

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21740356  
 研究課題名（和文） 巨大計算に向けた低数値誤差蓄積シミュレーションコードの開発  
 研究課題名（英文） Development of high-accuracy codes for a large-scale magnetospheric simulation  
 研究代表者  
 寺田 直樹（Terada Naoki）  
 東北大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：70470060

研究成果の概要（和文）：

本研究では、高精度な数値磁気単極子除去法およびシームレス粒子法を開発を行った。数値磁気単極子除去法の開発においては、双曲型除去法の難点である超音速上流域への移流問題を解決すべく局所的な除去を促進し、超音速上流域や激み点における誤差の蓄積および解の振動を低減させた。シームレス粒子法の開発においては、開発済みの粒子計算部に加えて、場および流体計算部の高精度化を進め、惑星電磁圏や磁気圏-電離圏結合系などの実問題への適用を行った。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a high-accuracy divergence B cleaning method as well as seamless particle method. As for the divergence cleaning method, we have improved a hyperbolic-type method by enforcing local cleaning to prevent accumulation of errors and oscillations. Field and fluid solvers as parts of the less dissipative seamless particle method are developed and then applied to planetary ionopause, magnetosphere-ionosphere coupling system, etc.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：宇宙プラズマ

1. 研究開始当初の背景

現在、磁気圏-電離圏結合の磁気流体力学（MHD）シミュレーションは実用の域に達し、リアルタイム宇宙天気シミュレーションを始めとする磁気圏・電離圏研究に幅広く活用されている。磁気圏-電離圏結合シミュレーションは、今後さらに大規模化・高精度化が

進み、流体近似では記述しきれない粒子効果を含むグローバル計算へとその発展が加速していく。しかし、大部分の磁気圏-電離圏結合シミュレーションは、中規模計算機環境で開発されたものをそのまま領域拡張・大規模化しただけでは、いずれ計算が破綻してしまうと予想された。それは、地球近傍領域で

の計算反復回数の増加に伴い、数値誤差の蓄積が無視出来なくなるからである。超巨大計算時代の到来を間近に控えて、磁気圏現象の巨大計算を実現するための基盤技術の一つである「低数値誤差蓄積コード」の開発が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、低数値誤差蓄積コードを構成する2種類の計算手法(a)高精度な数値磁気単極子除去法と、(b)高精度なシームレス粒子法を開発することである。

## 3. 研究の方法

高精度な数値磁気単極子除去法の開発では、過去にDedner et al. [2002]によって提案された双曲型除去法を発展させた手法を開発する。Dedner et al.の双曲型除去法では、数値磁気単極子の補正誤差がよどみ点に蓄積しないように移流項を調整することが可能であるが、その一方で、磁気圏シミュレーションでは超音速上流域への移流問題や、背景流れに逆流する領域で解が振動するなどの問題が発生しうる。本研究では、これらの問題を解決する為に、数値磁気単極子の移流を各コントロールボリューム内で閉じさせ、伝播を制御することにより、誤差逆流を最小限に抑える。

高精度なシームレス粒子法の開発では、従来の計算手法では、地球近傍と磁気圏では磁場強度差が最大で $\sim 5$ 桁にも及ぶため、巡回周波数が大きく異なる複数の領域で、高精度に荷電粒子の運動を表現出来なかった。そこで、ジャイロ運動論に基づく解法を従来の運動方程式を解く手法と連結させることにより、磁場強度差による困難を克服するシームレスコードの基礎部を開発した。ジャイロ運動論では、ハミルトン理論とリー摂動展開法を用いて、エネルギー保存を満たし、巡回位相を平均化しつつも有限巡回半径効果を保持する方程式系を導く。このジャイロ運動法と従来の運動方程式を解く手法を、背景の磁場強度から計算した巡回周波数を判定子として連続的に切り替え、電離圏高度から磁気圏領域までを連続的に表現する高精度な粒子軌道計算(粒子計算部)を実現する。さらに電磁場への反動を自己無撞着に組み込む為に、高精度な電磁場ソルバー(場および流体計算部)の開発を行う。そしてこれらの開発したコードを惑星磁気圏-電離圏結合系に適用し、実問題への適用可能性を調査する。

## 4. 研究成果

本研究では、平成21年度は、数値磁気単極子除去法の開発、及び、惑星電磁圏-電離圏結合シミュレーション等の実問題への実装を行った。数値磁気単極子除去法の開発に

おいては、従来の数値磁気単極子除去法の中でも比較的誤差の蓄積が小さく適用範囲が広い双極子型除去法をベースにして開発を行った。双曲型除去法の難点である超音速上流域への移流問題を解決するために、数値磁気単極子は逆極性のペアが出現するという性質を用いて移流の方向と速度を制御して局所的な除去を促進し、また背景流れに対する移流方向と速度の制御により補正誤差の逆流を抑え、超音速上流域や澱み点における誤差の蓄積および解の振動を低減させた。この数値誤差蓄積の低減により、惑星の電離圏内や電磁圏夜側のウェーク領域などのプラズマ対流速度が遅い領域における磁場構造をより精確に表現することに成功し、衛星観測と良く一致する結果を得た。また、一様格子においてCT法の開発も行い、複数の数値磁気単極子除去法の比較を行った。

平成22年度は、磁気圏-電離圏結合シミュレーションの流体計算部の高精度化を行い、粒子コードおよび拡張磁気流体コードの場の計算部における数値誤差蓄積の低減を実現した。また、実問題への適用に向けて、木星磁気圏-電離圏結合領域における拡張磁気流体力学方程式系(電子移流項を含む磁気流体力学方程式系)への試験的な実装を試みた。本研究では、高精度中心スキームのリーマンファンの評価を行う際に、従来のように磁気流体波動の最大伝搬速度を用いずに、ランキン-ユゴニオの関係を用いた伝搬速度の見積りを利用することによって、プラズマ波動(特に接触不連続)に付加される数値粘性の大幅な低減を実現した。しかしながら、ランキン-ユゴニオの関係を用いた方法では、プラズマの移流速度と波動の伝搬が逆向きでキャンセルされる(合計速度が0になる)点において、数値不安定が生じる問題が発生する。この問題を解決するために、本研究では、プラズマの移流部分、すなわちエントロピーモードを分離して解く方法を新たに提案し、数値不安定が生じる点(合計速度が0になる点)を回避することに成功した。実問題への適用に向けた試験的な実装においては、木星磁気圏-電離圏結合領域において電子移流項を磁気流体力学方程式系に組み込み、各種プラズマ波動の伝搬試験を行い、理論とよく一致する伝搬速度などの初期的な結果を得た。

平成23年度は、前年度に高精度化を達成した流体計算部の実問題への適用を行った。第一の適用先として、金星電離圏界面における磁気流体力学方程式系に適用し、現実的な速度シア配位を初期条件として採用することによって、磁気流体近似では観測された表面波の成長を説明できないことを示し、運動論の効果の重要性を示唆する結果を得た。第二の適用先として、木星磁気圏-電離圏結合領域における拡張磁気流体力学方程式系

(電子移流項を含む磁気流体力学方程式系)に適用し、木星電離圏-イオ結合系の沿磁力線電場形成において電子移流項が果たす役割を定量的に評価した。その結果、沿磁力線電流がある閾値を超えると、電流駆動型の不安定性によってイオン音波モードが増幅され、狭い高度範囲に不連続的な加速層が形成されることを示した。また、観測から示唆される木星電離圏-イオ結合系における電流-電圧関係の経度分布を再現することに成功した。次に、流体計算部と、旋回位相を保持した粒子軌道計算部の結合を行い、自己無撞着な電磁混成コードにおける数値誤差蓄積の評価を行った。その結果、流体計算部に高精度中心スキームを用いた場合は、粒子軌道計算部の時間発展に半整数時間格子点を用いると二次の誤差が紛れ込み、更なる高次精度化を図るには整数時間格子点上で粒子運動を解く陰的スキームを導入する必要があることが明らかになった。

#### 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 33 件)

1. 吉川一朗, 土屋史紀, 寺田直樹, 小型科学衛星1号機Sprint-A/EXCEED計画の概要, 日本惑星科学会誌, Vol.21, pp.16-21, 2012. (査読有り)
2. Matsuda, K., N. Terada, Y. Katoh, and H. Misawa, The role of the electron convection term for the parallel electric field and electron acceleration in MHD simulations, *Physics of Plasmas*, 18, 082901, doi:10.1063/1.3622204, 2011. (査読有り)
3. Umeda, T., T. Kimura, K. Togano, K. Fukazawa, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, N. Terada, T. K. M. Nakamura, and T. Ogino, Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body, *Physics of plasmas*, 18, 012908, 2011. (査読有り)
4. Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, N. Terada, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, Vertical Connection from the Tropospheric Activities to the Ionospheric Longitudinal Structure Simulated by a New Earth's Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model, *Journal of Geophysical Research*, 116, A01316, doi:10.1029/2010JA015925, 2011. (査読有り)
5. Ishikawa, K., Y. Ezoe, T. Ohashi, N. Terada, Y. Futaana, X-Ray Observation of Mars at Solar Minimum with Suzaku, *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*, Vol. 63, pp.S705-S712, 2011. (査読有り)
6. Ezoe, Y., Y. Miyoshi, H. Yoshitake, K. Mitsuda, N. Terada, S. Oishi, and T. Ohashi, Enhancement of Terrestrial Diffuse X-ray Emission Associated With Coronal Mass Ejection and Geomagnetic Storm, *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*, Vol. 63, pp.S691-S704, 2011. (査読有り)
7. 大谷栄治, 倉本圭, 今村剛, 寺田直樹, 渡部重十, 荒川政彦, 伊藤孝士, 坂本尚義, 渡部潤一, 木村淳, 高橋幸弘, 中島健介, 中本泰史, 三好由純, 小林憲正, 山岸明彦, 並木則行, 小林直樹, 出村裕英, 大槻圭史, 「月惑星探査の来たる10年」検討・第一段階報告, 遊星人, Vol.20, pp.350-366, 2011. (査読有り)
8. Masunaga, K., Y. Futaana, M. Yamauchi, S. Barabash, T. Zhang, A. Fedorov, N. Terada, and S. Okano, O<sup>+</sup> outflow channels around Venus controlled by directions of the interplanetary magnetic field: Observations of high energy O<sup>+</sup> ions around the terminator, *Journal of Geophysical Research*, 116, A09326, doi:10.1029/2011JA016705, 2011. (査読有り)
9. Kitamura, N., Y. Ogawa, Y. Nishimura, N. Terada, T. Ono, A. Shinbori, A. Kumamoto, V. Truhlik, and J. Smilauer, Solar zenith angle dependence of plasma density and temperature in the polar cap ionosphere and low-altitude magnetosphere during geomagnetically quiet periods at solar maximum, *Journal of Geophysical Research*, 116, A08227, doi:10.1029/2011JA016631, 2011. (査読有り)
10. Tsugawa, Y., N. Terada, Y. Katoh, T. Ono, H. Tsunakawa, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, and M. Matsushima, Statistical analysis of monochromatic whistler waves near the Moon detected by Kaguya, *Annales Geophysicae*, 29, pp.889-893, doi:10.5194/angeo-29-889-2011, 2011. (査読有り)
11. Ezoe, Y., K. Ishikawa, T. Ohashi, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Fujimoto, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, and Y. Futaana, Solar system planets

- observed with Suzaku, *Advances in Space Research*, 47, 3, pp.411-418, 2011. (査読有り)
12. Yoshikawa, I., K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, S. Kamada, M. Ueno, N. Terada, F. Tsuchiya, M. Kagitani, and Y. Kasaba, Extreme Ultraviolet Spectroscopy for Exospheric Dynamics Explore (EXCEED), *Advances in Geosciences*, 19, 579, 2010. (査読有り)
  13. Kitamura, N., Y. Nishimura, T. Ono, Y. Ebihara, N. Terada, A. Shinbori, A. Kumamoto, T. Abe, M. Yamada, S. Watanabe, A. Matsuoka, and A. W. Yau, Observations of very-low-energy (<10 eV) ion outflows dominated by O<sup>+</sup> ions in the region of enhanced electron density in the polar cap magnetosphere during geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research*, 115, A00J06, doi:10.1029/2010JA015601, 2010. (査読有り)
  14. Matsuda, K., H. Misawa, N. Terada, and Y. Katoh, Asymmetrical features of frequency and intensity in the Io-related Jovian decametric radio sources: Modeling of the Io-Jupiter system, *Journal of Geophysical Research*, 115, A12222, doi:10.1029/2010JA015844, 2010. (査読有り)
  15. Miyoshi, T., N. Terada, Y. Matsumoto, K. Fukazawa, T. Umeda, and K. Kusano, The HLLD approximate Riemannsolver for magnetospheric simulation, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38, 9, 2236-2242, doi:10.1109/TPS.2010.2057451, 2010. (査読有り)
  16. Matsumoto, Y., N. Terada, T. Miyoshi, K. Fukazawa, T. Umeda, T. Ogino, and K. Seki, Comparative study of global MHD simulations of the terrestrial magnetosphere with different numerical schemes, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38, 9, 2229-2235, doi:10.1109/TPS.2010.2056704, 2010. (査読有り)
  17. Fukazawa, K., T. Umeda, T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, and T. Ogino, Performance measurement of magnetohydrodynamic code for space plasma on the various scalar-type supercomputer systems, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38, 9, 2254-2259, doi:10.1109/TPS.2010.2055162, 2010. (査読有り)
  18. Ezo, Y., K. Ebisawa, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, H. Yoshitake, N. Terada, Y. Miyoshi, and R. Fujimoto, Time Variability of the Geocoronal Solar Wind Charge Exchange in the Direction of the Celestial Equator, *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*, 62, 981-986, 2010. (査読有り)
  19. 齋和人, 寺田直樹, 加藤雄人, 小野高幸, 降着円盤における磁気回転不安定性の数値実験, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 2, pp.45-52, 2010. (査読有り)
  20. 寺田香織, 寺田直樹, 藤原均, 加藤雄人, 笠羽康正, 火星におけるピックアップ O<sup>+</sup>イオンの生成率の太陽風動圧依存性, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 2, pp.61-66, 2010. (査読有り)
  21. 松田和也, 三澤浩昭, 寺田直樹, 加藤雄人, イオ関連デカメートル電波発生源の準定常構造に関する計算機実験, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 2, pp.67-73, 2010. (査読有り)
  22. 松本緑, 寺田直樹, 小野高幸, 星間雲形成における部分電離の効果, 東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 1, pp.5-10, 2010. (査読有り)
  23. 藤原均, 加藤雄人, 寺田直樹, 杉山徹, 西村太志, 岩崎俊樹, シミュレーション・スクールでのスーパーコンピュータ利用の報告-プラズマ粒子シミュレーションを題材とした計算科学の実験-東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, 43, 1, pp.38-40, 2010. (査読無し)
  24. Brain, D., S. Barabash, A. Boesswetter, S. Bougher, S. Brecht, G. Chanteur, D. Crider, E. Dubinin, X. Fang, M. Fraenz, J. Halekas, E. Harnett, M. Holmstrom, E. Kallio, H. Lammer, S. Ledvina, M. Liemohn, K. Liu, J. Luhmann, Y. Ma, R. Modolo, A. Nagy, U. Motschmann, H. Nilsson, H. Shinagawa, S. Simon, and N. Terada, A Comparison of Global Models for the Solar Wind Interaction with Mars, *Icarus*, 206, 139-151, 2010. (査読有り)

25. Ezoe Y., K. Ishikawa, T. Ohashi, Y. Miyoshi, N. Terada, Y. Uchiyama, and H. Negoro, Discovery of Diffuse Hard X-Ray Emission Around Jupiter with Suzaku, *Astrophysical Journal*, 709, L178-L182, doi:10.1088/2041-8205/709/2/L178, 2010. (査読有り)
26. Kaneda, K., N. Terada, and S. Machida, Solar-wind control of the hot-oxygen corona around Mars, *Journal of Geophysical Research*, 114, doi:10.1029/2008JE003234, 2009. (査読有り)
27. Terada, N., Y. N. Kulikov, H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, T. Tanaka, H. Shinagawa, and T. Zhang, Atmosphere and water loss from early Mars under extreme solar wind and EUV conditions, *Astrobiology*, 9, doi:10.1089/ast.2008.0250, 2009. (査読有り)
28. 寺田直樹, 松岡彩子, 関華奈子, 山崎敦, 二穴喜文, 横田勝一郎, 斎藤義文, 中川広務, 笠羽康正, 橋省吾, 尾川順子, 佐藤毅彦, MELOS ワーキンググループ, MELOS が挑む「火星大気散逸・大気進化科学」, *日本惑星科学会誌*, 18, pp.73-75, 2009. (査読有り)
29. Terada, N., H. Shinagawa, T. Tanaka, K. Murawski, and K. Terada, A three-dimensional, multi-species, comprehensive MHD model of the solar wind interaction with the planet Venus, *Journal of Geophysical Research*, 114, A09208, doi:10.1029/2008JA013937, 2009. (査読有り)
30. Delcourt, D. C., Y. Saito, K. Seki, and N. Terada, Dynamics of magnetospheric ions at Mercury: Some open questions awaiting BepiColombo measurements, AIP conference proceedings 1144: Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, pp.102-108, 2009. (査読有り)
31. Shinagawa, H. and N. Terada, MHD and kinetic modeling of the ionospheres of Venus and Mars, AIP conference proceedings 1144: Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, pp.63-69, 2009. (査読有り)
32. Hirahara, M., I. Shinohara, Y. Miyoshi, N. Terada, and T. Mukai, Editors of AIP conference proceedings 1144: Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, pp.1-239, 2009. (査読無し)
33. Liu, K., E. Kallio, R. Jarvinen, H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, Yu. N. Kulikov, N. Terada, T. L. Zhang, and P. Janhunen, Hybrid simulations of the O<sup>+</sup> ion escape from Venus: Influence of the solar wind density and the IMF x component, *Advances in Space Research*, 43, pp.1436-1441, 2009. (査読有り)
- [学会発表] (計 10 件)
1. Terada, N., Evolution of the Kelvin-Helmholtz instability in an inhomogeneous plasma: Momentum density shear model, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会、2011年11月3日、神戸
  2. 寺田直樹、電磁ハイブリッドシミュレーション手法の現状と今後の展望、太陽地球惑星系科学シミュレーション・モデリング技法勉強会、2011年9月16日、福岡
  3. Terada, N., T. Tanaka, and H. Shinagawa, MHD simulations of the cold ion escape from the ionospheres of Venus and Mars, International Union of Geodesy and Geophysics General (IUGG) 25th General Assembly, 2011年7月6日、メルボルン、オーストラリア
  4. 寺田直樹、田中高史、品川裕之、MHD simulations of the cold ion escape from the ionospheres of Mars and Venus、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011年5月25日、千葉
  5. Terada, N., H. Lammer, Yu. N. Kulikov, T. Tanaka, H. Shinagawa, Space weathering of planetary atmospheres by the solar wind - the Sun in time, 5th Alfvén Conference on Plasma Interaction with Non-magnetized Planets/Moons and its Influence on Planetary Evolution, 2010年10月5日、札幌
  6. Terada, N., T. Tanaka, and H. Shinagawa, MHD and hybrid simulations of the cold ion escape from the ionosphere of Venus, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2010, 2010年7月9日、ハイデラバード、インド
  7. Terada, N., D. C. Delcourt, K. Seki,

- M. Fujimoto, T. Ogino, and Y. Matsumoto, The Role of the Kelvin-Helmholtz Instability for Mass Exchange at the Magnetopause: Mercury versus Earth, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2010, 2010年7月6日、ハイデラバード、インド
8. Terada, N., Y. Matsumoto, T. Miyoshi, K. Fukazawa, and T. Umeda, MHD and multi-fluid simulations of a planetary magnetosphere based on a semi-discrete central scheme, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP), 2009年10月6日、リスボン、ポルトガル
  9. 寺田直樹、陣英克、松本洋介、梅田隆行、深沢圭一郎、三好隆博、加藤雄人、鈴木朋憲、三好勉信、藤原均、品川裕之、寺田香織、村田健史、吉川顕正、三好由純、中田裕之、数値計算プロジェクトの将来像と惑星電磁圏の理解の今後、第126回地球電磁気・地球惑星圏学会、2009年9月27日、金沢
  10. 寺田直樹、松本洋介、三好隆博、深沢圭一郎、陣英克、三好勉信、藤原均、品川裕之、田中高史、高精度中心解法コードの開発とモデル融合への適用、日本地球惑星科学連合2009年大会、2009年5月21日、千葉

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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