

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01868

研究課題名（和文）流体シミュレーションで運動論的物理過程はどこまで再現できるか？

研究課題名（英文）How do fluid simulations reproduce kinetic simulation results?

研究代表者

梅田 隆行（Umeda, Takayuki）

北海道大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：40432215

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000 円

研究成果の概要（和文）：宇宙プラズマシミュレーションにおいて、流体シミュレーションと運動論シミュレーションの結果の差がどこから生まれてくるのかという疑問の解決のため、流体シミュレーションでは解いていない三次及び四次モーメント量について、運動論シミュレーションの結果から直接評価を行った。その結果、熱輸送テンソルを含んだ新たな電磁流体シミュレーションが必要であることを見出した。また、運動論シミュレーションの新たな高次精度数値スキームの開発、および運動論シミュレーションコードにハイパフォーマンスコンピューティング技術を導入することにより、従来よりも高性能なコードの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の流体シミュレーションでは考慮されていなかった三次モーメント量が、運動論効果を仮想的に与える可能性を示唆し、新たな三次モーメント量を含んだ電磁流体シミュレーションの開発が必要であるという今後の宇宙プラズマシミュレーション方向性を見出した。

また、新たな高次精度数値スキームの開発により、従来の運動論シミュレーションの計算精度を保ったまま計算時間を格段に削減することに成功した。本研究で開発した技術は、今後さまざまな分野における計算機シミュレーションへ転用可能である。

研究成果の概要（英文）：In order to solve a question on the difference between fluid simulations and kinetic simulations in space plasma, the third and fourth moments, which are not solved in standard fluid simulations, are evaluated from the first-principle kinetic simulations. It is found that the third moment, i.e., the heat flux tensor is essential to reproduce kinetic simulation results.

New numerical schemes are developed for kinetic simulations, which have higher-order accuracy than conventional schemes. By utilizing high-performance computing techniques, kinetic simulation codes are parallelized and optimized for latest supercomputers.

研究分野：計算科学

キーワード：プラズマ科学 宇宙プラズマ 計算機シミュレーション 高性能計算

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 衛星などによる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。近年では、突発的な太陽フレアなどによって、宇宙プラズマ環境が静穏な太陽風環境に対して極端に乱れることが多々あり、宇宙プラズマ環境変動の予測研究は更に重要性を増している。

近年の編隊衛星ミッションや複数の衛星による同時観測プロジェクトをもってしても、限られた衛星軌道上の観測データから時間的な変動成分と空間的な変動成分を分離・抽出することは容易ではなく、宇宙プラズマ環境変動のすべてを観測のみで理解することは困難である。このため、計算機シミュレーションは宇宙プラズマ環境変動の理解や観測データの解釈に大きな役割を果たしてきた。地球磁気圏の変動などの巨視的な時空間スケールの宇宙プラズマ現象に対しては、磁気流体力学 (magneto-hydro-dynamics: MHD) 近似に基づく計算機シミュレーションが有効であり、約半世紀にわたって研究開発が進められてきた。一方で、宇宙プラズマ現象の多くは MHD 方程式だけでは記述できないことはよく知られており、近似の無い第一原理運動論方程式に基づく計算機シミュレーションも盛んに行なわれている。しかし運動論シミュレーションでは、計算時間やメモリ使用量などを現実的な計算機資源内に抑えるために、正電荷イオンと電子の質量比、光速や磁場強度などの物理パラメータの妥協が必須であり、運動論シミュレーション結果を衛星観測データと直接比較することは容易ではない。

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。しかし、計算機資源の制約より、数値シミュレーションによる宇宙環境変動の予測研究においては、第一原理運動論ではなく MHD 近似に基づく計算機シミュレーションが世界の主流であり、運動論過程は無視されている。MHD 近似において無視されている“非 MHD 効果”は宇宙プラズマ環境変動の予測に果たして重要なのか? という学術的問いに対しては、未だ答えが得られていない。

2. 研究の目的

MHD 方程式は第一原理運動論方程式である Vlasov 方程式 (無衝突 Boltzmann 方程式) の零次、一次および二次モーメントをとることにより導出できることはよく知られている。通常 MHD 方程式においては、二次モーメント量である圧力テンソルは応力項 (異方性および非対角成分) を無視したスカラー圧力として扱われる。つまり、運動方程式においてはスカラー圧力の勾配による加速項のみが考慮され、またエネルギー / 圧力はテンソル量の時間発展ではなくスカラー量の時間発展方程式が採用されている。さらに、エネルギー / 圧力の時間発展方程式からは三次モーメント量である熱輸送 (heat flux) テンソルは無視されている。しかし、様々な宇宙プラズマ現象に対する計算機シミュレーションにおいて、MHD シミュレーションと運動論シミュレーションで計算結果に差が出ることは、先行研究により明らかとなっている [1-5]。

MHD シミュレーションに非 MHD 効果を導入する手法としては、イオン慣性効果 (Hall 効果) を取り入れた Hall MHD および、応力テンソルを粘性近似により取り入れた FLR (Finite-Larmor-Radius: 有限ラーモア半径) MHD [6] が主流である。Hall MHD はイオン慣性長スケールの運動論シミュレーション結果をよく再現できる。それに対して、FLR MHD はイオンジャイロ半径スケールの運動論シミュレーション結果を再現できない [5, 7] という事実は、プラズマ理論を専門とする研究者にもあまり知られていない。

非 MHD 効果を含んだ宇宙プラズマ現象の研究では、近似を用いない第一原理運動論モデルであり荷電粒子 1 つ 1 つの運動を直接解く full Particle-In-Cell (PIC) シミュレーションを用いた研究が主流である。本研究で用いる Vlasov シミュレーションは、PIC シミュレーションと同様に第一原理運動論モデルであるが、荷電粒子 1 つ 1 つの運動を直接解く代わりに荷電粒子の分布関数の時間発展を直接解いている。このため、Vlasov シミュレーションは最大で 6 次元の空間を扱い、PIC コードに比べて数百倍以上の膨大な計算機メモリが必要である。しかし、スーパーコンピュータ技術の発展や数値解法の高度化により、近年になり多次元 Vlasov シミュレーションはようやく可能となった。

本研究の目的は「MHD 近似によって無視されたどの非 MHD 項がシミュレーション結果の差を生み出しているのか」という学術的問いを明らかにすることであり、MHD 方程式の導出により 1942 年にノーベル物理学賞を受賞した Hannes Alfvén に挑む研究である。流体力学と運動論を繋ぐ新しい理論は、MHD 理論が主流となっているプラズマ科学分野関連の宇宙プラズマ物理学、太陽物理学や天文学への波及効果があるのみならず、MHD 理論よりも高精度な宇宙空間のプラズマ環境の変動の予測により、将来の人類の宇宙利用の安心・安全に直接貢献できる。

3. 研究の方法

(1) 速度勾配層、密度勾配層や磁気勾配層 (電流層) などの、宇宙プラズマ中に普遍的に存在する境界層 / 不連続面において生じる流体的不安定性について Vlasov シミュレーションを行い、速度分布関数から圧力テンソル、熱輸送テンソルおよび、四次以上の高次モーメント量を数値的

に求める。磁場、速度場やスカラー圧力などの MHD 量も Vlasov シミュレーション結果から数値的に求められるため、それぞれの物理現象について、非 MHD モーメント項が通常の MHD 量に対してどのくらいの強度を持つのかについて、定量的に評価する。また FLR MHD 方程式[6]では、文献[8]の理論に基づいて応力テンソルを近似した粘性項として導入している。文献[7]では、この近似された粘性項が応力テンソルをよく再現できていることを、実際の Vlasov シミュレーションで得られた速度分布関数から二次モーメント量を計算することにより確かめており、これを三次および四次モーメント量に拡張する。

(2) 正確な高次モーメント量の算出のために不可欠である運動論シミュレーションコードについて、その高精度化および高速化のための数値スキームの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 高次モーメント量の評価

文献[8]のジャイロ平均した速度分布関数の近似式に基づいて、三次及び四次モーメント量の近似式を導出した。また、ケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性の 2 次元 full-Vlasov シミュレーション結果より三次及び四次モーメント量を計算し、導出した近似式との直接比較を行った。その結果、四次モーメント量はよく近似できていることに対し、三次モーメント量はほとんど近似できていないことを示した。この結果は文献[8]の奇数モーメント量の近似式を見直す必要があることを示唆する。

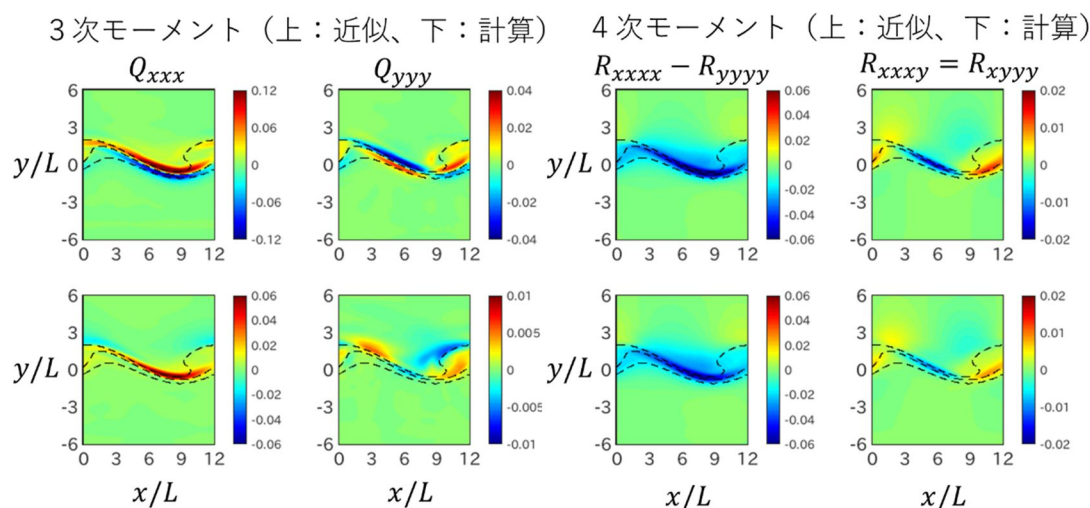


図 1 : 2 次元ケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性における、(上)文献[8]のジャイロ平均した速度分布関数に基づいた三次および四次モーメント量の近似式より算出されたモーメント量の各成分、および(下)2次元 Vlasov シミュレーション結果より直接計算したモーメント量の各成分。四次モーメント量がよく一致するのに対して、三次モーメント量はずれが大きい。

1 次元 full-Vlasov シミュレーションによる接触不連続のパラメータサーベイを行い、Maxwell 速度分布を持つプラズマ中では MHD 平衡解としての接触不連続が存在しないことを示唆した。さらに、full-Vlasov シミュレーションと全く同一パラメータを用いた 1 次元 hybrid-Vlasov シミュレーションとの直接比較を行い、接触不連続の崩壊の要因が三次モーメント量である熱輸送量であることを示した。この結果は、流体と運動論の差を作る要因の 1 つが三次モーメント量であることを示唆する。

(2) 粒子シミュレーション手法の改良

PIC 法を用いたプラズマ粒子シミュレーションにおいて、電流密度計算のスレッド並列化の際に“リダクション”と呼ばれるスレッド間のプライベート配列を共有配列にまとめる演算が用いられてきた。しかし、リダクション演算では個々のスレッドがプライベート配列を持つため、スレッド数が増加するにつれてメモリ使用量が増加し、また共有配列にまとめる計算量も増加するため、スケーラビリティが低下するという問題点があった。これを、ハイパフォーマンスコンピューティング分野で広く用いられているループタイリング(ブロッキング)によるマルチカラー法に基づいて計算順序を変更することによって、個々のスレッドが共通配列のデータを更新する際のアクセス競合を抑制し、スレッド並列化の際に高いスケーラビリティを実現することに成功した。

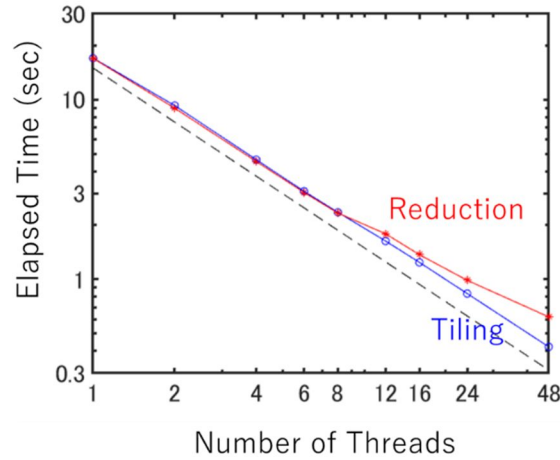


図2：名古屋大学スーパーコンピュータ「不老」Type I システム (Fujitsu FX1000) におけるスレッド並列化の強スケーリング性能評価の結果。従来のリダクション演算を用いたスキームでは8スレッドを超えると OpenMP のオーバーヘッドにより性能が劣化するが、新たに開発したルーブリッキングに基づいたスレッド並列化では、90%を超える並列化効率を達成した。

PIC法を用いたプラズマ粒子シミュレーションにおいて、運動方程式の数値解法としてこれまで Boris 法[9]が50年以上にわたって用いられてきた。しかし、相対論的ローレンツ因子が大きくなるにつれて、磁場を横切るドリフト速度に大きな誤差が生じるという問題点があった。これを、荷電粒子の相対論的運動方程式の理論解に基づいた時間発展式を導出し、磁場を横切るドリフト速度を正確に与える新たな数値解法の開発に成功した。さらに、相対論的ローレンツ因子の近似に4次精度ルンゲ・クッタ法 (RK4) を用いることにより、時間積分の4次精度化に成功した。

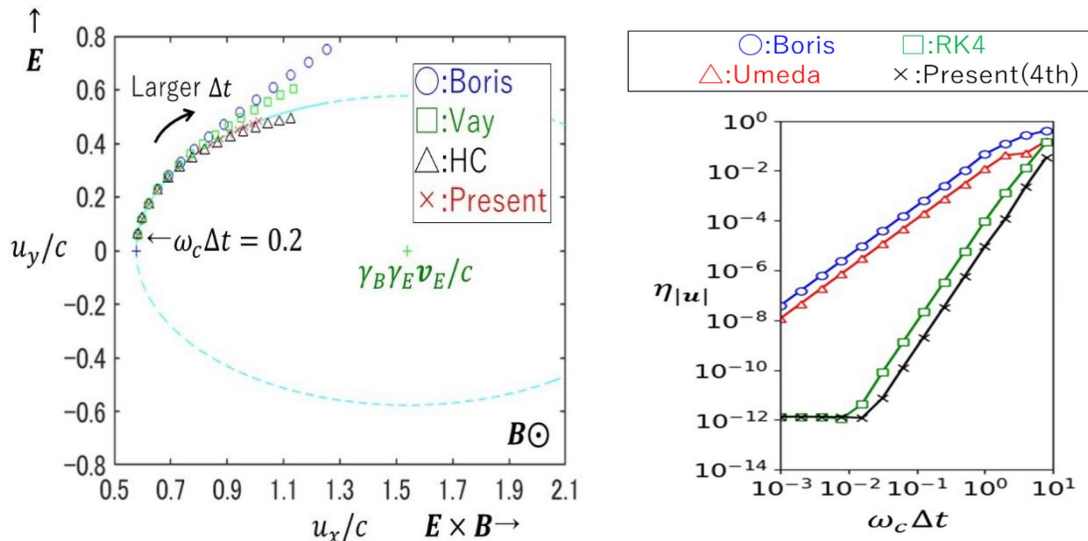


図3：従来の数値スキームと新たに開発した数値スキームとの比較。(左)従来の数値スキームでは運動量空間において相対論的ドリフト運動の理論的な楕円軌跡を再現できなかったが、新たに開発した数値スキームでは理論的な楕円軌跡を再現できている。(右)新たに開発した数値スキームは、2次精度では Boris 法[9]よりも1桁ほど計算誤差が低く、4次精度では RK4 よりも2桁ほど計算誤差が低い。

PIC法を用いたプラズマ粒子シミュレーションにおいて、粒子の初期速度にマックスウェル分布 (正規分布) を与える必要がある。1次元及び3次元マックスウェル分布の累積分布関数の逆関数を近似解で表現することにより、逆関数サンプリング法に基づいて正規乱数を発生させる手法を新たに開発した。この新手法は、従来の Box-Muller 法[10]と同等の揺らぎを持つ。

運動論シミュレーションにおいて、電磁場の標準解法として Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法[11]が 50 年以上にわたって用いられてきた。しかし FDTD 法には、急峻な変化を持つ波形において数値が発生するという問題点があり、これは空間差分の精度を上げることによって抑制できることが知られていた。一方で、空間差分の高精度化および多次元化したときに、時間刻み幅の制約(クーラン条件)が厳しくなるという問題点もあった。これを、時間発展式に 3 階差分項を付加することによって、空間差分を 4 次精度化し、同時にクーラン条件も緩和する新たな FDTD 法の開発に成功した。またこれをさらに空間 6 次精度に拡張し、同時にクーラン条件を緩和することにも成功した。

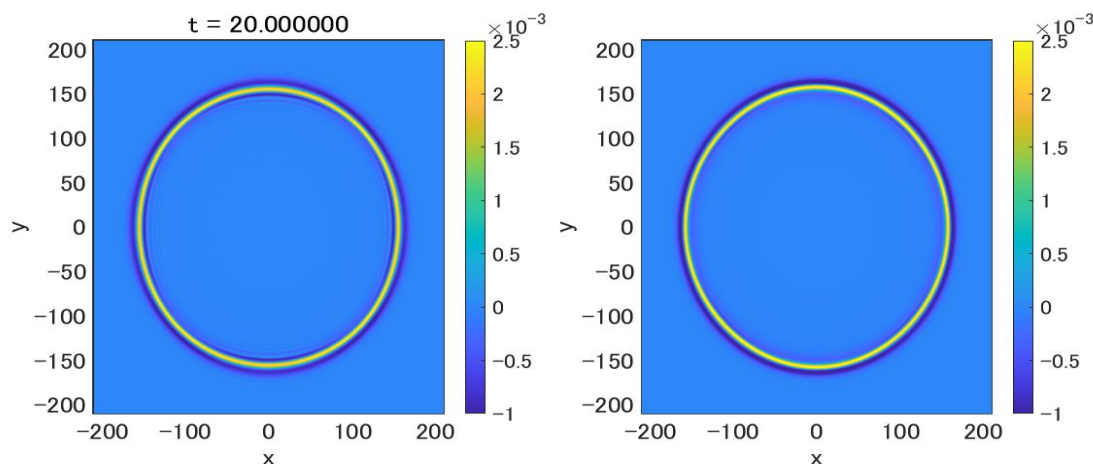


図 4 : 2 次元空間において中心に配置したループアンテナからパルス電磁波を放射したときの伝搬の様子。(左) CFL=0.5 に設定した従来の 2 次精度 FDTD 法[11]では、伝搬角が 0° および 90° (x 軸および y 軸方向)においてパルスの後方に数値振動が生じる。(右) CFL=1.0 に設定した新たな数値スキームでは 4 次精度の空間差分を用いており、伝搬角の異方性が緩和されて数値振動が低減し、かつ時間ステップ数が半分になっている。

<引用文献>

1. M. Wilber and R. M. Winglee, Dawn-dusk asymmetries in the low-latitude boundary layer arising from the Kelvin-Helmholtz instability: A particle simulation, *J. Geophys. Res.*, Vol.100, 1883–1898 (1995).
2. J. D. Huba, The Kelvin-Helmholtz instability: Finite Larmor radius magnetohydrodynamics, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.23, 2907–2910 (1996).
3. T. K. M. Nakamura, 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).
4. P. Henri, S. S. Cerri, F. Califano, F. Pegoraro, C. Rossi, M. Faganello, O. Sebek, P. M. Travnicek, P. Hellinger, J. T. Frederiksen, A. Nordlund, S. Markidis, R. Keppens, and G. Lapenta, Nonlinear evolution of the magnetized Kelvin-Helmholtz instability: From fluid to kinetic modeling, *Phys. Plasmas*, Vol.20, 102118 (2013).
5. T. Umeda, S. Ueno, and T. K. M. Nakamura, Ion kinetic effects to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability, *Plasma Phys. Contr. Fusion*, Vol.56, 075006 (2014).
6. K. V. Roberts and J. B. Taylor, Magnetohydrodynamic equations for finite Larmor radius, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.8, 197–198 (1962).
7. T. Umeda, N. Yamauchi, Y. Wada, and S. Ueno, Evaluating gyro-viscosity in the Kelvin-Helmholtz instability by kinetic simulations, *Phys. Plasmas*, Vol.23, 054506 (2016).
8. W. B. Thompson, The dynamics of high temperature plasmas, *Rep. Prog. Phys.*, Vol.24, 363–424 (1961).
9. J. P. Boris, Relativistic plasma simulation-optimization of a hybrid code, In: *Proceedings of 4th Conference on Numerical Simulation of Plasmas*, Washington D.C. 3–67 (1970).
10. G. E. P. Box, and M. E. Muller A note on the generation of random normal deviates, *Ann. Math. Statist.* Vol.29, 610–611 (1958).
11. K. S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol.14, 302–307 (1966).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Umeda Takayuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Generation of normal distributions revisited	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Computational Statistics	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00180-024-01468-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sekido Harune, Umeda Takayuki	4. 巻 123
2. 論文標題 Relaxation of the Courant Condition in the Explicit Finite-Difference Time-Domain(2,6) Method with Third- and Fifth-degree Differential Terms	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress In Electromagnetics Research M	6. 最初と最後の頁 83~93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2528/pierm23042504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sekido Harune, Umeda Takayuki	4. 巻 76
2. 論文標題 A novel high accuracy finite-difference time-domain method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 5-1~20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-023-01934-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Umeda Takayuki, Ozaki Riku	4. 巻 75
2. 論文標題 Advanced numerical techniques for time integration of relativistic equations of motion for charged particles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 157-1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-023-01902-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Umeda Takayuki	4. 巻 281
2. 論文標題 Multicolor reordering for computing moments in particle-in-cell plasma simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 108499-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2022.108499	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Umeda Takayuki	4. 巻 472
2. 論文標題 A new integrator for relativistic E-cross-B motion of charged particles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 111694-1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2022.111694	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sekido Harune, Umeda Takayuki	4. 巻 71
2. 論文標題 Relaxation of the Courant Condition in the Explicit Finite-Difference Time-Domain Method With Higher-Degree Differential Terms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 1630 ~ 1639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAP.2023.3234097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura T. K. M., Teh W.-L., Zenitani S., Umeda T., Oka M., Hasegawa H., Veronig A. M., Nakamura R.	4. 巻 30
2. 論文標題 Spatial and time scaling of coalescing multiple magnetic islands	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022902-1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0127107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Teh W.-L., Nakamura T. K. M., Zenitani S., Umeda T., Nakamura R.	4. 巻 947
2. 論文標題 New Aspects of Energy Conversion in Magnetic Island Dynamics: Particle-in-cell Simulation of Multiple Island Coalescence and MMS Observations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc2bf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamazaki R., Matsukiyo S., Morita T., Tanaka S. J., Umeda T., et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 High-power laser experiment forming a supercritical collisionless shock in a magnetized uniform plasma at rest	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 025203-1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.025203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura T. K. M., Blasl K. A., Hasegawa H., Umeda T., Liu Y.-H., Peery S. A., Plaschke F., Nakamura R., Holmes J. C., Stawarz J. E., Nystrom W. D.	4. 巻 29
2. 論文標題 Multi-scale evolution of Kelvin-Helmholtz waves at the Earth's magnetopause during southward IMF periods	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012901-1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0067391	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Umeda Takayuki	4. 巻 36
2. 論文標題 Paradigm Shift in Program Structure of Particle-in-Cell Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Parallel Computing	6. 最初と最後の頁 455 ~ 464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/APC200072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Umeda Takayuki, Tsujine Naru, Nariyuki Yasuhiro	4. 巻 26
2. 論文標題 Vlasov code simulation of contact discontinuities	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102107-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5100314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 梅田 隆行	4. 巻 33
2. 論文標題 宇宙プラズマの基礎理論およびその計算機シミュレーション手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 249 ~ 257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2019.T010	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura T.K.M., Umeda T., Nakamura R., Fu H.S., Oka M.	4. 巻 123
2. 論文標題 Disturbance of the Front Region of Magnetic Reconnection Outflow Jets due to the Lower-Hybrid Drift Instability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 235101-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.235101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamazaki Ryo, Shinoda Ayato, Umeda Takayuki, Matsukiyo Shuichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Mach number and plasma beta dependence of the ion temperature perpendicular to the external magnetic field in the transition region of perpendicular collisionless shocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125010-1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 TSUJINE Naru, HARUKI Takayuki, UMEDA Takayuki, NARIYUKI Yasuhiro, SATO Masahiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Stability of Contact Discontinuities in Electrostatic Hybrid- and Full-Vlasov Simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401002-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.1401002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Umeda Takayuki	4. 巻 27
2. 論文標題 Evaluating higher moments in the transverse Kelvin-Helmholtz instability by full kinetic simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 032112-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5139442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計43件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 ラプラシアン演算子を用いた陽的FDTD法の分散関係の異方性の低減
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎 理玖, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 相対論的運動方程式の高次精度数値解析手法の研究
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅田 隆行, 池羽 良太
2. 発表標題 Formation of double layer in two-dimensional current carrying plasma
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Sekido, T. Umeda, Y. Miyoshi
2. 発表標題 Improvement of the explicit finite-difference time-domain method with higher-degree differential terms
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Umeda, R. Ozaki
2. 発表標題 Advanced numerical techniques for time integration of relativistic equations of motion for charged particles
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Ozaki, T. Umeda
2. 発表標題 Higher order integrators for relativistic equations of motion for charged particles
3. 学会等名 35th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Sekido, T. Umeda
2. 発表標題 Reduction of anisotropy in numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with Laplacian
3. 学会等名 35th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Umeda, R. Ikeba
2. 発表標題 Formation of double layer in two-dimensional current carrying plasma
3. 学会等名 35th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎 理玖, 梅田 隆行, 三好 由純, 池羽 良太
2. 発表標題 オーロラ加速領域における電気二重層の計算機シミュレーション
3. 学会等名 第154回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 電流源を含む陽の高次FDTD法における数値誤差の修正
3. 学会等名 第154回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅田 隆行, 尾崎 理玖
2. 発表標題 A new integrator for relativistic equations of motion for charged particles
3. 学会等名 第154回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Sekido, T. Umeda, Y. Miyoshi
2. 発表標題 Reduction of anisotropy in numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Umeda, H. Sekido, R. Ozaki
2. 発表標題 Recent advances in numerical schemes for plasma particle-in-cell simulations
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 Performance measurement and tuning of plasma kinetic simulation codes on recent scalar CPUs
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池羽 良太, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 Computer simulation on the structure of double layer in the auroral acceleration region
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 Reduction of numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with higher-order differential terms
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sekido, H., T. Umeda, and Y. Miyoshi
2. 発表標題 Reduction of numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with higher-order differential terms
3. 学会等名 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sekido, H., T. Umeda, and Y. Miyoshi
2. 発表標題 Reduction of numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with higher-order differential terms
3. 学会等名 14th International School for Space Simulations (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ikeba, R., T. Umeda, and Y. Miyoshi
2. 発表標題 Computer simulation on the structure of double layer in the auroral acceleration region
3. 学会等名 14th International School for Space Simulations (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 Multicolor reordering for computing moments in particle-in-cell plasma simulations
3. 学会等名 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池羽 良太, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 オーロラ加速領域における電界構造の計算機シミュレーション
3. 学会等名 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 高階微分項を用いた陽的FDTD法のクーラン条件の緩和
3. 学会等名 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 マルチカラー法によるプラズマ粒子コードのスレッド並列化
3. 学会等名 第187回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 ループ分割によるA64FXにおけるプラズマ粒子コードの性能チューニング
3. 学会等名 第188回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 一様及び正規分布の生成方法再考
3. 学会等名 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池羽 良太, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 オーロラ加速領域における電界構造の計算機シミュレーション
3. 学会等名 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 Performance measurement of plasma kinetic simulation codes on the Flow supercomputer system at Nagoya University
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池羽 良太, 梅田 隆行, 三好 由純
2. 発表標題 オーロラ加速領域における電界構造の計算機シミュレーション
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Umeda, T., Kurogi, K.
2. 発表標題 High-accuracy numerical scheme for finite difference on staggered grids
3. 学会等名 34th General Assembly and Scientific Symposium (GASS) of the International Union of Radio Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Umeda, T., Tsujine, N., and Nariyuki, Y.
2. 発表標題 Kinetic Vlasov simulations of contact discontinuities
3. 学会等名 EGU General Assembly 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Umeda, T., R. Yamazaki, and Y. Ohira
2. 発表標題 Full particle-in-cell simulation of the interaction between two plasmas for laboratory experiments on the generation of magnetized collisionless shocks with high-power lasers
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 Multi-step Boris integrator for non-relativistic E-cross-B drift
3. 学会等名 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Umeda, T., Tsujine, N., and Nariyuki, Y.
2. 発表標題 Kinetic Vlasov simulations of contact discontinuities
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Umeda, T.
2. 発表標題 Paradigm shift in program structure of particle-in-cell simulations
3. 学会等名 International Conference on Parallel Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Umeda, T., R. Yamazaki, and Y. Ohira
2. 発表標題 Full particle-in-cell simulation of the interaction between two plasmas for laboratory experiments on the generation of magnetized collisionless shocks with high-power lasers
3. 学会等名 15th Symposium of Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Umeda, T.
2. 発表標題 Self-reformation of rippled perpendicular collisionless shocks: Full particle simulations
3. 学会等名 14th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Umeda, T.
2. 発表標題 Performance evaluation of kinetic code on scalar processors
3. 学会等名 International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Umeda, T.
2. 発表標題 Performance evaluation of kinetic code on scalar processors
3. 学会等名 48th International Conference on Parallel Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Umeda, T., and T. K. M. Nakamura
2. 発表標題 Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 プログラムモデルの異なるPICコードの性能測定
3. 学会等名 第173回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅田 隆行
2. 発表標題 プログラムモデルの異なるPICコードの性能測定
3. 学会等名 第172回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅田 隆行, 辻根 成, 成行 泰裕
2. 発表標題 Vlasov code simulation of contact discontinuities
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅田 隆行, 中村 琢磨
2. 発表標題 Electromagnetic linear dispersion relation for plasma with a drift across magnetic field
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 電磁界解析及び音響解析におけるFDTD法を高精度化する方法	発明者 梅田 隆行, 関戸 晴 宇	権利者 東海国立大学機 構
産業財産権の種類、番号 特許、2022-082029	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 相対論的運動方程式に基づく荷電粒子の運動解析方法	発明者 梅田隆行	権利者 東海国立大学機 構
産業財産権の種類、番号 特許、2022-032260	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	関戸 晴宇 (Sekido Harune)	名古屋大学・大学院工学研究科・大学院生 (13901)	
研究協力者	池羽 良太 (Ikeba Ryouta)	名古屋大学・大学院工学研究科・大学院生 (13901)	
研究協力者	尾崎 理玖 (Ozaki Riku)	名古屋大学・大学院工学研究科・大学院生 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	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	
研究協力者	テ ウェイロン (Teh Wai Leong)	マレーシア国民大学・気候変動研究所・上級研究員	
研究協力者	山崎 了 (Yamazaki Ryo) (40420509)	青山学院大学・理工学部・教授 (32601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	オーストリア	オーストリア科学アカデミー	グラーツ大学	
マレーシア	マレーシア国民大学			