

# 計算機実験による磁気プラズマセイルの性能評価

梶村 好宏\*1†・篠原 大介\*2・野田 賢治\*3・中島 秀紀\*4

(平成20年1月31日 受理)

## Performance Evaluation of Magneto Plasma Sail by using a Numerical Simulation

Yoshihiro KAJIMURA, Daisuke SHINOHARA,  
Kenji NODA and Hideki NAKASHIMA

†E-mail of corresponding author: [kajimura@aes.kyushu-u.ac.jp](mailto:kajimura@aes.kyushu-u.ac.jp)

A Magneto Plasma Sail (MPS) produces propulsive force by the interaction between the solar wind and an artificial magnetic field inflated by injecting plasma. In this paper, a performance evaluation of MPS which is expected to have high thrust to power ratio and high specific impulse compared with other electric propulsion systems is conducted. Two key issues in the field of MPS research are studied: one is the interaction between the solar wind and dipolar magnetic field. The thrust obtained from the interaction between very small magnetosphere (~4km) and the solar wind is estimated by the numerical simulation. The other issue is the magnetic inflation by injecting plasma from the boundary of the superconducting coil. Numerical simulations of magnetic inflation for the cases with different beta value are conducted by using hybrid simulation code. Then the inflation of magnetic field is evaluated quantitatively and the configuration of magnetic field after the plasma is injected at an angle of 30° in the polar direction is examined. Finally, the performance evaluation and feasibility of MPS are discussed.

**Key words:** *Space Propulsion, Solar Wind, Magneto Plasma Sail, Hybrid PIC Code*

### 1. 緒 言

外惑星探査や有人宇宙航行の短期間化、低コスト化は、エネルギー資源の効率的利用はもとより、近い将来、人類の発展や新しい物理の発見という面で大きく貢献するものである。2005年9月に小惑星にタッチダウンを行う快挙を成し遂げた探査機「はやぶさ」<sup>1)</sup>は、現時点で外惑星探査に最適なイオンエンジン（キセノンなどの希ガスをプラズマ化し、静電的な加速によって後方噴出し、推力を得る）を搭載しているが、そのイオンエンジンを用いたミッションは2003年の打ち上げ以降長期にわたるものとなっている。宇宙探査は、その探査範囲が広いほど長期のミッションとなり、より効率の良い、高い推力を発生することが可能な推進システムが求められている。高効率という観点で、燃料を搭載するという考え方から離れ、宇宙にすでに存

在している燃料を利用して航行するという考え方は、太陽エネルギーを利用することに代表され、その推進システムの候補としては、ソーラーセイルや、磁気セイルなどが挙げられる。磁気セイルを発展させた推進システムとして、磁気プラズマセイル（Magneto Plasma Sail : MPS）が、ワシントン大学のWingleeらによって提案された<sup>2)</sup>。

MPSは、超伝導コイルによって形成されたダイポール磁場を、磁場がプラズマに凍結して運ばれる性質を

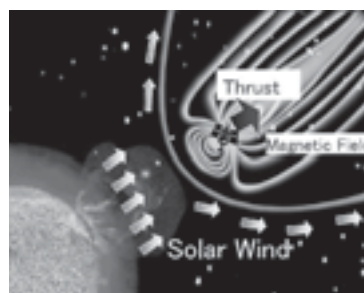


Fig.1 Image of Magneto Plasma Sail<sup>2)</sup>.

\*1 先端エネルギー理工学専攻

\*2 先端エネルギー理工学専攻修士課程  
(現在 NECシステムテクノロジー株式会社)

\*3 先端エネルギー理工学専攻修士課程  
(現在 日本電気株式会社)

\*4 先端エネルギー理工学専攻

利用し、プラズマ噴射によって大きく拡大させる（磁気インフレーション）。そして、広がった磁場を帆と見立て、高速のプラズマ流である太陽風を受けて宇宙を航行する。推力については、イオンエンジンが[mN：ミリニュートン]のオーダーであるのに対し、数十キロメートルの磁気圏を磁気インフレーションによって形成することができれば数[N]の推力を得られるとの推算がなされている<sup>2)</sup>。MPSの概念図をFig.1に示す。日本では、JAXA/MPS研究会を中心とし、新しい推進システムとしてこのMPSに注目し、太陽系外惑星やそれ以遠のミッションを短期化するための技術を実現する為、研究を進めている。MPSを実現するためには、①コイルを用いて宇宙機が作る磁場（磁気圏）の大きさに対し、得られる推力を定量的に評価することや推力発生メカニズムの解明、そして、②コイルを用いて宇宙機が作る磁場を、プラズマ噴射によって効率的に拡大する手法（磁気インフレーション）の確立と拡大磁場の定量的な評価、が必要であり、本論文ではこれら①②のテーマについて、数値解析を用いて検討した結果について報告する。

## 2. MPSの研究手法

MPSの性能評価や実現可能性の検証は、地上実験と数値解析の両面からアプローチがなされている。実験においては、太陽風や宇宙環境を地上で正確に再現することは困難であり、太陽風と磁場強度の関係、噴射プラズマと磁場強度の関係などを表す無次元パラメータを同一に設定し、磁気インフレーションや太陽風から得られる推力を評価している<sup>3)4)</sup>。一方、数値解析では、太陽風や噴射プラズマ、真空場などをコンピュータ上に再現することが容易で、これまでに多くの解析結果が得られている。今回は、前章で述べたMPSの実現可能性を検証する上での2大テーマである「太陽風と磁場が相互作用する際、太陽風の運動量変化として探査機に伝達する推力の推定」<sup>5)</sup>と、「プラズマ噴射による磁場拡大（磁気インフレーション）の定性的、定量的評価」<sup>5)</sup>を数値解析で実施した結果を紹介する。数値解析には、イオンを粒子、電子を慣性を無視した流体として扱うハイブリッドコードを用いた<sup>6)</sup>。このコードの特徴は、電子の運動（プラズマ運動、サイクロトロン運動）のタイムスケールで起こる現象の影響を除去し、時間幅や空間幅を大きくできる点にある。荷電準中性条件を仮定し、イオンと電子の数密度があらゆる所で等しいと置き、プラズマ振動を除去する。さらに、電磁放射等の高周波現象を無視するためにダーウィン近似を用いる。電磁場の計算アルゴリズムにはCAM-CL法<sup>7)</sup>を用い、真空中の電場は、ラプラ

ス方程式を解いて求めた。境界条件は、勾配0の条件を用いた。

## 3. 太陽風と磁場との相互作用の数値実験

### 3.1 解析モデルと解析条件

太陽風と磁場が相互作用する際、太陽風の運動量変化として探査機に伝達する推力の推定を行う為、Fig.2のような解析モデルを用い、数値実験を行った。解析領域に、太陽風の主成分である水素プラズマ（イオン粒子）を密度 $5 \times 10^6$ [個/m<sup>3</sup>]で満たし、Z方向に速度400[km/s]を与える。太陽風の動圧とダイポール磁場の磁気圧がつりあう位置からコイルの中心までの距離をLとする。磁気圏のサイズとして定義できるこのLをパラメータとし、太陽風とコイルが作るダイポール磁場との相互作用を解析する。

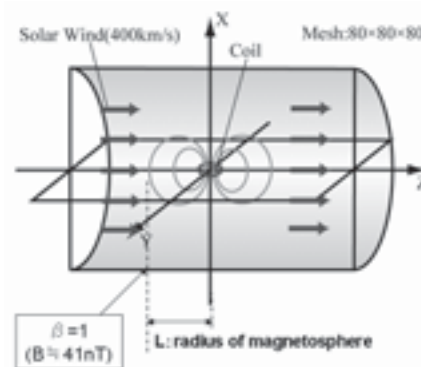


Fig.2 Simulation Model.

### 3.2 解析結果と考察

磁気圏境界面に太陽風圧力が加わると、その圧力と釣り合うように磁気圏境界面に誘導電流が流れる。ピオ・サバルの法則により、この電流が探査機に設置された磁場展開用のコイル付近に磁場を生成し、初期磁場生成のためのコイル電流とのローレンツ力を誘起する(Fig.3)。この力が推力となり、磁気圏周辺の太陽風の運動量変化を算出することでこの力を近似できることが示されている。

Fig.4(a)(b)に解析結果を示す。共に太陽風のイオン（粒子）の定常状態の分布と磁場のベクトル図（XZ面の分布）を示している。Fig.4(a)は、Lが800kmの結

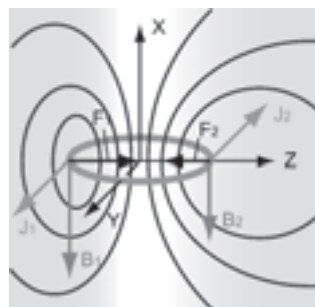


Fig.3 Mechanism of thrust generation.

果を示しており、Fig.4(b)は、Lが40kmの結果を示している。Fig.4(a)の結果から分かるように、太陽風粒子が体系中心のダイポール磁場に強く影響を受けて、軌道が大きく変化していることが確認できる。イオンが反射される領域では、密度が高くなっており、太陽風密度の約5倍という結果が得られた。これは、バウショックが生じる領域における理論値ともよい一致を得ている。Fig.4(b)では、粒子が磁気圏内に入り込んでおり、Fig.4(a)と比較して相互作用が弱くなっている様子を見て取れる。

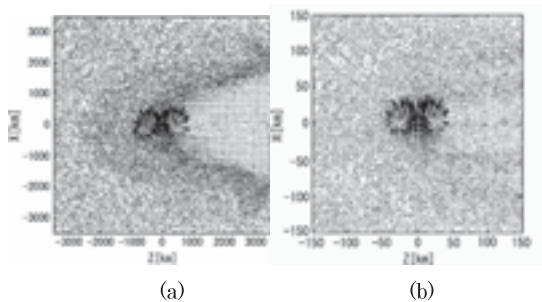


Fig.4 The distribution of particles and magnetic field vectors for the case (a)L=800 [km], (b)L=40 [km].

この現象を定量的に評価する為、式(1)に示す抗力係数 ( $C_d$ :無次元推力値) を導入し推力特性を評価した。

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (1)$$

ここで、分母は太陽風の動圧を表す。 $S$ は磁気圏断面積を示し $S = \pi L^2$ である。抗力係数は、推力を規格化(無次元化)することにより太陽風-磁気圏の相互作用の強さそのものを計ることができる値である。ここで(1)の分子に相当する推力 $F$ は、計算体系内の太陽風の運動量変化を求めることにより見積もった。Fig. 5に、 $L$ に対する抗力係数の値をプロットした図を示す。横軸は磁気圏代表長 $L$ 、縦軸は無次元抗力係数 $C_d$ である。曲線は、Fujitaらの結果である<sup>8)</sup>。太陽風イオンが磁場と作用する領域におけるラーマー半径は約100[km]であり、 $L=100$ [km]を境に、その右側の領域では電磁流体近似が成り立ち、左側では粒子的効果が支配的となる。図から分かるように、磁気圏代表長 $L$ が100km以下になると、粒子性がより強くなり、太陽風-磁気圏相互作用は劇的に弱くなり、抗力係数も小さくなる。 $L$ を現在のMPSがターゲットとしている磁気圏サイズである40kmと想定すると、約3[N]の推力が得られる結果となり、これまでに他の論文で推定されてきた結果と良い一致を得た。仮に、1[T]の磁場を作るコイルを搭載し、磁気圏のみを生成するとその大きさ ( $L$ ) は300mとなり、プラズマ噴射による磁場拡大を行わな

い場合、Fig.5の結果から外挿し、計算して求めた推力は2[ $\mu$ N]という値となる。

実際にイオンエンジンを搭載した探査機「はやぶさ」の推力が30mN程度であり、この推力を超える値を磁気インフレーションによって、また同程度の電力で実現できるかが課題となる。

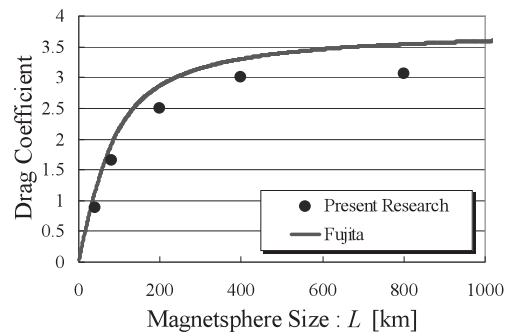


Fig.5 Plot of drag coefficient vs. magnetosphere size.

## 4.プラズマ噴射による磁場拡大の数値実験

### 4.1 解析モデルと解析条件

MPS実現の鍵となる「プラズマ噴射による磁場拡大(磁気インフレーション)」の定量評価の為の数値実験を行った。Fig. 6に2次元軸対象の解析モデルを示す。原点に探査機があると仮定し、半径を1.0[m]としたコイルを想定し、コイルがつくるダイポール磁場を初期磁場として定義する。探査機から極方向に30度の方向にアルゴンプラズマを噴射する。現実的な噴射機器を想定し、噴射速度を4.0[km/s]、密度を $7.5 \times 10^{19}$ [ $m^{-3}$ ]とした。プラズマ噴射位置での磁束密度は0.01[T]であり、これはコイル電流が $1.6 \times 10^4$ [A · turn]で生じる磁場に相当する。この時、噴射点における $\beta$ 値(プラズマの動圧と磁気圧の比)は1.0である。解析は、2次元球座標系のハイブリッドコードを用い、 $\beta$ 値が10、5、1の3ケースを実施し、拡大した磁場の形状がほぼ定常状態となる時間まで計算した。

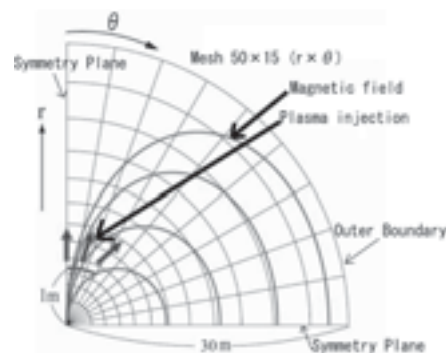


Fig.6 Simulation Model.

### 4.2 解析結果と考察

Fig.7に、各解析ケースにおける磁力線の結果を示す。Fig.7の左上が初期、(a)は $\beta = 1$ の結果、(b)は $\beta = 5$ の結果、(c)は $\beta = 10$ の結果である。それぞれの結果は、磁力線がほぼ定常状態となる時刻での結果であり、噴射から0.002 [s] 後の結果である。 $\beta$ が大きくなるにつれ、矢印で示した磁力線の位置がより遠方まで移動していることがわかる。 $\beta$ は、噴射プラズマの密度を変化させることによって調節しており、初期の電子の密度勾配の項による電場が、密度が大きいほど強く、より粒子が噴射方向に加速されるため、より遠くまで磁場が拡大されると考えられる。

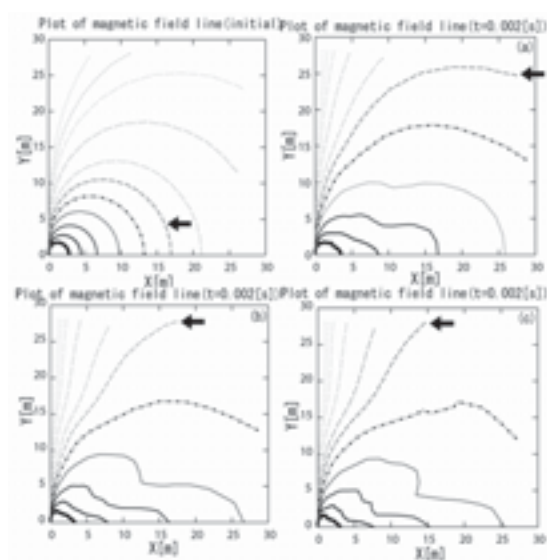


Fig.7 Plot of magnetic field line at initial and at  $t = 0.002$  [s] for (a)  $\beta = 1.0$  (b)  $\beta = 5.0$  and (c)  $\beta = 10.0$ .

### 4.3 インフレーションの定量評価

Fig.8に極軸上における磁場の絶対値を示す。点線は初期磁場を示しており、中心からの距離の3乗で減衰している。実線は、各ケースにおける磁場の値を示している。噴射点近傍では、磁場はほとんど拡大されておらず、中心から3m程度離れた地点から、拡大が開始されていることが分かる。各ケースにおける違いについては、Fig.7において、 $\beta$ が大きくなるにつれて磁場がより大きく拡大されていることを示した。Fig.8においても同様の結果である。

噴射点近傍(噴射点から10m以内)においては、 $r_L/L$ (噴射イオンのラーマー半径 $r_L$ と磁場の代表長 $L$ の比)が1よりも小さく、その領域でイオンが磁場にトラップされ、磁気インフレーションが生じている。 $r_L/L$ が1

以上では、イオンが磁場にトラップされず、磁気インフレーションは生じない。

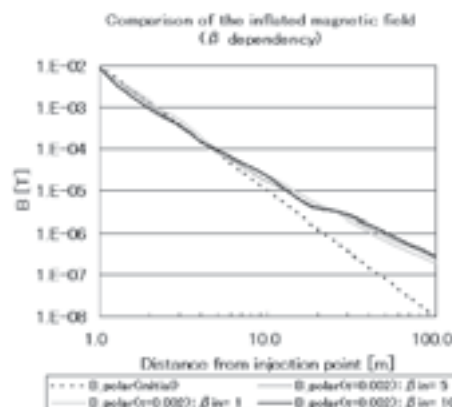


Fig.8 Profile of the magnetic field for the initial case and for  $\beta = 1.0, 5.0$  and  $10.0$  at  $t=0.002$  [s].

Table 1 Decay index of magnetic field in each case.

$\beta$	Decay index
10	-2.05
5	-2.1
1	-2.3
Initial	-3.0

Table1に磁場の減衰率を示す。 $\beta$ が大きくなるにつれ、減衰率が大きくなっていることが分かる。つまり、より遠くまで磁場が展開されている。プラズマが磁場に完全に凍結して運ばれる際、磁束の保存を考えれば、磁場は、最大でも距離の2乗に反比例して減衰する。つまり、 $\beta$ を10以上に大きくしたとしても、減衰率は-2よりも大きくはならない。

噴射位置における $\beta$ を1としてプラズマを噴射した場合、3乗で減衰する初期磁場が、2.3乗の減衰となることが分かった。仮に、1[T]の磁場を生成するコイルで、このインフレーションによる磁場展開が行われた場合、3章で実施した太陽風と磁場の相互作用の解析から算出した推力推定結果を用いれば、0.3[mN]程度の推力が得られると予測される。

## 5. マルチスケール現象を含んだMPSの全系解析にむけて

ここまでは、太陽風とダイポール磁場の相互作用、ダイポール磁場を拡大するためのプラズマ噴射、のそれぞれの現象を個別に解析し、拡大された磁場の定量評価や得られる推力の推定を実施してきた。しかし、実際には、これらの現象は同時に解析する必要があり、



加えて、太陽風の変動、太陽風や惑星間の磁場（リコネクションの影響等）も考慮する必要がある。プラズマ噴射を実施するスケールはメートルのオーダーに対し、N(ニュートン)クラスの推力を得るための拡大磁場の大きさ(L)は数十キロメートルのオーダーである。また、太陽風の動圧とコイルの磁気圧とが釣り合う位置における太陽風のイオンのラーマー半径は100[km]と非常に大きく、MPSがターゲットとする数十キロメートルのスケールにおいては、太陽風や噴射プラズマは粒子性が顕著となるため、粒子性を考慮した数値解析を行う必要がある。仮に、数メートルのメッシュ幅を用いて100[km]四方の領域を計算する場合、その格子点数は、直交等間隔格子で $10^{15}$ という数となり、さらに粒子を扱うとなれば現状のスキームでは、計算コストの面で非現実的である。よって、今後の方針として、数値流体で用いられる局所細分化適合格子法(AMR)を電磁場に適応し、そこにプラズマ粒子を従来の粒子法(PIC)を用いて導入するマルチスケール粒子法の開発を実施する計画である。この手法を用い、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MPSの基本原理と推力性能の評価を試みる計画である。大型計算機(ペタフロップスコンピューティング)の整備と、数値計算の新しいスキームの開発が相まって、マルチスケールを含むプラズマの粒子シミュレーションが現実的なコストで実施できる環境を作りたい。

## 6. 結 言

本報告では、新しい宇宙推進システムとしてMPSに注目し、コイルを用いて宇宙機が作る磁場(磁気圏)の大きさに対し、太陽風から得られる推力を定量的に評価し、さらに磁気圏をプラズマ噴射によって拡大する磁気インフレーションの定量的な評価を実施した。その結果、現時点で装備可能なコイル、プラズマ噴射機器を用いた場合(1[T]の磁場をつくるコイル、アルゴンプラズマを噴射するMPDアークジェットシステムを装備)、0.3[mN]程度の推力を得られるという結果を得た。しかし、現在主流のイオンエンジンと性能や効率の点で比較した場合、優位にあるとは言えず、今後、MPSの優位性を示す為に、より低いエネルギー(低 $\beta$ プラズマの噴射)で磁気インフレーションが可能かどうかを示し、優れた推力電力比を示す必要がある。また、5章でも述べたように、磁気インフレーションと太陽風と磁場との相互作用を同時に解析することや、太陽風磁場(IMF)を考慮し、太陽風下においても同様に磁気インフレーションが可能かどうか、磁気リ

コネクションなどの影響はあるのか等を検討する必要がある。

## 謝 辞

本研究は、九州大学総合理工学研究院における、総理工奨励研究に採択され実施したものであり、関係各位に感謝申し上げます。また、数値実験の実施に当たっては、九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムを利用させていただき、関係者に深く感謝致します。本研究を実施するに当たり、JAXAの船木一幸准教授をはじめとするMPS研究グループの皆様方に多大なるご協力を頂き、深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Kuninaka, H., Nishiyama, K., Funaki, I., Shimizu, Y. and Kawaguchi, J., "Asteroid Rendezvous of HAYABUSA Explorer Using Microwave Discharge Ion Engines", IEPC-2005-10, (2005).
- 2) Winglee, R. M., Slough, J., Ziemba, T., and Goodson, A., "Mini-magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the Energy of the Solar Wind for Spacecraft Propulsion", Journal of Geophysical Research, Vol. 105, No. 21, (2000), pp. 21067-21077.
- 3) 上野 一磨, 船木 一幸, 木村 俊之, 綾部 友洋, 山川 宏, 堀澤 秀之: "磁気セイル推力特性に関する実験的研究", 平成 19 年度宇宙輸送シンポジウム, (2008).
- 4) 木村 俊之, 上野 一磨, 綾部 友洋, 船木 一幸, 山川 宏, 堀澤 秀之: "磁気プラズマセイル総合実験システムを用いた磁気インフレーション評価実験", 平成 19 年度宇宙輸送シンポジウム, (2008).
- 5) Kajimura, Y., Noda, K., Nakashima, H. and Funaki, I., "Feasibility study of magneto plasma sail by using numerical simulation and experiment." 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2007-587, (2007).
- 6) Horowitz, J. E., et al. Journal of Computational physics, Vol. 84, (1989), pp. 279-310.
- 7) Matthews, A. P., "Current Advance Method and Cyclic Leapfrog for 2D Multispecies Hybrid Plasma Simulations", Journal of Computational Physics, Vol. 112, (1994), pp. 102-116.
- 8) Fujita, K., "Particle Simulation of Moderately-Sized Magnetic Sails", Journal of Space Technology and Science, Vol.20, No.2, (2005), pp.26-31.