14-NA05

Joint Usage / Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures

横山 央明 (東京大学)

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、(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。

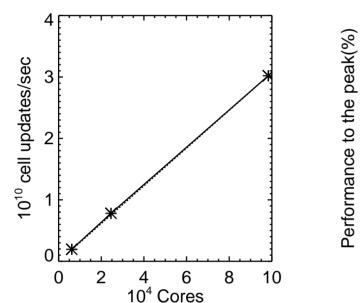
2.太陽内部全球のシミュレーション

太陽対流層は、熱対流不安定の状況下にあり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」クラスの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,105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)

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)

「京」では世界最高解像度の太陽熱対流の実現とそれに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: Hotta, Rempel, Yokoyama, 2014, ApJ, 786, 24)



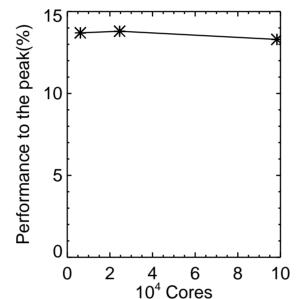


図1「京」で測定したコードの性能(左)1秒間に更新できるグリッドセル数のコア数依存性(右)実行効率のコア数依存性.

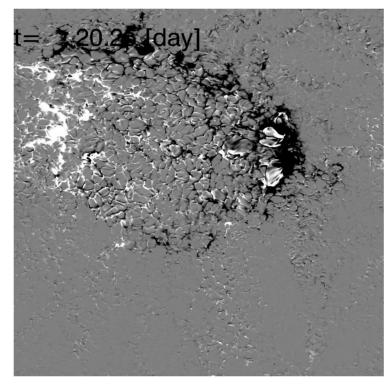


図 2 計算上の対流安定層と不安定層の境界での動径 方向磁場の分布. 白が正極(N極), 黒が負極(S極). 左右 端付近にみえる比較的大きな磁場が, 形成された黒点.

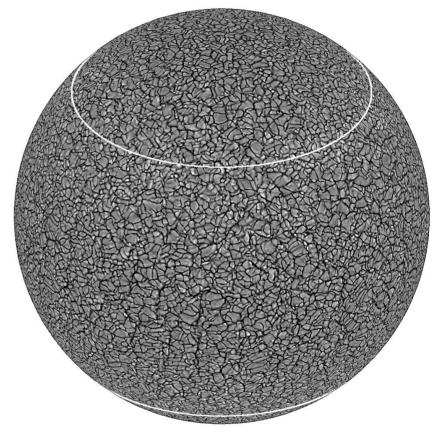


図 3 太陽全球熱対流シミュレーションの結果. 上部境界付近の動径方向速度の様子.

3.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.

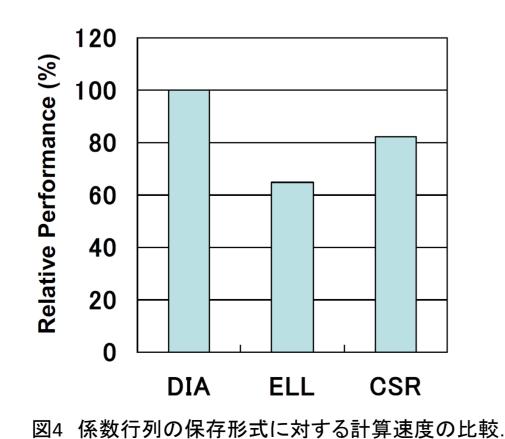
非等方熱伝導の数値解法としては、タイムスケールをCFL条件制限されない陰的解法が第一候補である.しかし、陰解法では係数行列の反転にグローバルな通信を必要とするため、陽解法と比べて並列性が悪くなりやすい.また、行列の反転においては適切な前処理が効率を劇的に改善する場合がある.

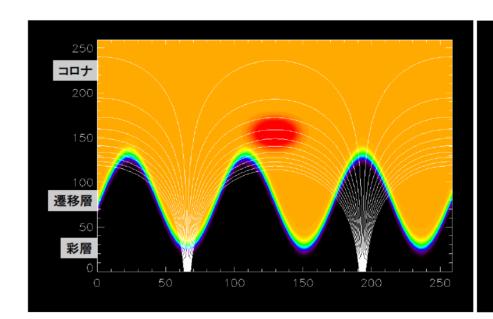
磁場に沿った非等方熱伝導の数値解法の第一候補として,CFL条件に制限されない陰的解法を検討した.係数行列が非対称であるため,前処理付きKrylov部分空間法の一種であり,安定性に優れたリスタート付のFlexible GMRES法を実装し,並列化を行った.

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)

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)





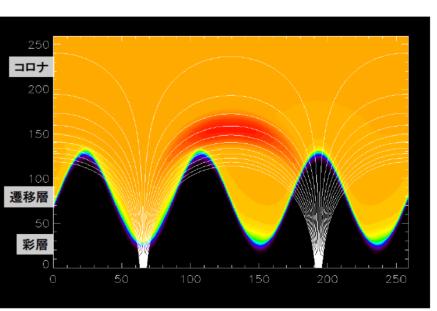


図5 太陽大気モデルにおける熱伝導の様子. 上が初期条件, 下が時間発展後. カラーは温度の対数, 白線は磁力線を表す.

学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第6回シンポジウム