

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011 ～ 2012
 課題番号：23740367
 研究課題名（和文）
 大規模ブラソフシミュレーションによる宇宙プラズマのスケール間結合の研究
 研究課題名（英文）
 Study of cross-scale coupling in space plasma via large-scale Vlasov simulations
 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）：

ポストペタフロップスコンピュータ用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、10,000コア以上のスカラ型超並列計算機に向けた並列化を行った。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、世界で初めて磁化天体のグローバルブラソフシミュレーションに成功するとともに、速度シア層におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性において、流体スケールの境界層渦構造の発展が、粒子スケールのイオンジャイロ運動に大きく影響を受ける結果を得た。

研究成果の概要（英文）：

We study numerical schemes for the first-principle Vlasov code as a post-Peta-scale 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 with more than 10,000 CPU cores. The new code is applied to various multi-scale processes in space plasma. The first global Vlasov simulation of a magnetized astronomical body is succeeded. Also, it is shown that temporal evolution of fluid-scale Kelvin-Helmholtz vortices generated at a velocity-shear layer is strongly affected by the particle-scale ion gyro motion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：超高層物理学・宇宙プラズマ

キーワード：プラズマ科学、計算機シミュレーション、計算科学、第一原理、地球惑星科学、ハイパフォーマンスコンピューティング

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・プラズマ)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、京コンピュータをはじめとするペタスケール以上のスーパーコンピュータにおいて高い並列化効率を達成することを目的とする。同時に、大規模超並列計算によって宇宙プラズマの諸現象における流体力学的スケールと粒子運動論的スケール間の結合過程の解明を目指すものである。

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、今後のエクサ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

近年に国内に配備されたスーパーコンピュータである理化学研究所の京コンピュータ、東京大学のFX10及び、九州大学のCX400において、これまでに開発してきた超並列ブラソフコードの性能評価を行い、これらの計算機システムにおける性能チューニングの

共通性や方向性を見出す

また、超並列大規模計算によって、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性(速度シア層)などの流体スケールの境界層不安定現象に対する流体力学スケールと粒子運動論スケールの物理過程の結合を明らかにすると共に、世界初となる磁化天体のグローバルブラソフシミュレーションを試みる。

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並列版多次元ブラソフコードを用いて、日本国内において最近配備されたスカラ型スーパーコンピュータにおける性能評価を行った。この結果を図1及び2に示す。東京大学のFX10・76,800コア(4800ノード)で実効効率16.9%、並列効率96%、理化学研究所の京コンピュータ・65,536コア(8192ノード)で実効効率15.3%、並列効率83%、九州大学のCX400・16384コア(1024ノード)で実効効率16.2%、並列効率72%を達成した。また、これらの成果により、HPCI「京」若手人材育成利用課題に採択された。

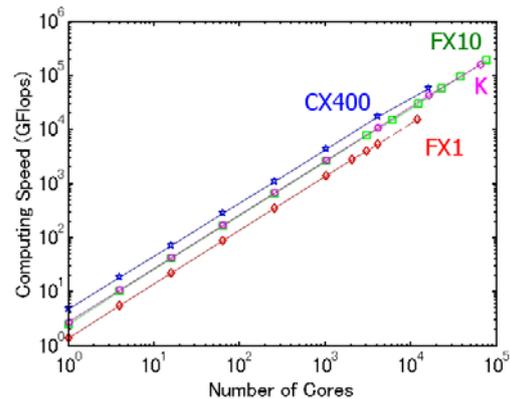


図1: コア数に対する計算速度(GFlops)。

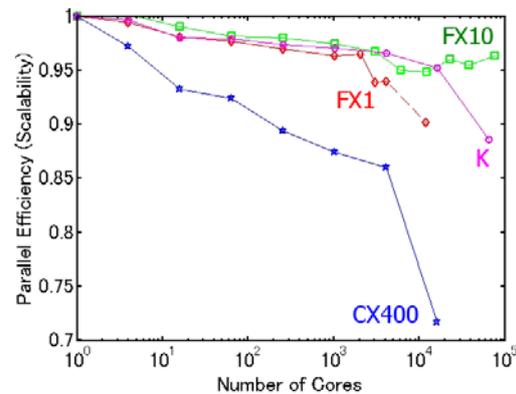


図2: コア数に対する並列効率(スケールビリティ)。

②太陽風と弱磁化小天体との相互作用

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 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弱磁場小天体の場合には、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り、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、磁化天体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成功した。図3に示すとおり、太陽風プラズマの圧縮によって昼側にバウショックが現われ、夜側にはウェイクと呼ばれる低密度構造が現れる。

本研究では特に、太陽風イオンのウェイク内への侵入過程について着目した解析を行った。その結果、昼側の閉じた磁力線付近に現れる磁気圏境界面で太陽風イオンが反射し、その一部が惑星間空間磁場によって加速され、ジャイロ運動によって夜側ウェイク領域に運ばれることが分かった。これらの成果は現在論文として投稿中である。また本課題の超高解像度計算が京コンピュータを用いて進行中である。

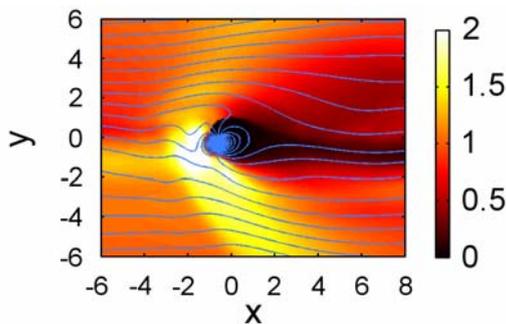


図3：太陽風と弱磁化小天体との相互作用で得られた、イオン密度の空間プロファイルと磁力線構造。

③ケルビン-ヘルムホルツ (KH) 不安定性

シミュレーション空間の下側に配置した止まった低密度領域に対して、左に移動する高密度領域をシミュレーション空間の上側に配置し、KH 不安定性の発展を、超並列ブラソフシミュレーションにより解き進めた。図4に示す通り、速度シア層で発達する流体スケールの1次 KH 渦の回転方向がイオンのジャイロ運動方向と同じ場合 (Run A) に比べ、回転の向きが逆向きの場合 (Run B) のほうが、渦が速く成長することが分かった。

一方、イオンジャイロスケールの2次的な KH 不安定性、レイリー-テイラー (RT) 不安

定性、電流層キンク不安定性などは、Run A と Run B で、発達する位置に違いが表れた。これは、イオンジャイロ運動によってその空間スケールで密度構造の緩和が起こり、渦の成長が妨げられるためであり、2次渦の回転方向とイオンのジャイロ運動方向が逆向きの位置でのみ成長することが分かった。以上の成果を現在論文にまとめているところである。

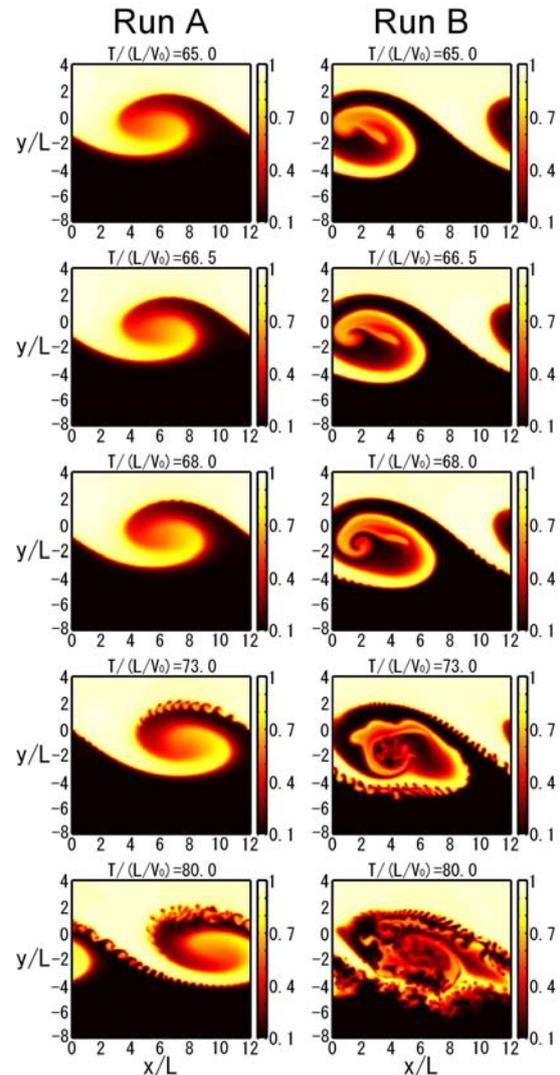


図4：ケルビン-ヘルムホルツ (KH) 不安定性の時間発展。Run A は KH 渦の回転とイオンジャイロ運動の回転が順方向、Run B は逆方向の場合。

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7件)

- ① Umeda, T., Effect of ion cyclotron motion on the structure of wakes: A Vlasov simulation, *Earth, Planets and Space*, Vol.64, 231—236, 2012.

- ② Umeda, T., Y. Nariyuki, and D. Kariya, A non-oscillatory and conservative semi-Lagrangian scheme with fourth-degree polynomial interpolation for solving the Vlasov equation, *Computer Physics Communications*, Vol.183, pp.1094—1100, 2012.
- ③ Umeda, T., K. Fukazawa, Y. Nariyuki, and T. Ogino, A scalable full electromagnetic Vlasov solver for cross-scale coupling in space plasma, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.40, 1421—1428, 2012.
- ④ Fukazawa, K., and T. Umeda, Performance measurement of magnetohydrodynamic code for space plasma on the typical scalar type supercomputer systems with the large number of cores, *International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol.26, 310—318, 2012.
- ⑤ Umeda, T., M. Ashour-Abdalla, J. S. Pickett, and M. L. Goldstein, Vlasov simulation of electrostatic solitary structures in multi-component plasmas, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, A05223 (7pp.), 2012.
- ⑥ Umeda, T., Simulation of collisionless plasma with the Vlasov method, *Proceedings of JSST 2012*, 258—261, 2012.
- ⑦ Umeda, T., Y. Ito, and K. Fukazawa, Global Vlasov simulation on magnetospheres of astronomical objects, *Journal of Physics: Conference Series*, in press.
- [学会発表] (計 22 件)
- ① Ito, Y., T. Umeda, and T. Ogino, Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body with magnetic anomaly, *American Geophysical Union (AGU) 2012 Fall meeting*, San Francisco, USA, December 3, 2012.
- ② 梅田 隆行, 深沢 圭一郎, ブラソフコードによる様々な超並列スーパーコンピュータの性能評価, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌コンベンションセンター, 2012 年 10 月 23 日.
- ③ 伊藤 陽介, 梅田 隆行, 荻野 竜樹, 太陽風と弱磁場天体との相互作用に関するグローバルブラソフシミュレーション, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌コンベンションセンター, 2012 年 10 月 22 日.
- ④ Umeda, T., Y. Ito, and K. Fukazawa, Global Vlasov simulation on magnetospheres of astronomical objects, *Conference on Computational Physics (CCP) 2012*, Kobe, Japan, October 15, 2012.
- ⑤ 梅田 隆行, 伊藤 陽介, 深沢 圭一郎, 超並列ブラソフコードによる宇宙プラズマの第一原理シミュレーション, 第 136 回ハイ

パフォーマンスコンピューティング研究発表会, 沖縄産業振興センター, 2012 年 10 月 3 日.

- ⑥ Umeda, T., Simulation of collisionless plasma with the Vlasov method, *International Conference on Simulation Technology (JSST2012)*, Kobe, Japan, September 27, 2012.
- ⑦ Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance measurement of parallel Vlasov code for space plasma on various scalar-type supercomputer systems, *12th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP)*, Fukuoka, Japan, September 7, 2012.
- ⑧ Umeda, T., Y. Kidani, S. Matsukiyo, and R. Yamazaki, Reformation at perpendicular collisionless shocks, *7th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows*, Hawaii, USA, June 28, 2012.
- ⑨ 伊藤 陽介, 梅田 隆行, 荻野 竜樹, 太陽風と局所的磁場を持つ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, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ, 2012 年 5 月 22 日.
- ⑩ 伊藤 陽介, 梅田 隆行, 荻野 龍樹, 太陽風と局所的磁場を持つ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, 日本天文学会 2012 年春季年会, 龍谷大学, 2012 年 3 月 20 日.
- ⑪ Ito, Y., T. Umeda, and T. Ogino, Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body with magnetic anomaly, *American Geophysical Union (AGU) 2011 Fall meeting*, San Francisco, USA, December 5, 2011.
- ⑫ Umeda, T., Y. Ito, Y. Kidani, and K. Fukazawa, Study of the moon-solar wind interaction with parallel kinetic plasma simulations, *International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis 2011 (SC11)*, Seattle, USA, November 15, 2011.
- ⑬ 伊藤 陽介, 梅田 隆行, 荻野 竜樹, Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body with magnetic anomaly, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 神戸大学, 2011 年 11 月 4 日.
- ⑭ Umeda, T., Recent Advancement in Vlasov code simulations, *10th International School for Space Simulations (ISSS-10)*, Banff, Canada, July 29, 2011.
- ⑮ Ito, Y., T. Umeda, and T. Ogino, Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body with magnetic anomaly, *10th International School for Space Simulations (ISSS-10)*, Banff, Canada, July 26 2011.

⑩Umeda, T., and Y. Ito, Vlasov simulation on the interaction between the solar wind and a dielectric body, *25th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly*, Melbourne, Australia, July 6, 2011.

⑪梅田 隆行, 深沢 圭一郎, 成行 泰裕, 荻野 竜樹, プラソフコードによる様々なスーパーコンピュータの性能評価, *日本地球惑星科学連合2011年大会*, 幕張メッセ, 2011年5月24日.

⑫伊藤 陽介, 梅田 隆行, 荻野 竜樹, 太陽風と局所的磁場を持つ誘電物体との相互作用に関する2次元プラソフシミュレーション, *日本地球惑星科学連合2011年大会*, 幕張メッセ, 2011年5月25日.

他4件

[図書] (計2件)

①Umeda, T., Simulation of collisionless plasma with the Vlasov method, *In: Computer Physics*, edited by B. S. Doherty and A. N. Molloy, pp.315—332, Nova Science-New York, 2012. (ISBN: 978-1-61324-790-7)

②Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance measurement of parallel Vlasov code for space plasma on various scalar-type supercomputer systems, *In: Algorithms and Architectures for Parallel Processing, Lecture Notes in Computer Science, Vol.7439*, edited by Y. Xiang, I. Stojmenovic, B. O. Aduhan, G. Wang, K. Nakano, and A. Zomaya, pp. 233—240, Springer-Verlag Berlin Heidelberg,

2012. (ISBN: 978-3-642-33077-3)

[産業財産権]
○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0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

・伊藤 陽介 (ITO, Yosuke)
名古屋大学・工学研究科・修士課程
・深沢 圭一郎 (FUKAZAWA, Keiichiro)
九州大学・情報基盤研究開発センター・助教
・成行 泰裕 (NARYUKI, Yasuhiro)
富山大学・人間発達科学部・准教授