

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610144

研究課題名(和文)6次元プラズマシミュレーション

研究課題名(英文)Six-dimensional plasma simulation

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：6次元電磁プラソフコードの開発を行った。実空間の移流計算の際に、6次元分布関数のデータの並びを速度-位置から位置-速度に転置することにより、使用メモリ量を大幅に削減した。また転置により、インテル系Xeonプロセッサにおいては、従来のコードよりも大幅に性能向上できた。一方で、富士通FX10及び京コンピュータにおいては、従来の5次元コードに比べて1割ほど実効効率が落ちたため、今後更なるチューニングを施す必要がある。

本研究ではさらに、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性や弱磁化小天体の大規模シミュレーションを行い、磁気流体スケールとイオンスケール及び電子スケールについて、物理過程の分離を行った。

研究成果の概要(英文)：A fully six-dimensional electromagnetic Vlasov code has been developed. Work arrays and memory space for the computation of the advection in the configuration space are substantially saved by the transposition of the data arrays for distribution functions. It is confirmed that the transposition efficiently accelerates the computational speed on x86 CPUs. While on SPARC CPUs, the computational efficiency becomes slightly worse.

We also performed large-scale Vlasov simulation of the Kelvin-Helmholtz instability (KHI) and a weakly-magnetized small body. It is shown that ion-scale secondary instabilities taking place during the nonlinear development of MHD-scale primary KHI are affected by the structure of secondary velocity-shear layers of primary KH vortices. On the other hand, electron-scale charge separation does not affect the structure of MHD-scale magnetosphere but affects wave activities inside the magnetosphere.

研究分野：計算科学

キーワード：プラズマ科学 ハイパフォーマンスコンピューティング 地球惑星科学 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。近年の高精度磁気圏衛星による観測結果により、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が、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ミクロ素過程を扱う運動論(粒子・プラソフ)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

本研究の大きな目的は、次世代プラズマシミュレーション手法としてプ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ベ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である。さらに、既存の超並列計算機において宇宙プラズマ諸現象の実用的な計算機実験を行い、宇宙プラズマ中の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に向けた基礎データを得ることを目指すものである。

本研究グループでは、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つであるプラソフコードに着目し、これまでその計算スキームの研究開発を行ってきており、また4次元以上の超多次元シミュレーションによるプラズマ素過程の研究において世界をリードしてきた。プラソフコードでは、プラソフ(無衝突ポルツマン)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。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、これまでにプ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以上の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。また、近年の計算機環境の向上は目覚ましく、大容量メモリを搭載した計算機が比較的安価で手に入るようになったことから、本研究では特に、6次元コードの新規開発に焦点を当てることとする。

## 3. 研究の方法

大容量メモリを有するプログラム開発用のワークステーションを導入し、既存の5次元コードを基に6次元コードを新たに開発する。

また既存の5次元コードを、近年に国内に配備されたスーパーコンピュータにおいて性能評価を行い、更なる性能チューニングの可能性を見出す。さらに、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プラソフシミュレーションを試みる。

## 4. 研究成果

### 6次元コードの開発

本研究グループにおいてこれまで採用していた計算アルゴリズムでは、6次元を行う際に実データ領域の3倍の作業配列を必要としていた。本研究では、実空間の移流計算の際に、6次元分布関数のデータの並びを速度-位置から位置-速度に転置することにより、使用メモリ量を大幅に削減した。また、データの並びの転置においても、スレッド並列をうまく用いることにより高速化できることが分かった。以上により、インテル系Xeonプロセッサにおいては、従来のコードよりも大幅に性能向上できた。一方で、富士通FX10及び京コンピュータにおいては、従来の5次元コードに比べて1割ほど実効率が落ちたため、今後更なるチューニングを施す必要がある。

### 5次元コードの改良及び性能評価

日本国内に配備された最新のスカラ型スーパーコンピュータにおける5次元コードの性能測定結果をもとに、コードの更なるを行った。具体的には、OpenMPを用いたスレッド並列の際に、多重ループを並列化するオプション(COLLAPSE)を新たに導入し、スレッド化の際のオーバーヘッドの削減に成功した。改

良いコードを用いた性能測定結果を図1及び2に示す。性能評価には、九州大学のFX10, CX400及びHA8000を用いた。またCX400ではインテルコンパイラと富士通コンパイラの2つを利用した。図1より、実効速度がコア数に比例してほぼ直線的に伸びていることが分かる。また図2より、10,000コアを超えた場合でも80%を超えるスケールビリティが得られていることが分かる。

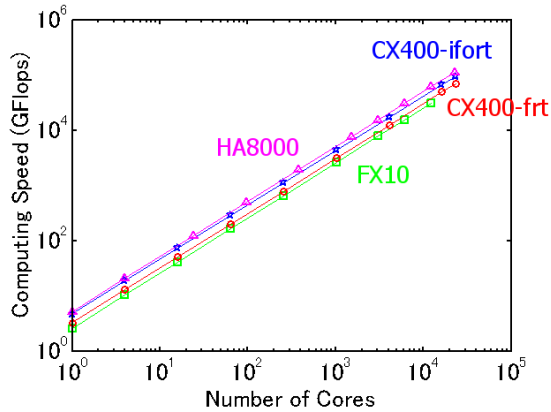


図1：コア数に対する計算速度(GFlops)。

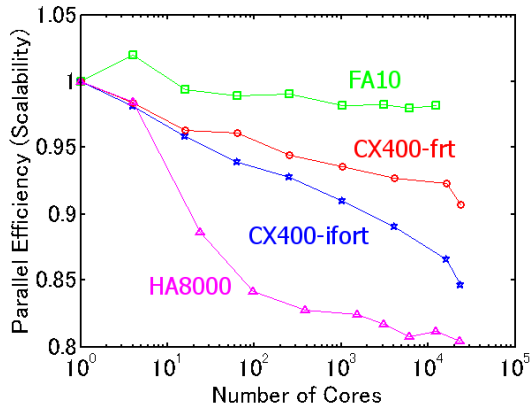


図2：コア数に対する並列効率(スケールビリティ)。

### 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、4次元プラソシミュレーションにより解き進めた。

図3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、2次シア層で生じるイオンジャイロスケールの2次的な不安定性は、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る。これらの2次的不安定性は、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。

またこれまでの計算では、計算資源の制限によりイオン・電子質量比を25にして計算しており、イオンスケールと電子スケールの物理を完全には分離できていなかった。本研究では、イオン・電子質量比を100にして計算を行い、2次的不安定性の比較を行った。その結果、質量比により発生する2次的不安定性の種類が異なることが明らかとなった。

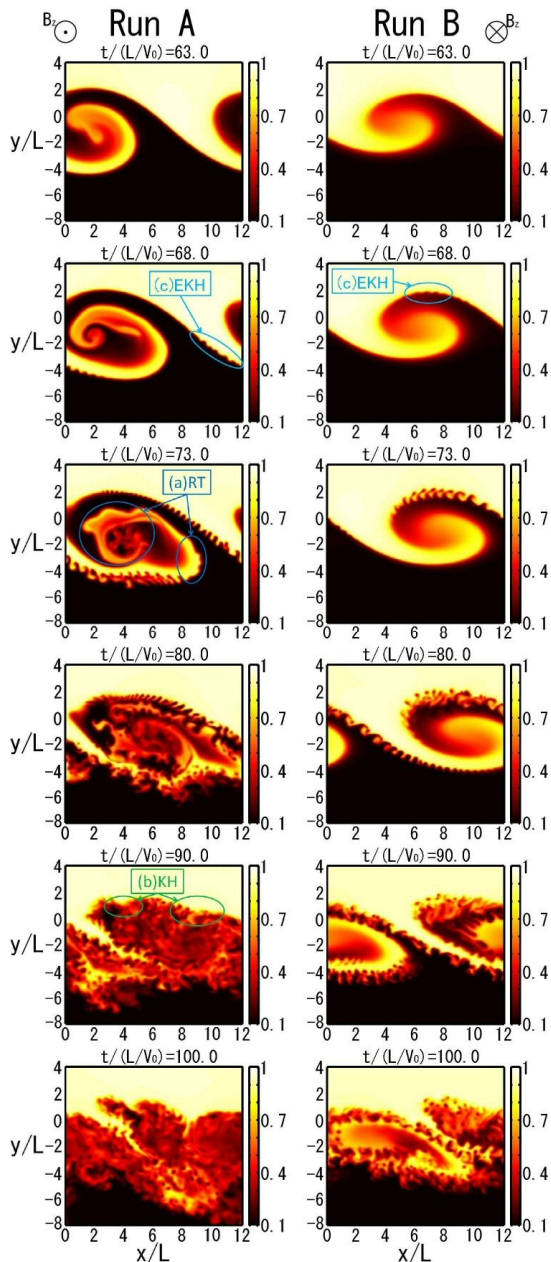


図3：ケルビン・ヘルムホルツ(KH)不安定性の時間発展。Run AはKH渦の回転とイオンジャイロ運動の回転が順方向、Run Bは逆方向の場合。

### 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るが、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。本研究では、京コンピュータを用いて超高解像度の計算を行い、これまでに得られていた低解像度の計算結果と比較した。

図4に示すとおり、太陽風プラズマの圧縮によって昼側にパ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。しかし、上段の低解像度計算と下段の高解像度の結果にほとんど差が見受けられまい。これは、磁化したイオンの動きを記述する MHD 過程が、電子スケールの微視的物理過程に直接影響されることは無いことを意味しており、MHD スケールと電子スケールが時空間的に分離していることを示唆する。

一方で、誘電性小天体の表面へのプラズマの帯電によって強い電場が発生し、それが閉じた磁力線に沿って現れることが分かった。しかしこの強い磁場は、前述の通り磁気圏構造そのものにはほとんど影響を与えないが、閉じた磁力線の領域において電子スケールのプラズマ波動が励起している様子も見られており、天体近傍の波動励起に影響している可能性があり、今度更なる解析を行う必要がある。

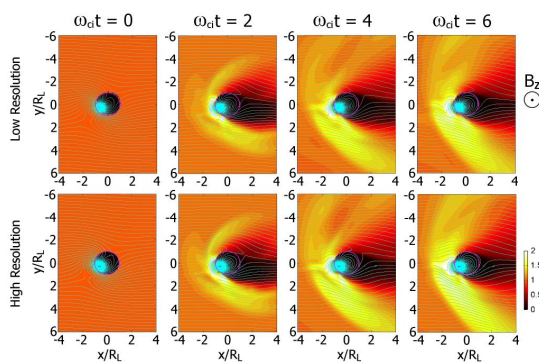


図4：太陽風と弱磁化小天体との相互作用で得られた、イオン密度の空間プロファイルと磁力線構造。上段が低解像度計算、下段が高解像度(低解像度の10×10倍)計算の結果。

### 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4件)

Zenitani, S., and T. Umeda, Some remarks on the diffusion regions in magnetic reconnection, *Physics of Plasmas*, Vol.21, 034503 (5pp.), 2014.

Umeda, T., and Y. Ito, Entry of solar-wind ions into the wake of a small body with a magnetic anomaly: A global Vlasov simulation, *Planetary and Space Science*, Vol.93—94, pp.35—40, 2014.

Umeda, T., S. Ueno, and T. K. M. Nakamura, Ion kinetic effects to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol.56, 075006 (11pp.), 2014.

Umeda, T., and K. Fukazawa, A high-resolution global Vlasov simulation of a small dielectric body with a weak intrinsic magnetic field on the K computer, *Earth, Planets and Space*, Vol.67, 49 (8pp.), 2015.

#### [学会発表](計29件)

梅田 隆行, 伊藤 陽介, 京コンピュータを用いた小天体の高解像度グローバルブラソフシミュレーション, *日本地球惑星科学連合2013年大会*, 幕張メッセ, 2013年5月24日.

上野 悟志, 梅田 隆行, 中村 琢磨, 松本 洋介, 町田 忍, ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の効果, *日本地球惑星科学連合2013年大会*, 幕張メッセ, 2013年5月24日.

Ueno, S., T. Umeda, T. K. M. Nakamura, and S. Machida, The effect of the ion gyro motion to the nonlinear process of the Kelvin-Helmholtz instability, *11th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-11)*, Zhongli, Taiwan, July 24, 2013.

Umeda, T., Vlasov simulation tutorial, *11th International School/Symposium for Space Simulations*, Zhongli, Taiwan, July 27, 2013.

Umeda, T., Vlasov code hands-on, *11th International School/Symposium for Space Simulations*, Zhongli, Taiwan, July 27, 2013.

梅田 隆行, 深沢 圭一郎, 京、FX10及びCX400におけるブラソフコードの性能チューニング, *第141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, 2013年9月30日.

梅田 隆行, 伊藤 陽介, 弱磁化小天体のグローバルブラソフシミュレーション, *第134回地球電磁気・地球惑星圏学会*, 高知大学, 2013年11月2日.

上野 悟志, 梅田 隆行, 中村 琢磨, 町田 忍, ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の効果, 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 高知大学, 2013 年 11 月 3 日.

Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance measurement of parallel Vlasov code for space plasma on scalar-type supercomputer systems with large number of cores, *13th International Conference on Systems Simulation (AsiaSim 2013)*, Singapore, November 8, 2013.

Ueno, S., T. Umeda, T. K. M. Nakamura, and S. Machida, The ion gyro effect to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *International CAWSES-II Symposium*, Nagoya, Japan, November 21, 2013.

Ueno, S., T. Umeda, T. Nakamura, and S. Machida, The effect of the ion gyro motion to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *American Geophysical Union (AGU) 2013 Fall meeting*, San Francisco, USA, December 9, 2013.

Umeda, T., and Y. Ito, Entry of solar-wind ions into the wake of a small unmagnetized body: A global Vlasov simulation, *American Geophysical Union (AGU) 2013 Fall meeting*, San Francisco, USA, December 10, 2013.

梅田 隆行, 上野 悟志, 中村 琢磨, 無衝突プラズマ中のケルビン-ヘルムホルツ不安定性におけるイオンジャイロ運動効果, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 2013 年 12 月 17 日.

上野 悟志, 梅田 隆行, 中村 琢磨, 町田 忍, ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の効果, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜会議センター, 2014 年 4 月 30 日.

梅田 隆行, 京コンピュータを用いた弱磁化小天体のグローバルプラソフシミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜会議センター, 2014 年 5 月 1 日.

Umeda, T., Global Vlasov simulation of a small body with a magnetic anomaly with the K-computer, *6th Alfvén Conference*, London, July 10, 2014.

Nakamura, T. K. M., and T. Umeda, Fully kinetic simulations of the Kelvin-Helmholtz instability at the Earth's magnetopause, *Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting*, Sapporo, July 29, 2014.

Ueno, S., T. Umeda, T. Nakamura, and S. Machida, The effect of the ion gyro motion to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting*, Sapporo, July

29, 2014.

Zenitani, S., and T. Umeda, The structure of the diffusion region in magnetic reconnection, *Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting*, Sapporo, July 30, 2014.

Umeda, T., Global Vlasov simulation of a small body with a magnetic anomaly with the K-computer, *Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting*, Sapporo, July 31, 2014.

②① 梅田 隆行, 深沢 圭一郎, OpenMP と MPI を用いたハイブリッド並列プラソフコードの性能測定, 第 146 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, 2014 年 10 月 3 日.

②② Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance tuning of Vlasov code for space plasma on the K computer, *14th Asia Simulation Conference (AsiaSim 2014)*, Kitakyushu, November 27, 2014.

②③ 上野 悟志, 梅田 隆行, 中村 琢磨, 町田 忍, ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の効果, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会, キッセイ文化ホール, 2014 年 11 月 2 日.

②④ 銭谷 誠司, 梅田 隆行, 磁気リコネクションの拡散領域についてのいくつかの考察, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会, キッセイ文化ホール, 2014 年 11 月 2 日.

②⑤ 梅田 隆行, 弱磁化小天体のグローバルプラソフシミュレーション, *Plasma Conference 2014*, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター, 2014 年 11 月 20 日.

②⑥ Ueno, S., T. Umeda, T. Nakamura, and S. Machida, The effect of the ion gyro motion to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *American Geophysical Union (AGU) 2014 Fall meeting*, San Francisco, USA, December 12, 2014.

②⑦ Umeda, T., S. Ueno, and T. K. M. Nakamura, Ion kinetic effects to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2015*, Vienna, Austria, April 14, 2015.

②⑧ 梅田 隆行, 上野 悟志, 中村 琢磨, ケルビン-ヘルムホルツ不安定性におけるイオンジャイロ運動効果, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ, 2015 年 5 月 24 日.

②⑨ 和田 泰尚, 梅田 隆行, 上野 悟志, 町田 忍, レイリー-テイラー不安定性のプラソフシミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ, 2015 年 5 月 24 日.

〔図書〕(計2件)

Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance measurement of parallel Vlasov code for space plasma on scalar-type supercomputer systems with large number of cores, In: *AsiaSim 2013, Communications in Computer and Information Science, Vol.402*, edited by G. Tan, G. K. Yeo, S. J. Turner, and Y. M. Teo, pp.561—569, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. (ISBN: 978-3-642-45036-5)

Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance tuning of Vlasov code for space plasma on the K computer, In: *AsiaSim 2014, Communications in Computer and Information Science, Vol.474*, edited by S. Tanaka, K. Hasegawa, X. Rui, and S. J. Turner, pp.127—138, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. (ISBN: 978-3-662-45288-2)

〔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/>

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

- ・深沢 圭一郎 (FUKAZAWA, Keiichiro)  
京都大学・学術情報メディアセンター・准教授  
研究者番号: 50377868
- ・成行 泰裕 (NARYUKI, Yasuhiro)  
富山大学・人間発達科学部・准教授  
研究者番号: 50510294

(4)研究協力者

- ・上野 悟志 (UENO, Satoshi)  
名古屋大学・工学研究科・修士課程
- ・中村 琢磨 (NAKAMURA, Takuma)  
ロスアラモス国立研究所・研究員
- ・銭谷 誠司 (ZENITANI, Seiji)  
国立天文台・理論研究部・特任助教