彩層中で相互作用により振幅を増大させることが、特に背の高い構造の形成に重要であるという示唆を得た。

| Method | Number of mesh | L_1 error | L_1 order | L_{∞} error | L_{∞} order |
|----------|----------------|--------------------------|-------------|--------------------------|--------------------|
| WENO-DK3 | 8×8 | 3.49481×10^{-2} | | 5.80017×10^{-2} | |
| | 16×16 | 2.22055×10^{-2} | 0.65 | 3.52868×10^{-2} | 0.72 |
| | 32×32 | 4.02669×10^{-3} | 2.46 | 6.33940×10^{-3} | 2.48 |
| | 64×64 | 5.29214×10^{-4} | 2.93 | 8.31611×10^{-4} | 2.93 |
| WENO-Z5 | 8×8 | 2.25209×10^{-2} | | 3.69293×10^{-2} | |
| | 16×16 | 1.18054×10^{-3} | 4.25 | 1.84657×10^{-3} | 4.32 |
| | 32×32 | 3.54686×10^{-5} | 5.06 | 5.73430×10^{-5} | 5.01 |
| | 64×64 | 1.11858×10^{-6} | 5.01 | 1.77847×10^{-6} | 4.99 |

表: 2次元アルフベン波伝播問題を用いた3次精度WENO-DK3補間と5次精度WENO-Z5補間による精度解析結果

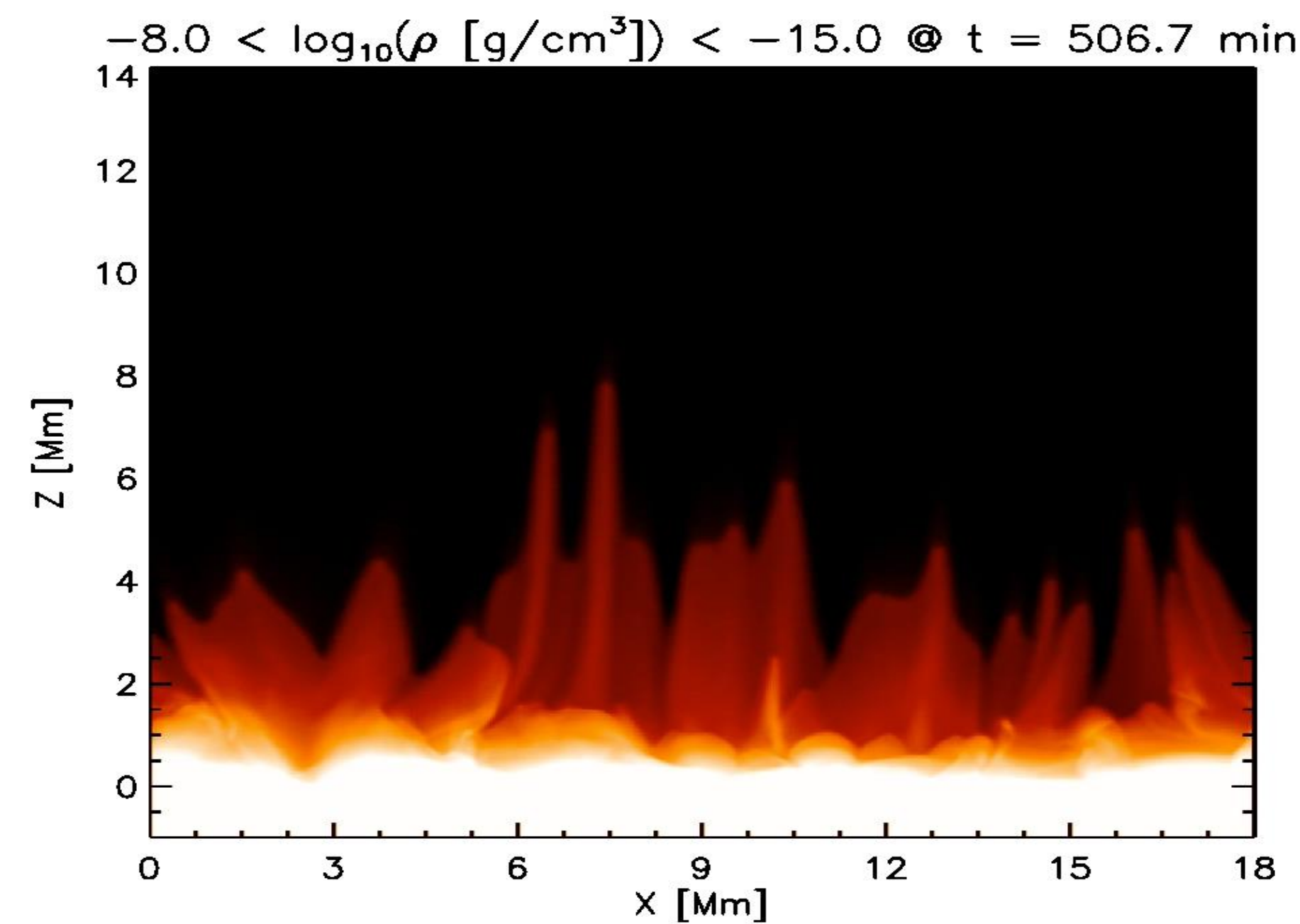


図: 太陽対流層からコロナまでを含む太陽磁気活動の大規模シミュレーションの結果

4. 太陽星内部の熱対流運動およびダイナモ過程の大規模シミュレーション

本研究で用いているコードは2013年度JHPCN共同研究でチューニングをおこなったものである。キャッシュミスや無駄なメモリアロケーションが基本的に負担となっていたので、レジスタの有効利用を心がけ、コードを抜本的に見直した所、実行効率2%程度だったコードが10%程度になった。また、このコードは「京」でも有用である事を確かめていて、実行効率14%ほどで、10万コアほどまで99%以上の並列化効率で、実行する事ができた。このコードを用いて、次の研究をおこなった。

(1) 熱対流によるローカルダイナモの効果: 星の自転を無視して、熱対流乱流だけで星内部で磁場増幅をおこないその乱流の振る舞いをみた(下図左2枚)。内部の温度勾配(低層ほど高温)に起因するマルチスケールの熱対流が発展するが、中間層においては、より上の層からの小スケール熱対流下降流の影響が顕著に現れる。強磁場は下降流に集まる。これは下降流による磁力線引き伸ばし効果のせい、などが結果としてわかった。(Hotta, Rempel, Yokoyama, 2014)

(2) 表面回転シア層の物理: 太陽の内部角速度分布には、表面近くシア層が見られることが知られていた。これを数値シミュレーションにより世界で初めて実現し、かつその生成維持機構を明らかにした(下図右2枚)。本共同研究で開発したコードをもちいて、表面近くの小スケール乱流を分解することで、そのReynolds応力による角運動量輸送をより正確に解くことができるようになり、はじめて物理が明らかになった。実際には、勾配層が及ぼす平均的なコリオリ力と子午面循環流にかかる乱流粘性応力との拮抗により勾配層が維持されていることが解析で明らかになった。(Hotta, Rempel, Yokoyama, 2015a)

