

14-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磁気流体コードと、非等方非線形熱伝導の陰的時間積分コードを開発している。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ている。

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，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，庄田宗人：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、(1)東京大学情報基盤センターFX10（と理化学研究所「京」と）の CPU 性能・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、太陽表面熱対流彩層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。もうひとつの目標は、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、彩層や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っぺ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 Speed of Sound 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。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、中間大気(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。

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。手持ちのコードでの実行効率にはのびしろがあると予測されたので、共同研究によって解決したいと考えた。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と考えられた。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つ

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、本共同研究が必要と考えた。

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(Iijima & Yokoyama 2015 準備中)。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 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

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 1: 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

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agger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、特に太陽表面对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

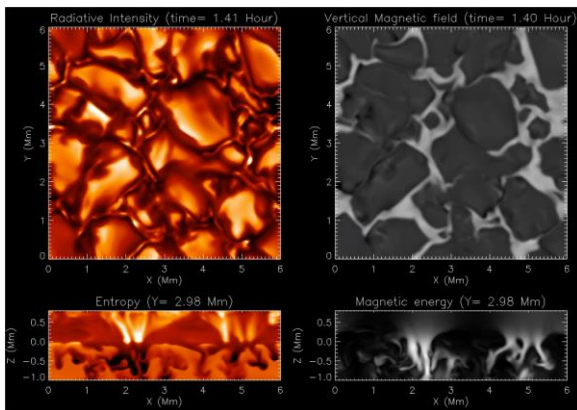


図 1: 開発した MHD スキームを用いた太陽対流層から彩層までの輻射磁気流体計算結果

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。図 1 は開発したコードを用いた太陽対流層から彩層下部までの輻射磁気流体計算の結果である。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。

5.2 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リング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)を用いてといた．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 $768 \times 768 \times 576$ に固定したストロングスケールングでは，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

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．より統計的なメカニズムに関しては現在解析中である（図 3）．

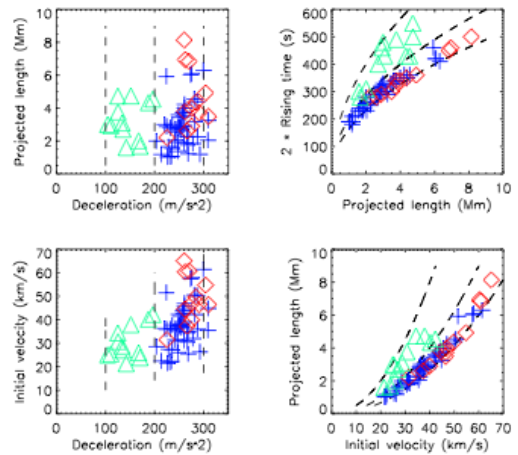


図 3: シミュレーション中のジェット様構造の統計解析結果

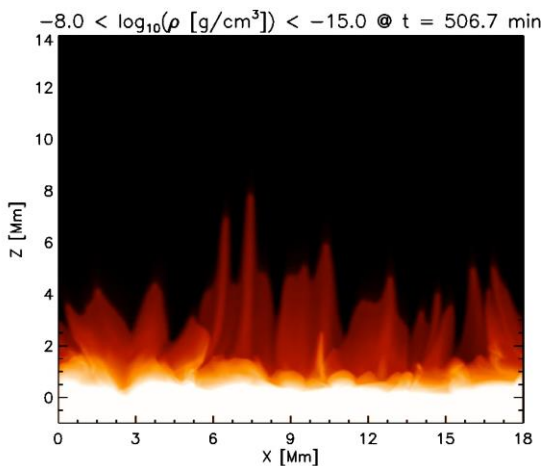


図 2: 太陽対流層からコロナまでを含む太陽動的大気の輻射流体計算の結果

模な問題を計算する際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

5.2 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」でも有用であることを確かめていて，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．本年度はこのコードを用いて，3 つ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（図 4）．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)

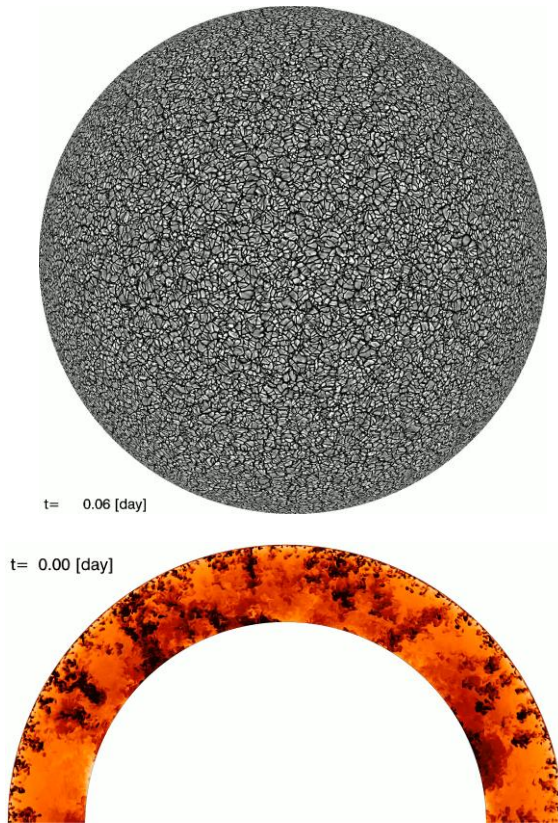


図 4: 太陽対流層内のローカルダイナモ計算の結果。上パネルは、星表面近傍での動径速度 (明色が上昇)、下パネルは、子午面で切ったときのエントロピー分布 (暗色が冷たい)。

(2) 表面回転シア層の物理：太陽の内部角速度分布には、表面近くに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 (図 5)。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)

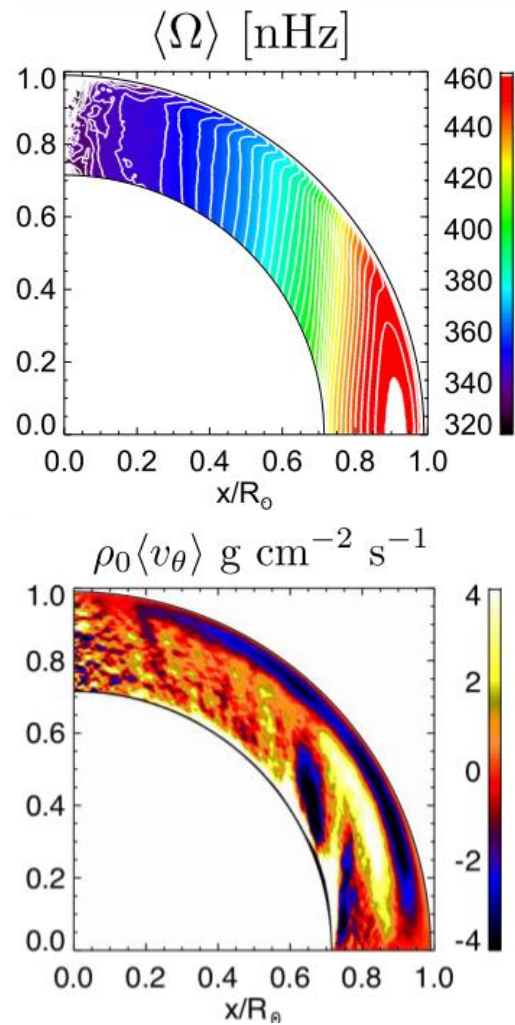


図 5 (右上) : 太陽対流層の表面回転シア層を実現したシミュレーションの結果。上パネルは、角速度分布、下パネルは、子午面循環流のうち緯度角成分 (の運動量)。

(3) 太陽内部の小スケールダイナモの再評価：これまでの全球対流計算では、その広い計算領域を包括するために乱流の慣性領域を十分に分解することが困難であった。そのため、最新のダイナモ計算でも、乱流磁場のエネルギーは運動エネルギーに対して 10%ほどと「弱い磁場」が達成されていた (Fan & Fang, 2014)。しかし、小スケールダイナモが効率的に働くほどの解像度になると、解像度をあげればあげるほど磁場が強くなるという結果が得られている (Rempel, 2014)。そこで、我々はより拡散の低いスキームを採用しつつ、水平方向に領域を制限することで、これまででない

高解像度を達成し、太陽対流層内部の小スケールダイナモを再評価した。これまでは、格子間隔が 4000 km 程度が限界だったが、今回は最小で 350 km 程度にした。その結果、乱流の磁場エネルギーは、運動エネルギーの 90% 以上となり、太陽内部の乱流磁場は弱いというこれまでの常識はくつがえった。磁場から速度場への揺り返しも重要となり、速度場は対流層の底で磁場の無い場合に比べて半分になるほか、強い磁場がエネルギー輸送を効率化するなどの発見があった。(Hotta, Rempel, Yokoyama, 2015b)

5.3 磁気リコネクションのシミュレーション

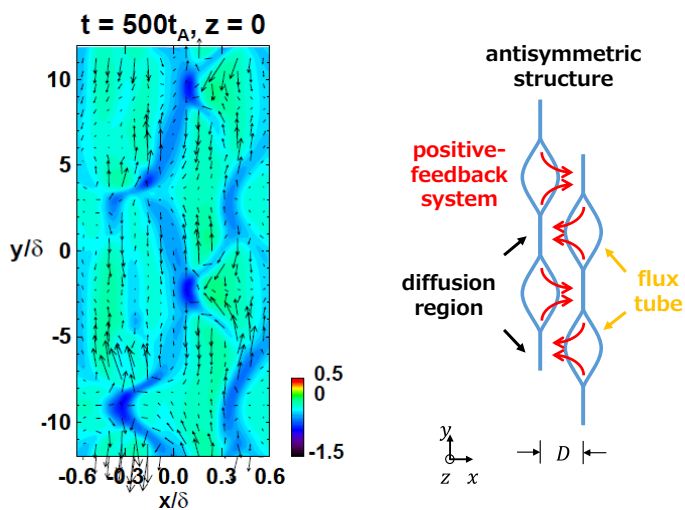


図 6：左 3次元磁気リコネクションシミュレーションの結果。電流密度（カラー）とプラズマ速度（矢印）を示す。右「衝撃波生成に至る正のフィードバック機構」概念図。

本プロジェクトで開発したコードをいずれ使用することを想定し、並行して科学的研究を実施している。ここで紹介するのは、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である。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。しかしながら太陽大気のように磁気拡散係数が極端に小さく、磁気 Reynolds 数が大きな物理系において、効率よい磁気エネルギー解放が可能かどうか、いまだに理論的研究が続いている。1950 年代に提案された Sweet-Parker モデルは、定常 2次元であり、太陽

フレアに適用するには解放率が小さすぎる。近年は、Sweet-Parker モデル解が大磁気 Reynolds 数の際に不安定性をおこし、その非定常発展により大局的に速い解放率が可能であるという提案がある。しかしいっぽう、3次元性に着目した研究は未発展であり、この課題ではそれに挑んでいる。

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。

図 6 左は、ある時刻の電流分布のようすを示している。初期の大局的な電流分布は「1枚のシート」であ

ったので、 x 座標の特定の位置にそって電流が強かった。しかし図で示したような十分発展した時刻では、2枚以上のシート状の「局所的な電流集中領域」が生成して複雑な微細構造が自発的に形成される。このときのエネルギー解放率は、Sweet-Parker モデル（青一点鎖線）よりも 5 倍程度大きな効率となっている。またさまざまな対照実験でも 3次元性とガイド磁場の存在とが重要なことが示された。このようなエネルギー解放率増大がなぜ起こるのか、シミュレーションデータを詳しく調べたところ、「衝撃波生成に至る正のフィードバック機構」が働いていることがわかり、これをわれわれは、磁気リコネクションエネルギー解放の増進機構のひとつとして新たに提案

した。これは図 6 右のように描ける。まず、「大局的な 1枚の電流シート」内部の複数の（図の x 座標の）位置で共鳴現象が起きる。これは、電流シートに起こる、よく知られたテアリング不安定性の成長による。初期ガイド磁場が存在することでそれぞれの共鳴面での磁場は互いに異なった角度をもち、テアリング不安定の固有関数も異なった波数方向に最大成長する。結果、図 6 右にみられるような互い違いの構造を生むことができる。それぞれのテアリング構造どうしで、プラズマ流が互いを助け合い、エネルギー解放を増幅する。同時に、その境界に磁気流体

衝撃波を生じ、磁気エネルギーの解放を促す。全体としてこれらの足し合わせで大局的なエネルギー解放が増幅する。現在この結果については論文執筆中でまもなく投稿予定である (Wang, Yokoyama, Isobe, 2015 準備中)

5.4 宇宙線圧パーカー不安定のシミュレーション
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 3 次元モデルのシミュレーションを行い、特性を理解することである。

パーカー不安定は銀河ダイナモのモデルでの素過程の一つ、また分子雲の形成機構においても重要な役割を果たすと注目されているが、このような仮説で想定されている成長のタイムスケール・空間構造を実現できるかシミュレーションによって確かめることが必要である。先行研究で、宇宙線の影響を考慮したパーカー不安定性の 3 次元シミュレーションを行っているものはあるが、タイムスケールや密度変化、空間構造など十分に調べられていない本研究ではシミュレーション計算を行い、特にタイムスケールについて調べた (図 7)。

単位時間あたりにディスク部からハロー部へ抜けた磁束量の時間発展を 2 次元、3 次元モデルについて計測した。2 次元モデルより、3 次元モデルで磁束流出が遅いことがわかった。現在この結果については論文執筆中でまもなく投稿予定である (Nasuda, Yokoyama, Kudoh, 2015)。

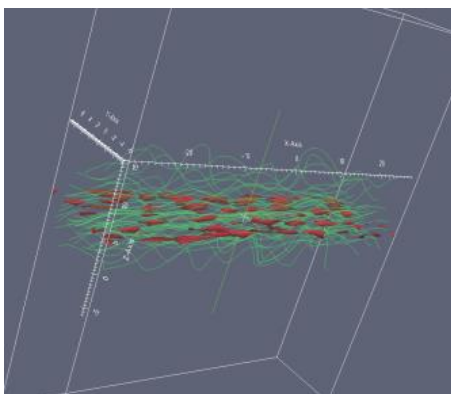


図 7 : 宇宙線パーカー不安定のシミュレーション結果。緑線が磁力線、赤等値面が密度。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

本年度は太陽対流層から光球、彩層、コロナまでを一つのボックスに含むシミュレーションのための計算コード開発及び 2 次元計算の実施を行った。年度前半では、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、並列効率が高く計算量の小さい STS 法による非等方熱伝導スキーム、輻射輸送方程式の解法では比較的並列効率の高い Short Characteristic 法を使用した効率的なコードを開発した。年度後半では開発したコードを用いて太陽対流層からコロナまでを含む 2 次元計算を行った。当初計画では 3 次元計算を予定していたが、結果がグリッドサイズにかなり依存することが予想されたことと、まず物理過程への理解を深めることが優先されると考えたため、予定を変更してより高解像度で計算領域の広い 2 次元計算を行った。その結果、スピキュールと呼ばれる構造を 2 次元計算ながら再現することに成功した。以上から、当初計画の 8 割程度は達成できたと考える。

今後の展望としては、(1)本コードを用いた 3 次元計算の実施、(2)プラズマの励起・電離の非平衡過程を導入した非局所熱力学平衡状態方程式の計算手法の開発と計算の実施、(3)将来的な課題として整合的な多次元 NLTE-RMHD 計算のため散乱を入れた輻射輸送方程式解法の効率化を計画している。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Hotta, H.; Rempel, M.; Yokoyama, T., 2015b, "Efficient small-scale dynamo in solar convection zone", *The Astrophysical Journal*, 803, 42

Hotta, H.; Rempel, M.; Yokoyama, T., 2015a, "High-resolution Calculation of the Solar Global Convection with the Reduced Speed of Sound Technique. II. Near Surface Shear Layer with the Rotation", *The Astrophysical Journal*, 798, 51

Kaneko, T.; Yokoyama, T., 2014, Simulation Study of Solar Plasma Eruptions Caused by Interactions between Emerging Flux and Coronal Arcade Fields Simulation Study of Solar Plasma

Eruptions Caused by Interactions between Emerging Flux and Coronal Arcade Fields, *The Astrophysical Journal*, 796, 44

Hotta, H.; Rempel, M.; Yokoyama, T., 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,

(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

Hotta, H., Rempel, M., Yokoyama, T., "Solar differential rotation maintained by small- and large-scale convection", *ASTRONUM*, Long beech, 2014/6/26 招待講演

Yokoyama, T., Hotta, H., Rempel, M., Numerical Simulations of Convection and Dynamo in the Solar Interior, *AOGS annual meeting*, 札幌, 2014/7/28 招待講演

Yokoyama, T., Solar Jets as a Manifestation of Magnetic Reconnection, *AOGS annual meeting*, 札幌, 2014/7/28 招待講演

Hotta, H., Rempel, M., Yokoyama, T., "High-resolution calculation of solar convection zone using K-computer", *PLASMA2014*, 新潟, 2014/11/20 招待講演

Hotta, H., Rempel, M., Yokoyama, T., High resolution calculations of solar global convection and dynamo, workshop for "Sunspot formation: theory, simulations and observations", Stockholm, 2015/3/9, 招待講演

(4) 国内会議発表

Wang, S., Yokoyama, T., Isobe, H., Investigation on guide field dependence of shock-evoking positive-feedback model of magnetic reconnection, 日本天文学会 2014 秋季年会, 山形大学

堀田英之, M. Rempel, 横山央明, 対流層内部の小スケール磁場の流れ場への非常に強い揺り返しの発見, 日本天文学会 2014 秋季年会, 山形大学

金子岳史, 横山央明, Keppens, 放射凝縮により形成されるプロミネンスの温度-密度間の冪乗則, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学

河野隼也, 横山央明, 彩層電波アルフベン波の反射に関する研究, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学

飯島陽久, 横山央明, 簡易輻射冷却を用いた局所熱力学平衡 MHD 太陽対流大気結合モデルの構築, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学

(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ー「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>

Hotta, H., Thermal Convection, Magnetic Field, and Differential Rotation in Solar-type Stars, 2015, Springer Theses