

# 磁気プラズマセイル (MPS) の研究

## Study of a Magnetoplasma Sail

船木一幸, 藤田和央, 山川宏, 小川博之, 野中聡 (ISAS/JAXA)

朝日龍介 (筑波大・院), 中山宜典 (防大)

Ikkoh FUNAKI, Kazuhisa FUJITA, Hiroshi YAMAKAWA, Hiroyuki OGAWA,

Satoshi NONAKA (ISAS/JAXA), Ryusuke ASAH (Tsukuba Univ.), Yoshinori NAKAYAMA(NDA)

**Key Words:** space propulsion, electric propulsion, M2P2, magnetic sail, deep space exploration

### Abstract

A magnetic sail is the way to propel a spacecraft by the solar wind in the interplanetary space. Although original concept of the magnetic sail depends solely on very large magnetic field generated by using such device as superconductors coil, in 2001, Winglee et al. proposed an efficient method to realize a huge magnetic field around a spacecraft with an assistance of plasma emission. From their theoretical analysis of what they call as mini-magnetospheric plasma propulsion (M2P2), it was shown that if a dense plasma were exhausted near the center of the dipole magnetic field, the magnetic field can be expanded far away from the spacecraft, thus the energy of the solar wind can be captured by this huge magnetic field in spite of very low-density solar wind. Based on the idea of such plasma sail, we firstly studied deep space missions targeting at some outer satellites like Jupiter. Plasma sail has great advantage against other electric propulsion systems because of its ability to produce larger thrust to power ratio. However, the thrust formula shown by Winglee et al. is doubtful in some respects. We therefore discuss an analysis model that can describe a process of the magnetic field inflation accompanied by plasma emission from the spacecraft.

### 1. はじめに

現在は宇宙機の推進システムに原子力などの核エネルギーを使える状況には無い。このため、高性能な2液式スラスタや、イオンスラスタなどに代表される最新式の電気推進を含んだ様々な推進方式が検討されている。このうちどれが最も優れているかは、推進機の使われる目的によって異なってくる。外惑星探査では常に推進剤の確保が問題になる。僅かな推進剤で大きな推進力を得るためには、推進機の排気速度を大きくしてやればよい。静電加速によって推進剤排気速度を40km/sまで大きくすることに成功したのがイオンスラスタである。イオンスラスタの実用化によって地球近傍の小惑星探査などが可能になった。NASAの試験探査機や宇宙科学研究所の小惑星探査機 MUSES-C では探査機に占める推進剤の比率が50%程まで下っている。[1][2]

イオンエンジンの課題は、推力電力比が小さいことである。推進剤を静電的に加速する推力発生機構のため、イオンスラスタは1kWあたりで30mN (30mN/kW) しか推力を発生できない。探査機には通常数kWの電力しか供給されず、しかも太陽電池による発電量は太陽から遠ざかる外惑星付近では非常に小さい。このためイオンスラスタの小さな推進力では短期間に大きな $\Delta V$ を稼ぐのは難しい。しかし、魅力的な外惑星探査は短期間で実現されなければならない。これを克服するために核エネルギーを使ってイオンエンジンのための大きな電力を稼ごうとするのが Nuclear Electric Propulsion (NEP) である。こうしたハイブリッド型推進システムとは全く別に、太陽風を利用した新しい推進機構を利用

するのがソーラーセイルや MagSail (磁気セイル) である。ソーラーセイルは太陽光の圧力 (光圧) を大きな帆で受け、光の反射力で推進するシステムである。帆で鏡面反射することで発生する運動量は小さいが、帆の面積を km オーダーまで薄い展開物でひろげる事で 1N クラスの推力を得ることができる。もちろん、このソーラーセイルを搭載した宇宙機は非常に軽く作る必要があり、本格的な利用には大きな技術革新が必要とされる。ソーラーセイルと異なり、磁気セイルは太陽風のプラズマの流れそのものを受けて加速する。更に、プラズマ噴射を伴う磁気セイルでは、現有の技術レベルでは最大の推力電力比を達成できると言われている。以下ではこの磁気セイルについて考えていく。

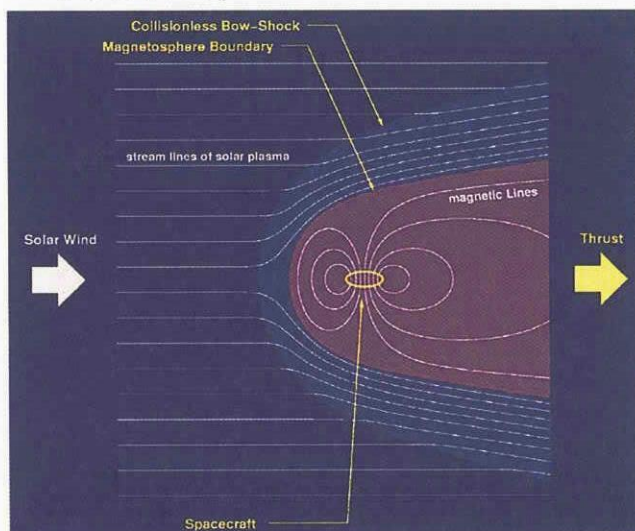


図1 磁気セイルの原理図

## 2. 推進原理

地球磁場を逃れて惑星間軌道にでると、主にプロトンから構成される強い太陽風が吹き荒れている事が知られている。この太陽風プラズマ流を大きなダイポール磁場で受け止める事が出来れば、太陽風の運動エネルギーをもとに宇宙機の推進力を得る事ができる。この時の推力発生機構を図1に示した。

### Magnetic Field Inflation by Plasma Injection

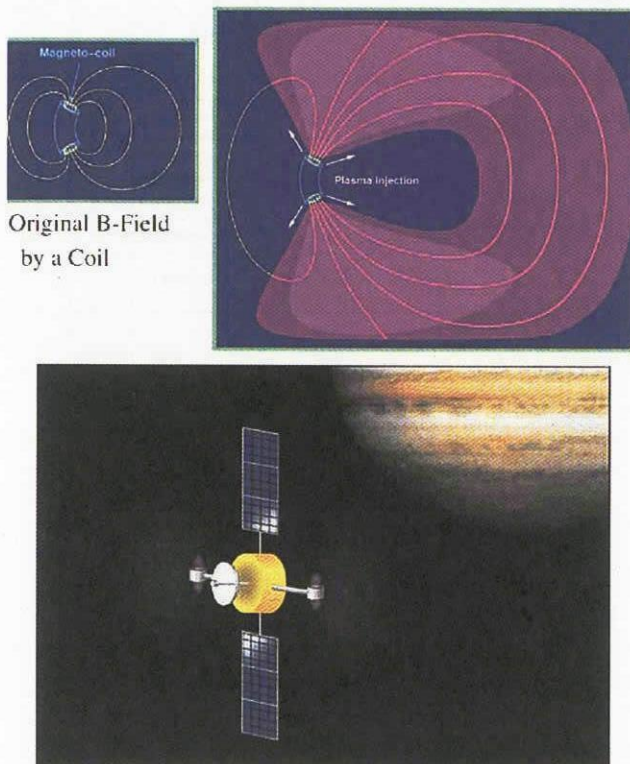


図2 磁気プラズマセイルの磁場展開機構と探査機のイメージ

太陽風プラズマ流が探査機をつくるダイポール磁場と干渉し、探査機前面では衝撃波を伴った流れが発生して太陽風の流れが曲げられている。これは地球磁気圏の構造を示す図と同一のものだが、ただ一つ、中心に位置するのが磁場を持つ探査機である点が異なる。太陽風の運動量変化を磁場がうけとることで探査機に働く抗力となり、太陽から遠ざかるための推進力に利用できる。こうしたシステムは磁場を帆(セイル)として太陽風をうけとめる様子から、磁気セイル(MagSail)と呼ばれるのが一般的である。だが、90年代にZubrinらによって行われた検討によると、宇宙機を動かす事ができるだけの大きな推力を得るためには直径数十kmにもおよぶ非常に大きな超電導コイルに電流を流して磁場を生成する必要があるという。[3]このような大規模構造体を実現するのは、随分遠い将来の事になるだろう。

磁場が広範囲に展開しなければ、MagSailの推力は期待できない。ワシントン大のWingleeらのアイデアは、プラズマ噴射によって磁場展開を実現しようというものである。[4] 図2左図のように、宇宙機まわりにごく小規模な磁場を予め生成しておく。後は探査機近傍にて人工的にプラズマを噴射するだけで良い。プラズマを無衝突状態で膨張加速させる事ができれば、磁場がプラズマ流に凍結して運ばれる性質を利用して、プラズマの持つエネルギーを磁場展開へと変換していく事が出来る。あとは広範囲に展開した磁場で、MagSailと同様に太陽風を受け止めるだけで良いのである。地球磁気圏物理学者であるWingleeらは、こうした推進システムをM2P2(Mini Magnetospheric Plasma Propulsion)と呼んでいるが、我々はプラズマを利用した磁気セイルであるとの考えから、プラズマセイル、あるいは磁気プラズマセイル(Magnetoplasma Sail)と称して研究を行っている。

実はこのプラズマから磁場へのエネルギー変換をどうやって実現できるかどうか、磁気プラズマセイルの最大の課題である。磁場展開に必要なエネルギー自体は小さい。直径20cmの推進機の表面磁場を0.2Tと仮定し、 $r$ を推進機中心からの距離とする。この時、通常 $B \propto r^{-3}$ のように減衰する磁気ダイポールを $B \propto r^{-1.1}$ のように遠方まで展開するために必要な磁気エネルギーは、僅か100W程度である。この際弱磁場領域だけを遠方まで展開させるのがポイントである。理由は2つあって、1つは太陽風の動圧が1nPa程度と小さいからである。1nPaの太陽風を受け止めるには、僅か50nTの磁場で十分である。もう1つの理由は、弱磁場領域のもつ磁気エネルギーは小さく、展開に必要なとされるエネルギーは強磁場領域と一緒に展開する場合よりも遥に小さいためである。

## 3. 推力評価モデル

発生推進力の計算例として、50nTの磁場を $r=26\text{km}$ まで展開するケースを考えよう。磁気プラズマセイルのおおよその推力は(太陽風の動圧)×(セイルの面積)で見積もる事が出来る。今の例では1Nの推力が得られる。磁場をプラズマ噴射で展開する効率が20%、プラズマの生成効率が80%、温度5eVのプラズマが生成されるとして、電源効率を考慮して必要電力はおおよそ4kWである。この際の単位電力あたりの発生推力は250mN/kWとなり、図3のようにイオンスラスタなどの既存プラズマ推進機と比べても非常に大きい。また、図3の横軸には探査機から放出する単位ガス質量あたりの推力(比推力)がプロットされている。従来型の化学推進機はこの比推力が500秒以下と小さいが、探査機のペイロード比を高めるためには図3に掲載した各種電気推進機のような大きな比推力が必要とされる。磁気プラズマセイルの推力はプラズマ噴射に因るのではなく、太陽風プラズマ流を受け止めて発生するのだから、探査機は僅かなガスを噴射するだけでよく、比推力も当然大きくなる。このように太陽風プラズマ流を推進機の主動力源とする事

で、推力電力比と比推力の双方が大きくな、魅力的な推進システムを構成することができる。その一方、動力源も作動流体も全て自前のプラズマ推進機では、大きな推力が大きな比推力のどちらかを選択せざるを得ない。これは探査機が推進のために使えるエネルギーが一定量に限られていることから理解できるであろう。

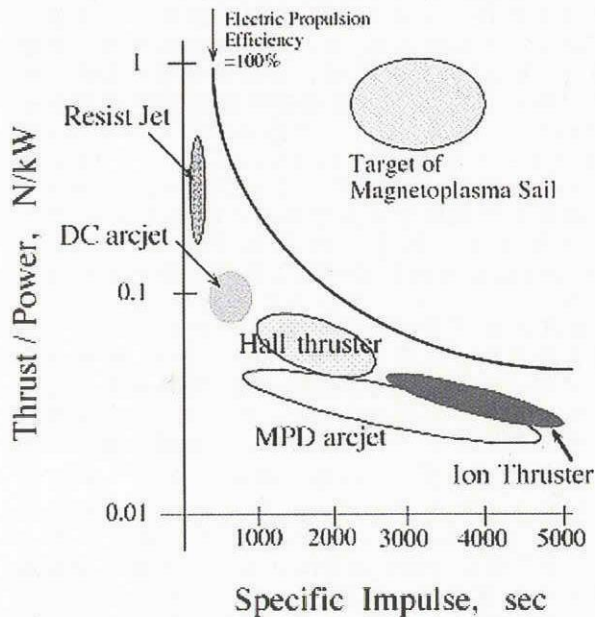


図3 プラズマ推進機と磁気プラズマセイルの性能比較

#### 4. 深宇宙探査ミッションへの応用

上記の解析に基づき推力電力比を250mN/kWを想定して、磁気プラズマセイルの外惑星探査への応用を検討した。[5] プラズマ発生のための電力は太陽電池パドルから供給するものとし、規模としては1.0AU（天文単位）において8.0kWとしている。探査機運用に必要な推進機以外への電力も考慮すると、1.0AUでの推力は1.8Nとなる。打ち上げ時には地球から見た無限遠相対速度の2乗（C3）として $0\text{km}^2/\text{s}^2$ 、つまり、ぎりぎり地球重力圏から脱出する軌道に投入し、その後、磁気プラズマセイルを稼動すると仮定した。図4に、探査機の主なパラメータと木星への移行軌道図を示す。惑星スイングバイを用いない地球から木星への直接移行軌道をとって、飛行時間は2年3ヶ月程度となっている。この例では太陽から4AU近くまで磁気プラズマセイルによる加速を行っているが、推力が大きいため惑星スイングバイを使用せずとも飛行時間の短縮が可能である。推力と比推力の双方が大きく取れる磁気プラズマセイルでは、飛行時間を短縮してペイロード比を大きく取る事ができる。更に、もし推力方向制御が可能で発生電力を大きくすること

ができれば太陽系脱出も十分可能である。これは図の探査機イメージにあるようにプラズマ発生源を2基搭載し、太陽風に対する探査機の姿勢を変える事で、可能かも知れない。

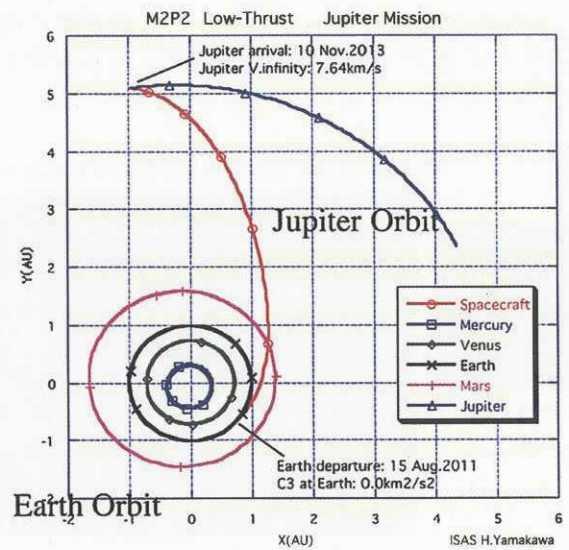


図4 磁気プラズマセイルによる木星探査機軌道計画

#### 5. 磁気プラズマセイルの研究の現状と今後の課題

##### 5-1. 推力発生機構の解明

Winglee が中心となったワシントン大学のグループでは、この磁気プラズマセイルの基礎研究を盛んに行っている。彼らは無衝突MHDモデルによる3次元シミュレーションによってダイポール磁場・噴射プラズマと太陽風プラズマの干渉問題を解き、磁場展開による磁気セイルの可能性を世界で初めて示した。[4] 無衝突プラズマを仮定すると、磁束管はプラズマに完全に追従して運動するので、プラズマの運動エネルギーは100%磁場のエネルギーに変換される。地球磁気圏の問題のように大きな空間スケールの問題では磁場とプラズマの凍結度合を示すパラメータ $Rm = \sigma \mu_0 u L$ （磁気レイノルズ数、 $\sigma$ ：電気伝導度、 $\mu_0$ ：真空透磁率、 $u$ ：代表速度、 $L$ ：代表長さ）が $10^{15}$ 程度となり、凍結状態にある。しかし、磁気プラズマセイルで扱っている大きさが高々数mの探査機周囲の現象は $Rm=1$ 程度であり、これではとても凍結状態であるとは言えない。従って、衝突の支配的なnear-fieldから、無衝突のfar-fieldまでの遷移過程を正確に予測する必要がある。これは我々のグループで現在取り組んでいる重要テーマである。プラズマ噴射による磁場展開機構には、プラズマの拡散・膨張加速・衝突性（連続体モデル）から非衝突性（粒子モ

デル)への遷移など複雑な物理過程が含まれており、解析による定量的予測は難しい。このため、この磁場展開メカニズムは実験でも検証する必要がある。ワシントン大のグループも高密度プラズマ源としてヘリコン源を使った磁場展開試験を開始した。[6]しかし、大規模なプラズマ磁場干渉を基本とする磁気プラズマセイルでは、真空チャンバー内での地上実験自体がそもそも困難である。彼らのパルスプラズマ試験では、直径1mほどの真空チャンバーにて点火後のプラズマが展開する様子を調べている。[6]しかし、これが衝突性の膨張加速流を捉えているのか、あるいは拡散の支配的な現象なのか区別がつかない。更に、試験の代表長が数十cmであることから、望んでいる無衝突プラズマと磁場の凍結状態を実現しているとはとても考えにくい。我々のグループでもプラズマ密度可変なマイクロ波プラズマ源にて同様の展開実験を準備しているが、スケールリングや壁との干渉を考慮してソースの小型化などの対応策が必要である。磁場展開機構の実験的検証も、今後取り組むべき重要課題である。

磁場展開の次のステップは、太陽風下での磁場展開を模擬する事である。太陽風との干渉のように大規模な現象では代表長さが大きく、 $R_m = \infty$ の凍結状態である。これを小規模な地上実験で成立させるため、超高速のイオンビームを用意する予定である。

#### 5-2. 利用可能なプラズマ源

プラズマセイルでは放電室内でプラズマを効率良く生成するイオンエンジンとは異なり、解放磁場の中でプラズマを作る必要がある。推進剤が未使用状態で流出する可能性が高まるため、推進剤利用効率が大幅に低下する事が予想され、今後検討が必要である。また、要求されるプラズマ密度が  $10^{12}$  から  $10^{13} \text{cm}^{-3}$  以上と非常に大きく、現行の推進機の中ではMPDアークジェットぐらいしか存在しない。もしその他の放電機構を利用するならば、これまでの宇宙推進とは異なった新種のプラズマ源が必要となるだろう。放電室に高密度プラズマを生成して噴射するやり方では、推進機壁面の熱的負荷が大きいため、マイクロ波やヘリコン波を使った非接触プラズマ源が有望であるが、今後研究を進めていきたい。

#### 6. おわりに

深宇宙推進システムとして注目される磁気プラズマセイルの原理とその課題を整理した。以下のような問題点を解明し、プラズマセイルが実現可能かどうか見極める必要がある。

1) プラズマ噴射により探査機周囲の磁場を遠くへ展開することが本当に可能かどうか。そし

て、磁場展開を現実的な電力と推進剤で実現可能かどうか。

2) プラズマの持つ不安定性によってプラズマセイルの推力が大幅に低下しないか。

3) 推進剤利用効率を高めた解放磁場型のプラズマ源が可能かどうか。

4) 推力ベクトルの制御ができ、また、太陽風プラズマの陽動に対応するなど、航法側の要求を満たせるかどうか。

磁気プラズマセイルを検証するには、最終的には軌道上での実証試験が必要になるだろう。困難とされる地上検証にて、その原理検証がどこまでできるのか。これが今後の大きな研究課題となってくる。

#### 参考文献

- [1] K. Toki, H. Kuninaka, K. Nishiyama, Y. Shimizu, and I. Funaki, "Development Status of a Microwave Ion Engine System for the MUSES-C Mission", Proc. 27th Int. Electric Propulsion Conf. (CD-ROM), IEPC-01-174, The Electric Rocket Propulsion Society, (2001).
- [2] J.R. Brophy, and M. Noca, J. Propulsion and Power 14 (1998) 700.
- [3] R.M. Zubrin: J. British Interplanetary Soc. 46(1993) 3.
- [4] R.M. Winglee, J. Slough, T. Ziemba, and A. Goodson: J. Geophys. Res. 105 (2000) 21067.
- [5] H. Yamakawa, K. Fujita, H. Ogawa, S. Nonaka, H. Kuninaka, I. Funaki: Planetary Exploration by Plasma Assisted Magnetic Sail, Proc. 12th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, 2002, ISAS.
- [6] R.M. Winglee, T. Ziemba, P. Euripides, and J. Slough, Computer Modeling of the Laboratory Testing of Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion, Proc. 27th Int. Electric Propulsion Conf., Pasadena, 2001.