

ブラソフモデルによる次々世代ジオスペースシミュレーション

梅田隆行¹, 深沢圭一郎², 梅野健太郎¹, 松本洋介¹, 中村琢磨³, 篠原育³

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²九州大学理学研究院, ³宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

umeda@stelab.nagoya-u.ac.jp

概要 : 宇宙の体積のうち 99.9%以上はプラズマの状態にあり、宇宙プラズマの研究による宇宙天気予報の実現は今後の人類の宇宙活動にとって重要な課題である。本研究グループでは、第一原理ブラソフマックスウェル方程式系を高精度かつ安定に解き進めるためのソルバーを独自に開発している。MPI とスレッドのハイブリッド並列化により、T2K や FX1 などの 1,000 コア以上の超並列スーパーコンピュータに対してスケーラブルな性能を得ることに成功した。

1 はじめに

宇宙の体積のうち 99.9%以上はプラズマ（電離気体）の状態にあり、宇宙プラズマの研究は人類が活動している太陽-地球系空間「ジオスペース」を理解する上で本質的である。特に、太陽表面の爆発（フレア）や太陽コロナホールから噴き出している高速太陽風によって引き起こされる地磁気の乱れなどの宇宙嵐を予測するための宇宙天気は人類の今後の宇宙活動において極めて重要となる。しかし、プラズマの挙動はその強い非線形性により非常に複雑であり、その理解には計算機シミュレーションが不可欠である。実際、次世代スーパーコンピュータに関する文部科学省のいくつかの資料の中には、第 3 期科学技術基本計画の目標 1 「飛躍知の発見・発明」に関連する課題として「宇宙天気予報の実現」が挙げられている[1]。

ジオスペースにおいて、太陽コロナ上空から地球電離圏上空までの空間はプラズマが非常に希薄であり、ほぼ無衝突とみなすことができる。この場合のプラズマ運動論は、速度分布関数の変化を記述するブラソフ（無衝突ボルツマン）方程式と電磁場の変化を記述するマックスウェル方程式で表わされる。またブラソフモデル以外の第一原理手法として、個々の荷電粒子の運動をニュートン-ローレンツ運動方程式により直接解き進める粒子モデルも存在する。ブラソフ式の 0~2 次モーメントをとり、質量、運動量、エネルギーの保存則を導くと磁気流体（MHD）方程式が得られる。MHD モデルは無衝突プラズマを扱う方程式系としては最も近似が粗いが、恒星圏全体や惑星磁気圏全体といった巨視的スケールの現象を扱うのに適しており、近年の宇宙天気シミュレーション手法の主流となっている。

一方で、宇宙プラズマの多スケール性は近年の人工衛星による「その場」観測でも指摘されている。宇宙プラズマには、流体としての巨視的（マクロ）スケールの現象、重いイオンが電磁場と相互作用する中間（メゾ）スケールの現象および軽い電子の運動による微視的（ミクロ）スケールの現象が存在し、しかも多スケール間の現象が互いに影響し合っている。「宇宙天気予報の実現」には、この多スケール間の相互作用であるスケール間結合を理解することが本質であり、そのためには既存の MHD モデルから脱却したモデルを新たに構築する必要がある。本研究では、次世代多流体モデルをさらに超えた、次々世代の第一原理（粒子・ブラソフ）モデルの開発を目指している。

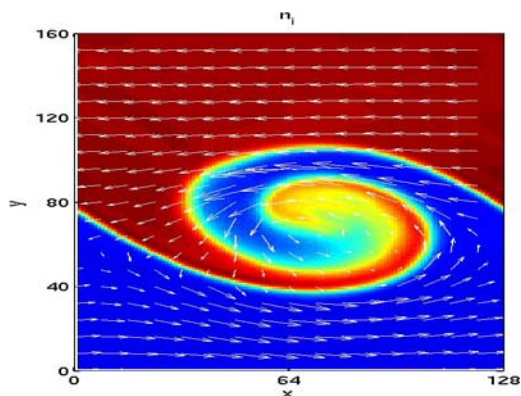
2 ブラソフモデル

粒子モデルおよびブラソフモデルは宇宙プラズマの第一原理シミュレーション手法であり、今後の計算機性能の発達とともにその適用範囲は拡大していくであろう。粒子モデルは非常に完成度の高い手法である半面、オイラー量である電磁場とラグランジュ量である粒子の位置・速度が混在しているため、超並列計算が非常に難しい。粒子モデルによる次世代ジオスペースシミュレーションには、10 万コアを超える超並列計算においても高い実効効率を出すことが課題となる。一方ブラソフモデルでは、速度空間 3 次元・実空間 3 次元の計 6 次元を扱うため、必要なメモリ量が桁違いに多い。このため手法が未成熟であり、また既存のコンピュータでの実行も容易ではない。例えば、市販の PC クラスで実行できるサイズは（速度空間 100 点×100 点）×（実空間 100 点×100 点）程度（~4 ギガバイト）であるが、実空間 100² 点で新

しいサイエンスを議論することは非常に難しく、大型計算は必須である。しかし、ブラソフモデルでは物理量がすべて格子点上で定義されるため、流体モデルと同様に領域分割法による並列計算が可能であるという利点がある。

筆者らは、発展途上であるブラソフモデルを次々世代ジオスペースシミュレーション手法としてとらえ、研究開発を行っている。多次元ブラソフ方程式を安定かつ高精度に解くための保存型・無振動・正值性保証スキームを独自に開発した [2, 3]。また、これまでに粒子モデルで行われたシミュレーションと同様のパラメータによるベンチマークテストにより、磁気リコネクションやケルビン-ヘルムホルツ不安定性などの基本的な問題に対して、過去の粒子シミュレーション結果の再現に成功している (図 1 参照)。

また、超並列計算機における実効性能評価として、東京大学情報基盤センターの T2K オープンスパコン、名古屋大学情報基盤センターの HX600 および、名古屋大学・宇宙航空研究開発機構の FX1 を用いて計算速度を測定した。その結果、T2K の 1 コアで 1.48 ギガフロップス(ピーク性能の 16.1%)、1,024 コアで 1.26 テラフロップス(ピーク性能の 13.4%)、HX600 の 1 コアで 1.73 ギガフロップス(ピーク性能の 17.3%)、512 コアで 789 ギガフロップス(ピーク性能の 15.3%)、FX1 の 1 コアで 1.38 ギガフロップス(ピーク性能の 13.8%)、1,024 コアで 1.35 テラフロップス(ピーク性能の 13.2%)、12,032 コアで 15.4 テラフロップス(ピーク性能の 12.8%)の実効性能を得た。特筆すべき結果として、Opteron クラスタ型計算機(T2KおよびHX600)では 80%以上の並列化効率を達成し、FX1 では 90%以上の並列化効率を達成している。即ち 10 万コア・10 ペタフロップス級の次世代スーパーコンピュータにおいて、1 ペタフロップスの実効性能を得ることが十分に可能であることを示唆している。



3 最後に

次世代スーパーコンピュータを含む 10 ペタフロップス・1 ペタバイト級のスーパーコンピュータにより、本格的な 6 次元ブラソフシミュレーションが初めて実現可能なること、および、ブラソフモデルが次世代スーパーコンピュータの全リソースを効率よく使用できるアプリケーションの 1 つであることの 2 点を付記する。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 若手研究 (B) No.21740352 の助成を受けて行われた。名古屋大学情報基盤センターFX1 およびHX600 の計算リソースは同大学太陽地球環境研究所の計算機共同利用研究より提供された。東京大学 T2K オープンスパコンの計算リソースは同大学情報基盤センターの共同研究プロジェクト (代表: 深沢圭一郎) より提供された。宇宙航空研究開発機構 FX1 の計算リソースは宇宙科学研究本部の共同利用より提供された。

参考文献

- [1] e.g., 藤木 完治, スーパーコンピューティングの国家戦略 (政策講演), 次世代スーパーコンピューティングシンポジウム 2007, 理化学研究所, 2007 年 10 月 3 日. (<http://www.nsc.riken.jp/sympo2007/slide/seisaku-kouen.pdf>)
- [2] T. Umeda, A conservative and non-oscillatory scheme for Vlasov code simulations, *Earth, Planets and Space*, Vol. 60, 773-779, 2008.
- [3] T. Umeda, K. Togano, and T. Ogino, Two-dimensional full-electromagnetic Vlasov code with conservative scheme and its application to magnetic reconnection, *Computer Physics Communications*, Vol. 180, 365-374, 2009.

図 1 : ブラソフモデルによるケルビン-ヘルムホルツ不安定性 (左) および磁気リコネクション (下) のシミュレーション例.

