

「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

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て広範囲に展開させて太陽風を受け止めて推力を得る。MPS における人工磁気圏-太陽風相互作用の理解や、局所的プラズマ噴射による人工磁場の展開プロセスの解析には、マルチスケール対応のプラズマ粒子シミュレーションが不可欠である。本研究では、マルチスケール粒子法を開発し、それを磁気プラズマセイル(MPS)開発に応用する。

H19 年度は、まず、グループ内にマルチスケール粒子法モジュール開発班と MPS シミュレーション解析班の 2 班を設置するとともに、研究員の公募と採用により研究体制を確立した。また、専用計算機システムの購入により研究環境の整備を行った。モジュール開発班では非一様直交格子システムに関する文献調査、および、非一様直交格子システムにプラズマ粒子法を導入した先行研究の調査を行った。今後、調査結果を検討し、マルチスケール粒子法モジュールのプロトタイプ作成を早期に行う。また、MPS 解析班では、ハイブリッド粒子コードを用いて、衛星からのプラズマ噴射による磁場展開プロセスの基本解析を行った。今後、より現実的な噴射プラズマパラメータを用いた磁場展開プロセスに関する解析を進める。また、マルチスケール粒子法モジュール開発に対する具体的な要件を挙げると共に、適切な物理モデルや要素技術について検討した。

## 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)マルチスケール粒子法モジュール開発:

非一様直交格子システムの中でも特に適合格子細分化法(Adaptive Mesh Refinement(AMR))

に着目し、その手法にプラズマ粒子法を導入した先行研究の調査を行った。その結果、格子階層間の粒子移動の際には、数値的な精度の低下や数値ノイズの発生を防ぐため、粒子の分割、結合を適切に行う必要があることがわかった。今後、この点に検討を加え、精度高く安定に動作するマルチスケール粒子法モジュールのプロトタイプ開発を進める。

(2)MPS シミュレーション解析:

MPS の性能を決める上でのキーテクノロジーとなるプラズマ噴射による磁場展開の評価を行う為、従来の一様格子モデルのハイブリッド粒子コードを用い、磁場展開プロセスの解明や、噴射プラズマのエネルギー(プラズマ  $\beta$  値:プラズマの動圧と磁気圧との比)をパラメータとした磁場展開度合いの定量評価を行った。解析モデルを図 1 に示す。コイル磁場を模擬したダイポール磁場を定義し、極方向へ 30 度の角度を持たせ、アルゴンプラズマを噴射した。噴射位置における  $\beta$  値を 1.0 とした場合、中心からの距離の 3 乗で減衰する初期磁場が、噴射後、定常状態においては、中心からの距離の 2.3 乗で減衰する結果となった。磁力線の結果を図 2 に示す。これらの成果は、Journal of Propulsion and Power に投稿した。また、2008 年 3 月の国際学会 (Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2008)にて口頭発表を実施した。MPS が他の宇宙推進システムよりも優位に立つためには、より低いエネルギー(低  $\beta$  値)で高い効率の磁場展開を実現する必要があり、今後の見通しとして、現在の水準 ( $\beta \sim 0.1$ ) 以下の低ベータについて、解析を実施し、評価を行う予定である。

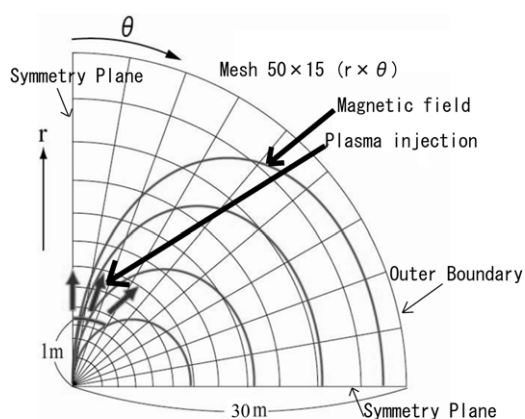


図 1 : 解析モデル図

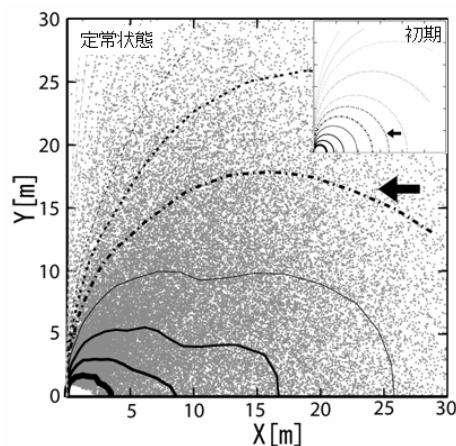


図 2 : 噴射イオン分布と磁力線図

また、マルチスケール粒子法モジュール開発に向け、研究対象である磁気プラズマセイルの推力評価に必要な物理パラメータ、解析条件を整理し、モジュール開発に対する具体的な要件を挙げると共に、適切な物理モデルや要素技術について検討した。検討事項として、以下の 5 つを挙げた。

- 1) 空間スケール: プラズマ噴射を行う噴射点近傍の数十 cm から、イオンエンジンの性能を上回る推力が得られる程度の磁気圏のスケールである数 km までの領域を同一の系で解析することが望ましい。

- 2) 解析スキーム: イオンを粒子、電子は慣性を無視した流体として取り扱うハイブリッドコードが有効である。
- 3) 解析格子: 噴射点近傍の格子サイズを  $\Delta x=0.5\text{m}$ 、遠方領域を  $\Delta x=50\text{m}$  として格子点を構成したとして、解析メモリは 200GB 程度となる。
- 4) 取り入れる物理モデル: プラズマの電気抵抗、イオン-イオン衝突の考慮、Alfvén 波、磁気音波、ホイッスラー波を考慮可能なモデルでの解析が必要。
- 5) 解析上のテクニック: AMR 法に粒子法を用いた場合、粗い格子から細かい格子へ粒子が移動した場合に、格子あたりの粒子数が減少し、解析精度が低下する可能性があるため、格子間を移動した粒子については、格子あたりの粒子数を一定数以上確保する処理が必要。

これらの結果については、2008年1月に開催された宇宙輸送シンポジウムで口頭発表を行った。また、これまでの磁気セイル、磁気プラズマセイルのハイブリッドコードによる研究結果のまとめも含め、九州大学総理工報告[1]に投稿し、受理(2008年1月)された。

一方、JAXA/ISAS では、プラズマチャンバーを用いた地上実験によりMPSシミュレーションを開始した。平成19年度は、太陽風プラズマ流を模擬する太陽風シミュレータ、磁気セイルを模擬するコイル、そして、コイル磁場を広範囲に広げるためにコイル近傍からプラズマを噴射していわゆる磁気プラズマセイルの動作とするための磁場拡大用プラズマ源の3つと、これらの駆動系から構成される MPS 地上実験シミュレータを利用した実験を実施して、次の3つの成果が得られた。1) 磁気セイル(宇宙機からのプラズマ噴射を伴わないもの)の直接推力測定を実施して、

実機スケールで代表長 300km (実験室では代表長 10cm) クラス磁気セイルの推力特性を明らかにした。2) 磁気セイル磁気圏磁場の分布を測定し、限られたケースではあるが、磁気圏(特にマグネットポーズとマグネットシース)の構造をとらえることに成功した。3) コイルからプラズマ噴射を伴う磁気プラズマセイルの実験(図 3)では、磁気セイル(プラズマ噴射を伴わないもの)の磁気圏がプラズマ噴射によって拡大される様子を捉えることに成功した。人工磁気圏の形成、プラズマ噴射による人工磁場の展開の実験的観測に成功した。今後、数値シミュレーションを用いてこれらの現象の定量解析を行う予定である。

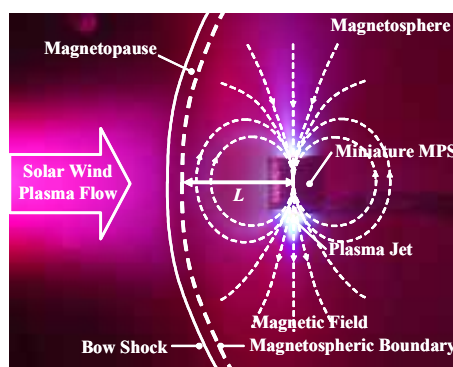


図 3: MPS のプラズマチャンバー実験

### 3. 研究実施体制

#### (1)「臼井」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

1) マルチスケール粒子法検討

2) 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

#### (2)「篠原」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宇宙科学研究本部、准教授)

#### ② 研究項目

1) マルチスケール粒子法検討

2) MPS プラズマチャンバー実験

3) 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

### 4. 研究成果の発表等

#### (1) 論文発表(原著論文)

[1] 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, 平成 20 年 1 月 31 日受理, 九州大学総理工報告第 29 巻 1 号, 2008 年 (出版予定)