

平成 30 年 6 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：2015～2017

課題番号：15K13572

研究課題名(和文)電磁プラズマ流体シミュレーションの共通数値解法の開発：MHDから多流体まで

研究課題名(英文) Study of unified numerical schemes for numerical simulations of electromagnetic fluid plasma: From MHD to multi fluids

研究代表者

梅田 隆行 (UMEDA, TAKAYUKI)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師

研究者番号：40432215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：ケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性およびレイリー・テイラー不安定性の非線形発展について、2次元プラズマシミュレーションにより研究を行った。初期勾配層の幅に対するイオン慣性長やイオンジャイロ半径を変化させたシミュレーションを行い、ホール効果およびジャイロ運動効果などの非MHD効果の寄与を議論した。非MHD効果があまり効かない場合にはMHDシミュレーションと同様の対称的な不安定性の発達が見られ、ホール効果が影響する場合には、非対称に発達することが分かった。またジャイロ運動効果が影響する場合には、イオンジャイロ半径スケールの新たな不安定性が生じ、不安定性の構造の成長を阻害することが分かった。

研究成果の概要(英文)：The nonlinear evolution of the Kelvin-Helmholtz instability (KHI) and the Rayleigh-Taylor instability (RTI) at a density shear layer transverse to magnetic field in collisionless plasma is investigated by means of a fully kinetic Vlasov simulation with two spatial and two velocity dimensions. Several simulation runs with different ratio of the ion inertial length and/or ion gyro radius to the thickness of the initial shear layer have been performed to discuss "non-MHD effects" such as the ion inertial (Hall) effect and the ion finite Larmor radius (FLR) effect. The result shows that the instabilities develop symmetrically when neither Hall effect or FLR effect are available. An asymmetric development of the instabilities is seen when the Hall effect is available. When the FLR effect is available, a different type of instability with a spatial scale of ion gyro radius is generated, which disturbs the development of the primary instabilities.

研究分野：計算科学

キーワード：プラズマ・核融合 宇宙科学 ハイパフォーマンスコンピューティング 超高層物理学 宇宙プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

人工衛星を用いた地球周辺の宇宙プラズマ環境の探査と利用は1960年代に始まり、気象衛星やGPS衛星などの宇宙利用は現在では人類にとって不可欠なものとなっている。宇宙嵐が多発する太陽活動極大期を向かえ、宇宙プラズマ環境の研究は更に重要性を増している。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「その場」観測により、宇宙プラズマ科学における粒子運動論の重要性は広く認識され、宇宙プラズマ科学の新しい概念として、磁気圏のグローバル構造とプラズマ粒子のマイクロ素過程が互いに相互作用している「スケール間結合」という考え方が重要視されるようになった。また、宇宙プラズマ科学の知見を生かして宇宙の変動を予報し、宇宙利用への貢献を目指す「宇宙天気」は宇宙プラズマ科学のもう1つの新しい流れであり、世界的にも活発化している。

世界的には、NASAのCommunity Coordinated Modeling Centerやミシガン大学のSpace Weather Modeling Frameworkによりアメリカが大きくリードしており、日本ではこれに追随する形で磁気流体力学(Magneto-Hydro-Dynamics: MHD)近似による宇宙天気研究が進められてきた。しかし、地球近傍に対してはMHD近似が必ずしも成り立たず、また宇宙天気予報の精度を格段に上げるために、従来のMHD近似モデルから脱却した計算モデルに対するニーズが高まりつつあり、次世代の多流体モデルや、次々世代の粒子モデルの開発が精力的に行われている。

本研究グループではこれまで、プラズマの第一原理シミュレーションである粒子モデル及びVlasovモデルの計算手法について、精力的に研究開発を行ってきた。一方で、MHDに次ぐ宇宙プラズマの次世代シミュレーションである多流体モデルについては、その研究開発はほとんど進んでおらず、MHDと運動論の間は、計算手法としても研究領域としても、文字通り「はざま」である。

## 2. 研究の目的

宇宙プラズマにおける物理スケールのはざまであるMHDと運動論の間にある物理過程を見出す。また、その新たな知見に基づいて、今後開発すべき電磁流体シミュレーションコードの設計を行う。

## 3. 研究の方法

電磁流体方程式は、Vlasov方程式の0次、1次および2次モーメントをとることによって得られる、それぞれ質量保存の式、運動量保存の式および、エネルギー保存の式より成り立つ。しかしこれらの式においては、電磁流体方程式を導出する過程において仮定や近似が施されている。通常広く用いられている電磁流体方程式では、圧力テンソルはスカラー圧力として扱われ、また熱輸送テンソルは無

視されている。本研究ではまず、圧力テンソルおよび熱輸送テンソルを無視せずに含めた「完全な」電磁流体方程式を、第一原理Vlasov方程式より再導出する。

次に、MHDスケールおよび、イオン慣性長スケールやイオンジャイロ半径スケールの宇宙プラズマ中の境界層不安定性についてVlasovシミュレーションを行い、シミュレーションより得られた速度分布関数から圧力テンソルおよび熱輸送テンソルを直接計算し、これらの項が「無視できるのか」どうかを明らかにし、またこれらの項が物理現象に対してどのような寄与をしているのかを議論する。

## 4. 研究成果

(1)ケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性における応力テンソル項の確認

Vlasov方程式の1次モーメントをとることによって得られる電磁流体の運動方程式は、以下のように導出できる。

$$mN \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + mN(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = qN\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{P} \quad (1)$$

ここで、 $m$ ,  $q$ ,  $N$ はそれぞれ質量、電荷、密度であり、 $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{J}$ はそれぞれ速度場、電場、磁場、電流密度のベクトルである。また、 $\mathbf{P}$ は $3 \times 3$ の対称な圧力テンソルである。圧力テンソルの対角成分の平均値をスカラー圧力 $P = (P_{xx} + P_{yy} + P_{zz})/3$ と定義すると、圧力テンソルは以下のように変形できる。

$$\mathbf{P} = P\mathbf{I} + \mathbf{\Pi} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ および $\mathbf{\Pi}$ はそれぞれ、 $3 \times 3$ の単位行列および応力テンソルである。これより、通常の流体方程式では、応力テンソルが無視されていることが分かる。

圧力テンソル(あるいは応力テンソル)は本来時間発展を解く必要がある物理量であるが、Thompson [1961]は、応力テンソルを速度場およびスカラー圧力より近似する方法を考案した。またRoberts and Taylor [1962]はThompson [1961]の近似式をMHD方程式に導入し、Finite-Larmor-Radius (FLR)効果と呼んだ。Huba [1996]は、FLR-MHDコードを用いたケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性(KHI)の2次元シミュレーションにより、KH渦の回転方向とイオンジャイロ運動の方向が同じ場合に渦の成長がMHDの場合よりも速くなり、逆向きの場合には遅くなることを示した。一方で、近年の第一原理シミュレーション[Nakamura et al. 2010; Umeda et al. 2014]においては、KH渦の回転方向とイオンジャイロ運動の方向が逆向きのほうが同じ向きの場合よりもKHIの成長が速いことを示した。つまり、FLR-MHDシミュレーションと第一原理シミュレーションの結果には矛盾がある。

本研究ではまず、Umeda et al. [2014]の2次元Vlasovシミュレーションで得られた速度分布関数を用いて速度場および圧力テンソルを直接計算し、Thompson [1961]の近似式と応力

テンソルがどのくらい合っているのかを調べた。その結果を図1および2に示す。これらの結果より、KH渦の回転方向とイオンジャイロ運動の方向が逆向きおよび同じ向きのどちらの場合においても、Thompson [1961]の近似式は応力テンソルを誤差30%の範囲で再現できていることが分かった。

さらに、KHIの発展に対する圧力テンソルの寄与を、流体の運動方程式を用いて解析したところ、KH渦の回転方向とイオンジャイロ運動の方向が同じ場合に渦の成長をMHDの場合よりも速め、逆向きの場合には遅めるという、FLR-MHDシミュレーションと整合性のあ

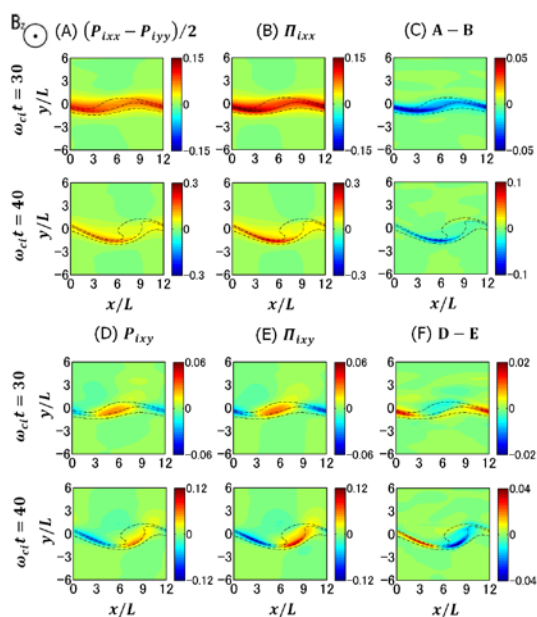


図1: KH渦の回転方向とイオンジャイロ運動が逆向きの場合における、応力テンソル(A,D)とThompson [1961]の近似(B,E)との比較。

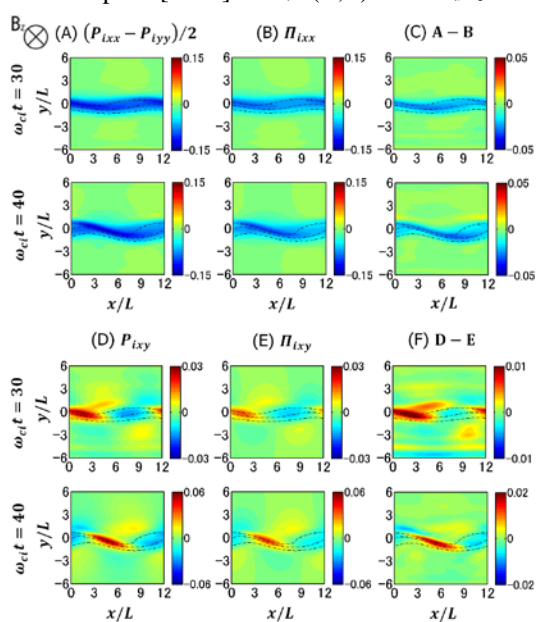


図2: KH渦の回転方向とイオンジャイロ運動が同じ向きの場合における、応力テンソル(A,D)とThompson [1961]の近似(B,E)との比較。

る結果を得た。つまり、電磁流体の運動方程式において圧力テンソルのみを考慮しただけの流体シミュレーションでは、運動論シミュレーション結果を再現するには不十分であることが明らかとなった。これは、エネルギーをスカラー量ではなくテンソルとして扱うだけでも十分ではなく、エネルギーテンソルの発展方程式においても、熱輸送テンソルを導入する必要があることを示唆する。

## (2)レイリー・テイラー不安定性における非磁気流体力学的効果の確認

レイリー・テイラー不安定性(RTI)は、密度の大きな流体を重力に逆らって密度の小さい流体を支えているときに生じる不安定性であり、不安定性によって両者の位置が入れ替わることから交換型不安定性とも呼ばれている。流体シミュレーションで見られるRTIの非線形発展では、高密度流体が低密度流体中に落ちていく過程で空間的に対称なキノコ型(指型)の密度構造が生じ、低密度流体が浮上する過程で空間的に対称な泡構造が生じることが知られている。

図3は、初期擾乱の波長を密度勾配層の3倍の長さで設定し、プラズマベータ値(プラズマ圧と磁気圧の比)を1/4, 4, 1/64と3通りに変化させたときのRTIの時間発展の様子を表す。カラーはイオン密度を表している。Run 1はプラズマベータ値が1/4であり、初期擾乱の波長がイオンジャイロ半径とイオン慣性長のそれぞれ48倍と12倍である。この場合、FLR効果やイオン慣性効果(Hall効果)などの非MHD効果は効かないと予想できる。

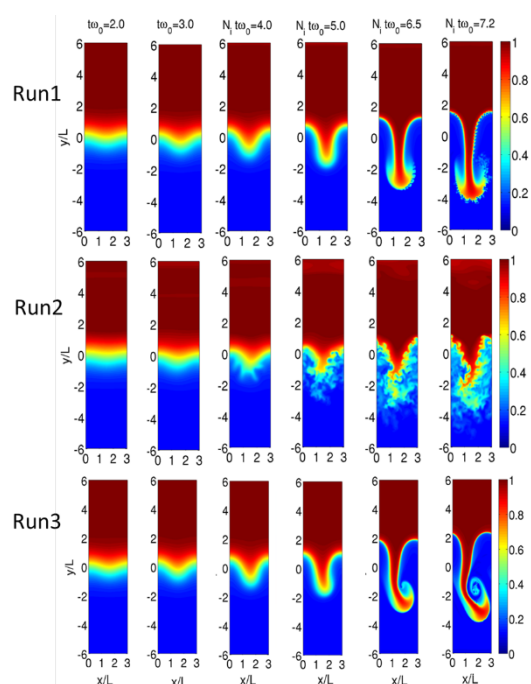


図3: プラズマベータ値(プラズマ圧と磁気圧の比)を1/4 (Run 1), 4 (Run 2), 1/64 (Run 3)と3通りに変化させたときのレイリー・テイラー不安定性の非線形発展。

MHD シミュレーションでは、空間的に対称なキノコ型および泡構造が生じる [Huba, 1996]。Run 1 における RTI の成長は、MHD シミュレーションのものと同様によく似ている。一方で、MHD シミュレーションでは現れなかった二次的不安定性がキノコ型の構造の右側に生じた。これは、本研究グループで行った KHI の Vlasov シミュレーションにおいて生じた二次的不安定性[Umeda et al., 2014]とよく似た特徴を示していることが分かった。RTI の非線形発展に伴って、高密度流体と低密度流体の境界には二次的な境界層が新たに発達する。この二次境界層は、密度だけでなく、速度、圧力、磁場などにも勾配があり、これらが新たな不安定性のエネルギー源となる。シミュレーションで現れた二次的不安定性が電子の速度勾配起源であることを明らかに、またキノコ型の構造の左右で電子速度が異なっている要因として、イオンの熱輸送テンソルが磁場を介して電子の速度場に影響を与えていることを明らかにした。

Run 2 はプラズマベータ値が 4 であり、初期擾乱の波長がイオンジャイロ半径とイオン慣性長のともに 12 倍である。この場合、Hall 効果は効かずに FLR 効果が効くと予想できる。Run 2 では、非線形段階においてキノコ型の構造への成長を阻害するようなイオンジャイロ半径程度の空間スケールを持つ構造が生じた。この小スケールの不安定性の一因として、電子の圧力テンソル項が無視できない量となっていることが明らかとなった。一方、本来 FLR 効果の要因であるはずのイオンの応力テンソル項は無視できる値であり、これまでの磁気流体力学的視点による FLR 効果の概念を覆すこととなった。また電子の圧力テンソル項が強く出た原因として、初期状態においてイオンと電子を等温とした高プラズマベータ環境を仮定していることが挙げられ、電子の初期温度を下げた場合にはこの不安定性は生じなくなると推測できる。

Run 3 はプラズマベータ値が 1/64 であり、初期擾乱の波長がイオンジャイロ半径とイオン慣性長のそれぞれともに 48 倍と 3 倍である。この場合、FLR 効果は効かずに Hall 効果が効くと予想できる。Run 3 では、非線形段階において空間的に非対称なキノコ型の密度構造が生じており、これは過去に行われた非 MHD 効果を含む流体シミュレーションの結果と一致する[Huba, 1996; Goto et al. 2014]。一方で、キノコ構造の右側に現れた KH 渦の発達においてイオンの熱輸送テンソル項が無視できない値になっており、KHI における応力テンソルの解析結果からも示唆されたとおり、エネルギーテンソルの発展方程式に熱輸送テンソルを導入する必要があることを示す。

<引用文献>

① Thompson, W. B., The dynamics of high temperature plasmas, *Rep. Prog. Phys.*, Vol.24, pp.363-424, 1961.

②Roberts, K. V., and J. B. Taylor, Magnetohydrodynamic equations for finite Larmor radius, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.8, pp.197-198, 1962.

③Huba, J. D., The Kelvin-Helmholtz instability: Finite Larmor radius magnetohydrodynamics, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.23, pp.2907-2910, 1996.

④Nakamura, T. K. M., H. Hasegawa, and I. Shinohara, Kinetic effects on the Kelvin-Helmholtz instability in ion-to-magnetohydrodynamic scale transverse velocity shear layers: Particle simulations, *Phys. Plasmas*, Vol.17, 042119, 2010.

⑤Umeda, T., S. Ueno, and T. K. M. Nakamura, Ion kinetic effects on nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *Plasma Phys. Controlled Fusion*, Vol.56, 075006 2014.

⑥Huba, J. D., Finite Larmor radius magnetohydrodynamics of the Rayleigh-Taylor instability, *Phys. Plasmas*, Vol.3, pp.2523-2532, 1996.

⑦Goto, R., H. Miura, A. Ito, M. Sato, and T. Hatori, Hall and gyro-viscosity effects on the Rayleigh-Taylor instability in a 2D rectangular slab, *Plasma Fusion Res.*, Vol.9, 1403076, 2014.

## 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 13 件)

①梅田 隆行, 宇宙プラズマの運動論シミュレーション, 日本計算数理工学会誌, 計算数理工学レビュー, No.2081-1, pp.27-35, 2018. 査読無

②Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance measurement of Eulerian kinetic code on the Xeon Phi KNL, Proceedings of HPC Asia 2018, P1 (4pp.), 2018.  
<http://sighpc.ipsj.or.jp/HPCAsia2018/poster/post101s2-file1.pdf> 査読有

③梅田 隆行, 深沢 圭一郎, Xeon Phi KNL におけるブラソフコードの性能評価(2), 情報処理学会研究報告, 2017-HPC-162(1), 2017. 査読無

④Umeda, T., and Y. Wada, Non-MHD effects in the nonlinear development of the MHD-scale Rayleigh-Taylor instability, *Physics of Plasmas*, Vol.24, No.7, 072307 (10pp.), 2017.  
DOI:10.1063/1.4991409 査読有

⑤Saito, S., Y. Nariyuki, and T. Umeda, Generation of intermittent ion acoustic waves in whistler-mode turbulence, *Physics of Plasmas*, Vol.24, No.7, 072304 (7pp.), 2017.  
DOI:10.1063/1.4990443 査読有

⑥Umeda, T., S. Saito, and Y. Nariyuki, Rapid decay of nonlinear whistler waves in two dimensions: Full particle simulation, *Physics of Plasmas*, Vol.24, No.5, 054503 (4pp.), 2017.  
DOI:10.1063/1.4982609 査読有

⑦梅田 隆行, 深沢 圭一郎, KNL Xeon Phi におけるブラソフコードの性能評価, 情報処

理学会研究報告, 2017-HPC-157(15),2016. 査読無

- ⑧ Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance comparison of Eulerian kinetic Vlasov code between flat-MPI parallelism and hybrid parallelism on Fujitsu FX100 supercomputer, Proceedings of the 23rd European MPI Users' Group Meeting, pp.218-221, 2016. DOI:10.1145/2966884.2966891 査読有
- ⑨ Nakamura, T. K. M., R. Nakamura, W. Baumjohann, T. Umeda, and I. Shinohara, Three-dimensional development of front region of plasma jets generated by magnetic reconnection, Geophysical Research Letters, Vol.43, No.16, pp.8356-8364, 2016. DOI:10.1002/2016GL070215 査読有
- ⑩ Umeda, T., and Y. Wada, Secondary instabilities in the collisionless Rayleigh-Taylor instability: Full kinetic simulation, Physics of Plasmas, Vol.23, No.11, 112117 (8pp.), 2016. DOI:10.1063/1.4967859 査読有
- ⑪ 梅田 隆行, 深沢 圭一郎, スーパーコンピュータ FX100 におけるブラソフコードの性能評価, 情報処理学会研究報告, 2016-HPC-156(1),2016. 査読無
- ⑫ Umeda, T., N. Yamauchi, Y. Wada, and S. Ueno, Evaluating gyro-viscosity in the Kelvin-Helmholtz instability by kinetic simulations, Physics of Plasmas, Vol.23, No.5, 054506 (4pp.), 2016. DOI:10.1063/1.4952632 査読有
- ⑬ Nariyuki, Y., T. Umeda, T. K. Suzuki, and T. Hada, Note on one-fluid modeling of low-frequency Alfvénic fluctuations in a solar wind plasma with multi-ion components, Physics of Plasmas, Vol.22, No.12, 124502 (4pp.), 2015. DOI:10.1063/1.4936798 査読有

[学会発表] (計 29 件)

- ① 梅田 隆行, 宇宙プラズマの運動論シミュレーション, 第 34 回計算数理工学フォーラム, 名古屋大学東山キャンパス, 2018 年 3 月 16 日.
- ② Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance Measurement of Eulerian Kinetic Code on the Xeon Phi KNL, International conference series on HPC technologies in Asia Pacific region (HPC Asia 2018), Tokyo, Japan, January 29, 2018.
- ③ 梅田 隆行, 深沢 圭一郎, Xeon Phi KNL におけるブラソフコードの性能評価(2), 第 162 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, くまもと県民交流館パレア, 2017 年 12 月 18 日.
- ④ Tsujine, N., T. Haruki, M. Sato, Y. Nariyuki, and T. Umeda, Temperature dependence of contact discontinuities in Vlasov simulations, Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference, Toki, Japan, December 5, 2017.
- ⑤ Umeda, T., and Y. Wada, Vlasov simulation of

the Rayleigh-Taylor instability, 25th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP 2017), Leuven, Belgium, September 19, 2017.

- ⑥ Fukazawa, K., T. Soag, T. Umeda, and T. Nanri, Performance Evaluation and Optimization of magnetohydrodynamic simulation for planetary magnetosphere with Xeon Phi KNL, International Conference on Parallel Computing (ParCo) 2017, Bologna, Italy, September 12, 2017.
- ⑦ 梅田 隆行, 宇宙プラズマの第一原理ブラソフシミュレーション, KOBE HPC Spring School 2017, 神戸大学計算科学教育センター, 2017 年 3 月 13 日.
- ⑧ 梅田 隆行, 深沢 圭一郎, KNL Xeon Phi におけるブラソフコードの性能評価, 第 157 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 沖縄産業支援センター, 2016 年 12 月 22 日.
- ⑨ 和田 泰尚, 梅田 隆行, 町田 忍, Secondary instabilities in the collisionless Rayleigh-Taylor instability: Full kinetic simulations, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 11 月 23 日.
- ⑩ Umeda, T., Hyper-dimensional Vlasov code for space plasma simulations and its performance on the FX100 supercomputer, The 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology (JSST2016), Kyoto, Japan, October 28, 2016.
- ⑪ Fukazawa, K., T. Umeda, and T. Nanri, Performance evaluation of MHD simulation code with X86 CPUs and manycore systems, The 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology (JSST2016), Kyoto, Japan, October 28, 2016.
- ⑫ 辻根 成, 春木 孝之, 成行 泰裕, 梅田 隆行, Parameter tuning of a 5th order Conservative and Non-oscillatory Scheme for Vlasov simulations, 第 142 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 京都大学, 2016 年 10 月 16 日.
- ⑬ Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance comparison of Eulerian kinetic Vlasov code between flat-MPI parallelism and hybrid parallelism on Fujitsu FX100 supercomputer, 23rd European MPI Users' Group Meeting (EuroMPI2016), Edinburgh, United Kingdom, September 26, 2016.
- ⑭ 梅田 隆行, 深沢 圭一郎, スーパーコンピュータ FX100 におけるブラソフコードの性能評価, 第 156 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 小樽経済センター, 2016 年 9 月 15 日.
- ⑮ Umeda, T., N. Yamauchi, Y. Wada, and S. Ueno, Evaluating gyro-viscosity in the Kelvin-Helmholtz instability by kinetic simulations, 27th Symposium on Plasma Physics and Technology, Prague, Czech Republic, June 20, 2016.
- ⑯ 和田 泰尚, 梅田 隆行, 町田 忍, レイリ

- ー・テイラー不安定性のブラソフシミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 2016 年 5 月 24 日.
- ⑰梅田 隆行, 山内 捺希, 和田 泰尚, 上野 悟志, ケルビン・ヘルムホルツ不安定性におけるジャイロ粘性効果, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 2016 年 5 月 24 日.
- ⑱Umeda, T., N. Yamauchi, Y. Wada, and S. Ueno, Evaluating gyro-viscosity in the Kelvin-Helmholtz instability by kinetic simulations, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 21, 2016.
- ⑲Wada, Y., T. Umeda, and S. Machida, Vlasov simulation of the Rayleigh-Taylor instability, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 19, 2016.
- ⑳梅田 隆行, 宇宙プラズマの第一原理ブラソフコードの性能評価, 平成 27 年度「京」における高速化ワークショップ, 秋葉原 UDX, 2015 年 12 月 18 日.
- ㉑和田 泰尚, 梅田 隆行, 町田 忍, レイリー・テイラー不安定性のブラソフシミュレーション, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 東京大学, 2015 年 11 月 1 日.
- ㉒梅田 隆行, 上野 悟志, 中村 琢磨, Ion kinetic effects to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 東京大学, 2015 年 11 月 1 日.
- ㉓ Umeda, T., and K. Fukazawa, Hybrid parallelization of hyper-dimensional Vlasov code with OpenMP loop collapse directive, International Conference on Parallel Computing (ParCo) 2015, Edinburgh, United Kingdom, September 2, 2015.
- ㉔Wada, Y., T. Umeda, and S. Machida, Vlasov simulation of the Rayleigh-Taylor instability, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 12th Annual Meeting, Singapore, August 4, 2015.
- ㉕Umeda, T., S. Ueno, and T. K. M. Nakamura, Ion kinetic effects to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 12th Annual Meeting, Singapore, August 4, 2015.
- ㉖Umeda, T., S. Ueno, and T. K. M. Nakamura, Ion kinetic effects to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Prague, Czech Republic, June 27, 2015.
- ㉗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ブ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.
- 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.
- ㉙Umeda, 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.

[図書] (計 2 件)

- ①Fukazawa, K., T. Soga, T. Umeda, and T. Nanri, Performance evaluation and optimization of magnetohydrodynamic simulation for planetary magnetosphere with Xeon Phi KNL, In: Parallel Computing is Everywhere, Advances in Parallel Computing, Vol.32, pp.178-187, IOS Press-Amsterdam Berlin Tokyo Washington DC, 2018. (ISBN: 978-1-61499-842-6)
- ② Umeda, T., and K. Fukazawa, Hybrid parallelization of hyper-dimensional Vlasov code with OpenMP loop collapse directive, In: Parallel Computing: On the Road to Exascale, Advances in Parallel Computing, Vol.27, pp.265-274, IOS Press-Amsterdam Berlin Tokyo Washington DC, 2016. (ISBN: 978-1-61499-620-0)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梅田 隆行 (UMEDA, Takayuki)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師  
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 (NARIYUKI, Yasuhiro)  
富山大学・人間発達科学部・准教授  
研究者番号: 50510294

寺田 直樹 (TERADA, Naoki)  
東北大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 70470060

加藤 雄人 (KATOH, Yuto)  
東北大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 60378982

### (4) 研究協力者

和田 泰尚 (WAYA, Yasutaka)  
名古屋大学・工学研究科・修士課程

中村 琢磨 (NAKAMURA, Takuma)  
オーストリア科学アカデミー・宇宙科学研究所・研究員