

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287041

研究課題名(和文)ハイブリッド粒子コードを用いた無衝突衝撃波における宇宙線陽子の生成過程の研究

研究課題名(英文)Generation of cosmic-ray protons at collisionless shocks via hybrid particle-in-cell simulations

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) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：計数ソートを用いた粒子データの並べ替えと座標配列に従属した粒子データ構造への変更により、Particle-In-Cell型のプラズマ粒子コードの高速化を行った。高速化したコードによる大規模2次元粒子シミュレーションにより、垂直衝撃波の非定常性である再形成について研究を行い、その存在が衝撃波遷移層における微視的不安定性の成長モードに依存することを示唆した。衝撃波遷移層における大振幅ホイッスラーモード波の発展について、1次元および2次元粒子シミュレーションを行った。1次元では波の発展ともなって電子が相対論的に加速されたが、2次元では新たな不安定性により波が急速に減衰し、電子加速は起こらなかった。

研究成果の概要(英文)：The computational speed of the particle-in-cell-type plasma simulation codes is accelerated by using the counting sort algorithm and the array-particle data structure. Large-scale two-dimensional particle-in-cell simulations are carried out by using the improved code for studying non-stationarity of perpendicular shocks called the reformation. The result implies that the existence of the reformation is controlled by types of micro-instabilities at the shock transition layer.

One- and two-dimensional particle simulations are also carried out on the development of a large-amplitude whistler-mode waves in the shock transition layer. Relativistic electron acceleration is found in the 1D run. On the other hand, a rapid decay of whistler-mode waves through a new instability is found in the 2D run, which suppress the relativistic electron acceleration.

研究分野：計算科学

キーワード：粒子加速 宇宙線 プラズマ科学 超高層物理学 高エネルギー天文学 高性能計算

1. 研究開始当初の背景

地球に降り注ぐ高エネルギー粒子である宇宙線の起源は未解明の問題である。宇宙線のエネルギーは最大でデカジュール(10の20乗電子ボルト)にも達し、宇宙背景放射や星光、星間磁場と同程度のエネルギー密度である。即ち、宇宙線は我々の宇宙の基本構成要素である。非熱的粒子である高エネルギー宇宙線の生成は、活動銀河核ジェット、ガンマ線バースト、超新星残骸、恒星間・惑星間空間および恒星・惑星磁気圏など、至る所に普遍的に存在する無衝突衝撃波で起きていると考えられているが、その粒子加速機構は数十年来の未解決問題である。

宇宙プラズマ中の衝撃波では、媒質であるプラズマの粒子間衝突の平均自由行程が遷移層の厚みに比べて桁違いに長いこと、無衝突衝撃波と呼ばれる。流体近似の下では衝撃波は単なる不連続面として表され、大多数のプラズマ粒子は圧縮・減速を受けて下流に流される。このような無衝突衝撃波の周辺に高速の非熱的粒子が存在すると、それらは比較的簡単に衝撃波面を横切ることができ、さらにプラズマ波動による散乱を受けることで、エネルギーを獲得しながら衝撃波面の前後を往復することが可能になる。これが「フェルミ加速」と呼ばれる粒子加速機構である。フェルミ加速理論は、宇宙線のエネルギー分布がべき型であることを説明できるが、べき指数や最高到達エネルギー等を説明できない観測例もあり、未だ実証されるには至っていない。より根本的問題として、注入過程—はじめに非熱的粒子がどのようにしてできるか—も未解決の難問である注入問題として知られる。

2. 研究の目的

電子と陽子は質量が約1840倍異なるために、電子と陽子の物理現象の時間・空間スケールがこの比程度まで異なるため、第一原理全粒子シミュレーションにより、電子加速と陽子加速を同時に追うためには非常に膨大な計算資源と計算時間が必要である。その結果として、陽子—電子質量比、プラズマ周波数—サイクロトロン周波数比、光速—熱速度比などの物理パラメータ比をそれぞれ現実から1桁以上減らした数値実験がこれまでに行われてきた。陽子加速のみに注目した場合、電子を流体として扱うハイブリッド粒子コードを用いることで、パラメータを妥協することなく、現実的な計算資源で数値実験を行うことが可能となる。このため、本研究ではハイブリッド粒子シミュレーション手法について、整備・開発を行う。

また引き続き、物理パラメータ比を計算可能な範囲まで減らした第一原理全粒子シミュレーションにより、波動による粒子加速などのプラズマ素過程についての理解を深める。

3. 研究の方法

これまでの衝撃波の粒子シミュレーション

では、磁場あるいはプラズマ粒子の圧力によりプラズマを圧縮することでコンピュータ内に衝撃波を生成しており、高速で伝播する衝撃波を有限のコンピュータメモリ内で解析するために膨大な計算リソースが必要であった。この解決策として、本研究グループが所有する世界的にもユニークな「衝撃波静止系モデル」により、衝撃波が止まった系でその振る舞いを解析する。これにより、従来の衝撃波シミュレーション手法に比べて必要な計算リソースを20分の1以下に節約できる。

本研究では特に、衝撃波面接線方向に対して、イオン慣性長の5倍以上のシミュレーション空間を確保し、「リップル」と呼ばれる衝撃波面の波打ち現象を含めた長時間のシミュレーションを行う。これにより、従来の1次元の衝撃波の描像を超えて、衝撃波面のイオンスケールの非定常性が衝撃波構造および粒子加速に与える影響を解析する。

また、整備・開発するハイブリッド粒子シミュレーション技術を、逐次衝撃波静止系コードに導入していく。

4. 研究成果

(1)粒子シミュレーション手法の改良

①Particle-In-Cell法による粒子コードでは、電磁場は格子上に与えられ、電磁場によって加速される粒子は、格子の座標に関係なく計算空間にばらまかれている。このため、粒子が格子上の電磁場データにアクセスするときには計算機メモリにランダムにアクセスすることになり、CPUのキャッシュメモリが非効率に使われていた。本研究ではまず、粒子をソートしてキャッシュ効率を上げることが高速化につながることを確認した。次に、PIC型粒子コードの高速化のため、新しいスレッド並列ソーティングアルゴリズムの検討を行い、バケツソート(計数ソート)が、スレッド並列化しやすく、かつ並列性能が高いことを明らかにした。さらに、粒子データが粒子の座標に関係なく並ぶ従来の配列データ構造から、各格子が粒子データを持つ構造へと変更した。これにより計算機メモリへのアクセスが局所的になり、キャッシュメモリへのデータ転送が効率化され、従来のコードよりも約3倍の高速化に成功した。

②ローレンツ力による荷電粒子のジャイロ運動を解くBoris法について、高精度化を行った。従来のBoris法ではローレンツ力による回転を2回計算することによってエネルギー保存則を満たしつつ二次精度を保っていた。本研究で新たに開発したn段のBoris法では、ローレンツ力による回転をn回計算することによってエネルギー保存則を満たしつつ、計算精度を従来のBoris法の 2^{n-2} 倍に高めることに成功した。

③従来のハイブリッド粒子シミュレーションコードでは、電磁場の更新に中心差分系の計算スキームを用いており、格子幅をイオン慣性長よりも小さくしたときに、数値的熱擾乱

から生じるポンデロモーティブ力によるプラズマの穴あきが生じ、計算の安定性に非常に大きな影響を及ぼすことが分かっていた。本研究では、磁場の誘導方程式を流体コードと同様の1次風上差分法に変更した。その結果、差分の誤差に起因する数値振動が抑制されてコードが安定化されることが分かった。しかし、計算精度が落ちて波動の減衰が生じた。より高精度かつ安定な風上差分の導入を試みたが、コードの安定性を確保するまでには至らず、今後さらに研究を進める必要がある。

(2)垂直衝撃波における再形成過程の検証

無衝突衝撃波の波面法線方向と磁場方向が垂直に近い場合、衝撃波上流から流入するイオンが周期的に反射され、衝撃波面が周期的に発達と消滅を繰り返す、再形成と呼ばれる現象がある。本研究では、リップルと呼ばれる衝撃波面がイオンスケールで空間的に変動する現象に着目し、大規模な2次元粒子シミュレーションを実行し、従来の小規模で一次的なシミュレーション結果との比較を行った。特に、アルフヴェンマッハ数が6程度の低マッハ数(準)垂直衝撃波における、2次元空間での衝撃波面の非定常性について解析を行った。過去のシミュレーション研究では、衝撃波の再形成の有無を磁場データのみにより判断しており、また判断方法も主観的であった。本研究では、衝撃波遷移層において上流イオンの反射およびそれに伴う磁場の増幅が同時に起こっているかどうかにより、衝撃波の再形成の有無を客観的に判断した。

図1では、小規模な2次元シミュレーション結果(上)と大規模な2次元シミュレーション結果(下)とを比較しており、垂直衝撃波遷移層における磁場(B_y)、イオン密度(N_i)及び、下

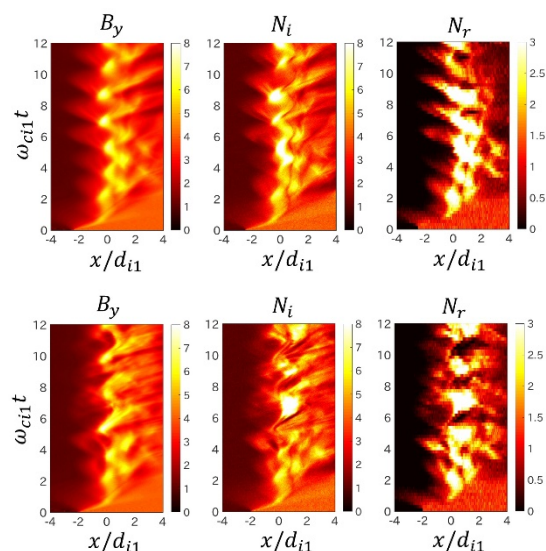


図1: 小規模な2次元シミュレーション結果(上)と大規模な2次元シミュレーション結果(下)との比較。垂直衝撃波遷移層における磁場(B_y)、イオン密度(N_i)および、下流のバルク速度よりも速い速度で上流へ向かうイオン(反射イオンとする)の密度(N_r)。

流のバルク速度よりも高速で上流へ向かうイオン(反射イオンとする)の密度(N_r)を表す。

小規模な2次元シミュレーションではこれらの物理量が時間的に周期振動しており、また反射イオン増加に伴って磁場が増加していることから、再形成が起きていることが分かる。大規模な2次元シミュレーションでは、反射イオンの増加と磁場の増加が同時に見られるものの、その周期については一定ではなかった。この傾向はイオン-電子質量比の小さいシミュレーションにおいて見られ、再形成は存在するものの、その周期が1次元的なシミュレーションよりも長くなると言える。

一方で、イオン-電子質量比の大きいシミュレーションにおいては、周期的なイオンの反射そのものが消滅し、磁場の増幅が衝撃波遷移層で生じた波動によって起こる確認できた。つまり、衝撃波の再形成は存在しないことが分かった。なお、本研究成果については現在査読付論文として投稿中である。

(3)大振幅ホイッスラーモード波の非線形発展と電子加速

垂直衝撃波の遷移層では、磁場により粒子が圧縮されて磁力線に垂直方向のプラズマ温度が上昇する。磁力線に平行方向と垂直方向の温度差が生じ、この温度差を解消するために、ホイッスラーモード波が励起する。この波は荷電粒子の加速に寄与することが知られているため、本研究では垂直衝撃波の遷移層の一部を切り出したローカルシミュレーションにより、大振幅ホイッスラーモード波の非線形発展について研究を行った。

図2は、磁場方向の1次元モデルにおいて、計算サイズをイオンスケールとしたときの、大振幅ホイッスラーモード波の発展を表す。磁場の強度をパネル(a)に、その波数スペクトルをパネル(b)に、いくつかの電子のローレンツ因子(γ)をパネル(c)に示す。電子スケールの大振幅ホイッスラー波は、パラメトリック不安定性を経て後方散乱波を励起し、その様子がパネル(b)に見られる。電子は、元の大振幅ホイッスラーモード波と後方散乱波によって磁場に垂直方向に加熱され、温度異方性によってイオンスケールの波長へと伸びていく。

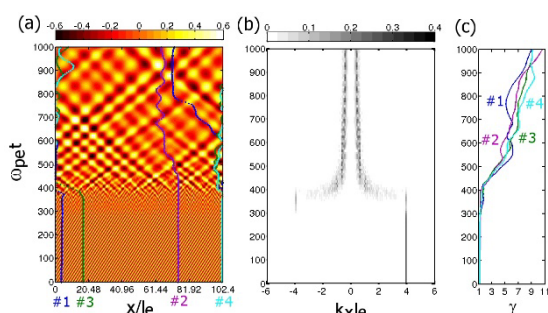


図2: 1次元における大振幅ホイッスラーモード波の時間発展。(a)磁場の強度、(b)その波数スペクトル、(c)いくつかの電子のローレンツ因子 γ 。

つまり、パネル(b)に見られるように、波数が小さくなっていく。またその過程において、双方向に伝搬するホイッスラー波と電子が共鳴し、電子が $\gamma = 10$ に届くような相対論的エネルギーまで加速することがパネル(c)に見られる。大振幅ホイッスラー波の励起は衝撃波の遷移領域周辺において普遍的に見られる現象であり、双方向ホイッスラー波が電子加速に寄与していることを示唆する結果を得た。

一方で、2次元に拡張した場合、1次元シミュレーションの場合と異なる結果を得た。これを図3に示す。2次元では、 x 方向に変化する元のホイッスラーモード波の伝搬方向と垂直に、より長波長で y 方向に変化する波動が現れた。この波動は磁場および電子密度が圧縮する音波モードであり、これまでは報告されていなかった新たな不安定性である。これにより初期に与えたホイッスラーモード波が急速に減衰し、その過程で電子の自由エネルギーが熱に変換されるため、1次元シミュレーションで見られたような電子加速が2次元では生じないことが分かった。

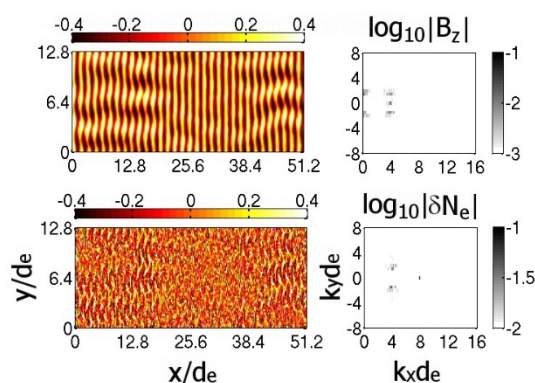


図3: 1次元における大振幅ホイッスラーモード波の変化の様子。磁場成分 B_z の空間プロファイルおよびその波数スペクトル(上)と電子密度の空間プロファイルおよびその波数スペクトル(下)。

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15件)

- ① Umeda, T., A three-step Boris integrator for Lorentz force equation of charged particles, *Computer Physics Communications*, Vol.228, pp.1-4, 2018. 査読有
DOI:10.1016/j.cpc.2018.03.019
- ② Umeda, T., and K. Fukazawa, Performance measurement of Eulerian kinetic code on the Xeon Phi KNL, *Proceedings of HPC Asia 2018*, P1 (4pp.), 2018. 査読有
<http://sighpc.ipsj.or.jp/HPCAsia2018/poster/post101s2-file1.pdf>
- ③ Umeda, 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. 査読有
DOI:10.1063/1.4991409

- ④ Saito, 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. 査読有
DOI:10.1063/1.4990443
- ⑤ Umeda, 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. 査読有
DOI:10.1063/1.4982609
- ⑥ 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. 査読有
DOI:10.1063/1.4952632
- ⑦ 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. 査読有
DOI:10.1063/1.4967859
- 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. 査読有
DOI:10.1145/2966884.2966891
- 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. 査読有
DOI:10.1002/2016GL070215
- ⑩ Shoji, Y., R. Yamazaki②, S. Matsukiyo⑫, T. Umeda⑩, et al. (全21名), Toward the Generation of Magnetized Collisionless Shocks with High-Power Lasers, *Plasma and Fusion Research*, 11, 3401031 (3pp.), 2016. 査読有
DOI:10.1585/pfr.11.3401031
- ⑪ 梅田 隆行, Particle-In-Cell プラズマ粒子コードの性能測定, *情報処理学会研究報告*, 2015-HPC-151(25), 2015. 査読無
- ⑫ Umeda, T., and S. Oya, Performance comparison of parallel sorting with OpenMP, *Proceedings of 2015 Third International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, pp.334-340, 2015. 査読有
DOI:10.1109/CANDAR.2015.25
- 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. 査読有
DOI:10.1063/1.4936798
- ⑭ Saito, S., T. Umeda, and Y. Nariyuki, Nonlinear damping of a finite amplitude whistler wave due to modified two stream instability, *Physics of*

Plasmas, Vol.22, No.7, 072105 (7pp.), 2015. 査読有 DOI:10.1063/1.4926523

- ⑮ Umeda, T., S. Saito, and Y. Nariyuki, Electron acceleration during the decay of nonlinear whistler waves in low-beta electron-ion plasma, *Astrophysical Journal*, Vol.794, No.1, 63 (10pp.), 2014. 査読有
DOI:10.1088/0004-637X/794/1/63

[学会発表] (計 36 件)

- ① 篠田 理人, 山崎 了, 梅田 隆行, プラズマ粒子シミュレーションを用いた無衝突衝撃波遷移層の構造のベータ依存性の研究, 日本天文学会 2018 年春季年会, 千葉大学, 2018 年 3 月 15 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 Saito, S., Y. Nariyuki, and T. Umeda, Cascade of whistler-mode turbulence from ion to electron kinetic scales: Particle-in-cell simulation, American Geophysical Union (AGU) 2017 Fall meeting, New Orleans, USA, December 11, 2017.
- ④ 梅田 隆行, Multi-step Boris integrator for Lorentz force equation, Plasma Conference 2017, 姫路商工会議所, 2017 年 11 月 21 日.
- ⑤ 梅田 隆行, Multi-step Boris integrator for Lorentz force equation 第 141 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 京都大学宇治キャンパス, 2017 年 10 月 17 日.
- ⑥ Umeda, T., Multi-step Boris integrator for Lorentz force equation, 25th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP 2017), Leuven, Belgium, September 18, 2017.
- ⑦ Umeda, T., S. Saito, and Y. Nariyuki, Decay of nonlinear whistler waves: 1D versus 2D, 32th International Union of Radio Science (URSI) General Assembly & Scientific Symposium, Montreal, Canada, August 26, 2017.
- ⑧ Umeda, T., S. Saito, and Y. Nariyuki, Decay of nonlinear whistler waves: 1D versus 2D, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting, Singapore, August 8, 2017.
- ⑨ 梅田 隆行, 大長 勇輝, Cyclic self-reformation of perpendicular shocks in two-dimensional particle-in-cell simulation, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 幕張メッセ, 2017 年 5 月 24 日.
- ⑩ Umeda, T., S. Saito, and Y. Nariyuki, Decay of nonlinear whistler waves: 1D versus 2D, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2017, Vienna, Austria, April 26, 2017.
- ⑪ 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.

- ⑫ 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, American Geophysical Union (AGU) 2016 Fall meeting, San Francisco, USA, December 15, 2016.
- ⑬ 梅田 隆行, 齊藤 慎司, 成行 泰裕, 2次元における大振幅ホイッスラー波の減衰, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 11 月 23 日.
- ⑭ 齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行, Whistler Turbulence at Ion and Electron Scales: Particle-In-Cell Simulations, 第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 九州大学伊都キャンパス, 2016 年 11 月 23 日.
- ⑮ 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.
- ⑯ Saito, S., Y. Nariyuki, and T. Umeda, Generation of small scale electrostatic fluctuations in decaying whistler turbulence: Particle-in-cell simulation (invited), Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 13th Annual Meeting, Beijing, China, August 2016.
- ⑰ 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.
- ⑱ 松清 修一, 梅田 隆行, 超臨界垂直衝撃波における微視的不安定性再考, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 2016 年 5 月 25 日.
- ⑲ 齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行, ホイッスラー乱流中での運動論スケール静電波動の励起について:粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 2016 年 5 月 25 日.
- ⑳ Umeda, 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.
- ㉑ Wada, 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.
- ㉒ Matsukiyo, S., and T. Umeda, Electron scale instabilities in the foot of a perpendicular shock, American Geophysical Union (AGU) 2014 Fall meeting, San Francisco, USA, December 17, 2015.

- ②③ Umeda, T., and S. Oya, Performance comparison of open-source parallel sorting with OpenMP, 3rd International Symposium on Computing and Networking (CANDAR), Sapporo, Japan, December 9, 2015.
- ②④ 齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行, Decaying whistler turbulence at ion scales: Particle-in-cell simulation, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 東京大学, 2015 年 11 月 2 日.
- ②⑤ 梅田 隆行, Particle-In-Cell プラズマ粒子コードの性能測定, 第 151 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, 2015 年 10 月 1 日.
- ②⑥ Wada, 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.
- ②⑦ Umeda, 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.
- ②⑧ Umeda, 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.
- ②⑨ 齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行, イオンスケール・ホイッスラー乱流のカスケードについて, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ, 2015 年 5 月 25 日.
- ③⑩ 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.
- ③⑪ Saito, S., Y. Nariyuki, and T. Umeda, Perpendicular ion heating by nonlinear development of finite amplitude whistler wave, American Geophysical Union (AGU) 2014 Fall meeting, San Francisco, USA, December 19, 2014.
- ③⑫ Umeda, T., Y. Kidani, S. Matsukiyo, and R. Yamazaki, Reformation and microinstabilities at perpendicular collisionless shocks, American Geophysical Union (AGU) 2014 Fall meeting, San Francisco, USA, December 15, 2014.
- ③⑬ 梅田 隆行, 木谷 佳隆, 松清 修一, 垂直衝撃波における再形成と微視的不安定性, 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 3 日.
- ③⑭ 成行 泰裕, 齊藤 慎司, 梅田 隆行, Parametric instabilities of whistler waves revisited, 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 3 日.
- ③⑮ Saito, S., Y. Nariyuki, and T. Umeda, Plasma

heating by nonlinear development of a finite amplitude whistler wave, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, Sapporo, July 29, 2014.

- ③⑯ 齊藤 慎司, 成行 泰裕, 梅田 隆行, 有限振幅ホイッスラー波動非線形発展に伴うプラズマ加熱, 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.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 磁場のローレンツ力による荷電粒子の運動解析方法
 発明者: 梅田 隆行
 権利者: 名古屋大学
 種類: 特許
 番号: 2017-118277
 出願年月日: 2017 年 6 月 16 日
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

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

小路 真史 (SHOJI, Masafumi)
 名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教
 研究者番号: 80722082
 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
 松清 修一 (MATSUKIYO, Shuichi)
 九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授
 研究者番号: 00380709
 齊藤 慎司 (SAITO, Shinji)
 名古屋大学・大学院理学研究科・特任准教授
 研究者番号: 60528165
 山崎 了 (YAMAZAKI, Ryo)
 青山学院大学・理工学部・教授
 研究者番号: 40420509

(4) 研究協力者

和田 泰尚 (WADA, Yasutaka)
 名古屋大学・大学院工学研究科・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