

白井 英之

神戸大学大学院システム情報学研究科・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、新規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を開発する。

平成 22 年度は、前年度までに開発されたマルチスケールプラズマ粒子シミュレーション (AMR-PIC)コードのプロトタイプを用いて小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用に関するテストシミュレーションを行い、従来法による結果との比較によりその妥当性を検証した。また、分散メモリシステムを用いた高速シミュレーションに向けて、MPI による並列チューニングを開始した。現在、プロセス間の負荷バランスを維持できる動的領域分割による MPI 並列手法の開発、実装、動作確認を行っている。

一方、MPS 解析では、推進システム設計の基礎データ取得のためのハイブリッド粒子シミュレーションを実施している。特に、今年は MPS に作用するトルクや推力に関して太陽風-MPS 磁気モーメント間の角度依存性および安定性について解析を行った。また、小型ダイポール磁場と高速プラズマ流の相互作用に関する全粒子シミュレーションも開始し、小型磁気圏や境界層電流形成におけるダイポール磁場強度や太陽風磁場方向の依存性について解析を行った。

今後は、衛星から放出された低エネルギープラズマによるダイポール磁場拡大プロセスの定量的解明を目指すとともに、本研究で新規開発された AMR(適合型細分化格子)マルチスケールプラズマ粒子シミュレーション手法を本格的に用いて小型ダイポール磁場と太陽風プラズマとの相互作用現象の再現、定量解析を進める。特に、磁気圏境界層に生じる磁気リコネクションや衝撃波、お

よびそれによるプラズマ加熱・加速、電磁界擾乱、乱流構造などを電子からイオンスケールへのマルチスケールな観点から定量的に解明することを目指す。

§ 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: 白井 英之 (神戸大学大学院システム情報学研究科、教授)

② 研究項目

- マルチスケール粒子シミュレーションコード開発
- 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
- 小型磁気圏-太陽風相互作用に関する全粒子シミュレーション

(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 宇宙科学研究本部、准教授)

② 研究項目

- 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ハイブリッドシミュレーション解析
- 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とそのハイブリッド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) ハイブリッド粒子モデルを用いた MPS 関連シミュレーション⁽⁴⁾

衛星搭載超伝導コイルを用いて形成された人工ダイポール磁場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、ダイポール場を拡大し太陽風との相互作用領域を広げる必要がある。その手法の一つとして衛星からのプラズマ噴射が従来から考えられてきたが、今年度行ったハイブリッド粒子シミュレーション解析により、噴射プラズマを磁気圏展開に用いた場合の推力増分は、噴射プラズマ自体を推進力として用いる場合の推力に対し、約 1.1 倍にしか成りえないことが明らかになった。代案として、熱速度程度の低エネルギープラズマ放出により衛星近傍で人工的なプラズマ環状電流の形成を行い、それにより全体的な磁気モーメントを増やすというアイデアがある。ただし、放出されたプラズマをいかに加熱してそのエネルギー増大、電流量の増大を実現するかについては、今後の課題である。

一方、MPS を用いた宇宙ミッションを設計し、計画するに当たっては、太陽風方向に対してコイルの磁気モーメントの方向がどの場合において安定であるか、また、惑星間磁場(IMF)が、推力や姿勢安定に及ぼす影響を評価することが重要である。ハイブリッド粒子モデルを用いた解析により、イオン慣性長スケールの磁気圏においては、太陽風方向に対して、コイルのダイポールモーメントが垂直な場合において推力が最大となり、この姿勢において、太陽風の流れ場からのトルクによ

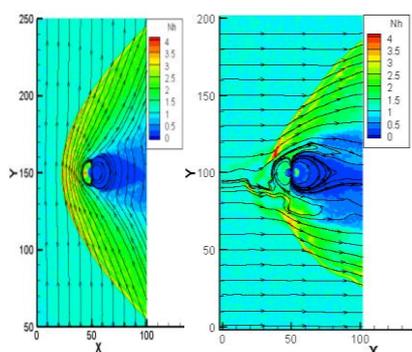


図 1: 太陽風プラズマの数密度コンター図と磁力線分布(左: IMF が太陽風方向(X 方向)に垂直な場合、右: 平行な場合)

て姿勢が安定化されることが分かった。また、IMF を考慮した場合、図 1 に示すように、IMF 方向によって磁気リコネクションの位置が変化し、磁気圏構造が複雑に変化する。この変化は推力にも影響を及ぼす。図 1 の左 (IMF が太陽風方向(X 方向)に垂直) の場合において推力最大となり、IMF を考慮しない場合の 2 倍程度の範囲で推力値に変化をもたらす。今後、ダイポールモーメントの方向角や IMF の強度や方向について、推力への影響をさらに詳細に調査し、MPS における安定姿勢の決定とミッション設計

へのフィードバックを行う。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、Flux-Tube 法(電磁場の時間発展を逐次的に解き進めるかわりに、仮の定常状態として設定した電磁場中での粒子の運動と、その運動によって作られる密度、電流分布が作る電磁場を交互に解く収束計算手法)による新しい推力評価手法を開発し、従来ハイブリッド粒子法のコスト(記憶容量, 計算時間)を約 1/10 に抑えて評価可能な手法を確立した。

(2) 全粒子シミュレーションによる小型人工磁気圏-太陽風相互作用の解析⁽³⁾

3次元一様格子系を用いて太陽風と小規模人工ダイポール磁場との相互作用および推力発生機構の解明を目的としたシミュレーション解析を行った(図 2 参照)。衛星搭載コイルによって形成するダイポール磁場の規模はイオンスケールより十分小さく電子スケールよりやや大きい程度のも

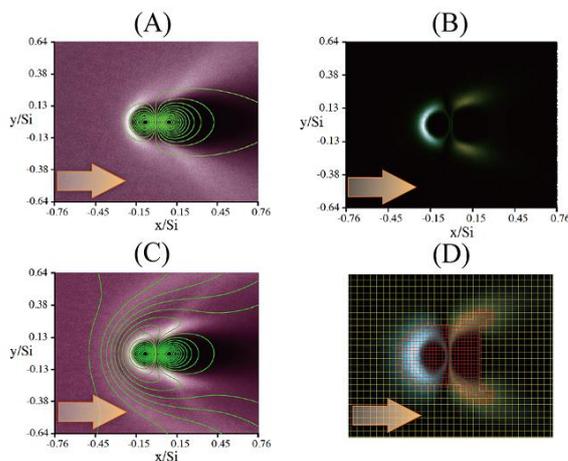


図 2 太陽風-小型磁気圏の解析例:
 (A) 電子密度(カラーマップ)と磁力線(緑)
 (B) 誘起される電流密度(紙面垂直)
 (C) IMF を含む太陽風相互作用における電子密度および磁力線
 (D) マルチスケール粒子コードを用いた電流密度の計算例(黄色: 粗格子、赤色: 細分化格子)
 いずれも右方向のプラズマ流を想定し、空間はイオン慣性長 S_i で規格化している

のを仮定する。従来のハイブリッドシミュレーションではこのサイズの磁場構造は太陽風との相互作用が見られないと予想されていたが、全粒子シミュレーション結果では、磁場構造前面に蓄積した電子と太陽風イオンとの静電的な相互作用により、太陽風運動量が衛星コイルへ一部変換されることが明らかになった。さらに IMF として背景磁場を導入したシミュレーションを行った結果、磁気リコネクションとそれによる磁気圏内部へのプラズマの流入により、さらに活発な太陽風の散乱が起こることがわかった。また本解析で用いてきたモデルをマルチスケール粒子コードにも適応し、計算の妥当性の検証を含めたテスト計算を開始している。今後はマルチスケールコードの並列化の進捗に合わせてさらに大規模な3次元系での解析を進めていく予定である。

(3) 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⁽¹⁾

本年度までに、異なる解像度をもつ階層間境界の情報交換処理に関する基本アルゴリズムの開発は完了し、電磁波やプラズマ静電波の伝播で動作確認を行ってきた。より複雑な現象の解析に向けて、階層間境界でのアンチエリアシング処理や電磁場の補正処理などを新たに追加し、コードの高性能化をはかった⁽²⁾。

並行して、MPI を用いた領域分割型並列化チューニングを開始した。今年度は、プロセス間通信時における MPI ライブラリの最適利用の検討や、通信、演算の同時処理による通信隠蔽手法を用いた並列性能向上テストの実行などの並列化チューニングを開始した。

AMR では異なる解像度を持つ格子が空間上で非一様に生成・消滅される。図3に一例を示すが、図中央の赤い格子群は、その他の黄色い格子群の半分の格子幅をもち、現象変動がある閾値より大きくなると自動的に生成される。その複雑な格子構造を表現するために、本コードでは格子位置や物理量などを内包する格子(Cell)構造体が定義され、それらがポインタで結合された木構造である FTT データ構造を用いる。今年度は、FTT 構造データを複数のプロセス上に動的かつ負荷バランスを維持しながら配置できるように、動的領域分割 MPI 並列手法の基礎開発を行った。一例として、1次元空間の中央にプラズマ高密度領域を設定した単階層モデルを用いたシミュレーションを行い、その演算時間の結果を図4に示す。全体システムをプロセス数で等分して各プロセスに割り

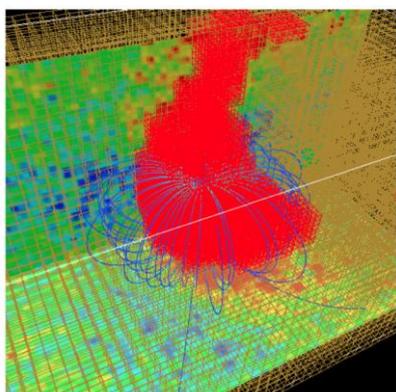


図3 ダイポール磁場(青線)と太陽風の相互作用によって起きる小型磁気圏と生成された細分化格子(赤)

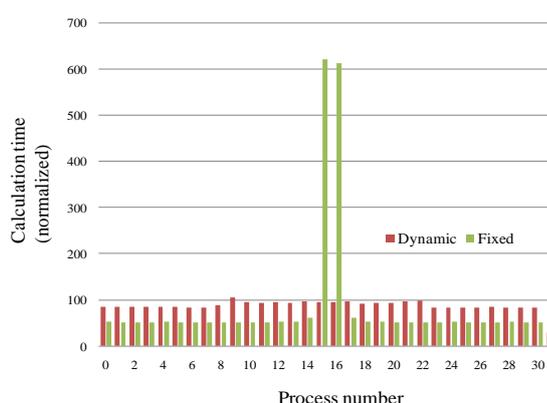


図4 固定領域分割(緑)と動的領域分割(赤)の場合の計算時間

当てる固定領域分割では、プラズマ密度の高い中央領域担当プロセスの負荷が他に比べて高くなる。その結果、他のプロセスは待ち状態となり、結果として全体の演算時間は長くなる。一方、動的領域分割では、粒子演算コストも考慮した上でプロセス間の負荷均等が実現されるので、全体の演算時間も短縮されることを示した。今後、この動的領域分割を空間階層が存在する3次元モデルに適応させ本コードの MPI 並列化の完成を目指す。

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- [1] Tatsuki Matsui, Hideyuki Usui, Toseo Moritaka, Masanori Nunami, "MPI Parallelization of PIC Simulation with Adaptive Mesh Refinement," pdp, pp.277-281, 2011 19th International Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing, 2011
- [2] T. Moritaka, M. Nunami, H. Usui, "Development of Full Particle-In-Cell Simulation Code with Adaptive Mesh Refinement Technique", Journal of Plasma and Fusion Research Series, vol. 9, pp.586-591, 2010.
- [3] Toseo Moritaka, Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Yoshihiro Kajimura Masao Nakamura and Masaharu Matsumoto, "Full particle-in-cell simulation study on magnetic inflation around a magneto plasma sail", IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 38, pp.2219-2228, 2010.
- [4] Yoshihiro KAJIMURA, Kazuma UENO, Ikkoh FUNAKI, Hideyuki USUI, Masanori NUNAMI, Iku SHINOHARA, Masao NAKAMURA and Hiroshi YAMAKAWA, "3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail Including Ion-Neutral Collision Effect in Laboratory", Transaction of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences Aerospace Technology Japan, Vol. 8, No. ists27, pp. Pb_19-Pb_25, 2010.
- [5] 大塩 裕哉, 上野 一磨, 船木 一幸, "準定常 MPD アークジェットプルームの非定常特性", 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 59, No. 686, pp. 70-75, 2011.

未発表論文

- [6] T. Matsui, M. Nunami, H. Usui and T. Moritaka, "MPI parallelization of PIC simulation code with Adaptive Mesh Refinement", 2011 19th International Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP 2011), accepted.
- [7] Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Hiroyuki Nishida, Hideyuki Usui, Iku

Shinohara, Hiroshi Yamakawa, Hideki 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, Accepted.

[8] Toseo MORITAKA, Masanori NUNAMI, Hideyuki. USUI and Tatsuki. MATSUI, “Full PIC simulation on solar wind interaction with a small scale magnetosphere by using uniform and nested grid systems”, Plasma and Fusion Research Special Issue, submitted.

[9] 松本正晴, 梶村好宏, 臼井英之, 船木一幸, 篠原育, “惑星間磁場を考慮した磁気セイルの 2次元 Hybrid-PIC シミュレーション”, 日本航空宇宙学会, submitted.

[10] 上野 一磨, 大塩 裕哉, 船木 一幸, 山川 宏, 堀澤 秀之, “磁気セイルの推力特性に関する実験研究”, 日本航空宇宙学会論文集, submitted.

[11] 芦田康将, 船木一幸, 山川宏, 梶村好宏, 小嶋浩嗣, “磁気セイル推力解析のための簡易モデルの検討”, 日本航空宇宙学会論文集, accepted.

[12] Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Iku Shinohara, Hideyuki Usui, Masaharu Matsumoto, Hiroshi Yamakawa, “Thrust Evaluation of a Magnetic Sail in the Ion Inertial Scale by using 3D Hybrid PIC Code”, Journal of Spacecraft and rockets, in preparation.

[13] Moritaka Toseo, Hideyuki Usui, Kajimura Yoshihiro and Masaharu Matsumoto, “Momentum transfer processes of solar wind plasmas in a kinetic scale artificial magnetosphere”, Physics of Plasmas, in preparation.

[14] Hideyuki Usui, Masanori Nunami, Toseo Moritaka, Tatsuki Matsui, Yohei Yagi, A Multi-Scale Electromagnetic Particle Code with Adaptive Mesh Refinement and Its Parallelization, International Conference on Computational Science, June-1-3, 2011, accepted.