

平成21年 4月30日 現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)

研究期間：2007～2008

課題番号：19840024

研究課題名(和文) 革新的なブラソフシミュレーション手法の研究

研究課題名(英文) Study of Revolutionary Vlasov simulation techniques

研究代表者

梅田 隆行 (UMEDA TAKAYUKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：40432215

研究成果の概要：

次世代宇宙プラズマシミュレーション技術である第一原理ブラソフコードの研究開発を行った。連続体の多次元発展方程式である無衝突ボルツマン(ブラソフ)方程式を高精度かつ安定に解き進めることのできる数値解法を開発し、宇宙プラズマ中の様々なマルチスケール現象に対してベンチマークテストを行った。その結果、新たに開発したコードは従来のブラソフコードよりもはるかにロバストであることがわかった。次世代スーパーコンピュータに向けた高速化および超並列化が今後の課題である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,350,000	0	1,350,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
総計	2,700,000	405,000	3,105,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：プラズマ・コンピュータシミュレーション・第一原理・次世代スーパーコンピュータ・アルゴリズム・計算科学

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙プラズマは非線形性の強い媒質であり、人工衛星の「その場」観測データからだけではその時空間発展の様子を必ずしも理解できず、研究手段としての計算機シミュレーションが古くから発展してきた。日本のジオテール磁気圏観測衛星の成功に端を発した近年の高精度磁気圏衛星による観測結果として、宇宙プラズマのマルチスケール性は広く認識されることとなった。しかし、従来の研究スタイルでは、磁気圏のグローバル構造を扱う磁気流体 (MHD) シミュレーションとプラズマ粒子のマイクロ素過程を扱う運動論 (粒子・ブラソフ) シミュレーションはそれぞれ個別に行われてきた。これは、グローバル磁気圏と粒子運動論の時空間スケールがあまりに違いすぎるためにこれまでの計算機の性能では両者を同時に解き進めることが困難であったためである。しかし近年、宇宙プラズマのマルチスケール物理の重要性とともに、太陽から放出された高速プラズマ流 (太陽風) が地球磁気圏に与える影響を研究する「宇宙天気」の重要性も増している。宇宙天気予報の精度を格段に上げるためには、従来の MHD 近似モデルから脱却した粒子運動論モデルを用いる必要があり、グローバル磁気圏と粒子運動論を同時に解くことができる新しいシミュレーション手法に対するニーズが高まりつつある。

## 2. 研究の目的

本研究では、次世代プラズマシミュレーション手法としてブラソフコードに注目し、その要素技術開発を行うことを目的とする。ブラソフコードは無衝突プラズマの運動論を自己無頓着に解き進める第一原理シミュレーション手法の1つであり、無衝突ボルツマン (ブラソフ) 方程式とマックスウェル方程式により、プラズマ粒子の位相空間分布関数と電磁界の時間発展を解き進めるコードである。プラズマ粒子の分布関数は実空間3次元および速度空間3次元の計6次元変数として表されるため、その時間発展を解き進めるためには膨大な計算機メモリが必要である。そのため、これまでにブラソフコードの研究開発はほとんど行われておらず、発展途上にある。しかし、同じ第一原理プラズマ運動論シミュレーション手法である粒子コードと比べて、数値ノイズが少ないことと並列計算が容易であることの2つの利点があり、

今後の次世代スーパーコンピュータにおけるアプリケーションとして大いに期待できる。

## 3. 研究の方法

ブラソフ方程式は線形移流方程式の組み合わせとして記述できるため、線形移流方程式を高精度かつ安定に解くことが重要である。本研究ではまず、線形移流方程式の解法について研究を行い、ブラソフシミュレーションに適した数値解法を開発する。

次に、世界的にもこれまでにほとんど成功していない多次元ブラソフコードを開発する。また、粒子シミュレーション結果との直接比較により、現状のブラソフコードの有用性を評価し、今後の開発要素を洗い出す。

## 4. 研究成果

本研究ではまず、数値振動を完全に除去しつつ解の正值性と保存則を満たしたまま1次元の線形移流方程式を解くことができる3次精度の数値補間法を開発し、ブラソフ方程式に適用した[Umeda, 2008]。次に、新しく開発した数値補間法を多次元モデルへと拡張した[Umeda et al., 2009]。一方で、新しく開発した数値補間法を1次元磁気流体 (MHD) モデルにも適用し、連続的な波動に対しても不連続的な衝撃波に対してもロバストなMHDコードを開発した[Tanaka et al., 2009]。

新しく開発した多次元ブラソフコードの性能評価として、これまでに主に粒子コードにおいて行われてきたプラズマ波動の研究のみならず、磁気リコネクションやケルビン-ヘルムホルツ不安定性をはじめとする様々なマルチスケール物理過程の計算機実験を行った。プラズマ波動のシミュレーションでは、粒子コードに対して格段に低い数値ノイズの実現により、大振幅プラズマ波動のパラメトリック不安定性の発展をより詳細に解析することに成功した[Umeda, 2007; Umeda and Ito, 2008; Kumashiro et al., 2009]。

一方、磁気リコネクションはこれまでに、磁気流体 (MHD)、Hall-MHD、電磁ハイブリッドおよび電磁粒子コードを用いて計算されており、計算結果を比較できる点で最適な課題である。本研究では、イオンの慣性長に対

して十分に荒い解像度を用いた場合とイオン慣性を十分に解像できる高精度シミュレーションを行った場合を比較し、前者が MHD シミュレーションの結果と近くなり、後者が Hall-MHD および電磁ハイブリッドシミュレーションの結果と近くなることを示した [Umeda et al., 2009]。この結果は、ブラソフコードがさまざまな解像度の計算に対してロバストであり、今後の次世代スーパーコンピュータにおけるマルチスケールシミュレーションに非常に適したアプリケーションであることを意味している。

今後、より高精度な数値補間法の研究開発を進めるとともに、次世代スーパーコンピュータに向けた高速化および超並列化を行っていく予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Takana, S., T. Umeda, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, and T. Ogino, Implementation of non-oscillatory and conservative scheme into magnetohydrodynamic equations, *Earth, Planets and Space*, in press, 2009.
  - ② Kumashiro, T., T. Hada, Y. Nariyuki, and T. Umeda, Vlasov simulation of finite amplitude magnetohydrodynamic waves in the solar wind: Development of Vlasov-Hall-MHD code, *Journal of Plasma and Fusion Research Series*, in press, 2009.
  - ③ Umeda, T., 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, No.3, 365-374, 2009.
  - ④ Umeda, T., and T. Ito, Vlasov simulation of Langmuir decay instability, *Physics of Plasmas*, Vol.15, No.8, 084503, 2008.
  - ⑤ Umeda, T., A conservative and non-oscillatory scheme for Vlasov code simulations, *Earth, Planets and Space*, Vol.60, No.7, 773-779, 2008.
- ⑥ Umeda, T., Vlasov simulation of Langmuir wave packets, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol.14, No.5, 671-679, 2007.
- [学会発表] (計 18 件)
- ① 梅田 隆行, ブラソフシミュレーションでジオスペースを解く, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月 27 日.
  - ② Umeda, T., et al., New Vlasov simulation techniques for scale coupling in the plasma universe, Workshop on Cross-Scale Coupling in Plasmas, Rende, Italy, March 11, 2009.
  - ③ 梅田 隆行, ジオスペースをブラソフシミュレーションで解く, プラズマ科学シンポジウム 2009, 名古屋大学, 2009 年 2 月 2 日.
  - ④ Umeda, T., K. Togano, and T. Ogino, Vlasov simulation of GEM magnetic reconnection challenge, American Geophysical Union (AGU) 2008 Fall meeting, San Francisco, USA, December 17, 2008.
  - ⑤ Umeda, T., Beyond the MHD and toward cross-scale plasma science: A Vlasov simulation framework at STEL, International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, Nagoya, Japan, November 28, 2008.
  - ⑥ Togano, K., T. Umeda, and T. Ogino, Vlasov code simulation of GEM reconnection challenge, International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, Nagoya, Japan, November 28, 2008.
  - ⑦ Umeda, T., Status of Japanese young simulationists, International Symposium: ERG, SCOPE and Beyond, Sagamihara, Japan, November 26, 2008.
  - ⑧ Umeda, T., et al., Beyond the MHD: A Vlasov simulation framework at STEL, International

- Symposium: Fifty Years after IGY, Tsukuba, Japan, November 11, 2008.
- ⑨ Togano, K., T. Umeda, and T. Ogino, Vlasov code simulation of GEM reconnection challenge, International Symposium: Fifty Years after IGY, Tsukuba, Japan, November 11, 2008.
- ⑩ Umeda, T., and T. Ito, Vlasov simulation of Langmuir decay instability, 14th International Congress on Plasma Physics (ICPP), Fukuoka, Japan, September 8, 2008.
- ⑪ Togano, K., T. Umeda, and T. Ogino, Two-dimensional Vlasov code simulation of magnetic reconnection, 14th International Congress on Plasma Physics (ICPP), Fukuoka, Japan, September 8, 2008.
- ⑫ Kumashiro, T., T. Hada, Y. Nariyuki, and T. Umeda, Vlasov simulation of finite amplitude magnetohydrodynamic waves in solar wind: Parametric instability of Alfvén waves, 14th International Congress on Plasma Physics (ICPP), Fukuoka, Japan, September 8, 2008.
- ⑬ 梅田 隆行, 他, STP シミュレーションコード開発の将来展望, 第 124 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 仙台市戦災復興記念館, 2008 年 10 月 11 日.
- ⑭ 梅田 隆行, 他, STP シミュレーションコード開発の将来展望と京速計算機, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008 年 5 月 29 日.
- ⑮ 梅田 隆行, 他, ペタスケールコンピューティングに向けた STP シミュレーションコード開発, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008 年 5 月 26 日.
- ⑯ Umeda, T., K. Togano, and T. Ogino, Two-dimensional Vlasov code simulation of magnetic reconnection, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection 2008, Okinawa, Japan, March 6, 2008.
- ⑰ 梅田 隆行, 他, ブラソフシミュレーションで拓く太陽地球惑星科学, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 秋葉原コンベンションホール, 2007 年 12 月 20 日.
- ⑱ Umeda, T., Vlasov code simulations, International CAWSES Symposium, Kyoto, Japan, October 25, 2007.

[その他]

ホームページ等

<http://center.stelab.nagoya-u.ac.jp/member/umeda/vlasov/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梅田 隆行 (UMEDA TAKAYUKI)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教  
研究者番号: 40432215

### (2) 研究協力者

梶野 健太郎 (TOGANO KENTARO)  
名古屋大学・大学院工学研究科・修士課程