

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740370

研究課題名(和文) 磁気プラズマセイル評価に向けたマルチスケール対応プラズマシミュレーション

研究課題名(英文) Multi-Scale Plasma Simulation for the Estimation of a Magneto-Plasma Sail

研究代表者

松本 正晴 (MATSUMOTO, Masaharu)

東京大学・情報基盤センター・講師

研究者番号：40626264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙機に搭載された超伝導コイルによる小規模な磁場を人工的なプラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽風プラズマを受け止める、磁気プラズマセイルが提案されている。本研究では、惑星間を航行する磁気プラズマセイルの推力特性とプラズマ現象の定量的評価のために、適合格子細分化法を導入し、マルチ空間スケールに対応した宇宙プラズマシミュレーション手法の開発を行った。また、従来のHybrid PICコードのロバスト性を向上させ、従来コードではできなかった条件での解析を進めるとともに、新たに開発を進めるマルチスケール手法に対するモデルの最適化への指針を得た。

研究成果の概要(英文)：Magneto-Plasma Sail is a propulsion system making use of the solar wind in the interplanetary space. This propulsion system creates an artificial magnetosphere as a sail catching the momentum of the solar wind. The artificial magnetosphere is created by a superconducting coil, and is inflated by an artificial plasma injection. In this study, a multi-scale plasma PIC simulation scheme including adaptive mesh refinement technique was developed for the estimation of the thrust performance and the plasma phenomena in a magneto-plasma sail. Furthermore, The robustness of an existing hybrid PIC code was improved, and numerical analysis under the various parameter was conducted by using the new hybrid PIC code.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ粒子シミュレーション マルチスケール 適合格子細分化 宇宙プラズマ 小型磁気圏

1. 研究開始当初の背景

宇宙機に搭載された超伝導コイルによる小規模な磁場を人工的なプラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽風プラズマを受け止める、磁気プラズマセイルという推進手法がワシントン大の Winglee らによって 2000 年に提案された。このような画期的な推進システムが有望なのかを明らかにするために、日本では JAXA を中心に数値的な観点からさまざまな検討が行われ、推力伝達機構の解明等、多くの知見が得られた。しかし、磁気プラズマセイルの推進特性の定量的評価は未だできていない。これは、プラズマ噴射による磁気圏拡大率の評価において、数 m オーダーのノズルから噴射されるプラズマ流から、数十 km オーダーにまで広がる磁気圏の解析を一度に行わなければならないことによる (図 1 参照)。これまで磁気圏プラズマ物理分野において粒子シミュレーションが盛んに行われてきたが、本研究では、宇宙空間の中に宇宙機システムという局所的な特異点領域が存在するモデルを扱うため、そのマルチスケール性を考慮する必要がある。

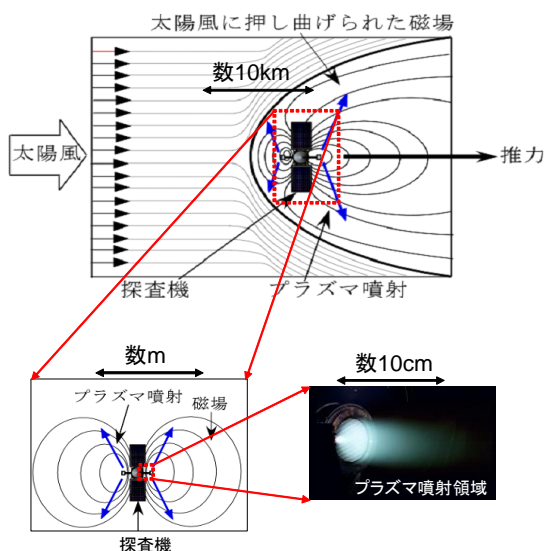


図 1 磁気プラズマセイルにおけるマルチスケール

2. 研究の目的

本研究では、惑星間を航行する磁気プラズマセイルの推力特性とプラズマ現象の定量的評価のために、数 m から数十 km オーダーまでのマルチ空間スケールに対応した宇宙プラズマシミュレーション手法の開発を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の当初計画では、磁気プラズマセイルシステムに現れるマルチスケールな現象の個々に最適な計算モデルを当てはめる、つまり、電磁流体近似が成立する宇宙機近傍では電磁流体モデル (Hall MHD)、プラズマの運動論効果が現れる磁気圏境界面以遠を粒子モデル (Hybrid Particle-In-Cell (PIC)) で評価

し、それぞれ異なる階層にある計算モデルを self-consistent に連結させるマルチスケール連結階層プラズマシミュレーション手法を開発する、という研究計画であった。ところが、上記の最重要要素技術である連結階層の方法論が決定できなかったことから、当初計画であった異なる計算モデルの連結階層によるマルチスケール化ではなく、それまで研究を進めてきた単一の計算モデル (Full PIC) への適合格子細分化手法 (Adaptive Mesh Refinement, AMR) の導入によるマルチスケール化 (AMR-PIC 法の開発) へと計画を変更した。また、従来の Hybrid PIC コードで計算可能な範囲の低密度プラズマ噴射による磁気プラズマセイル全系シミュレーションを行い、新たに開発を進めるマルチスケール手法に対するモデルの最適化への指針を得る。

4. 研究成果

(1) マルチスケール対応 AMR-PIC プラズマシミュレーション手法の開発

① 概要

プラズマ中のイオンと電子をそれぞれ粒子と見なして解析を行う Full PIC シミュレーションでは、一般に数値的安定性の観点から、空間格子の間隔はプラズマの特性長である Debye 長程度に制限される。したがって、計算領域内に局所的に Debye 長が短い領域が存在すると、その格子間隔で全計算領域の計算格子を構成しなければならない、磁気プラズマセイルシステムでは数十 km オーダーの計算領域 (磁気圏全域) を数 m の格子間隔で構成しなければならないこととなる。しかしこれは膨大な数の格子点数とそれに伴う粒子数が必要となることから、AMR-PIC 法では、シミュレーション内に生起する現象の空間的特性長を各格子点においてモニターし、最適な空間分解能をもつ格子システムを局所階層的かつ動的に導入している。これにより、計算資源を有効に利用しながらマルチスケールシミュレーションが可能となる。

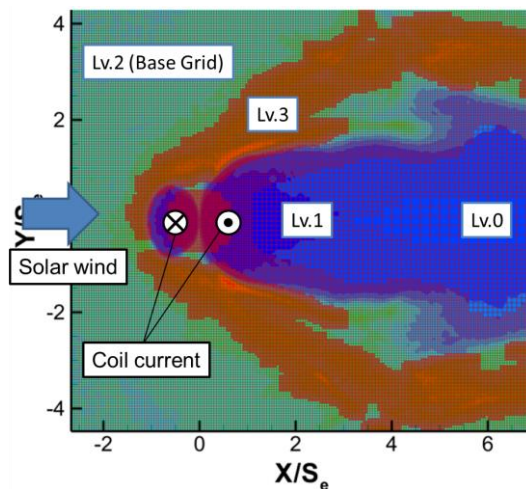


図 2 磁気セイルの AMR-PIC シミュレーション例 (コンター: 電子数密度, 赤線: 格子間隔)

② 磁気セイル環境への AMR-PIC シミュレーションの適用

図2にイオン慣性スケール～電子慣性スケール磁気圏を持つ磁気セイルと太陽風プラズマとの相互作用に関する AMR-PIC シミュレーション例を示す。図中のコンターは電子数密度分布、赤線は計算格子を示す。図中、 Se は電子慣性長を表し、イオン慣性長はその5倍に設定されている。太陽風プラズマは計算領域左から流入するとともに、計算領域中央には宇宙機内部に搭載される超伝導コイルを模擬した電流によって宇宙機中心に小型ダイポール磁場が形成されている。同図より、イオン慣性スケールよりも小さな磁場構造の場合でも太陽風プラズマはダイポール磁場と相互作用することにより磁気圏が形成され、太陽風上流側では弓型に高数密度領域が形成されるとともに、太陽風下流側では電子数密度が低い Wake 領域が形成されることがわかる。また、本計算では AMR 機能により、電子数密度の高低によって動的に格子間隔が決定されることも同図からわかる。

③ 得られた成果の国内外の位置づけとインパクト、今後の展望

このようなプラズマ PIC シミュレーションに AMR 法を導入した先行研究は数が少なく、世界でもあまり例がない。開発したコードの計算精度向上や格子細分化に伴う階層間の物理量の取り扱い等、多くの課題が未だ残されているのが実情ではあるが、磁気プラズマセイル環境のシミュレーション結果も得られつつあり、当初の目的であったマルチ空間スケール対応のプラズマシミュレーション手法の開発という観点については一定の成果が得られたものと考えられる。また一方で、本研究で得られた知見を基に、一様格子で構成されている計算コード用の AMR フレームワークの開発も進めている。一般に、既存の計算コードを AMR 化するのには容易ではない。そこで、AMR-PIC 法の開発において得られた知見から、既存のコードを比較的容易に AMR 化できるフレームワークの構築を進めている。

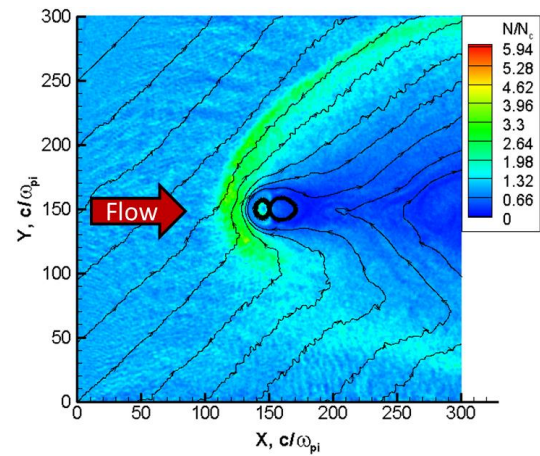
(2) Hybrid PIC コードのロバスト化と磁気プラズマセイル全系シミュレーション

① 概要

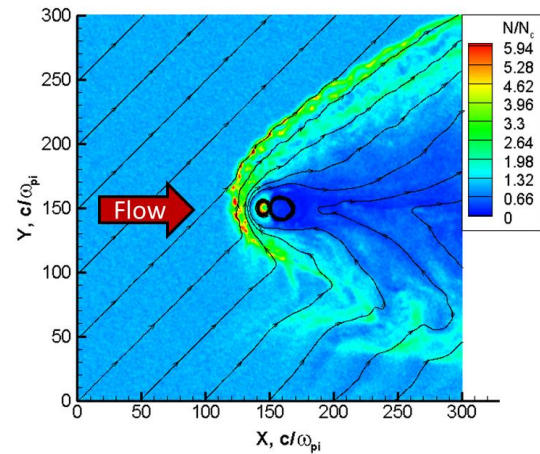
磁気プラズマセイルの推進特性の解明には、想定される数十 km 程度の磁場構造スケールにおけるプラズマの粒子的・運動論的效果を考慮しなければならないため、イオンを粒子として、電子を慣性のない流体として取り扱う Hybrid PIC モデルがその推力特性の評価に使われてきた。しかし、従来の Hybrid PIC コードでは、磁場構造と太陽風プラズマとの相互作用によって生じる磁気圏境界面や衝撃波に起因した不連続面において磁場の非物理的・数値的な振動が発生することや、Hybrid PIC モデルの定式化から、低密度領域で磁場が発散してしまうことなど、ロバスト性に問

題があり、長時間の計算では計算精度が大きく低下してしまう問題があった。

② Hybrid PIC モデルのロバスト性の向上
Hybrid-PIC 法では、磁場は誘導方程式によって計算されるが、従来提案の Hybrid-PIC コードで発生する数値振動の問題は、誘導方程式中の対流項の離散化を中心差分で評価していることに起因する。磁場の誘導方程式の対流項のような双曲型偏微分方程式を中心差分で評価すると、物理量の不連続面において数値振動が発生することが数値流体分野ではよく知られている。そこで数値流体分野で用いられる Total Variation Diminishing (TVD) 法を Hybrid-PIC 法に導入することによって問題となっていた数値振動の低減を試みた。さらに Wake 領域で発生する低密度領域で磁場が発散しないよう、最低限の密度を担保するための背景粒子を導入した。



(a) 従来の Hybrid PIC モデル



(b) TVD 法を導入した場合

図3 磁気セイル環境におけるイオン数密度分布の比較

図3に従来の Hybrid PIC モデルの場合(a)と TVD 法を導入した場合(b)のイオン慣性スケール磁気セイル環境の2次元シミュレーション結果例を示す。図中の色はイオン数密度、黒線は磁場（惑星間磁場とダイポール磁場）を示している。従来法の場合(a)、短波長の細かい振動が現れている。これは磁場の不連続

面から進展する非物理的な数値振動によって粒子が影響を受けた結果であり、計算のロバスト性が損なわれる原因となる。一方 TVD 法を導入した場合(b)では(a)で見られた数値振動が大きく抑えられ、衝撃波面がはっきりと表れていることがわかる。

③ 3次元 Hybrid PIC モデルによる磁気プラズマセル全系解析

ロバスト性を向上させた3次元 Hybrid PIC コードによる磁気プラズマセル全系解析を行った。イオンスケール磁気圏を持つ磁気セルの赤道面から代表的な条件のプラズマを噴射した。図4に磁気プラズマセルを赤道面から見た場合のイオン数密度分布を示す。従来コードでは宇宙機近傍で非物理的な振動が発生し計算が破たんしてしまう場合が少なくないが、本計算では数値的な振動は抑制されている。同図より、プラズマを噴射することによって宇宙機周りにプラズマがドリフトし、それに伴いリングカレントが形成される様子がわかる。このリングカレントによってダイポール磁場を強められ、磁気圏が拡大する。

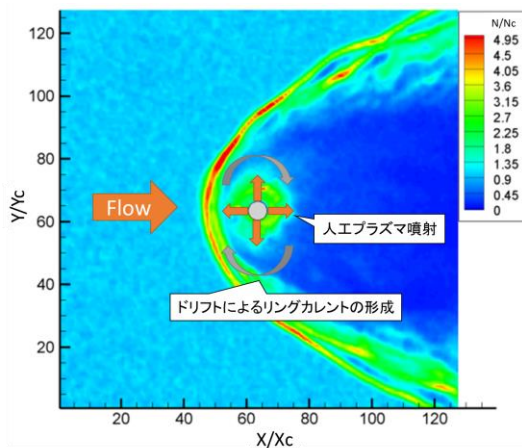


図4 人工プラズマ噴射によるリングカレントの形成 (イオン数密度分布)

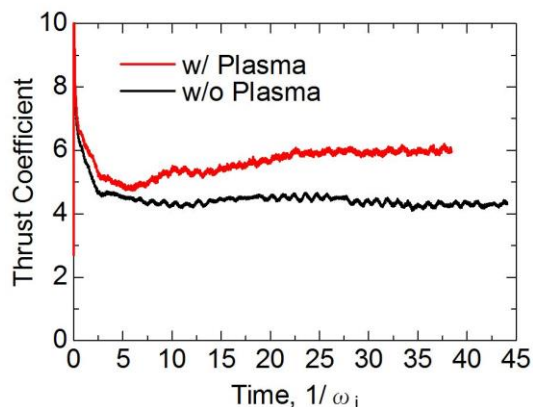


図5 プラズマ噴射の有無による推力係数の時間変化の比較

図5にプラズマを噴射する場合と噴射しない場合の宇宙機の推力係数の時間変化を示す。ここで推力係数とは推力を太陽風の慣性力で規格化したものである。時間が進むに従っ

てプラズマを噴射しない場合では推力係数はほぼ一定になるのに対して、プラズマを噴射した場合の推力係数は徐々に増加していく様子がわかる。これはプラズマ噴射によって形成されるリングカレントによって磁気圏が拡大していくことで、太陽風の流れが阻害され、その運動量変化が宇宙機の推力となることによる。

④ 得られた成果の国内外の位置づけとインパクト、今後の展望

Hybrid PIC モデルのロバスト性の向上により、これまで Hybrid PIC シミュレーションでは不可能と考えられていた条件での高精度な計算が可能となってきた。従来の Hybrid-PIC コードでは、超音速流中の衝撃波前後に見られるような不連続面における数値振動は、陽的にスムージングをかけることで抑制する手法が一般的に行われてきた。しかしこの手法は物理量を数値的に拡散させてしまうことを意味しており、衝撃波のような不連続面における物理量の評価に対して計算精度を大きく低下させる原因となっていた。本研究は TVD 法を導入することで Hybrid-PIC 法で超音速流中に現れる不連続面の物理量を高精度で評価することが可能となり、このような試みはこれまで世界的に見てもほとんど行われていない。今後は AMR 法の導入を視野に入れ、新たなマルチスケールシミュレーション手法の開発を進めていく。

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6件)

- ① Masaharu Matsumoto, Futoshi Mori, Satoshi Ohshima, Hideyuki Jitsumoto, Takahiro Katagiri and Kengo Nakajima, Implementation and Evaluation of an AMR Framework for FDM Applications, *Procedia Computer Science*, 査読有, Vol.29, 2014, 936-946, DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.084
- ② Hideyuki Usui, Akihide Nagara, Masanori Nunami and Masaharu Matsumoto, Development of a Computational Framework for Block-Based AMR Simulations, *Procedia Computer Science*, 査読有, Vol.29, 2014, 2351-2359, DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.219
- ③ Masaharu Matsumoto, Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Masao Nakamura and Iku Shinohara, Two-Dimensional AMR-PIC Plasma Simulation for Mini-Magnetosphere of Magnetized Object, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.8, 2013, 2406132, DOI: 10.1585/pfr.8.2406132
- ④ Hideyuki Usui, Yohei Yagi, Masaharu Matsumoto and Masanori Nunami, Development of Parallelized AMR-PIC Plasma Simulation Code with Dynamic

Domain Decomposition, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.8, 2013, 2401149, DOI: 10.1585/pfr.8.2401149

- ⑤ Masaharu Matsumoto, Yoshihiro Kajimura, Hideyuki Usui, Ikkoh Funaki and Iku Shinohara, Application of a Total Variation Diminishing Scheme to Electromagnetic Hybrid Particle-In-Cell Plasma Simulation, Computer Physics Communications, 査読有, Vol.183, 2012, 2027-2034, DOI: 10.1016/j.cpc.2012.04.021
- ⑥ Masaharu Matsumoto, Yoshihiro Kajimura, Hideyuki Usui, Ikkoh Funaki and Iku Shinohara, Two-Dimensional Hybrid Particle-In-Cell Simulation of Solar Wind Plasma Flow around Magnetic Sail, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Aerospace Technology Japan, 査読付, Vol.10, 2012, Pb_43-Pb_50, DOI: http://doi.org/10.2322/tastj.10.Pb_43

[学会発表] (計 25 件)

- ① Masaharu Matsumoto et al., Development of an AMR Framework for FDM Applications on Parallel Processors, HPC in Asia Session, International Supercomputing Conference 2014 (ISC'14), 22-26 June 2014, Leipzig (Germany)
- ② 松本正晴他, 適合格子細分化手法を用いたプラズマPICシミュレーションの開発, 2014年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2014), 2014年1月7日-8日, 一橋大学一橋講堂 (東京都・千代田区)
- ③ Masaharu Matsumoto et al., 2D AMR-PIC Plasma Simulation for Mini-Magnetosphere of Magnetized Objects, 22nd International Toki Conference, 19-22 Nov 2012, Ceratopia Toki (Gifu, Toki)
- ④ 松本正晴他, 太陽風-小型ダイポール磁場の相互作用に関する2次元AMR-PICシミュレーション, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第132回総会及び講演会, 2012年10月20日-23日, 札幌コンベンションセンター (北海道・札幌市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 正晴 (MATSUMOTO, Masaharu)

東京大学・情報基盤センター・特任講師
研究者番号: 40626264

(2) 研究分担者
該当無し

(3) 連携研究者
該当無し

(4) 研究協力者
臼井 英之 (USUI, Hideyuki)
沼波 政倫 (NUNAMI, Masanori)
船木 一幸 (FUNAKI, Ikkoh)
梶村 好宏 (KAJIMURA, Yoshihiro)