

jh130009-NA05

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。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。

1. 研究の目的と意義

本研究の目的は、(1) 東京大学情報基盤センター FX10（と理化学研究所「京」）の並列化性能をフルに発揮できる磁気流体コードを開発し、黒点周期解明をめざした太陽全球磁気熱乱流ダイナモシミュレーションを実施すること、(2) 同じく FX10 の並列化性能を引き出せるような非等方非線形熱伝導の陰的時間積分コードを開発し、太陽表面熱対流コロナ結合系シミュレーションを実施すること、が大きな柱である。

科学的な目標の第 1 は、太陽活動のエネルギー源である「磁場の起源」の理解であり、そのメカニズムとしての「ダイナモ」モデルの完成である。太陽ダイナモでは、星の自転運動と熱対流乱流運動とから、磁場を増幅・維持するというのが大雑把な理解である。観測的な制限としては、表面黒点磁場や一般磁場の変動、特に 11 年活動周期や緯度分布、表面对流運動や大規模流れ、日震学から知られる内部角運動量分布や温度分布があり、これらをすべて満たすモデルの構築が求められる。いまのところ、観測をすべていっぺんに再現するモデルは世界的に存在しない。しかしながら、我々のグループの堀田が開発した音速抑制法 (Hotta et al. 2012) によりブレイクスルーが期待できると考えている。

太陽黒点周期問題は、19 世紀の観測的発見以来の、天文学の最古の問題のひとつであるが現在にいたるまでまだ解決をみていない。おおざっぱには星内部の流体と磁場との相互作用（ダイナモ）

で起こっていると考えられている。しかしダイナモ問題では、小スケールの熱対流乱流と大スケールの自転・磁場とが互いに相互作用しながら発展するようすを解かなければならない。また、局所的な波動横断時間（磁場構造を音速が横断する時間で数秒程度）と知りたい大局的時間（太陽活動周期の 11 年）とが極端に違う。そして本質的に 3 次元であり、シミュレーションに要する計算機資源が大きくな、非常に高負荷な課題である。そしてこれまでの経験から、より高解像度の計算がより新しい結果を生み出すことがわかっている。これは、乱流による角運動量輸送や小スケール磁場生成機構が、現状のシミュレーションではまだよく分解できていない、ということを示している。これまで先行研究では、（音波モードを方程式から落とす近似である）非弾性近似（anelastic 近似）が用いられており、ある程度の成功を収めたのであるが、この手法では、今後も技術的発展がみこまれる大規模並列計算機への適用がそろそろ限界に達しつつある。そこで我々は独自に、音速抑制法 (Reduced Sound Speed Technique) による計算を提案した。この技法であれば、極端に多数の並列数をもつ計算機においてもその CPU 数に応じた計算速度の向上が認められ、画期的な成果が得られる。

もうひとつの科学目標は、磁場のエネルギーが太陽大気におよぼす影響の解明である。具体的には、表面輻射冷却駆動の熱対流乱流で発生する磁気流体波動が磁力線に沿って上空へ伝播、コロナ中で

熱化していくようすを解きたい。これは、磁気流体・輻射輸送・輻射衝突原子励起電離・非等方非線形熱伝導がいつべんにカップルするきわめて複雑なシステムでこれらの要素をすべて高効率で解くことが求められる。

太陽表面大気コロナ結合系の理解は、JAXA 宇宙科学研究所の衛星として、現在太陽物理学コミュニティで計画が策定されている Solar-C ミッションの最重要ターゲットのひとつである。科学的には「コロナ彩層加熱問題」と呼ばれる天体物理学上の重要問題が主たる解明目標で、これは星のエネルギー発生が中心なのに対し、最外層大気であるコロナ（数百万 K、高さ 3000km 以上）や、やや上空大気の彩層（数万 K、高さ 1000km 以上）が表面（数千 K、高さゼロ）より温度が高いという謎である。この加熱には波動などによる磁気力学的エネルギー輸送が鍵であると考えられているが、上にも述べたように複雑な物理が互いに絡み合った領域で、観測事実の解釈のためには数値シミュレーションによる援護が必要不可欠である。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

本共同研究は以下の研究者によって実施した。

東京大学・大学院理学系研究科

横山央明, 飯田佑輔, 飯島陽久, 鳥海森,

堀田英之, 松井悠起, 那須田哲也,

金子岳史, 王燦洋, 河野隼也

東京大学・情報基盤センター

中島研吾, 松本正晴

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

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るので、共同研究によって解決をめざしている。通信計算並行実行などの工夫や、キャッシュを有

効利用するなどハードウェアに近い知識が必要であった。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る。そして、熱伝導拡散は陰的時間積分が必要で、そのための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。FX10 で培った技術をもとに「京」やさらに将来の超大規模計算にむけたコード開発を実施するため、本共同研究が必須で、実際に性能向上を果たし、結果を残すことができています。

3. 研究成果の詳細

3.1 太陽内部全球のシミュレーション

太陽対流層は、熱対流不安定の状況下において常に乱流的な熱対流に満ちあふれている。熱対流はエネルギー・角運動量を運び、それぞれ重力成層・大規模な流れ(差動回転・子午面還流)を決定する。また、熱対流そのものや、生成された大規模な流れは、太陽にあまねく存在する磁場の生成に重要である。以上のような意義から太陽内部の熱対流を数値計算により詳しく調査する事は、生成・維持の物理機構が未解明の大規模流れ(差動回転・子午面還流)や太陽黒点 11 年周期の問題の解決には不可欠である。しかし、太陽は対流層の底から表面に向かうにつれ、圧力スケール長が 6 万 km から 300km へと変わる。また、太陽の円周が 400 万 km ある。上記にあげた問題を理解するにはこのすべてを解くことが重要であるので、非常に多くのグリッド点を要する挑戦的な数値計算的課題である。

本年度は、「京」クラスより大きなスケールのスーパーコンピューターを見据えて、コードチューニングをおこなった。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、 10^5 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。(図 1)

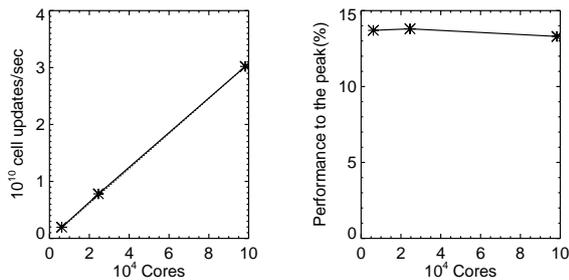


図 1 「京」で測定したコードの性能 (左) 1 秒間に更新できるグリッドセル数のコア数依存性. (右) 実行効率のコア数依存性

このコードを用いて、FX10 の大規模実行では、太陽内部で生成された磁束が太陽表面で活動領域を生成する様子の再現に挑戦し成功した。この過程を数値計算で再現したのは世界初である。(図 2)

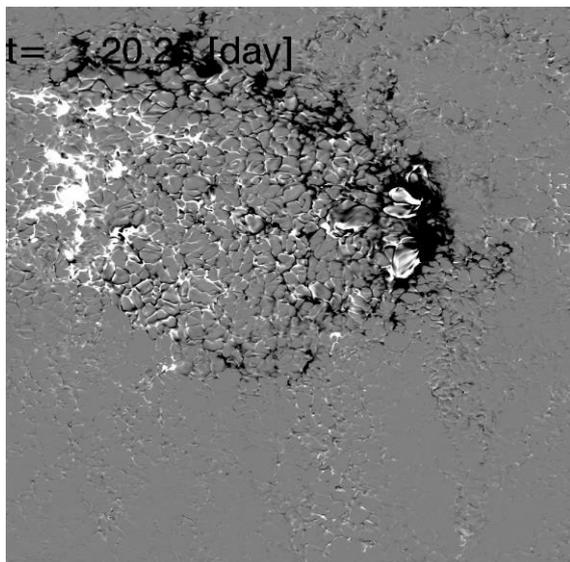


図 2 計算上の対流安定層と不安定層の境界での動径方向磁場の分布。白が正極(N 極), 黒が負極(S 極)。左右端付近に見える比較的大きな磁場が, 形成された黒点。

「京」では世界最高解像度の太陽熱対流の実現とそれともなう表面勾配層の実現に挑戦し、そちらも成功した。過去の計算に比べて 10 倍程度大きな規模の計算が可能になった。世界で初めて、表面勾配層を数値計算で実現する事に成功した。(図 3)

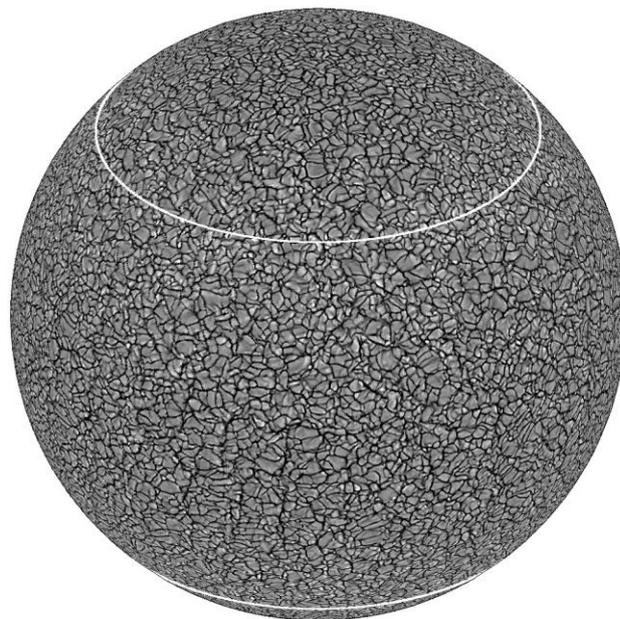


図 3 上部境界付近の動径方向速度の様子

3.2 非等方熱伝導の数値解法の検討

太陽コロナや銀河では、非熱プラズマによる磁力線に沿った方向への熱伝導がプラズマの運動において重要な役割を果たす。特に、太陽コロナでは、コロナの熱収支を決める「磁気流体エネルギーの散逸、輻射による冷却、熱伝導による下部大気への熱輸送」のうち最もタイムスケールが短く、これを無視しては議論が成り立たない。熱伝導の効率はプラズマの温度と密度に大きく依存し、磁気流体の速度スケールに対し、優に 1000 倍を超えうる。このような硬い方程式系を解くためには、非等方熱伝導の効率的な数値解法が必要となる。

非等方熱伝導の数値解法としては、タイムスケールを CFL 条件制限されない陰的解法が第一候補である。しかし、陰解法では係数行列の反転にグローバルな通信を必要とするため、陽解法と比べて並列性が悪くなりやすい。また、行列の反転においては適切な前処理が効率を劇的に改善する場合がある。

磁場に沿った非等方熱伝導の数値解法の第一候補として、CFL 条件に制限されない陰的解法を検討した。係数行列が非対称であるため、前処理付き Krylov 部分空間法の一つであり、安定性に優れたリスタート付の Flexible GMRES 法を実装し、並列化を行った。

Krylov 系解法では計算時間の大部分が行列ベクトル積の計算に費やされる。行列ベクトル積の計算効率化のため、係数行列の保存形式として DIAGONAL storage format (DIA), ELLpack-itpack format (ELL), Compressed Sparse Row format (CSR) を検討し、実際に FX10 上で速度の比較を行った。その結果に基づき、有限差分的なステンシルに対して高速な DIA 形式を採用した。(図 4)

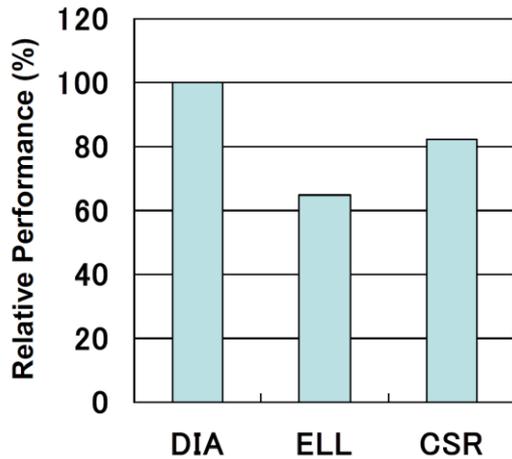


図 4 係数行列の保存形式に対する計算速度の比較。

Krylov 部分空間法の効率は前処理に大きく依存する。本研究では前処理として SSOR (対称 SOR) 法及び ILU(0) 分解 (LU 分解のうち係数行列の非ゼロ成分と同じ場所のみを計算したもの) を検討した。実際の太陽大気をモデル化した上で、2つの前処理付き GMRES 法を適用した。その結果、SSOR 前処理は緩和パラメータを適切にとることで、5 倍程度の収束率改善に成功した。一方、ILU(0) 前処理は非等方熱伝導に適用する場合ゼロピボットが頻繁に表れ、分解がスムーズに行えないことが分かった。上の結果から推測すると、マルチグリッド前処理などのより高度な前処理を行った場合、さらに数倍の改善が見込まれる。

陰的解法とは別のアプローチとして、Super Time Stepping (STS) 法を検討した。STS 法では、一つの独立なステップに対して安定性を考え CFL 条件を課すのではなく、複数のステップをひとまとめにして安定性を考える。この方法を用いると、熱伝導などの放物型微分方程式の CFL 条件を緩和

させることが出来る。STS 法を上述の太陽大気モデルでの熱伝導に適用した場合、SSOR 前処理 GMRES 法のさらに 10 倍程度の改善が見込まれることが分かった。STS 法で重要なのは時間ステップ幅の決定なので、差分計算に関してはコードをそのまま流用することが出来る。また陽的な解法なので、大規模な並列化に伴う性能低下の心配も少ない。以上の理由から、非等方熱伝導の解法において、Super TimeStepping 法が有望であるという結論を得た。(図 5)

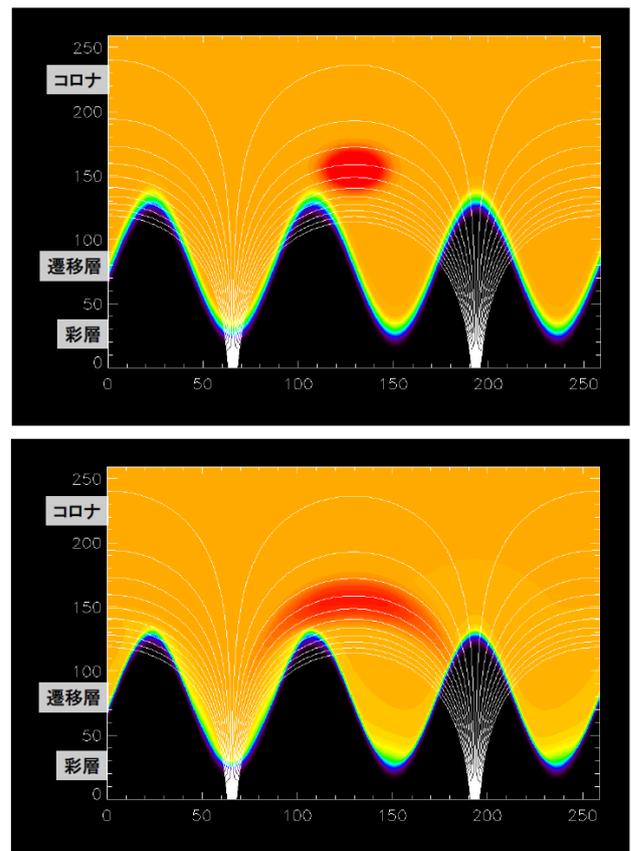


図 5 太陽大気モデルにおける熱伝導の様子。上が初期条件、下が時間発展後。カラーは温度の対数、白線は磁力線を表す。

3.3 宇宙線影響下の磁気パーカー不安定

本研究の目的は、宇宙線の影響を受けたパーカー不安定性の 2 次元、3 次元モデルのシミュレーションを行い、成長を比較することである。

宇宙線入りのパーカー不安定が、この銀河中の分子雲生成の期待するタイムスケール・空間構造で実現できるかどうかを、シミュレーションにより確かめることが必要である。先行研究で、宇

宇宙線の影響を受けたパーカー不安定性の 2 次元モデルの計算が行われているが、2 次元と 3 次元モデルの成長比較を行っているものはない。3 次元モデルになると、パーカー不安定性に加え、磁気交換不安定性も考えることになり、成長の速さが変わることが予想されるため、実際に計算を行って、比較をした (図 6)。

2 次元, 3 次元のモデルの成長を解析すると, 図 7 が得られた. X-Y 面で平均した磁場強度の Z 分布にしきい値をもうけて, パーカー不安定性の成長を図にしたものである. 先行研究から予想されるとおり, 宇宙線ありのモデルがなしのモデルより成長が速く, 拡散係数が大きいモデルほど, 成長が速い様子が見て取れる. 2 次元, 3 次元モデルの比較に関しては, 宇宙線の影響を考慮することで, 2 つのモデルの差が縮まっている様子が見られる.

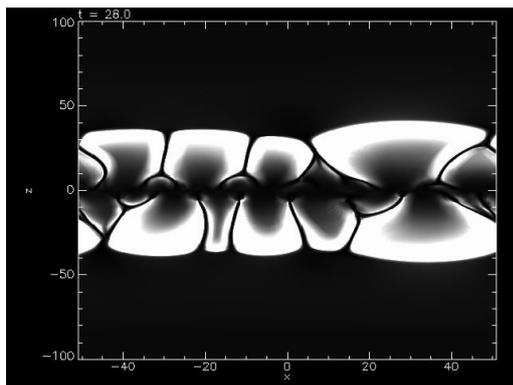


図 6 宇宙線入り磁気浮力不安定性のシミュレーションの磁気圧対ガス圧比の分布. パーカー不安定性によって磁束ループが上昇している様子が見て取れる.

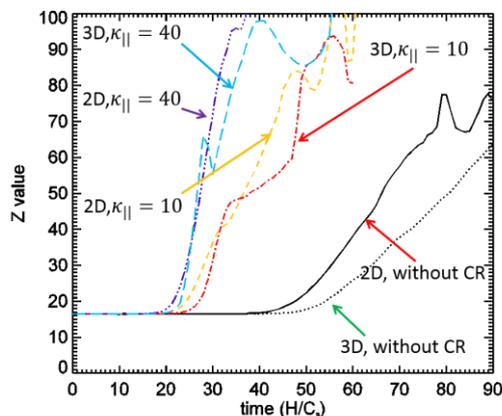


図 7 宇宙線入り磁気浮力不安定の時間発展のようす. 縦軸は浮上した磁気ループの高さ. 各線は, 2

次元シミュレーション (2D) か 3 次元シミュレーション (3D) か, 宇宙線なし ("without CR") か 宇宙線あり (宇宙線拡散係数 " κ " の値を示す) かを示している.

3.4 電流シート内の 3 次元乱流擾乱の発展

太陽フレアなどの爆発現象において, 磁気リコネクションと呼ばれる物理過程が中心エンジンであると考えられている. これは磁気拡散によりつなぎ変わった磁力線が周囲のプラズマを巻き込んで加速・加熱することで, 効率よく磁気エネルギーを解放する機構である. しかしながら, 太陽コロナは磁気拡散が小さく, 拡散領域もきわめて小さな空間スケール (たとえばイオン Larmor 半径の数 m 程度) であると想像されている. いっぽうフレア自体は太陽半径に匹敵するサイズ (数万 km 程度) と考えられていてそのスケールギャップは巨大である. おそらくは乱流的で非定常な構造が発展していると考えられているが, まだ本格的な研究は端緒についたばかりである.

われわれは 3 次元拡散あり磁気流体シミュレーションを用いて, 有限振幅の擾乱を初期に与えた電流シートの時間発展を調べた (図 8). 反平行磁場からなる電流シートにガイド磁場 (誌面垂直成分磁場) を加えたものを初期分布とし, 乱数的な擾乱を磁気拡散に 1.6 Alfvén 時間だけ与え, その後の時間発展を観察した.

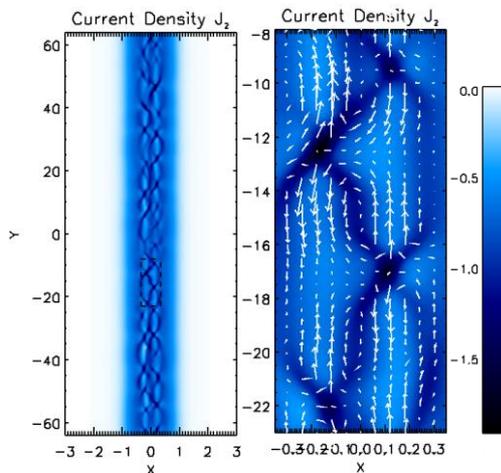


図 8 有限擾乱電流シート時間発展のシミュレーション結果. 誌面垂直成分の電流密度分布を示す. シミュレーションの結果, いわゆる

Sweet-Parker 型リコネクションよりも 3 倍ほど高いエネルギー解放率を得た。これは図にみられるようなジグザグ模様が電流シートの中に発展し、それぞれで発生したリコネクション流出流・流入流が互いに助けあった結果である。

3.5 磁気リコネクションへの熱伝導の影響

太陽爆発現象の素過程として Petschek モデル磁気リコネクションの 2 次元磁気流体シミュレーションについて熱伝導の効果を実装した場合、リコネクションで生じるスローモード断熱衝撃波は等温衝撃波と熱伝導面へと解することはわかってはいたがそのエネルギー解放効率については追究されていなかった。それぞれの場合のリコネクションによる温度分布を図 9 に示す。

リコネクションのエネルギー変換効率には磁気拡散の値が大きく影響してくると考えられ、本年度前期に行った 2 次元磁気流体シミュレーションでは磁気拡散は異常抵抗として設定しその値を変化させることでエネルギー解放効率の変化を探った。リコネクションのエネルギー解放効率を探る上でその過程で生成される電流シートを解像することは重要となり、磁気拡散が小さい時に実現する高磁気レイノルズ数状態では電流シートが十分薄くなりより高解像度の必要が生じる。

数値計算の結果として低磁気レイノルズ数から高磁気レイノルズ数状態にかけて熱伝導の効果により磁気リコネクションでのエネルギー解放効率が増すことが示された。その様子を図 10 に示す。

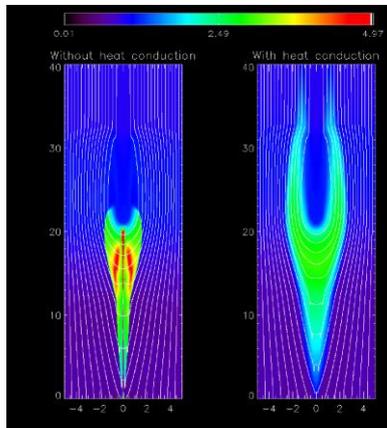


図 9 熱伝導の効果を含めた場合の磁気リコネクション温度分布の比較

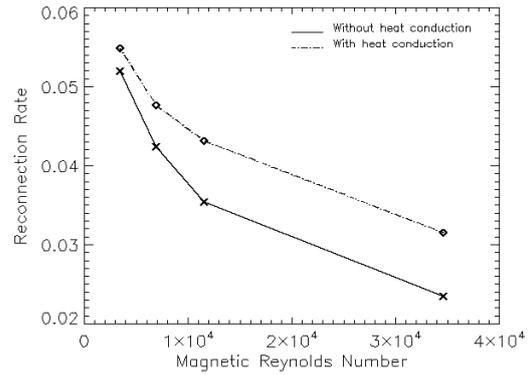


図 10 熱伝導の効果を含めた場合とそうでない場合におけるリコネクション効率の磁気レイノルズ数に対する変化

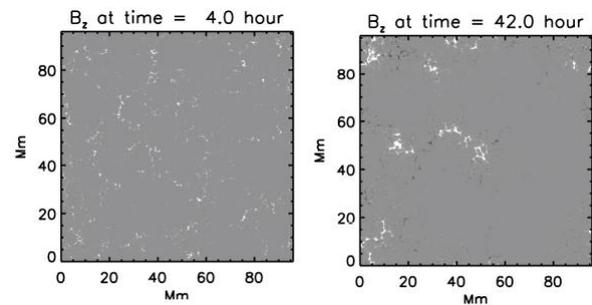


図 11 3 次元対流計算による中規模磁場構造形成

3.6 太陽表面における中規模磁場構造形成

太陽表面付近では、磁気ネットワークと呼ばれる網目状の磁場構造が存在する。磁気ネットワークは太陽のいたるところに存在し、彩層コロナ加熱機構において重要な役割を担うと考えられてきた。しかし、現在までその生成理由は明らかにされていない。

我々は輻射輸送と磁気流体を結合させた 3 次元輻射磁気流体シミュレーションを用いて、この問題に取り組んでいる。太陽表面における典型的な対流スケールは千 km 程度であるが太陽内部のマルチスケールな対流構造により、数十万 km 程度の磁場構造が形成されている (図 11)。

4. これまでの進捗状況と今後の展望

4.1 太陽内部全球のシミュレーション

本年度は順調に進んでおり、本年度の目標であった世界最高解像度の熱対流という目的は達成できた。今後は、磁場が自発的に出来る様子を解明する予定である。

4.2 非等方熱伝導の数値解法の検討

非等方熱伝導の解法として前処理付き GMRES 法及び Super TimeStepping 法を検討した。その結果、STS 法が有望であるという結論を得た。今後は、STS 法で大規模並列計算を行うために、より細かいチューニングを行っていく。特に、熱伝導では磁気流体に比べて、差分計算に対する隣接通信の回数がやや多い。このため、大規模並列計算では MPI 通信がボトルネックになる可能性があり、通信の隠ぺいなども検討していく。

4.3 宇宙線影響下の磁気パーカー不安定

成長の比較から、交換不安定性とパーカー不安定性の成長率の差によって出来る隙間への磁束の膨張によって成長が阻害されるという観点から結果を説明しているが、検証が不十分であり、さらなる解析が必要である。

4.4 電流シート内の 3 次元乱流擾乱の発展

これまでのところ数値的な収束性のチェック、特に人工粘性の影響などを調べた。このあと磁気拡散率強度依存性（磁気レイノルズ数依存性）を調べて得られた結果の普遍性について明らかにする。

4.5 磁気リコネクションへの熱伝導の影響

熱伝導入り磁気リコネクションのエネルギー解放効率を探るため、改良 Lax-Wendroff 法による流体計算および BiCG 法により陰的に熱伝導を解くコードを用いた 2 次元磁気流体シミュレーションを行ったが、フレア加熱機構によるコロナ加熱プロセスの詳細を追究するため、より高解像度さらには 3 次元シミュレーションへと拡張させていきたい。

4.6 太陽表面における中規模磁場構造形成

3 次元輻射磁気流体シミュレーションにより、ネットワーク状の中規模磁場構造を形成すること

ができた。今後はこの構造がどのように形成されているのかを、スケール間のエネルギー輸送解析等を用いて明らかにしていく。より将来的には、上層大気も計算ボックスに含めることで、上層大気のダイナミクスや加熱機構における役割を探ることも検討している。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- H. Hotta, M. Remple, T. Yokoyama, 2014, High-resolution Calculations of the Solar Global Convection with the Reduced Speed of Sound Technique. I. The Structure of the Convection and the Magnetic Field without the Rotation, *The Astrophysical Journal*, 786, 24
- S. Toriumi & T. Yokoyama, 2013, Three-dimensional magnetohydrodynamic simulation of the solar magnetic flux emergence. Parametric study on the horizontal divergent flow, *Astronomy & Astrophysics*, 553, 55
- S. Toriumi, 2014, Observations and Modelings of the Solar Flux Emergence, *PASJ* in press
- H. Iijima & T. Yokoyama, 投稿中, On the origin of the Supergranulation and the Magnetic Network in Solar Quiet Regions, *The Astrophysical Journal*
- T. Kaneko & T. Yokoyama, 投稿中, Simulation Study of Solar Plasma Eruption Caused by Interaction between Emerging Flux and Coronal Arcade Field, *The Astrophysical Journal*
- T. Nasuda, T. Yokoyama, T. Kudoh, 執筆中, The timescale of the nonlinear magnetobuoynancy instability with the effect of cosmic rays
- S. Wang, T. Yokoyama, H. Isobe, 執筆中, Analysis on Mechanisms of Reconnection Rate Enhancement in 3D MHD Simulation of a Current Sheet in a Resonant Box
- ### (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

H. Hotta, Current status of understanding about solar global convection, 7th Hinode Science Meeting, Takayama, Japan, Nov., 12, 2013

H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama, Calculation of high-resolution solar global convection with the reduced speed of sound technique, APPC12, Makuhari, Japan, July, 17, 2013

H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama, The calculation of the solar global convection with the reduced speed of sound technique, AOGS 10th annual meeting, Brisbane, Australia, June, 28, 2013

H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama, Flux emergence in the solar global convection with the reduced speed of sound technique, Flux emergence workshop 2013, April, 15, 2013.

H. Iijima, T. Yokoyama, Kinetic and magnetic power spectra in the supergranular-scale convection studied by three-dimensional radiative magnetohydrodynamic simulations, 7th Hinode Science Meeting, Takayama, Japan, Nov., 12, 2013

S. Wang, T. Yokoyama, H. Isobe, Analysis on Mechanisms of Reconnection Rate Enhancement in 3D MHD simulation of a Current Sheet, 7th Hinode Science Meeting, Takayama, Japan, Nov., 12, 2013

(4) 国内会議発表

堀田英之, Matthias Rempel, 横山央明, 音速抑制法を用いた高解像度太陽全球殻数値シミュレーション, 日本流体力学会 年会 2013, 東京農工大, 2013 年 9 月 13 日

堀田英之, Matthias Rempel, 横山央明, 太陽の差動回転シミュレーションで知る天体乱流の取り扱い, 日本天文学会 2013 秋季年会, 東北大学, 2013 年 9 月 10 日

堀田英之, Matthias Rempel, 横山央明, solar local dynamo in global scale, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 21 日

那須田哲也, 横山央明, 工藤哲洋, 日本天文学会

2013 秋季年会, 東北大学 2013 年 9 月 11 日

那須田哲也, 横山央明, 工藤哲洋, 日本 SKA サイエンス会議 「宇宙磁場」2013, 奥州宇宙遊学館 2013 年 9 月 14 日

飯島陽久, 横山央明, 3 次元輻射磁気流体計算による磁気ネットワーク形成過程の研究, 日本天文学会 2013 秋季年会, 東北大学, 2013 年 9 月 11 日

S. Wang, T. Yokoyama, H. Isobe, Analysis on Mechanisms of Reconnection Rate Enhancement in 3D MHD simulation of a Current Sheet in a Resonant Box, 日本天文学会秋季年会, 東北大学, 2013 年 9 月 12 日

金子岳史, 横山央明, 熱不安定により励起されるフィラメント内の波動の解析, 日本天文学会春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 20 日

堀田英之, 横山央明, M. Rempel, 大規模数値計算で明らかにする太陽対流層内部のローカルダイナモ, 日本天文学会春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 20 日

堀田英之, 横山央明, M. Rempel, 大規模数値計算による太陽表面角速度勾配層の実現, 日本天文学会春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 20 日

河野隼也, 横山央明, 磁気リコネクションに対する熱伝導の寄与, 日本天文学会春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 3 月 20 日

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

堀田英之, 横山央明, プレス発表: スーパーコンピュータ「京」を用いて世界最高解像度で太陽の対流層計算を達成, 東京大学, 2014 年 4 月 11 日, <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2014/15.html>