

太陽風を利用した推進システムの推力発生メカニズムについて

西田 浩之*・小川 博之**・船木 一幸**・稲谷 芳文**

Thrust Generation Mechanism of Propulsion Systems Making Use of the Solar Wind

Hiroyuki NISHIDA*, Hiroyuki OGAWA**, Ikkoh FUNAKI** and Yoshifumi INATANI**

Abstract : For the last few years, several deep space propulsion systems making use of the energy of the solar wind have been proposed and researched. Thrust production mechanisms of these propulsion systems, however, have not been understood well, hence they are now intensively studied in the United State and in Japan. In this paper, the thrust characteristics of the Magnetic Sail, which is considered as one of the simplest system in these propulsion systems, are quantitatively obtained by numerical simulations, which successfully revealed the momentum transferring process from the solar wind to the coil of the Magnetic Sail. Also, other propulsion systems making use of the solar wind are introduced in comparison with the Magnetic Sail, so as to reveal the unknown physics and the applicability to deep space missions.

Keywords : Propulsion system, Solar Wind, Thrust generation mechanism

概 要

深宇宙探査に適した推進システムとして、太陽風のエネルギーを利用した推進システムがいくつか提案され研究されているが、これらの推進システムの多くについては推力の定量的な評価がなされておらず、発生メカニズムの理解が不十分である。本稿では、これら推進システムのうち最もシンプルなシステムである磁気セイルの推力特性について数値解析を行ない、推力発生メカニズムを明らかにした。この磁気セイルおよび磁気セイルと類似した新しい推進システムの研究状況を合わせて報告し、これら太陽風を利用した推進システムの将来展望を探る。

* Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo

** ISAS/JAXA

1. はじめに

太陽系外縁部やさらにその外側の領域への深宇宙探査に適した推進システムとして、太陽風の運動量（圧力）を利用した推進システムがいくつか提案され、研究が行われている。Magnetic Sail [9] , Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion (M₂P₂) [8] , The Plasma Magnet [5] , Electrostatic Solar Wind Propulsion System [2] などがそうである。ここでElectrostatic Solar Wind Propulsion Systemは、宇宙機を高電圧に帯電させることで生じる電場により太陽風粒子の軌道を湾曲させその反発力で推進する。この推進システムは非常にシンプルなコンセプトであり推進原理も明解である。一方、Magnetic Sail, M₂P₂, The Plasma Magnetなどは一般にElectromagnetic Sail (EM Sail) [6] と呼ばれ、宇宙機の周囲に展開した磁場により太陽風の運動量（圧力）を受け止め推進力とする。それぞれのシステムの違いは、磁場展開方法による。しかしながらこれらのEM Sailの推力発生プロセスは複雑な電磁力学的干渉によっており、その詳細はよく知られていない。

本稿では、EM Sailのうち最もシンプルな磁気セイル（Magnetic Sail）の推力発生メカニズムと推進特性について述べる。また、磁気セイルの発展形とも言えるその他の太陽風を利用した推進システムについて紹介し、これらシステムの推力発生原理と問題点を概説する。

2. Magnetic Sail

磁気セイル（Magnetic Sail）はZubrinらによって最初に提案された最もシンプルなEM Sailである [9]。宇宙機の周囲に展開された巨大な超伝導コイルに電流を流し、太陽風の圧力を受け止めるのに十分な強さを持ったダイポール磁場を広範囲に展開する（Fig.1 参照）。磁気セイルは、宇宙機を推進させるのに十分な推力を得るには直径数十 km以上の超伝導コイルを用いる必要があると見積もられ、実用するには現実的でないと考えられている。しかしながら、非常にシンプルなシステムであり、この磁気セイルの推力メカニズムを明確にすることは、その他のより実用的な（だが複雑なシステムである）EM Sailの推力メカニズムを理解する上で重要なことである。そこで我々は磁気セイルの推力メカニズムを、電磁流体力学（MHD）に基づいた数値解析により検証した。また磁気セイルの迎角に対する推進特性（推力ベクトル、トルク）について定量化も行った。

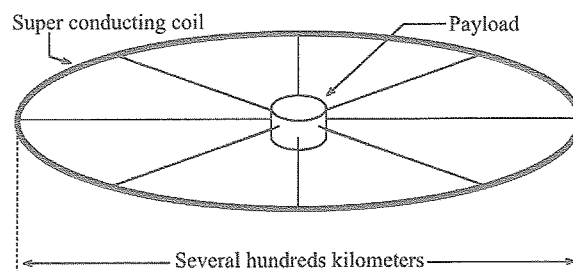


Fig.1 磁気セイル (Magnetic Sail) .

2.1. 解析手法

支配方程式には電気伝導度を無限大と仮定した1流体理想電磁流体方程式を用い、数値解法として空間2次元シミュレーションにはFlux-Corrected Transport法 [3] を、空間3次元シミュレーションには8-wave formulation [6] を適用したTVD Lax-Friedrich法 [1] を用いた。TVD Lax-Friedrich法の高次精度化にはMUSCL法を用い、制限関数にはMINMOD Limiterを使用した。

2.2. 計算モデル及び計算条件

シミュレーションは、空間2次元及び空間3次元において行う。空間2次元シミュレーションにおいては長方形型の計算領域を定義し、原点に計算平面に対して垂直な方向に逆方向に電流が流れる無限に長い2本の電線を設置し、磁気セイルを模擬する。一方、空間3次元シミュレーションにおいては直方体型の計算領域を定義し、原点にコイル（環電流）を設置する。太陽風を計算開始時より一方の境界面から流し始め、定常状態になるまで計算を行う。電流による磁場の初期条件として、磁場の強い領域では一定圧力・一定Alfven速さのプラズマで、弱い領域では一定圧力・一定密度のプラズマで満たした。境界条件としては、太陽風流入境界においては太陽風のパラメータで固定し、それ以外の境界には流出条件を与えた。またコイル・電線側の境界はコイル・電線から一定距離内の物理量を固定することにより与えた。計算パラメータをTable 1に示す。ここでAttack angle（迎角）は太陽風流れ方向とコイル面との間の角度で定義する。ただし、ここで示されているパラメータはすべて無次元量である。無次元化のため、代表長 L_0 =コイル半径、代表磁束密度 $B_0=2 \times 10^{-8}$ [T]、代表密度 $\rho_0=1.67 \times 10^{-21}$ [kg/m³]の3つを基準無次元化パラメータとして、代表流速 $v_0=B_0/(\mu_0 \rho_0)^{1/2}=436.2$ [km/sec]、代表圧力 $p_0=\rho_0 v_0^2=3.18 \times 10^{-10}$ [Pa]、代表電流 $J_0=B_0/\mu_0 L_0=2.5 \times 10^{-9}$ [A/m²]を定義しており、 μ_0 は真空中での透磁率である。コイル半径のサイズを含めた有次元量については後に議論する。

Table.1 無次元計算パラメータ（ただし、()内は対応する有次元量）。

Solar Wind velocity	0.917 (400km/sec)	
Solar Wind pressure	8.7×10^{-2} (20eV)	
Solar Wind density	5.0 (5mi $\times 10^6$ kg/m ³)	
Coil Current	2次元： 1.2×10^{12}	3次元： 9.6×10^{12}
Attack angles	0~90 degrees	

2.3. 磁気セイルの推力メカニズム

太陽風と磁場が電磁流体近似の成り立つスケールで干渉しあう場合、磁気セイル周りの流れ場は地球磁気圏周りの流れ場によく似たものになる。Figure 2のシミュレーション結果から、磁気セイル周囲には磁場の領域である磁気圏が形成され、太陽風は磁気圏周囲を流れ磁気圏内部には流れ込まないことが分かる。磁気圏上流にはBow shockが形成され、太陽風の流れはBow shockにより圧縮・湾曲され磁気圏境界面上に圧力分布を形成する。

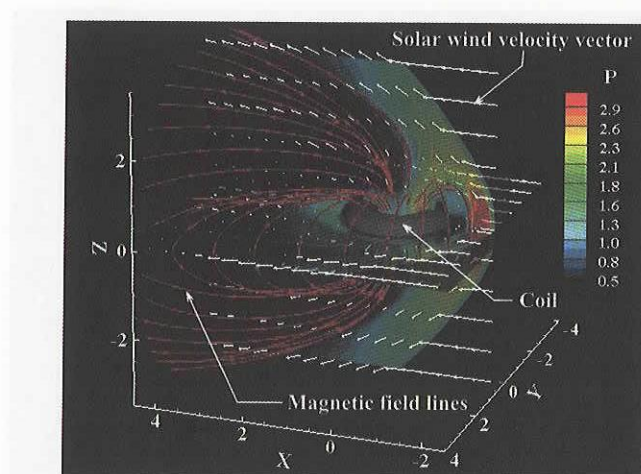


Fig.2 磁気セイル周りの流れ場（空間3次元シミュレーション）。

磁気セイルは太陽風の運動量（圧力）を、自身の磁場を介した電磁力的相互作用により受け取り推力とする。このプロセスを検証するため、プラズマ・磁場干渉中に含まれる力のやり取り（作用反作用）を確かめた。すなわち、太陽風が磁場から受けている力（太陽風の運動量変化：F1）、磁気圏が境界面上の太陽風圧力より受ける力（F2）、コイル電流が誘導電流から受けるLorentz力（F3）の3つの力を比較した。F1は計算領域内に流入・流出する太陽風の全運動量を積分することによって、F2は磁気圏境界面を定義しその境界面上の圧力分布を積分することによって、F3は計算領域内に流れる全誘導電流とコイルとの間に働くLorentz力を積分することにより計算した。Fig. 3に空間2次元シミュレーションにより計算したF1, F2, F3とコイルの傾き角（Coil tilt angle）の関係を示す。

Fig. 3より、3つの力が計算精度の範囲内で一致して釣り合っていることが確認できる。以上から磁気セイルは

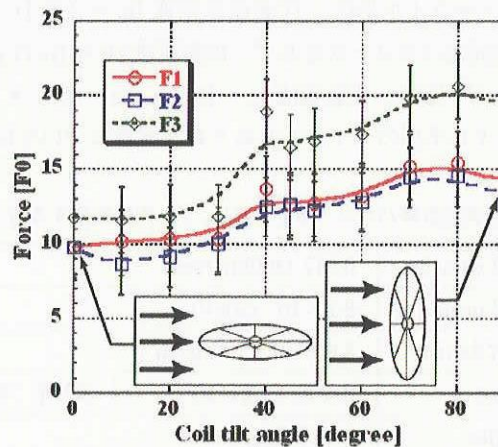


Fig.3 3つの力のバランス。

太陽風の運動量を、誘導電流を介したLorentz力により受け取り推力とすることがわかる。つまり、太陽風と干渉することで太陽風の圧力が磁場を変形して磁気圏を形成し、磁気圏を形成することで流れる誘導電流と超伝導コイル中の電流との間に働くLorentz力が磁気セイルを推進させる（Fig. 4）。

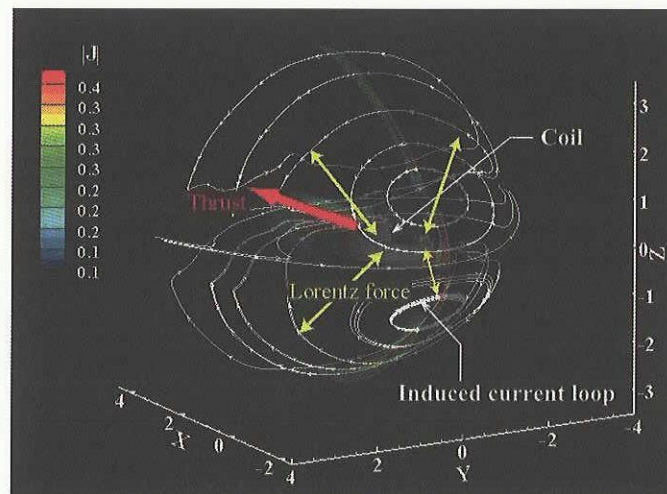


Fig.4 磁気セイルの推力メカニズム（誘導電流線図）。

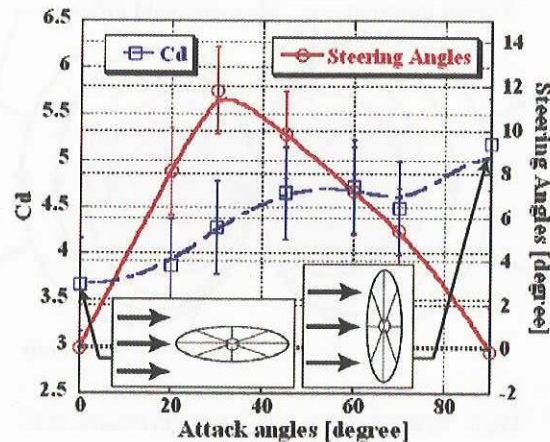


Fig.5 磁気セイルの推進特性.

2.4. 磁気セイルの推進特性

空間3次元シミュレーションにより、磁気セイルの得る推力ベクトル、トルクの定量化を行った。推力ベクトル、トルクの計算は磁気セイルが太陽風に対してさまざまな迎角 (Attack angle) をとった場合に対して行い、迎角との関係について調べた。Fig. 5に迎角と推力、Steering angle (推力方向制御角) の関係をグラフで示す。ここでSteering angleとは太陽風流れ方向からの推力ベクトルの傾斜角であり、推力は太陽風動圧に対する抵抗係数Cdで示してある。抵抗係数を計算する際の代表面積には、迎角 0° の時ににおけるShock stand off distanceを半径とした円面積をとっている。

Figure. 5から、迎角 90° の場合が最も効率が良く、磁気圏の大きさに対して約5.0の抵抗係数が得られることが分かる。以上の性能を有次元量に換算すると、コイル直径が20 kmのときに9 Nの推力が得られる計算であり、コイルに流す電流は8 kAになる。また、トルクの計算より磁気セイルは風見安定性を持っていることがわかった [4]。

本シミュレーションにおいてコイル半径20 kmは電磁流体近似が成り立つと考えられるぎりぎり最小のサイズであり、これ以下のサイズのものについての解析には粒子法によるアプローチが必要となる。

3. Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion (M2P2)

磁気セイルには、実用化にあたり巨大な構造物が必要であるという難点がある。この問題を解決するためにWingleeらによって新しい磁場展開方法が考案された [7]。この方法は宇宙機からのプラズマ噴射を利用するというものである。磁場にはプラズマ流に凍結して運ばれる性質がある。宇宙機の周囲に磁場を展開し、そこにプラズマを噴射すると、宇宙機近傍の強い磁場がプラズマ流に凍結しプラズマの拡散と共に遠くに運ばれる (強い磁場が広範囲に展開される) ことになる。この磁場展開方法を用いることにより、噴射プラズマのための推進剤は必要となるものの大規模な構造物を必要とせず、より現実的なシステムになる。この方法を用いる推進システムをM2P2 (Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion) もしくは磁気プラズマセイル (Magnetoplasma Sail) と呼ぶ (Fig. 6)。

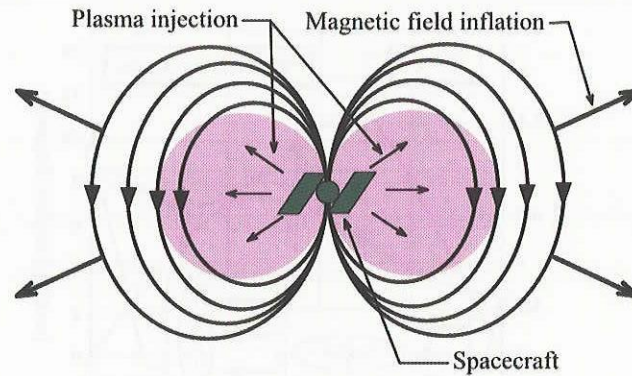


Fig.6 磁気プラズマセイル (Magneto Plasma Sail).

磁気プラズマセイルは宇宙機からのプラズマ噴射による磁場展開という電磁気的プロセスを含んでいるため、推力発生メカニズムは磁気セイルのものよりも複雑である。宇宙機周囲には磁場を展開したことにより強い誘導電流が流れる（言い換えるとプラズマ噴射に起因した強い誘導電流により磁場が展開される）。磁気セイルの場合、太陽風の圧力は磁気圏境界面上の誘導電流を介して、最終的に磁気セイル自身のコイル電流が受け止めることになりこれが推力となる。しかし、磁気プラズマセイルは自身のコイル電流だけでなく周囲の噴射プラズマ中に流れる誘導電流でも受け止めることになると考えられる。展開した磁場を支えている噴射プラズマが宇宙機自身に（電磁気的に）固定されていない場合、太陽風の圧力を受けとめた噴射プラズマのみが太陽風風下へ吹き流され、磁気プラズマセイルの性能が著しく低下する可能性がある。磁気プラズマセイルの性能をおどすことなくプラズマ噴射により磁場を展開するには、噴射プラズマを磁気圏内にトラップするようなプラズマ噴射方法が必要になると考えられる。

4. The Plasma Magnet

近年、Washington大のSloughらによって提案された新しい磁場展開方法を用いるEM SailがThe Plasma Magnetである[5]。この推進システムは回転ダイポール（RMF：Rotating Magnetic Field）を用いて広範囲に強い磁場を展開する。Fig.7に示すような十字に配した2組のコイルに位相を90°ずらした交流電流を流すことで回転するダイポールを形成する。

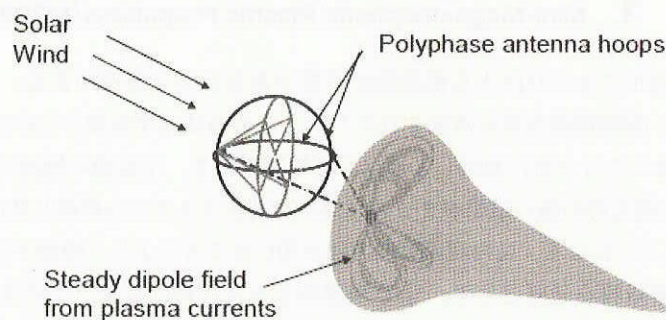


Fig.7 The Plasma magnet [5].

プラズマ中においてダイポール磁場を回転させると、軽い電子が回転ダイポール磁場にトラップされて運動し、プラズマ中に環電流が流れる。このプラズマ中の電流が安定したダイポール磁場 (Steady dipole field) を形成する。回転ダイポールにはプラズマ中の電気抵抗に逆らって電子を引きずれるだけの強い磁場強度が必要である。さらに、プラズマ電流は自身のhoop forceによって外に向かって膨張し、それとともに安定したダイポール磁場も大きく展開されることになる (Fig. 8)。プラズマの膨張は外側の太陽風圧力と釣り合うことで止まる。このシステムの利点は、大規模な構造物を必要としないこと、磁気プラズマセイルと同じく磁気圏のサイズが太陽風との圧力の釣り合いで決まるため推力が太陽からの距離に依存しないこと、推進剤を必要としないことなどが挙げられる。また、この磁場展開のプラズマ電流生成プロセスの物理的原理はよく理解されており、実験的研究もすでに行われていることも利点である。

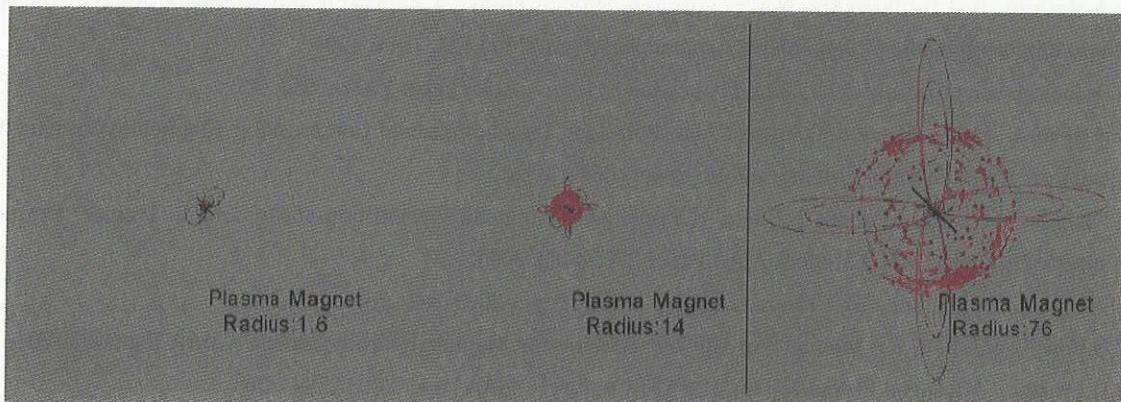


Fig.8 回転ダイポール (RMF) による磁場展開過程 [5].

磁気圏を支える、ひいては太陽風の圧力を支えることになるプラズマ電流 (回転ダイポールにより磁化されたプラズマ) には大きな力が下流方向に加わることになり、プラズマ電流のみが回転ダイポールより切り離され下流に吹き流される可能性がある。The Plasma Magnetが有効に推力を発生するには、太陽風からの圧力を、それを支えているプラズマ電流を介して、最終的に宇宙機の2組のコイル電流で受ける必要がある。そのためにはプラズマ電流を回転ダイポールにトラップさせ、磁気圏中に維持し続ける必要がある。今後こうした影響を加味した性能解析が必要であろう。

5. Electrostatic Solar Wind Propulsion System

磁場により太陽風の流れを反射・湾曲させ推力を得るEM Sailと違い、電場により太陽風の流れを湾曲させるのがAlexander Bolonkinにより提案されたElectrostatic Solar Wind Propulsion Systemである [2]。これは非常にシンプルな推進原理のシステムで、導電性の布などで作った宇宙機を高電圧に帯電させることで太陽風粒子の軌道をクーロン力により散乱させ推力を得る (太陽風粒子とのクーロン衝突により推力を得る)。直径4-10mほどの100 MV/mに帯電したボールを作ることができれば数Nの推力を得ることができ、火星軌道まで70日、木星軌道まで150日、土星軌道まで250日で飛行できると見積もられる [2]。

このシステムを実現するためには、宇宙機を高電圧に帯電させる技術や太陽風粒子が宇宙機に衝突し宇宙機が放電してしまうのを避ける工夫などが必要となる。

6. まとめ

本稿では、磁場により太陽風の運動量を受け推進するElectromagnetic Sailの内、最もシンプルなシステムである磁気セイルの数値解析により明らかとなった推力メカニズムと推進特性について述べ、その他の現在研究されている太陽風を利用した推進システムの原理について紹介を行った。

参 考 文 献

- [1] A.A.Barmin, A.G.Kulikovskiy, N.V.Pogorelov, "Shock-Capturing Approach and Nonevolutionary Solution in Magnetohydrodynamics", *Journal of Computational Physics*, Vol.126, 77-90, 1996.
- [2] A.Bolonkin, "Electrostatic Solar Wind Propulsion System", AIAA Paper 2005 - 3653, 2005.
- [3] C.R.Devore, "Flux-Corrected Transport Algorithms for Two-dimensional Compressible Magnetohydrodynamics", Naval Research Laboratory Memorandum Report 6544, 1989.
- [4] H.Nishida, H.Ogawa, I.Funaki, K.Fujita, H.Yamakawa, Y.Inatani, "Verification of Momentum Transfer Process on Magnetic Sail using MHD Model", AIAA Paper 2005-4463, 2005.
- [5] J.Slough, Louis Giersch, "The Plasma Magnet", AIAA Paper 2005-4461, 2005.
- [6] K.G.Powell, P.L.Roe, R.S.Myong, "An Upwind Scheme for Magnetohydrodynamics", AIAA Paper-95-1704, 1995.
- [7] R.H.Frisbee, "Advanced Propulsion for The XXI Century", AIAA Paper 2003-2589, 2003.
- [8] R.M.Winglee, J.Slough, T.Ziemba, A.Goodson, "Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion", *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, 67-77, 2000.
- [9] R.Zubrin, D.Andrews, "Magnetic Sails and Interplanetary Travel", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.28, 197-203, 1991.