

臼井 英之

京都大学 生存圏研究所・准教授

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衛星という局在するミクロな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っている。

平成 20 年度は、4 月に着任した専任研究員を軸として研究活動を実質上スタートさせた。MPS に関連して、(1) 太陽風－人工磁気圏の電磁力学的相互作用 (2) 衛星からのプラズマ噴射によるダイポール磁場構造展開プロセス、の 2 課題に着目し、JAXA で実施された真空チャンバー実験の詳細解析のためのハイブリッドシミュレーションを開始するとともに、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を開始した。またこれと並行して、AMR(適合型細分化格子)を従来の粒子法(PIC 法)を用いた電磁プラズマシミュレーションに取り入れ、マルチスケール対応のプラズマ粒子シミュレーション開発を開始した。今後、ハイブリッド粒子モデルを用いた MPS 解析を引き続き進めるとともに、マルチスケールプラズマ粒子シミュレーション手法開発を精力的に進めその完成を目指す。将来的にはペタスケール級コンピュータなどの超多数ノードシステムにおける並列高速化手法の開発が必須であり、平成 21 年度以降、着手する予定である。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

(1) 太陽風－人工磁気圏の電磁力学的相互作用

現在 JAXA において小型 MPS システムとイオン流との電磁力学的相互作用^{1),2),3)}に関する真空チャンバー実験が行われており^{4),6),10),11),13),15)}、それに対応したハイブリッドシミュレーション⁵⁾により、プラズマ流-磁気圏相互作用解析や小型 MPS 推力評価を行っている。図1にチャンバー実験お

よびシミュレーションで得られた密度図を示す。 $Z=0$ の位置に置かれた電流コイルによって形成されたダイポール磁場構造が左からのプラズマ流により圧縮され磁気圏境界層を形成することが確認できる。図中では白の点線曲線で境界層の大まかな位置を示す。また、極域には、カスプと呼ばれる、プラズマ流が比較的容易に入り込める領域が形成され密度がやや高い。小型磁気圏とプラズマ流との相互作用、および推定されるMPS推力の評価において、中性粒子とイオン流の衝突などチャンバー実験固有の要素がどのように影響しているか定量的に把握し¹⁶⁾、その知見をチャンバー実験結果の較正に用いるとともに、無衝突プラズマで満たされた開放系の宇宙環境でのMPS推進性能の評価に役立てる。

(2) 衛星からのプラズマ噴射によるダイポール磁場構造展開プロセス

プラズマ噴射による人工ダイポール磁場構造の展開については、これまでMHD⁸⁾やHybridシミュレーション^{7),17)}により、その実現性が検討されてきた¹⁴⁾。しかし、それらの解析方法では磁場構造展開に関する定量的評価が手法上困難であることがわかってきている。そこで、まずイオンダイナミクスのみに着目し、変位電流項と電場の縦成分を無視することでイオン電磁波モードを効率よくロバストに解き進めることが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を開始した。現在テストシミュレーションにより性能評価を行っている。これを用いて、MPSからのプラズマ噴射とイオン電磁波動擾乱、および磁場構造展開を再現し、相互の関連を定量的に理解する予定である。

(3) マルチスケール粒子法モジュール開発:

・イントロダクション

MPSモデルにおいて、宇宙機近傍でのプラズマ噴射スケールは 10^{-1}m オーダー、磁気インフレーションによる拡大磁気圏スケールは 10^4m オーダーであり、実に4~5桁もの幅広いダイナミックレンジを取り扱う必要がある。また、磁気圏展開や太陽風-磁気圏相互作用などの各過程において、プラズマ運動論的效果は重要であり、そのため粒子シミュレーションは必須である。しかし、通常の粒子シミュレーション(PIC: Particle-In-Cell法)¹²⁾では特徴的スケールがデバ依長程度に制限されるため、考え得る最小幅の格子を一律に用いる必要があり、扱える空間領域には限界があった。そこで我々は、数値流体で近年用いられている適合格子細分化法(AMR: Adapted Mesh Refinement法)をオイラー場である電磁場に適用し、そこにラグランジュ的プラズマ粒子を従来のPIC法を用いて導入する試みを行っている。AMR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

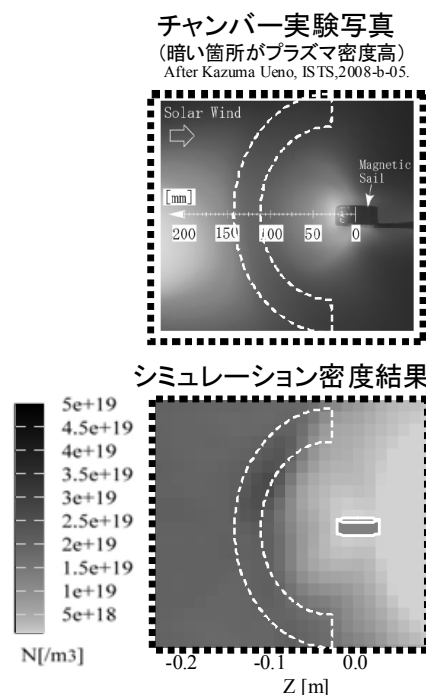


図1: 小型ダイポール磁場($z=0$ にコイル)とプラズマ流(左が上流)との相互作用。側面から見た密度図。上はチャンバー実験、下はシミュレーション。

のかつ動的に導入することにより、全体としてマルチスケールシミュレーションを実現する。本プロジェクトでは、将来のペタフロップス級スパコンも見据えて、超並列環境に適用可能な AMR 法によるマルチスケール粒子コードの開発を目指すとともに、この新規シミュレーションコードによる大規模プラズマ粒子シミュレーションを行いマルチスケール相互作用を包含した中で MPS に関連する様々なプラズマ現象の解析を試みる。

・アルゴリズム

AMR 法を PIC 法に実装するため、FTT(Fully Threaded Tree)構造と呼ばれる階層格子構造を用意する。これは各格子に対して、細分化された際に生成される子セル、自身の元となっていた親セル、隣り合う隣接セル、階層レベル等の情報を持たせることで階層構造を実現する(図 2)。また、各々をポインタで指示することにより、従来の座標グリッドに基づく配列格子に比べて、動的な格子細分化・粗視化に対して非常に柔軟に対応することができる。同時に各格子にはその格子領域に存在する粒子情報(位置や速度)も持たせる。従って、粒子運動計算では各格子階層で閉じた形での実行が可能になる。

粒子シミュレーションの並列計算で一般的に用いられる均一な空間領域分割法では、各ノード領域に存在する粒子数の時間変動のために負荷バランスが崩れる。そこで我々は、負荷バランス維持のため、数値流体分野で近年よく利用されている Morton 順序法を採用する。しかし、粒子シミュレーションでは粒子運動計算に大半の計算時間を割かれるため、格子数の均等化のみでは負荷分散性能の低下を抑えるには不十分である。そこで、粒子数や細分化階層レベルに依る計算量の増大分を、一種の重みとして加味した「修正 Morton 順序法」を新たに考案し、新しい動的並列領域分割法を試みている¹⁸⁾。テスト段階であるが、新たに考案した修正 Morton 順序法により、格子数・粒子数ともに各ノード間で計算負荷の均等化を図ることができることを確認した。

・計算例

基礎的な部分の開発を終えたマルチスケール粒子シミュレーションコードのベンチマークをとるため、各開発モジュールに対してテストシミュレーションによりコードの評価を行っている。図 3 は、人工磁気圏と太陽風プラズマとの相互作用に関するハイブリッド粒子シミュレーション結果に AMR 法による適合格子細分化モジュールを適用した例である。ある一定のプラズマ密度を閾値として細分化条件を与え、格子を動的に細分化した。磁気圏形成に伴うプラズマの密度変化に応じて、格子の細分化が動的に進められることを確認した。また、球状プラズマの膨張現象に対する AMR 法による粒子計算を行い、プラズマ膨張⁹⁾に伴い粒子密度が変化する場合、ある一定の粒子密度を条件として各格子には適時、細分化格子が生成・消滅され、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

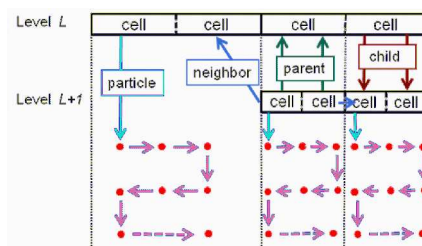


図 2: 階層格子構造と粒子のポインタ関係。矢印はポインタを表す。

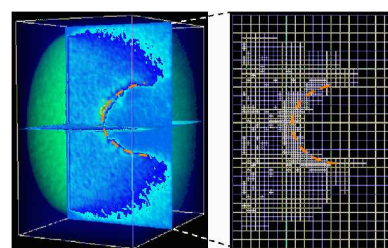


図 3: 人工磁気圏と太陽風プラズマとの相互作用における適合格子細分化の例。磁気圏形成に伴って、動的に格子細分化が進められていく。

れることを確認した。

3. 研究実施体制

(1)「京都大学」グループ

① 研究分担グループ長: 臼井 英之 (京都大学 生存圏研究所、准教授)

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
- ・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
- ・改良型ハイブリッド粒子シミュレーション手法の開発

(2)「JAXA」グループ

① 研究分担グループ長: 篠原 育 (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
- ・MPS 人工磁場展開に関するシミュレーション解析

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. D. 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. 梶村 好宏, 篠原 大介, 野田 賢治, 中島 秀紀, 計算機実験による磁気プラズマセイルの性能評価, 九州大学総理工報告第 29 巻 4 号, 369-373 頁, 2008 年.
4. 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.
5. 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, in press.
6. I. Funaki and H. Yamakawa, Research Status of Sail Propulsion using the Solar Wind,

- EPR-P3-204, Journal of Plasma and Fusion Research Series, in press.
7. 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, EPR-P3-215, Journal of Plasma and Fusion Research Series, in press.
 8. H. Nishida, I. Funaki, 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, in press.
 9. 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, in press.
 10. K. Ueno, I. Funaki, Imaging of Plasma Flow Around Magnetoplasma Sail in Laboratory Experiment, EPR-P3-206, Journal of Plasma and Fusion Research Series, in press.
 11. K. Ueno, T. Kimura, T. Ayabe, I. Funaki, H. Yamakawa, and H. Horisawa, Thrust Measurement of Pure Magnetic Sail, Space Technology Japan, in press.
 12. H. O. 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, in press, 2009.
 13. 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, in press.
 14. 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集, submitted.
 15. 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.
 16. 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, Journal of Propulsion and Power, in preparation.
 17. 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.
 18. M. Nunami, H. Usui, and T. Moritaka, Modified Morton Method for Load Balancing for AMR-PIC simulations, Journal of computational physics, in preparation.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)