

「マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション」
平成19年度採択研究代表者

白井 英之

神戸大学大学院工学研究科 ・教授

惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション

§ 1. 研究実施の概要

惑星間宇宙航行システムとして提案されている磁気プラズマセイル(MPS)は、宇宙機の周辺に人工的なダイポール磁場による小規模磁気圏を作り、それをプラズマ噴射によって広範囲に展開させて太陽風を受け止めて推力を得る。本研究では、MPSにおける人工磁気圏と太陽風の相互作用というマクロ的な現象が局在するマイクロな衛星物体に与える推力を定量的に評価するために、イオンを粒子、電子を流体として扱うハイブリッドモデルのプラズマ粒子シミュレーション解析を行うとともに、マルチスケール対応のプラズマ粒子シミュレーション手法の基盤構築を行う。

平成 21 年度は、AMR(適合型細分化格子)を従来の粒子法(PIC 法)の電磁粒子シミュレーションに取り入れたマルチスケールプラズマ粒子シミュレーションの基本ルーチン開発をほぼ終え、その動作確認、テストシミュレーションを行った結果、従来法よりも大幅に少ない計算機資源で高解像度を維持した粒子計算が実行できることを確認した。また理化学研究所の協力を得てコードの単体性能向上およびスレッド並列化を進めた。MPS 解析では、JAXA チームで行われている真空チャンバー実験をモデルとしたハイブリッド粒子シミュレーションを実施し、小型磁気圏形成、プラズマ流との相互作用による推力評価の観点から地上実験結果の詳細解析を行った。衛星からのプラズマ噴射による人工ダイポール磁場構造展開プロセスに関する全粒子モデルシミュレーションを実行し、イオンおよび電子ダイナミクスと磁場構造変化の関係について様々な初期条件のもとで詳細解析を開始した。また、従来のハイブリッドシミュレーションの欠点を克服出来る改良型ハイブリッド粒子シミュレーション手法の開発も開始し、基礎ルーチンの作成とその動作テストを開始した。今後、より高精度な粒子シミュレーションにより MPS に関連するプラズマ現象解析および推力推定を行うとともに、マルチスケールシミュレーションの MPI 並列化と改良ハイブリッド粒子シミュレーションの完成を目指す。

§ 2. 研究実施体制

(1)「神戸大学」グループ

① 研究分担グループ長: 臼井 英之 (神戸大学大学院、教授)

② 研究項目

- マルチスケール粒子シミュレーションプロトモデル開発
- MPS 人工磁場展開に関する全粒子モデルシミュレーション解析
- MPS 小型磁気圏-太陽風相互作用に関する改良版ハイブリッドシミュレーション

(2)「京都大学」グループ

① 研究分担グループ長: 山川 宏 (京都大学、教授)

② 研究項目

- 小型ダイポール磁場構造とプラズマ流との相互作用に関する真空チャンバー実験のハイブリッドシミュレーション解析
- MPS 人工磁場展開に関するハイブリッドシミュレーション解析

(3)「JAXA」グループ

① 研究分担グループ長: 篠原 育 ((独)宇宙航空研究開発機構、准教授)

② 研究項目

- MPS プラズマチャンバー実験
- 改良型ハイブリッド粒子シミュレーション手法の開発
- Nested-grid 粒子シミュレーション手法開発
- MPS 人工磁場展開に関するシミュレーション解析

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

(1)マルチスケールプラズマ粒子シミュレーションコード開発

AMRを導入したプラズマ粒子シミュレーションコードの基本ルーチンをほぼ完成させた。球状プラズマの膨張現象に関するテストシミュレーション¹²⁾を行った。図1にAMR-PICによる計算例を示す。プラズマに膨張に応じて細分化格子の動的な生成・消滅が行われ、境界値以上の密度領域では非常に高い解像度を維持しながら粒子計算が実行されることを確認した。AMRでは各階層で異なる格子サイズおよび時間ステップ間隔を持つため、階層間の境界領域で非物理的な計算結果をもたらす可能性がある。これを回避するために、重合領域における電磁場と超粒子の処理と階層間の計算順序を定義し、その妥当性を電磁波およびラングミュア波の伝播に関するテストシミュレー

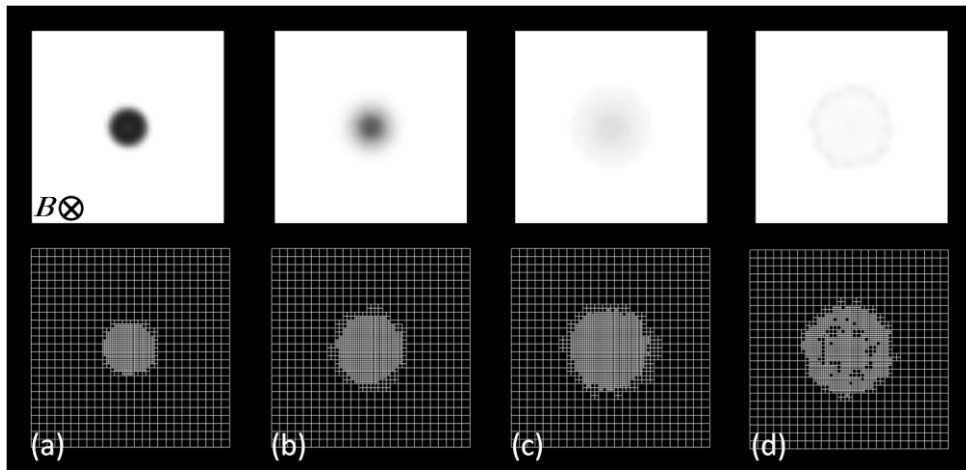


図 1 AMR-PIC による細分化レベルが 2 階層までの適合細分化格子生成を伴った粒子計算例。一様磁場中の球状プラズマ雲の膨張に従って電子密度が変化する中(上段)、その変化に応じて細分化格子が生成・消滅を繰り返し(中段)、粒子計算が実行されていく。

ションで確認した。

並行して、理化学研究所の協力を得て、本 AMR-PIC コードの並列化適応解析や単体スレッド並列チューニングを行っている。本コードはポインタによるリスト構造を利用しているため、コンパイラによる自動並列化はほとんど機能しない。そこで構造体に対するソーティングやリストの更新などで分割処理を行えるように工夫し、openMP を用いてスレッド並列化を行った。次世代スーパーコンピュータの1ノードを想定した8CPUで検証し、主要サブルーチンについて、比較的高い並列化効率76%を得た。さらに昨年度から開発を進めてきた修正モートン法を用いたMPI分散並列化と組み合わせることにより、3次元的な人工磁気圏-太陽風相互作用を含む大規模なシミュレーションへと発展させていく予定である。

一方、非動的なマルチスケールモデル対応のために nested grid 法を採用したポアソンソルバー⁵⁾を開発、実装、動作確認を行った。並列高速演算のために multi-grid 法および領域分割並列化に適している Red-black Gauss-Seidel 法を採用している。図 2 に厳密解のわかっているある電荷分布に対して電位分布を計算した結果例を示す。テスト計算の結果か

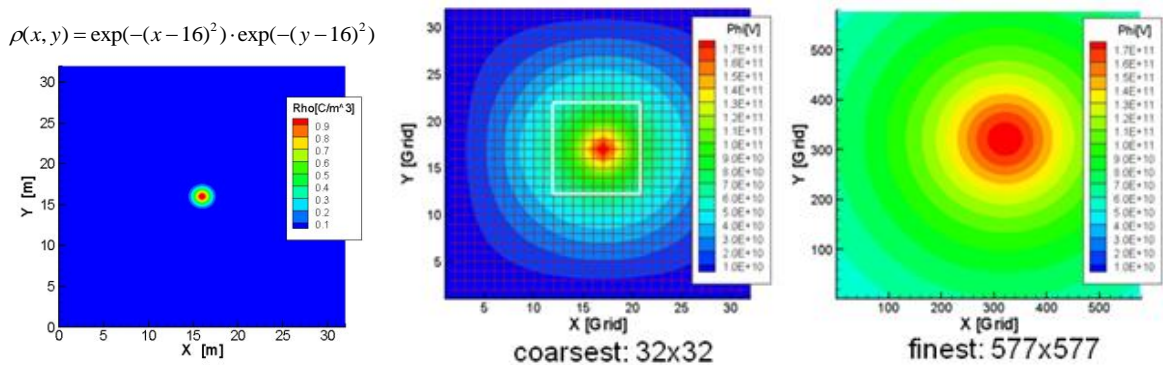


図 2: multi-grid 法のテスト計算結果 (左) 電荷分布 (中) 最粗格子の電位解 (右) 最密格子の電位解

ら、十分に高速でかつ必要な精度が得られることが評価できた。今後、本ソルバーに粒子法を実装していく。

(2) MPS 関連シミュレーション

衛星周辺に形成された人工磁気圏と太陽風との相互作用によって十分な推力を得るためには、太陽風のイオン慣性長(～100km)程度以上の磁気圏サイズが必要である。MPS では衛星からプラズマ噴射を行うことでこの磁気圏を拡大(インフレーション)させ、イオン慣性長程度の磁気圏を形成することが計画されている。我々は、噴射エネルギー($\beta > 1$ または $\beta < 1$ 、但し β はプラズマベータ値)と初期磁気圏サイズ $L/L_p > 1$ または $L/L_p < 1$ 、但し L_p はイオンジャイロ半径)を組み合わせたパラメータで2次元 full-PIC コードによる解析を行い、小型磁気圏のインフレーション過程と粒子効果の役割を調べた。噴射速度が低い場合は噴射プラズマが噴射点近傍で磁力線に捕捉され(図 3, 左)、また噴射速度が十分大きい場合でも背景プラズマの効果により噴射プラズマと磁力線が分離するため(中)、拡大された磁気圏は噴射プラズマ分布より小さくなる。インフレーションが効果的に

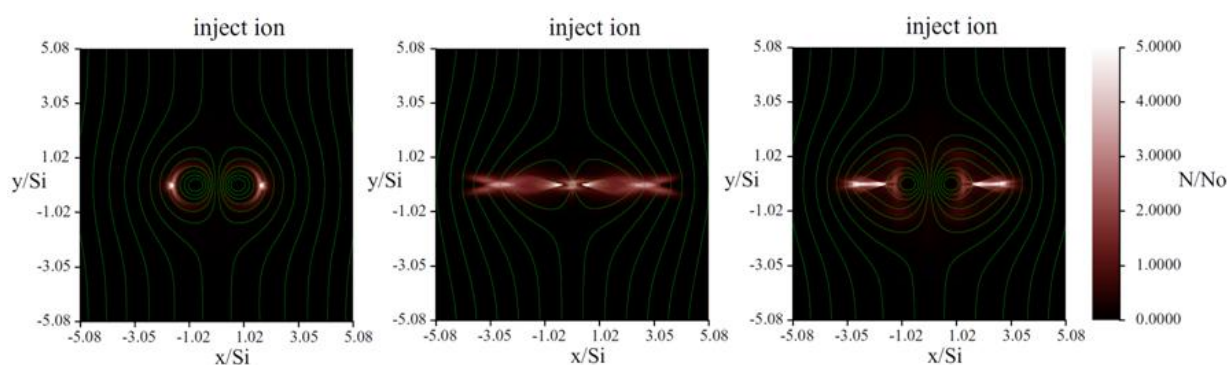


図 3: 噴射イオン密度と磁力線(緑線)

(左) 低速噴射+大型磁気圏 (中) 高速噴射+小型磁気圏 (右) 高速噴射+大型磁気圏

なるのは、背景プラズマが排除された強磁場中で噴射プラズマが遠方まで到達する場合(右)であり、よりエネルギーの低いプラズマ噴射でこのような状況を作り出す噴射機構の検討を今後進めていく。

また、MPS システムで形成される人工小型磁気圏と太陽風の相互作用^{1), 2)}に関するシミュレーション解析⁸⁾に関しては、ハイブリッド粒子モデルに背景イオンを流体として導入することにより改良型ハイブリッド粒子モデル手法を開発し、動作評価の結果、数値的安定を非常に高い解像度を維持しながら粒子計算が実行されることを確認することができた。

宇宙環境における磁気セイル(プラズマ噴射を伴わないMPS)の推力の推定は、先行研究として藤田らのハイブリッド粒子シミュレーション研究があり、人工磁気圏の大きさがイオンジャイロ半径より小さくなる領域において明らかにMHDモデルによる推力推定値よりも低くなる結果が得られている。宇宙実験におけるシステム設計を行う場合、この藤田らの結果の信憑性、信頼性を定量的に

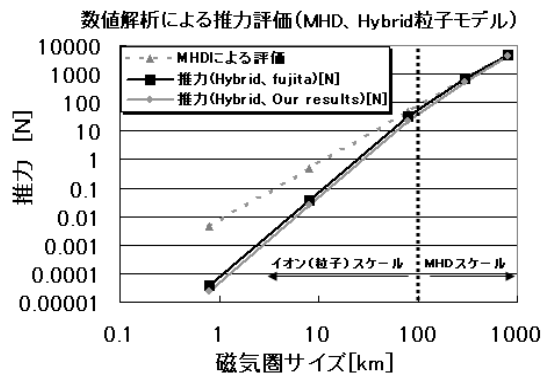


図 4: MHD スケールからイオン粒子スケールにおける
 推力の推定結果

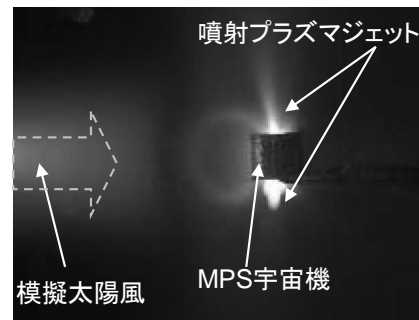


図 5: MPS 地上実験

明らかにする必要がある。図 4 に、藤田らの推力推定結果と、本プロジェクトで用いている従来型ハイブリッド粒子モデルを用いた推力の推定結果を示す。両者はほぼ一致しているが、今後、推定推力の誤差をできるだけ小さくし、より定量的に確定的な推力値推定を行うことにより、MPS 設計にフィードバックさせる。また現在、宇宙機からのプラズマジェットを伴う MPS の地上実験^{3), 4), 7), 9), 13)}を JAXA で実施しており、ハイブリッド粒子モデルを用いてこれに対応したシミュレーション解析^{6), 14), 15)}を進めている。図 5 に MPS 地上実験の概要を示す。噴射プラズマの速度や密度の違いによる推力への影響をイオン慣性長スケールにおいて調査した結果、噴射位置におけるプラズマ β 値(アルフベンマッハ数の 2 乗に相当)が 1 以下の場合、噴射前後で推力の増加が確認され、1 以上では推力が減少する結果を確認した。これは、先行研究として実施された理想電磁流体 (Ideal MHD) 近似を用いて明らかにされた結果と同一の傾向である。今後は、イオン慣性長スケールにおいて推力最適化を行うことを目的とし、プラズマジェットに起因する宇宙機周辺および磁気圏境界の電流構造解明、そしてそれらが推力増加へどのように寄与するのかについて、そのメカニズムを明らかにし設計へのフィードバックを行う予定である。パラメータスタディを行う上でシミュレーションの効率化高速化が必要であり、MHD シミュレーション¹¹⁾で得られる定常解を粒子シミュレーションの初期値もしくは境界値に利用することにより、粒子シミュレーション定常解をできるだけ正確にかつ高速に得られるような工夫も開始した。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- [1] Sasaki, I. Funaki, H. Yamakawa, H. Usui, and H. Kojima, Numerical Analysis of Magnetic Sail Spacecraft, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, Vol. 1084, 2009, pp.784-792.

- [2] Y. Minami, I. Funaki, H. Yamakawa, T. Nakamura, H. Nishida, D. Sasaki, H. Yonekura, H. Kojima, and Y. Ueda, Thrust Characteristics of Magnetic Sail Spacecraft Using Superconducting Coils, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, Vol. 1084, 2009, pp.721–727.
- [3] I. Funaki, K. Ueno, Y. Oshio, T. Ayabe, H. Horisawa, and H. Yamakawa, Laboratory Facility for Simulating Solar Wind Sails, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conference Proceedings, Vol. 1084, 2009, pp.754–759.
- [4] K. Ueno, T. Kimura, T. Ayabe, I. Funaki, H. Yamakawa, and H. Horisawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, SPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 7, No. ists26, pp.Pb_65–Pb_69, 2009.
- [5] H. Ueda, M. Okada, H. Usui, T. Muranaka, I. Shinohara, Estimation of Auroral Environment by Electrostatic Full-particle Simulations Modeling of REIMEI Satellite Observations, JSASS On-Line Journal Space Technology Japan, Vol.7, No.ists26, pp.Pr_2_13–Pr_2_18, 2009.
- [6] 梶村 好宏, 船木 一幸, 西田 浩之, 臼井 英之, 篠原 育, 山川 宏, 中島 秀紀, プラズマ噴射による磁気圏拡大現象におけるイオン粒子効果の定量評価, 日本航空宇宙学会論文誌, Vol. 57, No. 666, pp. 287–294, 2009.
- [7] K. Ueno, I. Funaki, T. Kimura, H. Horisawa and H. Yamakawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail using the Parallelogram–pendulum Method, Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 2, pp. 536–539, 2009.
- [8] H. Usui, Y. Kajimura, M. Nunami, I. Funaki, I. Shinohara, H. Yamakawa, M. Nakamura, D. Akita, and H. O. Ueda, Multi-Scale Plasma Particle Simulation for the Development of Interplanetary Flight System, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1569–1573.
- [9] I. Funaki and H. Yamakawa, Research Status of Sail Propulsion using the Solar Wind, EPR–P3–204, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1580–1584.
- [10] Y. Kajimura, Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Ikkoh Funaki, Iku Shinohara and Hideki Nakashima, Numerical Study of Inflation of a Dipolar Magnetic Field in Space by Plasma Jet Injection, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp.1616–1621.
- [11] H. Nishida, I. Fuanki, Y. Intatani, and K. Kusano, MHD Flow Field and Momentum Transfer Process of Magneto–Plasma Sail, EPR–P3–203, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1574–1579.
- [12] M. Nunami and K. Nishihara, “Numerical Analysis of Laser Produced Plasma Expansion with Large Ion Larmor Radius via 3D PIC Simulation”, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 815–818.

- [13] K. Ueno, I. Funaki, Imaging of Plasma Flow Around Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment, EPR-P3-206, Journal of Plasma and Fusion Research Series, Vol. 8, 2009, pp. 1585-1589.
- [14] Y. Kajimura, H. Usui, I. Funaki, I. Shinohara and H. Yamakawa, Numerical Study of an Inflation of a Dipolar Magnetic Field by Plasma Jet Injection in Magneto Plasma Sail. ADVANCES IN APPLIED PLASMA SCIENCE, Vol.7, 2009, pp. 103-106.
- [15] Y. Kajimura, H.Usui, I. Funaki, K.Ueno, M. Nunami, I. Shinohara, M. Nakamura, H. Yamakawa, Hybrid Particle-in-cell Simulations of Magnetic Sail in Laboratory Experiment, Journal of Propulsion and Power, Vol. 26, No. 1, January-February, 2010, pp. 159-166.

未発表論文

- [1] T. Fujimoto, H. Otsu, I. Funaki, and Y. Yamagiwa, MHD Analysis of the Magnetic Diffusion Effect on Magneto Plasma Sail, Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, submitted.
- [2] T. Moritaka, M. Nunami and H. Usui, Development of a full particle-in-cell simulation code with adaptive mesh refinement technique, Journal of Plasma and Fusion Research Series, [accepted](#).
- [3] T. Moritaka, H. Usui, M. Nunami, Y. Kajimura, M. Nakamura and M. Matsumoto, Full Particle-in-cell Simulation Study on Magnetic Inflation around a Magneto Plasma Sail, IEEE transactions on Plasma Science, submitted.
- [4] Y. Kajimura, I. Funaki, H. Nishida, H. Usui, I. Shinohara, H. Yamakawa and H. Nakashima, Quantitative Evaluation of the Ion Kinetic Effect in a Magnetic Field Inflation by Injecting Plasma Jet, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, in preparation.
- [5] M. Nunami, H. Usui, and T. Moritaka, Modified Morton Method for Load Balancing for AMR-PIC simulations, Journal of computational physics, in preparation.
- [6] Y. Kajimura, K. Ueno, I. Funaki, H. Usui, M. Nunami, I. Shinohara, M. Nakamura, H. Yamakawa, 3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail Including Ion-Neutral Collision Effect in Laboratory, The ISTS Special Issue of Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, submitted.
- [7] Y. Kajimura, I. Funaki, H. Nishida, H. Usui, I. Sinohara, H. Yamakawa, H. Nakashima, Quantitative Evaluation of Ion Kinetic Effect in Magnetic Field Inflation by Injection of Plasma Jet, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, submitted.