

jh150011-NA08

## 太陽磁気活動の大規模シミュレーション

横山央明（東京大学）

### 概要

太陽表面对流コロナ結合系シミュレーションのために、FX10 の並列化性能を引き出せかつ、精度の高い計算が可能な天体大気中での輻射磁気流体コードを開発した。完成したコードをもちいて、太陽天体プラズマ物理シミュレーションを将来実施することを視野において現有コードでも物理的な研究をすすめた。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学 大学院理学系研究科

東京大学 情報基盤センター

#### (2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

横山央明：全体統括

飯島陽久，金子岳史，王燦洋，河野隼也，庄田宗人，鳥海森，堀田英之，市村千晃，大井喜智：開発されたコードを用いた太陽天体活動現象のシミュレーション

中島研吾，松本正晴：コードの効率化・高性能化

### 2. 研究の目的と意義

本研究の目的は、太陽表層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目的は、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、従来のもより大規模な計算を実施して、実観測の解釈に役立てる。「ひので」太陽観測衛星による最大の成果のひとつは、彩層が非常にダイナミックな領域であったことの発見である。これは、衛星打ち上げ前には予想していなかったことであり、太陽物理学には未開拓な分野がまだ残っていることを印象付けた。彩層は、温度が 1 万度前後であるため、部分電離状態にあり、温度最低層から外層コロナまで水素電離度が 6 桁も変動している。また光球がガス圧優勢（高ベータ。ベータはガス圧割る磁気圧）で、コロナが磁場優勢（低ベータ）大気であるのに対し、彩層はその途中でちょうど両者がほぼ拮抗する場所である。つまりプラズマダイナミクスがガスにより磁場を捻るレジームから磁場がガスを駆動するものに変化する。また輻射も、非局所熱力学平衡状態にあり、非常に複雑な物理が相互にからんでいる。

彩層のようなガスは、他の恒星にも存在している。その様相はたとえばカルシウム吸収線などにより、多くの恒星で観測されていて、天体大気の構造や

そのダイナミクス・磁気活動を理解するのに使われている。これらはすべて太陽彩層をもとに解釈されており、そもそもの太陽の理解が重要なことはいままでもない（が、その理解は十分とはいえない）。特に「彩層の基底加熱 (basal heating)」問題など未解決な魅力的な問題もある (Schrijver 1995)。そして、星形成領域における原始惑星系円盤は低温部分電離ガスからなっており、共通物理を介してその理解にも貢献したいと考えている。このような状況のもと、現在太陽コミュニティでは「ひので (Solar-B)」に続く太陽観測衛星「Solar-C」を策定している。そのめざす重要科学課題のひとつが「彩層ダイナミクスの解明」である。「ひので」では彩層は撮像観測のみであったのに対し、Solar-C では偏光分光器を搭載する予定で、「ひので」で発見された現象の物理機構解明をめざす。

本研究では、このような状況のもと、理論シミュレーション的側面から Solar-C プロジェクトをサポートするとともに、最新の計算技術を取りこむことでこの分野に大きな進展をもたらしたいと考えている。

### 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究における計算は、きわめて大規模なものであり、いずれも大規模並列計算機の性能をフルに発揮することが求められる。したがってコードのチューニングは非常に重要であるが、手持ちのコードでの実行効率にはのびしろがあると考えられたが、本共同研究によって大幅に改善し、磁気流体計算で理研「京」での実行効率 24% を達成した。また、本研究の計算では輻射輸送計算を実施する。これは各グリッド点において数十方向に向かう光線にそって物理量を積分するもので、従来の流体計算とは異なる並列化技術が必要とされた。そし

て、熱伝導拡散は陰的時間積分が必要で、そのため行列反転については計算機科学分野の研究者との共同研究が必須と考えた。共同研究で議論しながら調査した結果、行列反転による陰解法ではなく、SuperTime Stepping (STS) 法が最適な結果であることが分かった。数値計算研究者との議論のなかでさまざまな可能性を検討することができ最適な方法を見つけることができたことは、本公募型共同研究の重要な成果であった。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

2013 年度の HPCI-JHPCN 課題により、太陽ダイナモ研究のための、星全球磁気流体コードのチューニングを実施している。これまでのところ「京」での最大実行性能が 14% まで向上した。これと独自開発の音速抑制法とを組み合わせ、世界最大ダイナミックレンジかつ最大解像度の磁気熱対流計算を実施した (Hotta, Rempel, Yokoyama, 2014)。また太陽表面对流コロナ結合系シミュレーションのために、非等方非線形熱伝導の陰的時間積分コードの主要エンジンであるマトリックスソルバーの開発を実施している。並行して、太陽表面熱対流の 3 次元輻射磁気流体シミュレーションを実施した。

また 2014 年度は、非等方熱伝導の解法という課題で陰解法のスキーム効率化と陽的な Super-Time Stepping 法の比較を行った。また同時に磁気流体コードについても検討を行い、特に、「磁気大気と非磁気大気とが共存する系における高精度計算での  $\text{div}B=0$  維持」に着目したあたらしい方法を開発した (Iijima & Yokoyama 2015 として投稿中)。また科学的成果としても、宇宙線圧拡散効果をいれた銀河中での磁気浮力不安定や、3 次元磁気リコネクションのシミュレーションを実施した (Wang et al. 2015)。

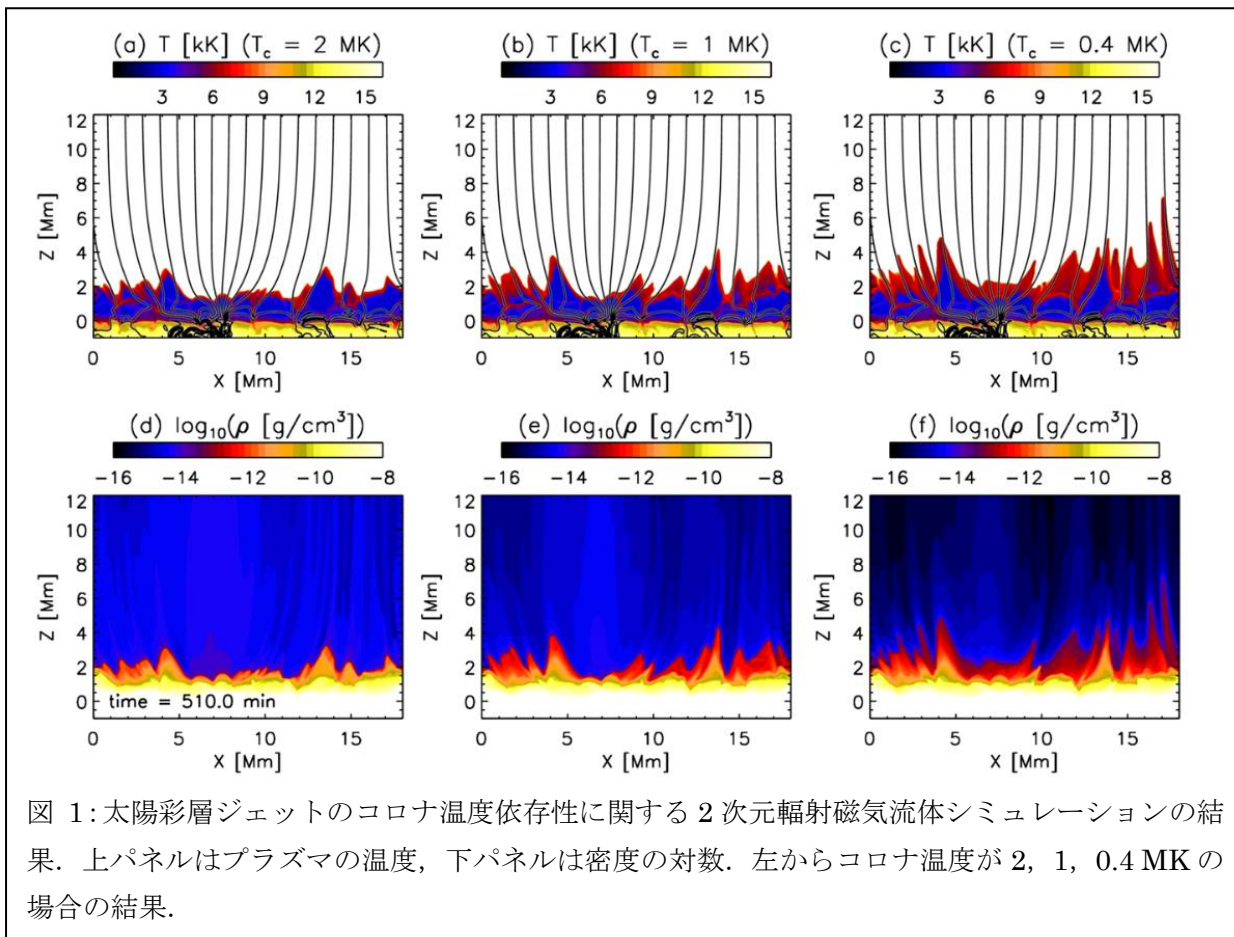


図 1: 太陽彩層ジェットのコロナ温度依存性に関する 2 次元輻射磁気流体シミュレーションの結果. 上パネルはプラズマの温度, 下パネルは密度の対数. 左からコロナ温度が 2, 1, 0.4 MK の場合の結果.

## 5. 今年度の研究成果の詳細

### 5.1. 太陽彩層ジェットの輻射磁気流体シミュレーション

前年度に開発した磁気流体計算スキーム(Iijima, Yokoyama, 2016, 投稿中)と Short Characteristic 法による輻射輸送, Super Time Stepping 法による非等方熱伝導の効果を取り入れた太陽対流層上部からコロナ下部までを含む輻射磁気流体計算により, 太陽彩層に普遍的に見られるジェット構造に関する研究を行った.

(1) 彩層ジェットのコロナ温度依存性に関する 2 次元磁気流体シミュレーション: 太陽彩層ジェットは観測される領域によって現象のスケールが大きくことなる. 本研究ではこの彩層ジェット

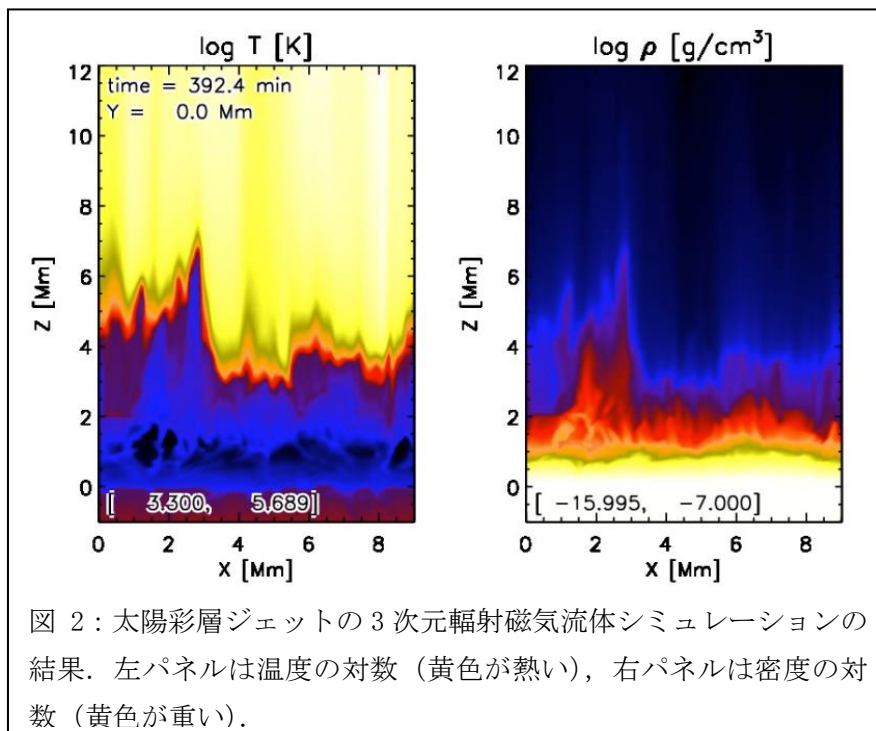


図 2: 太陽彩層ジェットの 3 次元輻射磁気流体シミュレーションの結果. 左パネルは温度の対数 (黄色が熱い), 右パネルは密度の対数 (黄色が重い).

の領域依存性にコロナが与える影響に注目し, コロナの状態をコントロールしやすい 2 次元シミュレーションを用いてコロナが彩層ジェットに与える影響を検証した. その結果, 衝撃波の彩層中で

の増幅の違いにより彩層ジェットのスケールに大きな違いが現れた。さらに、コロナの状態によりジェット運動モデルも影響を受け、自由落下に近い運動から周期的な衝撃波による減速を受けるレジームまで移行していくことを発見した。(Iijima, Yokoyama, 2015)

(2)彩層ジェットの 3 次元磁気流体シミュレーション：上記の 2 次元計算ではコロナの状態を上部境界から熱伝導フラックスを注入することでコントロールしていた。これは 2 次元では磁気エネルギーのコロナ中での散逸が効率的でなく、コロナを十分加熱出来ないことも理由であった。本研究では、領域を 3 次元に拡張することにより、自発的にコロナを加熱しつつ、彩層ジェットを形成することが出来た。

## 5.2. 磁気リコネクションの 3 次元シミュレーション

磁気リコネクションと呼ばれるプラズマ基礎物理過程の 3 次元磁気流体シミュレーションを実施している。太陽フレアなどのプラズマエネルギー解

放現象において、磁気リコネクションはその基礎物理過程となっていることが知られている。反平行な磁場にはさまれた電流シートに、電流と平行なガイド磁場を一様に加えた初期状態を考える。これにランダムな速度擾乱を与えた後の発展を 3 次元磁気流体シミュレーションで調べた。磁気拡散係数は定数とした。

昨年度我々が提案した「衝撃波生成に至る正のフィードバック機構」についてさらに詳しく解析した。素過程に注目するためにテアリング不安定性の固有関数を与え、その時間発展を調べた(図 3)。ただし、固有モードは、電流シートに対して左右回転対称なものをふたつ重ね合わせて与えた。これはいま考えている「反平行磁場+ガイド磁場」において、電流の極大値位置から左右に等距離の面において不安定が発展するのが、(昨年度実施した)ランダム擾乱での非線形シミュレーションで得られたことによる。その素過程を調べたいというのがこの解析の動機である。「フィードバック機構」により、中央対称面付近に磁束が集積し新たな電流シートが形成され磁気拡散領域となる。い

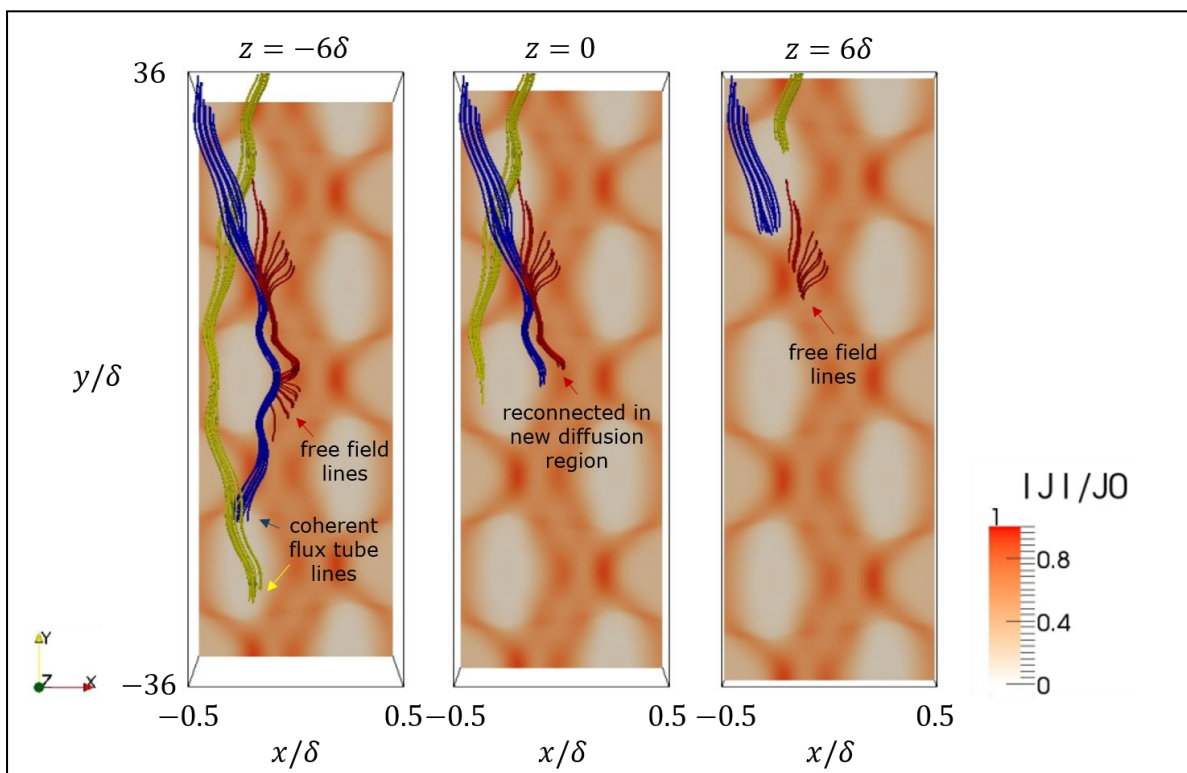


図 3：磁気リコネクションの 3 次元磁気流体シミュレーションの結果。電流分布（背景カラー）と、磁力線の様子。

っぽう左右の不安定面内でテアリング不安定の結果成長した磁束管が中央付近でぶつかりあうことでも別な磁気拡散領域（強電流領域）ができあがる。これらの磁気拡散領域では、磁力線が活発につながりかわり（リコネクションし）、カオス的な構造をかたちづくることがわかった。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

太陽彩層ジェットの輻射磁気流体シミュレーションについては、前年度開発した太陽大気計算コードを用いて 2 次元、3 次元の計算を実施した。特に、当初予定していた規模の 3 次元シミュレーションを実施することができ、国際会議などで公表し好評を博した。

次に、散乱を含んだ輻射輸送スキームの効率的な解法の検証については、（主たる従事者の大学院生が博士課程最終年であったため）太陽科学的成果の産出を優先し、既存の非散乱輻射輸送スキームを使用した計算を実施した。そのため、輻射輸送スキームの解法に関する研究は行わなかった。磁気リコネクションの 3 次元シミュレーションについて、固有モード初期条件による素過程解明を予定どおり実施できた。

## 7. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

Iijima, H.; Yokoyama, T., 2015, “Effect of coronal temperature on the scale of solar chromospheric jets”, *The Astrophysical Journal Letters*, 812, L30

Kaneko, T.; Goossens, M.; Soler, R.; Terradas, J.; Van Doorselaere, T.; Yokoyama, T.; Wright, A. N., 2015, “Apparent Cross-field Superslow Propagation of Magnetohydrodynamic Waves in Solar Plasmas”, *The Astrophysical Journal*, 812, 121

Wang, S., Yokoyama, T. Isobe, H., “Three-dimensional MHD magnetic

reconnection simulations with a finite guide field: proposal of the shock-evoking positive-feedback model”, *ApJ*, 2015, 811, 31

Kaneko, T.; Yokoyama, T., 2015, “Numerical Study on In-Situ Prominence Formation by Radiative Condensation in the Solar Corona”, *The Astrophysical Journal*, 806, 115

Hotta, H.; Rempel, M.; Yokoyama, T., 2015, “Efficient Small-scale Dynamo in the Solar Convection Zone”, *The Astrophysical Journal*, 803, 42

Hotta, H.; Rempel, M.; Yokoyama, T., 2016, “Large-scale magnetic fields at high Reynolds numbers in magnetohydrodynamic simulations”, *Science*, 351, 1427

### (2) 国際会議プロシーディングス

該当なし

### (3) 国際会議発表

Iijima, H.; Yokoyama, T., “Effect of coronal conditions on solar chromospheric jets”, Workshop on Physics and Diagnostics of Emerging Flux Regions, Tokyo, 2015/10/16

Iijima, H.; Yokoyama, T., “Effect of coronal temperature on the formation of the solar chromospheric jets”, Hinode-9 Science Meeting, Belfast, 2015/09/17

Iijima, H.; Yokoyama, T., “Two-dimensional simulation of chromospheric jet formation with convection and emerging magnetic flux”, Flux Emergence Workshop, Boulder, 2015/06/18

Iijima, H.; Yokoyama, T., “Two-dimensional simulation of the small scale structure in the solar chromosphere”, Japan Geoscience Union Meeting, 2015/05/25

Wang, S., Yokoyama, T., Isobe, H., “Positive-feedback system in 3D resistive MHD reconnection”, Hinode 9 Science Meeting, 2015, ePoster

### (4) 国内会議発表

飯島陽久, 横山央明, 磁気流体方程式における磁

場の拘束条件に基づく多次元リコンストラクション手法の提案，日本流体力学会年会，東京，2015/09/26

飯島陽久，横山央明，2次元輻射磁気流体計算による彩層ジェット構造のコロナ温度依存性の検証，日本天文学会 2015 年秋季年会，兵庫，2015/09/10

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）

「太陽最古の謎解決に王手」，記者発表，2016 年 3 月 24 日，千葉大学主催，文部科学省記者クラブ

