

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：54501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760669

研究課題名(和文) 太陽風アシストによるプラズマセイル 磁気ノズル複合推進機の性能最適化と実証実験

研究課題名(英文) Thrust Performance of a Magneto Plasma Sail with a Magnetic Nozzle

研究代表者

梶村 好宏 (Kajimura, Yoshihiro)

明石工業高等専門学校・その他部局等・講師

研究者番号：20403941

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近年、実用化に向けた研究が進められている磁気ノズルスラスタと太陽風から磁気帆を介して推進力を得る磁気プラズマセイルの推進技術を融合した「プラズマセイル-磁気ノズル複合推進機」を提案し、実証実験を行う。はじめに、推進性能を最適化する為の3次元数値シミュレーションを行い、次にその結果を利用して、地上真空チェンバー実験による直接推力測定を行い、推進機の性能実証を行った。数値解析による最適化パラメータを用いて実験を行った結果、提案した「プラズマセイル-磁気ノズル複合推進機」の推進力は、磁気ノズルの推力に対し、約3倍に増加することを確認した。

研究成果の概要(英文)：Magneto Plasma Sail (MPS) is a propulsion system used in space, which generates its force by the interaction between solar wind and an inflated magnetic field via a plasma injection. The magnetic nozzle can control the plasma flow resulting from expanded thermal plasma by using a coil and it obtains the thrust by exhausting the plasma flow from the back of the rocket. As a result by using numerical simulations, the optimized injected thermal plasma beta is 0.46 and the ratio of Larmor radius of injected ion to the representative length of the magnetic field is 3 at the injection point. In this situation, the maximum thrust gain of the MPS with the magnetic nozzle is 5 compared with the thrust obtained from only magnetic nozzle.

The thrust gain of the MPS with magnetic nozzle is 3 in case for the ground experiment under the same parameters optimized by the numerical simulation. In the present study, the thrust gain is successfully observed in the ground experiment.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学 航空宇宙工学

キーワード：電気推進 磁気ノズル 磁気プラズマセイル 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

月・惑星探査、あるいは深宇宙探査において、ミッション期間短縮やペイロード比の増大を実現するため、大推力・高比推力の推進機の開発が求められている。これらの実現を目指し、近年、研究が進められてきた磁気プラズマセイルは、1990年にZubrinらによって提案された磁気セイルを発展させた宇宙推進システムである。磁気セイルは、超音速のプラズマ流である太陽風を、超伝導コイルによって形成したダイポール磁場で受け止めることで推進力を得るシステムである。この磁気セイルが作る宇宙機周りの、ごく小規模な磁気圏をプラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽風を受け止める推進システムが、磁気プラズマセイルである。既存の電気推進機と同等の推進剤消費効率かつ1ケタ高い推力を得ることができるため、太陽系を10年で脱出できる可能性があると報告された。しかし、これまでに行われた地上実験や数値解析を用いた磁気プラズマセイルの推進性能の評価では、先の予測性能を達成するためには、現状の推力に対してさらに1桁から2桁の推力増大を実現する必要があることがわかっている。

惑星探査機「はやぶさ」に搭載されたイオンスラスタは1基で約10mNであり、空間電荷保存則から推力密度に限界があり、大推力化には大型化しかない。一方、ホールスラスタにおいても、高推力密度化が難しく、大型化による重量増が問題となっている。昨今、実用化に向けた研究が進められているのが磁気ノズルスラスタである。このスラスタの原理を図1に示す。

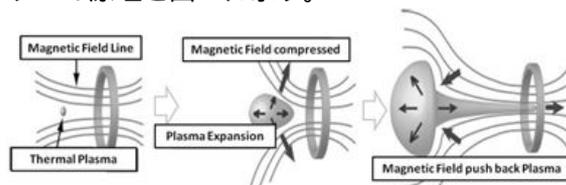


図1 磁気ノズルスラスタの原理

磁気ノズルスラスタでは、無電極で長寿命化が可能な高周波加熱(RF)によって生成したプラズマを磁気ノズルにおいて加速し、その反力で推進力を得るものである。特徴は、推進剤であるプラズマが固体壁ではなく磁場壁と相互作用することで、エネルギー損失が低減される。従って、他の電気推進機と比較して、高い排出速度(即ち高い比推力)と大きな比出力を同時に達成可能である。世界的には、NASAのVASIMR、国内では、HITOP(東北大)やLFR(九州大)が磁気ノズルを用いた推進機を提案、研究を行っている。しかしながら、このシステムは、投入電力の増加に伴い、プラズマの温度が高くなり、推力を担うイオンのGyro半径が増大し、損失を招き、磁気ノズルによる加速ができなくなる。よって、大推力を得るためには、強い

ノズル磁場が必要であり、必然的に大きな電力(VASIMR:200kWで6N)を要する。この電力規模は、10年で太陽系を脱出するシステムには大きすぎると考えられる。さらに、未だこの手法で直接推力が測定されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、先に示した磁気プラズマセイルと磁気ノズルスラスタを融合した推進システムを新たに提案し、その推進性能を評価することを目的とする。提案する推進システムの概念図を図2に示す。

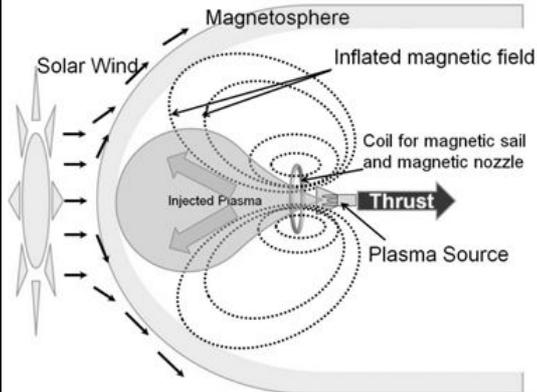


図2 磁気プラズマセイル - 磁気ノズル融合推進機の原理図

磁気プラズマセイルは、太陽系内に吹く太陽風という外部エネルギーを利用可能であり、燃費は良いが推力は不十分である。また磁気ノズルは、無電極長寿命であるが、大推力を得るためには電力規模が大きすぎる。これらの推進システムを、うまく組み合わせ、最適なパラメータで動作させることにより、大推力、高比推力の推進システムが実現可能であるかどうかを検討する。本研究では、この検討を(1)数値解析および(2)地上真空チャンバー実験による推力計測によって行う。実験に先駆けて、提案した推進システムが得る推力を数値解析を用いて最適化し、その後、実証実験を行って推力を直接測定する。

3. 研究の方法

(1)数値解析

実験に用いるプラズマパラメータの最適化には、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。図3に解析モデルを示す。解析領域の中央に磁気ノズルを形成するコイルの中心を合わせて設置し、コイルが作る初期磁場を定義する。このコイルの半径や電流量は地上実験で想定される値と同じとした。地上実験の条件を再現するため、イオンと中性粒子の衝突を考慮している。詳細のパラメータは参考文献(雑誌論文3)を参照されたい。

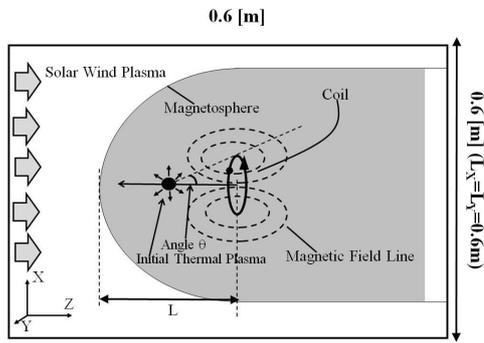


図3 解析モデル図

(2) 推力測定実験

図4に、実施した真空チェンバー実験の概要図を示す。

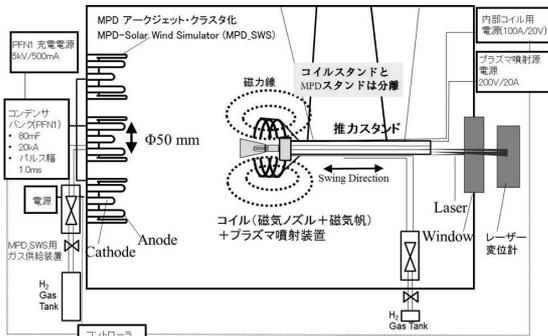


図4 実験概要図

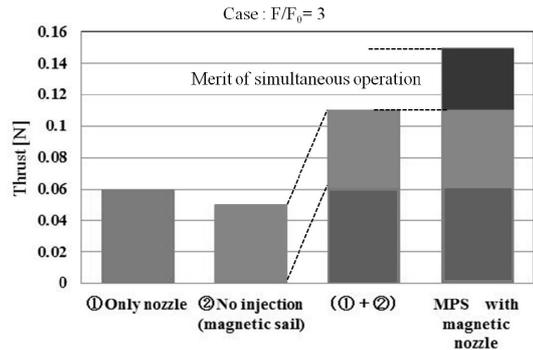
実験装置は、図4に示されるように、太陽風プラズマ流を模擬する太陽風シミュレータ(MPD アークジェットシステム3基) 磁気帆および磁気ノズルを模擬するコイル、そして推進力と磁気帆展開の為に用いるプラズマ噴射源と、これらの駆動系、計測系から構成される。コイル、プラズマ噴射源と太陽風シミュレータ(MPD_SWS)を同時に運用すると、約1msの間準定常的に模擬太陽風プラズマ流と磁気ノズル、磁気帆拡大用のプラズマ噴射が干渉する。この干渉によって、コイルに作用する推力が発生する。この推力を振り子式の推力計測スタンドを使ってインパルスとして検出・測定する。

4. 研究成果

(1) 数値解析

図5に、計算で得ることができた推力の内訳を示す。評価したケースは、推力ゲインが3 ($r_{Linj}/L_B=10$ で、 $=3.7$)のケースである。このパラメータを実験で再現する場合、密度は 4×10^{20} [1/m³]、温度は 8.4[eV]、流量 10 [mg/s]である。図の棒グラフの一番左は、太陽風を作用させず、噴射プラズマと磁気ノズルのみを作用させた際に得ることができる推力 ($=0.06\text{N}$)を示している。また、2つめのグラフでは、プラズマを噴射せず、ノズル磁場と太陽風プラズマのみを作用させた磁気セルとしての推力 ($=0.05\text{N}$)を示

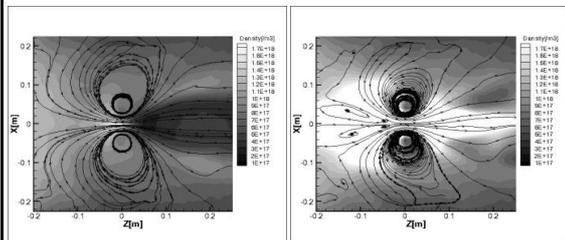
している。プラズマを噴射した場合、上記のと の 推力の合計に加えて、磁気ノズル(磁気帆)が変形することによる推力増分がいかに大きく得られるかが、この推進システムの優位性を決めるファクターであるため、その点について、評価を行った。その結果、単純に と を合算した推力(0.11N)よりも、磁気ノズルを伴った磁気プラズマセルとして動作させた場合の方が、推力が大きくなる(0.15N)ことが確認された。この結果は、まさに磁気帆が拡大することで、太陽風



から得られる推力が増えたことを意味している。

図5 数値解析によって得られた推力の内訳(磁気ノズルのみ、磁気セルのみ、+ の合計、磁気プラズマセルと磁気ノズル融合スラスターの場合)

図6に本解析で得られたイオンの数密度コンター図および磁力線図を示す。図6(a)は、プラズマを噴射しない場合であり、ノズル磁場が太陽風と相互作用し、コイル後方に太陽風プラズマが遮られて出来た低密度領域が確認できる。これに対し、図6(b)は、プラズマを噴射した場合 ($r_{Linj}/L_B=3$ で、 $=7.5$ の場合)で、噴射したプラズマが磁気ノズルによって、太陽風方向に方向転換(密度が高い領域が確認)されており、磁気ノズルがきちんと機能していることが確認できる。実際に、磁気帆の大きさを決める磁気圏サイズは大きくなっていることを確認した。この結果においても、先に示したように、推力の増大が確認された。



(a) (b)

図6 数値解析結果(イオンの数密度分布と磁力線図、(a) プラズマを噴射しない場合、(b) プラズマを噴射した場合 ($r_{Linj}/L_B=3$ 、 $=7.5$ のケース)

本数値解析結果に関して、噴射プラズマのパラメータを変化させた場合の結果について図7に示す。図7は、横軸に噴射位置における噴射プラズマの β 値、縦軸に推力ゲインを取ったグラフである。推力ゲインの定義は、プラズマを噴射しない場合と噴射した場合の推力の比である。プラズマを噴射しない場合、コイル磁場は磁気帆として太陽風から推力を得ることができ、これは磁気セイルとしての推力に相当する。これに対し、プラズマを噴射した場合は、磁気ノズルとして得ることができる推力に加え、磁気帆が拡大し、その磁場で太陽風から得ることができる磁気プラズマセイルとしての推力を計算した値を評価している。この比が大きい方が、性能が良いことを示している。今回の解析においては、 $r_{Linj}/L_B=1$ (噴射プラズマイオンの Gyro 半径 r_{Linj} と、磁場勾配長 L_B の比が 1) で、 $\beta=2.0$ の場合が最も推力ゲインが大きく、噴射前後で 24 倍の推力ゲインとなっている。しかし地上実験に用いるプラズマ密度としては非現実的であるため、図の丸印に示したパラメータ ($r_{Linj}/L_B=3$ で、 $\beta=0.46$ の場合) において推力ゲインが 5 を用いて実証実験を行うこととした。

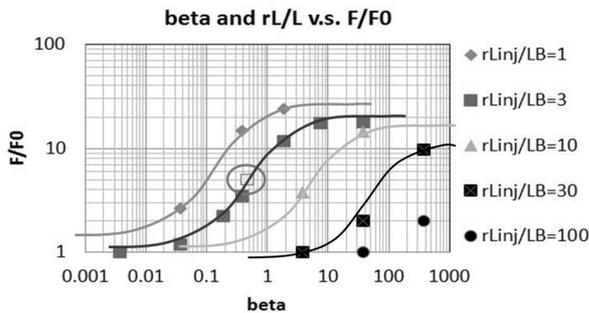


図7 パラメトリック解析結果 (推力ゲインの噴射プラズマ, r_{Linj}/L_B 依存性)

(2) 推力測定実験

図8に磁気セイルモードと磁気ノズルモードを同時動作させた全系動作時の撮像結果を示す。図8では、先の図4に示したコイル、およびその中心にプラズマ噴射源であるMPD アークジェットシステムが配置されていることが確認できる。プラズマ噴射源から、高速の水素プラズマが撮像写真左方向へ噴出しており、同時に図の左側から太陽風プラズマを作用させている様子が確認できる。

図9に推力測定実験における各モードの推力計測結果を示す。太陽風プラズマとコイルのみを動作させた磁気セイルモード、コイルとMPDプラズマ源のみを動作させた磁気ノズルモード、との単純合計、磁気セイルモードと磁気ノズルモードを合わせた全系動作のモードの各推力を示している。

図9において、磁気セイルモードの推力がマイナスになっている。推力の算出方法は、磁気セイルモードのスタンドの変位から、コ

イルのみに通電した場合の変位を差し引いた値を磁気セイルモードの推力とした。コイルに通電した場合の変位(ノイズ)が大きく、そのノイズに磁気セイルの推力が埋もれてしまったことが要因である。本結果は、3回の実験の平均値を示しており、図のエラーバーは3回の実験の標準偏差である。推力が正となるケースもあったが、平均値としては負の値となった。次に、磁気ノズルモードの推力については、約 0.8N となった。このモードにおいても、3回の平均値である。磁気セイルモードと磁気ノズルモードの単純合計値をその上に示す。この値と比較して、磁気ノズル+磁気プラズマセイルモードの推力が大きければ、磁気ノズル動作によって磁気圏の拡大が生じ、その磁気圏拡大によって、太陽風からの推力が増大したことを意味している。今回の実験では、磁気セイル+磁気ノズルモードの単純合計に対して約3倍の推力が確認されたが、先の数値解析結果で得られた推力ゲイン5倍には至らなかった。この要因については、磁気ノズルからのプラズマ噴射密度の違いや、コイル磁場の分布の違いなどが想定されるが、今後詳細に調査を行い、違いの要因を明らかにしたい。

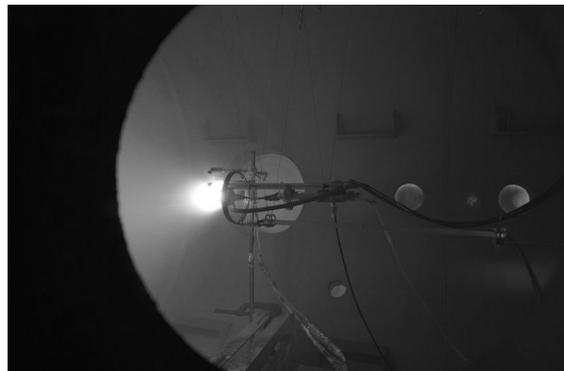


図8 磁気ノズル+磁気プラズマセイルモード(全系動作)の撮像結果

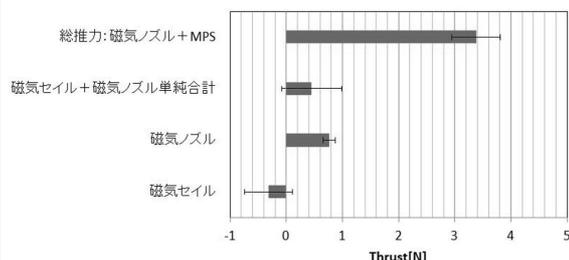


図9 推力測定実験における各モードの推力計測結果

今回の実験では、磁気ノズルスラスタのプラズマ噴射源にMPDアークジェットを用いたが、このプラズマ源は、それ自体に発生する推力が大きく、またコイルと電磁的に相互作用を起こし、ノイズの要因となるため、今後の実験計画では、熱プラズマ源としてヘリコン波を用いたプラズマ源を用いて同様の

実験を実施したい。また、ヘリコンプラズマ源は、MPD プラズマ源よりも低電力での動作が可能なることから、推進システムとして、推力電力比の向上などの性能向上を図ることも期待できる。

(3) まとめ

本研究では、近年、宇宙用電気推進の分野において実用化に向けた研究が進められている磁気ノズルスラスタと太陽風から磁気帆を介して推進力を得るプラズマセイルの推進技術を融合した「プラズマセイル-磁気ノズル複合推進機」を提案し、実証実験を行った。はじめに、提案した推進機の推進性能を最適化する為の3次元数値シミュレーションを行い、その結果を利用して、地上真空チャンバー実験による推力測定及び推進機の性能実証を行った。これまで、コイルのみが作る磁気帆によって太陽風から推力を得る手法では、十分な推力(イオンエンジンなどと比較)が得られない結果が出ており、磁気帆をプラズマ噴射等によって拡大する手法が考案されてきた。その手法の一案として、本プラズマセイル-磁気ノズル複合推進機が挙げられる。評価方法には、プラズマ中のイオンを粒子として、また電子を流体として取り扱う3次元ハイブリッド粒子モデルによる数値解析を用いた。数値解析では、磁気ノズルの強度、噴出させるプラズマの流量と温度をパラメータとして、推進機が得られる推力の最適化を実施した。その結果、磁気セイルの推力に対して、プラズマ噴出後の推力の比、つまり推力ゲインが最大24倍まで上昇可能であることを示した。地上真空チャンバー実験では、準備できるプラズマのパラメータに限度があることから、その範囲内のパラメータを用いた実験を想定し、その条件を用いた数値解析による評価を行った。その結果、実験パラメータを用いた評価では、約5倍程度の推力ゲインが見込まれることが分かった。同条件を用いた地上実験を実施し、推力スタンドによる直接推力測定を行った結果、磁気ノズル推力に対し約3倍程度の推力増加が見られた。また、動作中の撮像、磁場強度やプラズマ密度、温度の測定も同時に実施し、推進機の動作の原理実証を行うこともできた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

1. Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, H. Usui, M. Matsumoto, H. Yamakawa, Numerical Simulation of Dipolar Magnetic Field Inflation by Equatorial Ring-current, Plasma Fusion Res. 9, 2405008, (2014). URL: http://www.jspf.or.jp/PFR/PDF/pfr2014_09-2405008.pdf
2. I. Funaki, Y. Kajimura, Y. Ashida, H. Nishida, Y. Oshio, I. Shinohara, H. Yamakawa, The Use of Dipole Plasma

Equilibrium for Magnetic Sail Spacecraft, Transactions of Fusion Science and Technology, Vol.63, No.1T, 2013, pp.168-171.

3. Yoshihiro KAJIMURA, Ikkoh FUNAKI, Kazuma UENO, Yuya OSHIO and Hiroshi YAMAKAWA, Thrust Performance of a Magneto Plasma Sail with a Magnetic Nozzle, Proceedings of ISTS ISTS-2013-b-06, 2013. URL: http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2013-b-06.pdf

〔学会発表〕(計 5件)

1. Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, K. Ueno, Y. Oshio, H. Yamakawa, Numerical Simulation of Plasma Flow around a Magnetized Plasma Sail with a magnetic Nozzle, 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'13), HGb-3, Taipei, Taiwan, 2013. (招待講演)
2. Yoshihiro Kajimura, Ikkoh Funaki, Kazuma Ueno, Yuya Oshio, Hiroshi Yamakawa, Thrust Performance of a Magneto Plasma Sail with a Magnetic Nozzle, 29th ISTS, 2013-b-06, Nagoya, June 2-9, 2013.
3. 梶村好宏, プラズマセイル-磁気ノズル融合推進機の性能最適化と推力測定実, 第57回宇宙科学技術連合講演会、1108、2013.
4. Y. Kajimura, I. Funaki, I. Shinohara, H. Usui, M. Matsumoto, H. Yamakawa, Numerical Simulation of Dipolar Magnetic Field Inflation by Equatorial Ring-current, 22nd International Toki Conference, P4-6, Toki, Nov. 2012.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページアドレス

<http://www.akashi.ac.jp/contents/Electric/kajimura/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

梶村 好宏 (KAJIMURA YOSHIHIRO)

明石工業高等専門学校・その他部局等・講師
研究者番号: 20403941