

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740352

研究課題名(和文)

次世代スーパーコンピュータに向けた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 Vlasov simulation techniques for next-generation supercomputers

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(和文)：

次々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。超多次元保存則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た。スカラ型超並列計算機に向けた並列化を行い、1,000以上のコアを用いた場合でも80%を超える並列計算効率を得ることに成功した。また宇宙プラズマ中の様々なマルチスケール現象に対して適用を行い、流体スケールと粒子スケール間の結合を示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：

We study numerical schemes for the first-principle Vlasov code as a second-next-generation computer simulation technique of space plasma. We developed numerical algorithms for solving the collisionless Boltzmann (Vlasov) equation which is a hyper-dimensional conservation law. The new simulation code is parallelized for scalar massively parallel computers and has achieved more than 80% parallel efficiency on more than 1,000 CPU cores. The new code is applied to various multi-scale processes in space plasma. The numerical results imply the existence of cross-scale coupling between fluid scale and particle scale.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

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：宇宙プラズマ、プラズマ計算機実験

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、流体スケールと粒子運動論スケールを同時に扱う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と共に、次世代スーパーコンピュータ「京」をはじめとするポストペタスケールスーパーコンピュータに向けた超並列化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撞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との相互作用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進んでおらず、未だ発展途上にある。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、今後のポストペタスケール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

近年のスーパーコンピュータは、Blue GeneやT2Kオープンスパコンに見られるように、スカラ型CPUを用いた超並列クラスター計算機が主流となっており、次世代スーパーコンピュータ「京」もスカラ型超並列計算機である。このため、本研究グループが開発した多次元ブラソフコードに対してMPI及びスレッド並列を併用した超並列化を行う。

また、テアリング不安定性（磁気リコネクション）やケルビン-ヘルムホルツ不安定性（境界層乱流）などの流体スケールの現象に

対して適用し、これまでに行われ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

①コードの超並列化

本研究グループがこれまでに開発してきた多次元ブラソフコードに対してMPI及びスレッド並列を併用した超並列化を行い、日本国内の主要なスカラ型スーパーコンピュータにおいて性能評価を行った。東京大学のHA8000・1024コアで実効効率14.5%、並列効率83%、名古屋大学のHX600・1024コアで実効効率15.5%、並列効率89%、名古屋大学のFX1・1024コアで実効効率13.9%、並列効率98%、九州大学のSR16000・128コアで実効効率10.5%、並列効率96%を達成し、10万を超える超並列計算が十分に行えることを示した。

②磁気リコネクション

新たに開発した超並列コードを用いて磁気リコネクションのマルチスケール性について調べた。リコネクションのx-ポイント周辺において電子密度が大きく減少することにより、電子の運動論効果による磁気拡散領域が従来の電磁粒子シミュレーションによって得られた空間スケールよりも大きく広がり、これによって磁気拡散領域が多階層構造を持つことを示した。これは、従来の粒子シミュレーション手法では限られた粒子数による数値的な雑音のために得ることができなかった結果である。

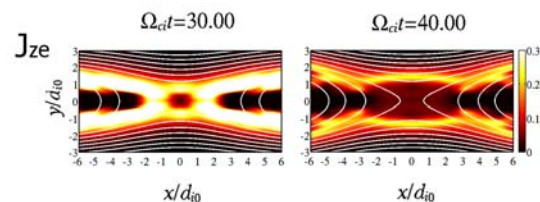


図1：ブラソフシミュレーションで得られた電子スケールの電流層

③ケルビン-ヘルムホルツ不安定性

新たに開発した超並列コードにより、ケルビン-ヘルムホルツ(KH)不安定性の第一原理ブラソフシミュレーションに世界で初めて成功した。高密度領域と低密度領域の混合層付近で2成分プラズマの分布関数のはっきりと現れることを確認した。また、レイリー-テイラー(RT)不安定性で生じる2次の渦の空間スケールがイオンジャイロ半径よりも小さくなることを明らかにし、電子スケールの存在を示唆する結果を得た。

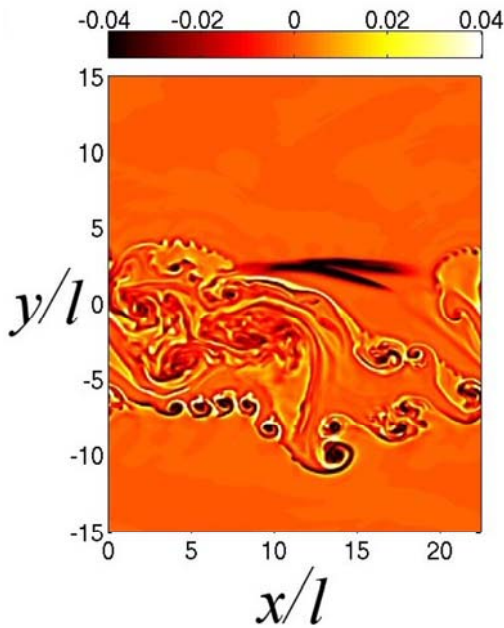


図2：ブラソフシミュレーションで得られたKH不安定性の微細な渦構造

④ 太陽風と天体との相互作用

これまで太陽風と天体との相互作用のシミュレーション研究は主に磁気流体力学(MHD)コードやハイブリッドコードを用いて行われてきた。しかし、イオンジャイロ半径オーダーの大きさを持つ非磁化天体や弱磁場天体の場合には、太陽風プラズマが天体表面へ到達するため、イオンのジャイロ運動と天体の帯電を同時に扱う必要がある、従来のMHD・ハイブリッド・粒子コードで扱うのは困難であった。本研究では、計算格子スケールの数値ノイズを除去できる性質を持つブラソフコードによってこれらを同時に扱い、天体スケールのグローバルブラソフシミュレーションを世界で初めて行った。特に、MHDとイオン粒子のスケール間結合に注目し、天体の夜側に現れるウェイク電場の起源が天体からの距離に依存していることを明らかにした。

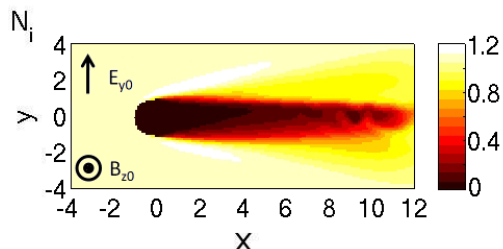


図3：ブラソフシミュレーションで得られた非対称なウェイク構造

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計11件)

- ① Umeda, T., Effect of ion cyclotron motion on the structure of wakes: A Vlasov simulation, *Earth, Planets and Space*, in press, 2011.
- ② Pavan, J., P. H. Yoon, and T. Umeda, Quasilinear theory and simulation of Buneman instability, *Physics of Plasmas*, Vol.18, No.4, 042307, 2011.
- ③ Nariyuki, Y., T. Umeda, T. Kumashiro, and T. Hada, Nonlinear evolution of parallel propagating Alfvén waves: Vlasov-MHD simulation, *Planetary and Space Science*, Vol.59, No.8, 767-771, 2011.
- ④ Amano, T., K. Seki, Y. Miyoshi, T. Umeda, Y. Matsumoto, Y. Ebihara, and S. Saito, Self-consistent kinetic numerical simulation model for ring current particles in the Earth's inner magnetosphere, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, No.A2, A02216, 2011.
- ⑤ Umeda, T., T. Kimura, K. Togano, K. Fukazawa, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, N. Terada, T. K. M. Nakamura, and T. Ogino, Vlasov simulation on the interaction between solar wind and a dielectric body, *Physics of Plasmas*, Vol.18, No.1, 012908, 2011.
- ⑥ Jain, N., T. Umeda, and P. H. Yoon, Modeling nonlinear development of Buneman instability with linear dispersion theory, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol.53, No.2, 025010, 2011.
- ⑦ Yoon, P. H., and T. Umeda, Nonlinear turbulence theory and simulation of Buneman instability, *Physics of Plasmas*, Vol.17, No.11, 112317, 2010.
- ⑧ Fukazawa, K., T. Umeda, T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, and T. Ogino, Performance measurement of magneto-hydro-dynamic code for space plasma on the various scalar type supercomputer systems, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.38, No.9, 2254-2259, 2010.
- ⑨ Nariyuki, Y., and T. Umeda, On the nonlinearity of the Langmuir turbulence excited by a weak electron beam-plasma interaction, *Physics of Plasmas*, Vol.17, No.5, 054506, 2010.
- ⑩ Umeda, T., J. Miwa, Y. Matsumoto, T. K. M. Nakamura, K. Togano, K. Fukazawa, and I. Shinohara, Full electromagnetic Vlasov code simulation of the Kelvin-Helmholtz instability, *Physics of Plasmas*, Vol.17, No.5, 052311, 2010.
- ⑪ Umeda, T., K. Togano, and T. Ogino,

Structures of diffusion regions in collisionless magnetic reconnection, *Physics of Plasmas*, Vol.17, No.5, 052103, 2010.

[学会発表] (計 24 件)

- ①梅田 隆行, 深沢 圭一郎, 成行 泰裕、無衝突プラズマの超並列ブラソフシミュレーション、2011年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム、2011年1月18日、産業技術総合研究所。
- ②梅田 隆行、無衝突プラズマの超並列ブラソフシミュレーション、次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム 2010、2011年1月17日、ニチイ学館。
- ③T. Umeda, M. Ashour-Abdalla, J. S. Pickett, M. L. Goldstein, Vlasov simulation of electrostatic solitary structures in four-component plasmas, American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall meeting, 2010年12月13日, San Francisco, USA.
- ④T. Umeda, K. Fukazawa, Y. Nariyuki, Y. Matsumoto, T. K. M. Nakamura, Highly scalable full electromagnetic Vlasov solver for cross-scale coupling in space plasma, International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC), 2010年11月16日, New Orleans, USA.
- ⑤梅田 隆行, ウェイク形成に対するイオンジャイロ運動の効果、第128回地球電磁気・地球惑星圏学会、2010年11月3日、沖縄県市町村自治会館。
- ⑥T. Umeda, Effect of ion cyclotron motion on the structure of wakes, 5th Alfvén Conference on Plasma Interaction with Non-magnetized Planets/Moons and its Influence on Planetary Evolution, 2010年10月8日, 北海道大学。
- ⑦T. Umeda, Y. Matsumoto, T. K. M. Nakamura, K. Fukazawa, T. Ogino, Vlasov code simulation of cross-scale coupling in space plasmas, 5th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows, 2010年6月15日, San Diego, USA.
- ⑧梅田 隆行, 深沢 圭一郎, 梅野 健太郎, 松本 洋介、次世代ブラソフコードによるジオスペースシミュレーション、2010年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム、2010年1月14日、工学院大学。
- ⑨K. Togano, T. Umeda, T. Ogino, Two-dimensional Vlasov code simulation of magnetic reconnection, American Geophysical Union (AGU) 2009 Fall meeting, 2009年12月15日, San Francisco, USA.
- ⑩T. Umeda, T. Kimura, K. Fukazawa, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, N. Terada, T. K. M. Nakamura, T. Ogino, Vlasov simulation on the

interaction between solar wind and a dielectric body, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas, 2009年10月6日, Lisbon, Portugal.

- ⑪梅田 隆行、太陽風と誘電物体との相互作用に関するブラソフシミュレーション、第126回地球電磁気・地球惑星圏学会、2009年9月28日、金沢大学。
 - ⑫梅野 健太郎, 梅田 隆行, 荻野 竜樹、磁気リコネクションの2次元ブラソフシミュレーション、第126回地球電磁気・地球惑星圏学会、2009年9月28日、金沢大学。
 - ⑬T. Umeda, New Vlasov simulation techniques for multi-scale dynamics of magnetosphere, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 6th Annual General meeting, 2009年8月13日, Suntec City, Singapore.
 - ⑭T. Umeda, Recent advancement on Vlasov code simulations, 9th International School for Space Simulations (ISSS-9), 2009年7月7日, Saint-Quentin-en-Yvelines, France.
 - ⑯K. Togano, T. Umeda, T. Ogino, Two-dimensional Vlasov code simulation of magnetic reconnection, 9th International School for Space Simulations (ISSS-9), 2009年7月7日, Saint-Quentin-en-Yvelines, France.
 - ⑰梅田 隆行, 深沢 圭一郎, 松本 洋介, 梅野 健太郎、ブラソフコードの現状と展望、日本地球惑星科学連合 2009年大会、2009年5月21日、幕張メッセ。
 - ⑱梅野 健太郎, 梅田 隆行, 荻野 竜樹、磁気リコネクションの2次元ブラソフシミュレーション、日本地球惑星科学連合 2009年大会、2009年5月21日、幕張メッセ。
- 他 7 件

[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) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

深沢 圭一郎 (FUKAZAWA KEIICHIRO)
九州大学・理学研究院・日本学術振興会特別研究員

松本 洋介 (MATSUMOTO YOSUKE)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・日
本学術振興会特別研究員
梅野 健太郎 (TOGANO KENTARO)
名古屋大学・大学院工学研究科・修士課程

(H 2 1)
津村 全 (TSUMURA TAMOTSU)
名古屋大学・大学院工学研究科・修士課程
(H 2 2)