

臼井 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 (神戸大学大学院システム情報学研究科、教授) (研究代表者)
- 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
  - 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 ((独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、准教授) (主たる共同研究者)
- ② 研究項目
  - MPS 人工磁場展開および推力評価に関するシミュレーション解析および真空チャンバー実験

## §2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

[研究のねらい]

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、電流コイルにより人工ダイポール磁場構造を衛星周りに作り、それをプラズマ噴射により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における人工小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用およびそれによって衛星が得る推力を定量的に評価するために、プラズマ粒子モデル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。

#### [研究の概要]

平成 23 年度は、新規開発したマルチスケールプラズマ粒子シミュレーションコード(Parmer)<sup>(1)</sup>を京コンピュータ上で単体性能評価を行うとともに、プロセス間負荷バランスを維持できる動的領域分割法を採用した MPI 並列手法の開発、実装を行った。一方、MPS 解析では、衛星からのプラズマ噴射による環状電流形成が人工ダイポール磁場を拡大させることを粒子シミュレーションで示すとともに、その効果による MPS 推力増加を評価した。並行して、小型ダイポール磁場とプラズマ流との相互作用を全粒子シミュレーションで解析を行い、小型磁気圏形成における電子ダイナミクスの重要性を明らかにした<sup>(2)(10)</sup>。

#### [研究進捗および成果]

京コンピュータを用いた Parmer 単体性能評価では、負荷が高い粒子処理部分ルーチンを分割することでより高いピーク性能比が得られる可能性を明らかにした。現在、動的領域分割によるプロセス並列コードの調整、動作確認を行っている。

小型ダイポール磁場構造が太陽風イオンのラーマ半径と同程度またはそれより小さい場合に着目し、高速プラズマ流との相互作用に関する粒子シミュレーションを行った。その結果、境界層領域において電子ダイナミクスが重要になる小磁気圏が形成されることがわかった<sup>(2)(10)</sup>。特徴としては、イオンラーマ半径が大きいにも関わらず、イオン運動を含めた太陽風の動圧とダイポール磁場圧が釣り合う点を中心にダイポール磁場が圧縮される点、および、その磁場圧縮領域で電子による境界層電流が流れその領域の厚さは電子のラーマ半径程度である点、が挙げられる。ただし、惑星間空間磁場との影響により、前面では衝撃波構造に似た擾乱領域の生成、また磁力線リコネクションによるダイポール磁場の構造的変化、それに伴う太陽風プラズマの流入、また後方では低密度領域の形成とそれに伴う電磁場擾乱<sup>(5)</sup>などが確認された。

一方、MPS 推力増加のためには、小型ダイポール磁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<sup>(4)(11)</sup>。その手法の一つとしてダイポール磁場中に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。3次元ハイブリッド粒子モデル<sup>(3)</sup>を用いて、プラズマ放出時の磁気圏形成と MPS 推力増加の定量的な評価を行った。図1に、原点から熱速度プラズマを放出した場合のプラズマの流線および紙面垂直方向の噴

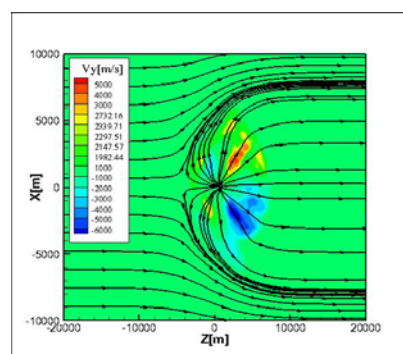


図1: 磁気プラズマセル(宇宙機)が作る磁場にさえぎられる太陽風の流れ場(コンター図は等方向噴出プラズマの速度  $V_y$  を示す。)

出プラズマの速度コンターを示す。解析結果から、放出プラズマが磁場に捕捉され、環状電流が形成されていることを確認した。その環状電流による磁気帆の拡大によって、太陽風プラズマの流れが大きく遮られている。このケースでは、推力はプラズマ放出前後で約 10 倍となり、プラズマの温度を上昇させることにより、さらなる推力増分を確認した。また、より小さいダイポール磁場構造（数 100m～数 km）の場合について 3 次元全粒子シミュレーションを行い、プラズマ放出前後で 2 倍の磁気圏拡大と約 2 倍の推力増加を確認した。

また、小型磁気圏形成に関して、2 次元 Parmer コードにより境界層領域の空間分解能を動的かつ局所的に上げたシミュレーション解析も進めている。図 2 に示したように、磁気圏が形成され弓型に高数密度領域が境界で形成されるとともに、太陽風下流では電子数密度が低い大きな Wake 領域が発生している。本シミュレーションでは、時間変動によって電子数密度がある閾値よりも大きくなると、自動的に細かい空間格子が局所的に生成される。図 2 右の黒線で囲まれている領域では、赤線で示された基本格子の半分の格子幅をもつ。このような適合細分化法を粒子シミュレーションに応用することにより、計算資源の有効利用、演算の大幅な短縮が可能となるとともに、同一シミュレーション領域内でイオンと電子の間の運動論的カップリング現象を再現できる可能性を示すことができた。

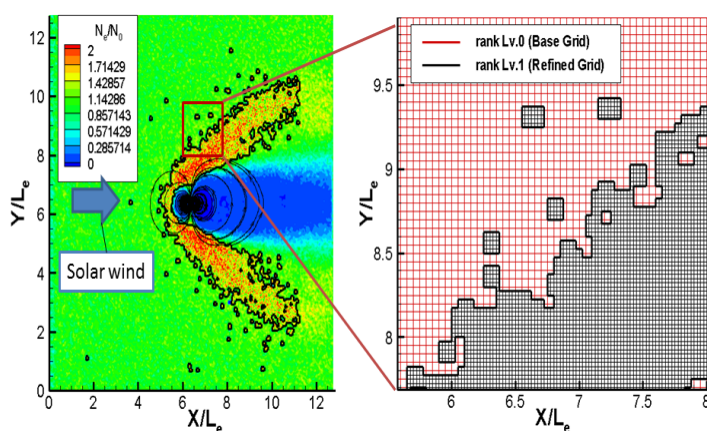


図 2 太陽風の電子数密度と磁力線分布(左)と電子数密度変動によって生成・消滅される細分化格子の様子(右)

[今後の見通し]

Parmer コードのプロセス並列版を速やかに完了させ、京コンピュータを用いた並列性能評価およびチューニングに移行する予定である。特に、大規模な系における動的領域分割によるプロセス間負荷バランス維持の確認とその際の MPI プロセス間データ通信負荷に着目する。また、2次元版 Parmer を用いて小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用に関連したマルチスケールプラズマ現象の詳細解析を精力的に進める。特に磁気圏境界層領域における非定常現象に着目し、従来の粒子モデルシミュレーションでは再現不可能なプラズマ素過程の解明を目指す。また、MPS に関

するシミュレーションでは、人工ダイポール磁場を効率よく拡大させるための最適なプラズマ放出パラメータの抽出、それによる MPS 推力増加の評価を進め、MPS 宇宙機的设计、ミッション提案へのフィードバックを行う。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ●論文詳細情報

- [1] 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, published in *Procedia Computer Science* 4 (2011) 2337–2343.
- [2] 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”, *Journal of Plasma and Fusion Research Special Issue*, Vol. 6, 2401101, 2011.
- [3] Yoshihiro Kajimura, Hideki Nakashima, “Verification of Hybrid Particle-in-Cell Simulation Model for Advanced Plasma Propulsions: Magneto Plasma Sail and Magnetic Nozzle for Laser Fusion Rocket”, *Journal of Space Technology and Science*, Vol. 25, No. 2, 2011, pp. 34-54.
- [4] 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*, Vol. 54, No.184, 2011, pp. 90-97.
- [5] 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”, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol. 60, 2012, No. 1 pp. 31-39.
- [6] 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*, Vol. 59, No. 688, 2011, pp. 126-131.
- [7] 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*, Vol. 59 No. 692, 2011, pp.229-235.
- [8] 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, 2011, pp. 70-75.
- [9] Hiroyuki Nishida, Ikkoh Funaki, Yoshifumi Inatani, and Kanya Kusano,

“Discussion on Momentum Transfer Process of a Magneto-Plasma Sail”, Journal of Propulsion and Power, Vol.27, No.5, 2011, pp. 1149-1153.

- [10] Moritaka Toseo, Kajimura Yoshihiro, Hideyuki Usui, Masaharu Matsumoto, Tatsuki Matsui, and Iku Shinohara, “Momentum transfer processes of solar wind plasmas in a kinetic scale artificial magnetosphere”, Physics of Plasmas 19, 032111, 2012.
- [11] Daisuke Akita, Hiroko Ueda, Iku Shinohara, Ikkoh Funaki and Hideyuki Usui, “Magnetic Inflation of Magnetic Plasma Sail by One Component Plasma Simulation”, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 8, (2011) pp. Pb\_109-Pb\_114.

未発表論文

- [12] Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Masaharu Matsumoto, Iku Shinohara, Hideyuki Usui, Kazuma Ueno, Yuya Ooshio, Hiroshi Yamakawa, “3D Hybrid Simulation of Pure Magnetic Sail on Ion Inertial Scale in Laboratory”, ISTS-special Issue Accepted, 2012.
- [13] Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Masaharu Matsumoto, Iku Shinohara, Hideyuki Usui, Hiroshi Yamakawa, “Thrust and Attitude Evaluation of Magnetic Sail by 3D Hybrid PIC Code”, Journal of Propulsion and Power, Accepted, 2012.
- [14] Yasumasa Ashida, Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa, Yoshihiro Kajimura, Hirotsugu Kojima, “Thrust Evaluation of a Magnetic Sail by Flux-Tube Model”, Journal of Propulsion and Power, accepted, 2012.