

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

白井 英之^{1),4)}、梶村 好宏^{1),4)}、沼波 政倫^{1),4)}、山川 宏^{1),4)}、
篠原 育^{2),4)}、船木 一幸^{2),4)}、秋田 大輔^{2),4)}、上田 裕子^{2),4)}、中村 雅夫^{3),4)}

1) 京都大学 生存圏研究所, 2) JAXA/ISAS, 3) 大阪府立大学, 4) JST/CREST

E-mail: usui@rishi.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

現在、地球に比較的近い月、火星、金星の探査が進められているが、今後、木星等の外惑星を含む太陽系全域の探査が本格化ようになる。この探査を実現する惑星間宇宙航行の推進システムとしては、これまでの化学燃料を利用するシステムだけでは限界があり、電気推進、太陽風エネルギー等を利用する新しい原理の高効率な推進システムの利用が計画されている。新しい惑星間航行用推進システムの代表例として「磁気プラズマセイル(MPS)」[1]が宇宙航空研究開発機構・宇宙科学本部(JAXA/ISAS)によって提案され、2007年度には小型衛星ワーキンググループの設立が認められた。MPSは、図1に示すように、宇宙機の周辺に人工的なダイポール磁場を発生させて小規模な磁気圏を作り、それをプラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽

から高速に吹き出ているプラズマ流（太陽風）を受け止めて推力を得る推進システムである。この MPS 開発では、数十キロオーダーの小規模磁気圏と太陽風の電磁力的相互作用により発生する推力や、衛星からの局所的なプラズマ噴射による人工磁気圏のマクロ展開プロセスなど、プラズマの粒子性を考慮したマルチスケールな現象の定量理解が不可欠となる。

2. 研究概要

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目的で、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²⁾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。

具体的な解析課題としては、(1) 太陽風－人工磁気圏の電磁力的相互作用、(2) 衛星からのプラズマ噴射によるダイポール磁場展開プロセス、(3) これらの結果として生じる MPS システムの推力、が挙げられるが、それぞれ相互に関連しており、特に(3)では MPS 全システムを含むマルチスケールシミュレーションの実行が不可欠であり、現在、マルチスケール粒子シミュレーションコードの開発を行っている。以下にそれぞれの項目について述べる。

(1)太陽風－人工磁気圏の電磁力的相互作用
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⁾、それに対応したハイブリッドシミュレーションにより、プラズマ流－磁気圏

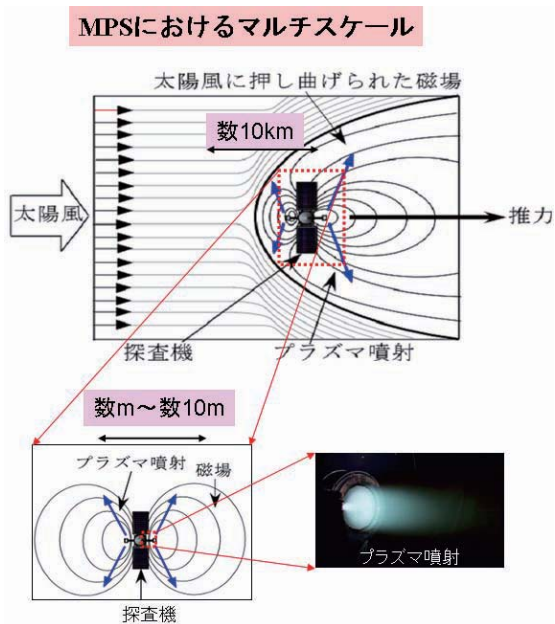


図1 シミュレーションモデル

相互作用の解析や小型 MPS 推力の評価を行っている。図 2 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そ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、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、宇宙環境での MPS 推進性能の評価に役立つ。

(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磁場構造の展開については、これまで MHD や Hybrid シミュレーションにより、そ

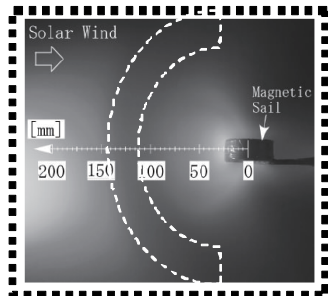
の実現性が検討されてきた。しかし、それらの解析方法では有効性の定量的な評価が手法上困難であることがわかってきている。そこで、まずイオンダイナミクスのみに着目し、変位電流項と電場の縦成分を無視することでイオン電磁波モードを効率よくロバストに解き進めることが出来る改良型ハイブリッド粒子シミュレーション手法の開発を開始した。現在テストシミュレーションにより性能評価を行っている。これを用いて、MPS からのプラズマ噴射とイオン電磁波動擾乱、および磁場構造展開を再現し、相互の関連を定量的に理解する予定である。

(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 10^4 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 10^4 m 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、プラズマ運動論的効果は重要であり、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)では特徴的スケールがデバイ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

チャンバー実験写真
(暗い箇所がプラズマ密度高)
After Kazuma Ueno, ISTS, 2008-b-05.



シミュレーション密度結果

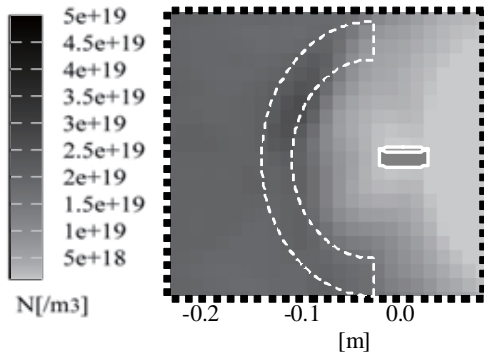


図 2: 小型ダイポール磁場(z=0 にコイル)とプラズマ流(左が上流)との相互作用。側面から見た密度図。上はチャンバー実験、下はシミュレーション。

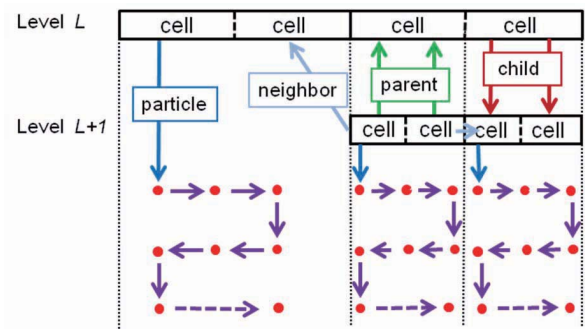


図 3: 階層格子構造と粒子のポインタ関係。矢印はポインタを表す。

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。ここでは、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を開発し、大規模プラズマ粒子シミュレーションを行うことにより、マルチスケール相互作用を包含した中で、MPS での様々なプラズマ現象のシミュレーション解析を試みている。

・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3)。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的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。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

開発した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4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、プラズマ膨張に伴い粒子密度が変化中、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れることを確認した。

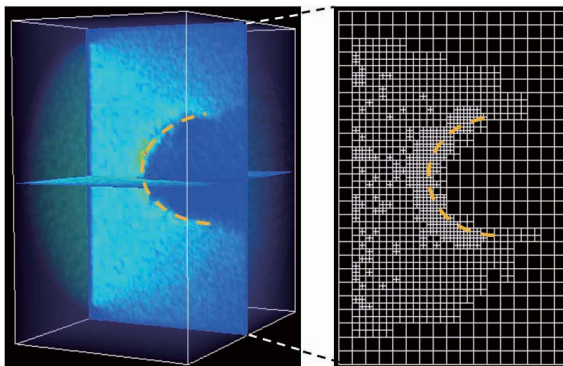


図4：人工磁気圏と太陽風プラズマとの相互作用における適合格子細分化の例。磁気圏形成に伴って、動的に格子細分化が進められていく。

3. 将来展望

上述した3つの解析項目について、従来ハイブリッド粒子モデルや改良型ハイブリッドモデルを用いた 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。マルチスケール粒子法が完成すれば、様々な革新的宇宙航行システムの検証に役立つだけでなく、プラズマプロセスや核融合分野における粒子シミュレーション研究に対してもブレイクスルーをもたらす。また、ペタスケール級コンピュータとマルチスケール粒子法の利用により、

MPS 全系と太陽風との相互作用に関する大規模シミュレーションを是非試みたいが、そのためには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要である。この問題点を解決し、将来的には、マルチスケール粒子シミュレーション解析により、設計に必要な基礎データの取得を行い、**MPS** 開発コストの削減、開発期間の短縮に貢献したい。

参考文献

- [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.