

VASIMR 型プラズマ推進機の研究開発状況と課題

安藤 晃* 服部 邦彦* 犬竹 正明*

Present status and future prospect of the VASIMR type plasma thruster

by

Akira Ando*, Kunihiro Hattori* and Masaaki Inutake*

Abstract: In the Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket (VASIMR) project under development in NASA, it is proposed to control a ratio of specific impulse to thrust at constant power. Ion heating by electromagnetic waves and magnetic nozzle acceleration of a fast-flowing plasma are two key issues for the development of the advanced space thruster. In the HITOP experiments, we have successfully demonstrated these two tasks experimentally. Present status and future tasks of the VASIMR-type plasma thruster is presented.

Key words: VASIMR, Plasma thruster, HITOP, Ion heating, Magnetic nozzle, Mars exploration

概 要

有人火星探査を目指した高性能の比推力可変電気推進機 VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) が NASA を中心に提案され実用化研究が進められている。このシステムでは一定電力下で自由に推力と比推力の比を制御することが出来る。このシステムを実現するには高周波によるプラズマ流の加熱と磁気ノズルによるプラズマ流の加速が重要な2つの技術課題である。我々は HITOP 装置を用いてこの2つの課題が実現可能であることを実験的に明らかにした。VASIMR 型のプラズマ宇宙推進機の現状と課題について報告する。

1. はじめに

電気推進機は従来の化学推進ロケットに比べ高比推力であり重力の影響の少ない宇宙空間での長期ミッション用主推進機として精力的に研究開発が進められている。電気推進機には様々な種類があり、軌道遷移や惑星探査用主エンジンなど多様なミッションに応じた利用が広がっている。

最近、有人火星探査を目指した高性能の比推力可変電気推進機 VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) が NASA を中心に提案され注目されている [1]。概念図を図1に示すが、このシステムでは、軸磁場中で生成されたプラズマ中のイオンを、高周波を用いてサイクロトロン加熱を行い、その下流部に形成した発散型磁気ノズルによってその熱エネルギーを推力に変換する。この手法によれば、プラズマを生成する電力と加熱する電力を制御することで、噴出されるプラズマ粒子の密度と流速を変化させることができる。すなわち推力と比推力を自由に制御することができ、ミッションの状況に応じた様々なエンジン動作が実現可能となる。

* Department of Electrical Engineering, Tohoku University

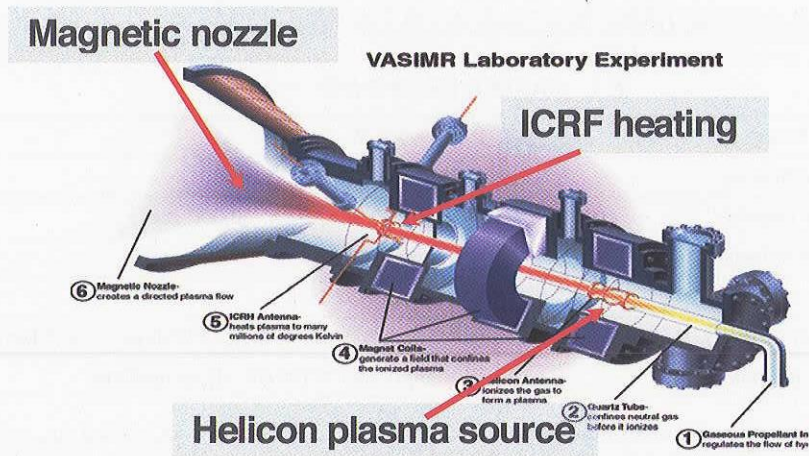


図1 VASIMR 概念図.

このシステムを実現するには高周波によるプラズマ流の生成と加熱，また磁気ノズルによるプラズマ流の加速と離脱に関する技術を確立することが求められている。これまでプラズマの波動加熱研究は核融合を目指した磁場閉じ込めプラズマ中での実験が主であり，高速で流れているプラズマ流への加熱に関する研究は十分に行われていない。加熱部を短時間に通過する間に効率よく加熱をする手法を見出すことや，ドップラー効果など流れに起因する共鳴現象の変化などについて研究を行う必要がある。

現在，この VASIMR 型のプラズマ推進機の開発は NASA の ChangDiaz らのグループと東北大学の HITOP (High density TOhoku Plasma) グループが実験を進めている。我々 HITOP グループでは，直線型磁場発生装置 HITOP に MPDA (Magneto-Plasma-Dynamic Arcjet) をプラズマ源として設置し，プラズマ流の高周波加熱と，高周波印加によって加熱されたエネルギーを流れのエネルギーへと変換させる発散型磁気ノズルに関して研究を行い，イオン加熱と磁気ノズル加速を複合させた比推力の制御を世界で初めて実証した。以下では，VASIMR 型プラズマ推進機開発の現状と課題，そして HITOP 装置にて得られた高速プラズマ流の加熱と加速に関する実験結果について報告する。

2. VASIMR 推進機の開発状況

VASIMR 推進機は有人火星探査用の主エンジンとして提案されたもので，地球を出発して約 3 ヶ月での運行によって火星の周回軌道に到着しうる性能を持つ。電気出力 4MW のロケットエンジンを 3 機使用し，その比推力を 3,000 秒から 50,000 秒まで変化させることで，効率の良い加速運行を行い，約 60 トンの探査船を火星まで移送することを想定している。

電力効率 40%，比推力 10,000 秒，重水素ガスを推進剤とした際に計算されるパラメータを表 1 に示す。密度が 10^{19}m^{-3} 以上の高密度プラズマを高周波によって数 100 eV の温度まで加熱し，磁気ノズルにて加熱されて得た熱エネルギーを流れ方向のエネルギーへと変換させることでこれらの値を実現させることが出来る。

すでに NASA では，2000 年より VX-10 装置を用いて実験研究を開始し，ヘリコン波によるプラズマ生成やイオン加熱研究を行ってきた。しかし，ヘリウムを用いた実験では中性ガスとの荷電交換反応によってイオン加熱が阻害され，うまく実験的検証が行われていなかった。我々は 2002 年より HITOP 装置に MPDA をプラズマ源として設置し高速プラズマ流の高周波加熱実験をおこない，イオン加熱効果を実験的に検証することに成功した。この理由として MPDA では容易に高電離プラズマを生成できることと，短パルス運転のため中性ガスの導入量を制限できるために荷電交換反応によるイオン加熱への悪影響を抑制できたことがあげられる。実験では，磁気ビーム磁場配位においてイオンサイクロトロン共鳴加熱によりプラズマの熱エネルギーが 1 桁以上増加し，イオン温度も 100 eV まで加熱される現象が観測された。電子密度が高くなるとイオン間の衝突が支配的となりサイクロトロン共鳴が起らなくなるため，現在は電子密度が 10^{18}m^{-3} 以下の低密度条件でサイクロトロン加熱現象が観測されている。この結果の概要については以下の章で述べる。

最近では VX-10 グループも，ヘリウムに比べ荷電交換反応率の低い重水素を動作ガスとして用いることで高周波印加用のアンテナ抵抗の増加が確認され，またヘリコン波でのプラズマ生成も 10^{19}m^{-3} 台のプラズマを生成することが出来るようになってきた。今後，高密度条件下でのイオン加熱実験や磁気ノズル加速機構と磁場からの離脱など実験的に明らかにし

ていく必要があるが、これらの今後の課題に関しては最後の章で述べる。

表1 VASIMR推進機の各種パラメータ

Input Power	$P = 4 \times 10^6 \text{ W}$
Power efficiency	$\epsilon = 0.4$
Specific Impulse	$I_{sp} = 10,000 \text{ sec (max. 50,000 sec)}$
Exhaust velocity	$u = I_{sp} g = 10^5 \text{ m/s}$
Thrust	$F = 2\epsilon P/u = 32 \text{ N}$
Propellant rate	$m = F/u = 3.2 \times 10^{-4} \text{ kg/s (170 days --> 4.7 Ton)}$
Exhaust ion energy	$W_i = m_i u^2 / (2e) = 100 \text{ eV (D}_2\text{-propellant)}$
Average ion density at exhaust inlet	$\bar{n}_i = \frac{\dot{m}}{m_i \pi r_p^2 u_{i/0}} = 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} (r_p = 0.2 \text{ m, } u_{i/0} = 10^4 \text{ m/s)}$

3. HITOPにおける実験成果

3.1. HITOP装置

以下では、HITOP装置を用いて行われたイオン加熱と磁気ノズル加速の実験研究について概説する。

本研究で用いたHITOP装置の概略図を図2に示す。真空容器は、長さ3.3 m、内直径0.8 mのステンレス製の円筒容器である。容器外部に磁場コイルを設置しており、各コイルに流す電流値を変化させ、最大磁場強度1 kGの様々な磁場配位を形成することができる。プラズマ源としてMPDAが設置されており、パルス整形回路を介して約1 msec間の準定常放電(最大電流値10 kA)を行う。この時、放電電流と自己誘起磁場とにより軸方向に加速力を受け、イオンマッハ数約1程度的高速プラズマ流が形成される。本研究において動作ガスはヘリウムを使用している [2,3]。

本研究ではイオンサイクロトロン波の励起アンテナとして右回り方向に180°ねじった形状のヘリカルアンテナを用いた。このアンテナを用いることにより、アンテナ長の2倍の波長を持つ波動で、下流方向に左回り(イオンラーマー回転と同方向)に回転する $m = -1$ 非軸対称モードの波を効率よく励起可能である。MPDA下流約0.6 mのところこのヘリカルアンテナを設置し、インバータ型電源を用いて高周波電流をアンテナに給電している。電源の出力部とは変圧器で結合し、2次側に励起アンテナと共振用コンデンサを直列に接続し共振回路を形成している。本研究では励起周波数20 kHz~500 kHz、入力パワー15 kWの範囲で実験を行った。

HITOP装置には高周波電源のほか、電子温度・密度計測のための静電プローブ、流速測定用マッハプローブ、波動観測用の磁気プローブなど各種プローブをはじめ、イオン温度測定用静電エネルギー分析器、プラズマ熱エネルギー計測用の反磁性コイルなどが設置され、種々のプラズマパラメータを計測することができる。

図3に実験を行った磁場配位を示す。励起されたイオンサイクロトロン波の吸収効率を上げるため、MPDA出口およびアンテナ近傍からプラトー領域へと徐々に磁場強度を弱めた磁気ビーチ配位となっている。このプラトー領域下流部にプラ

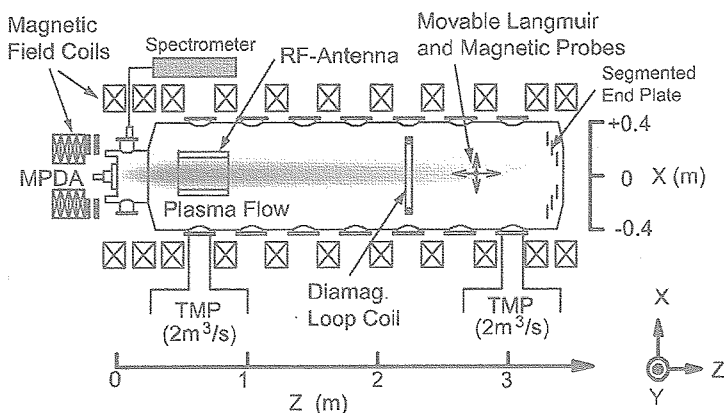


図2 HITOP概略図。

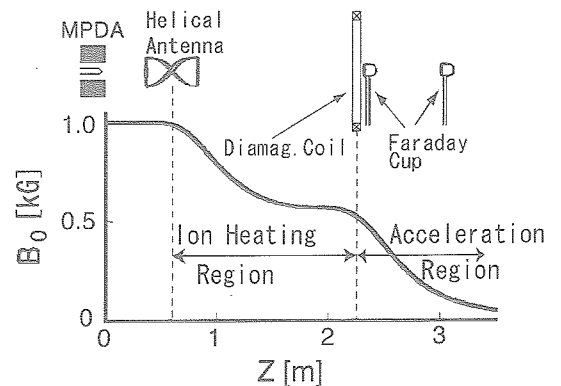


図3 イオン加熱及び加速実験時の磁場配位。

ズマ流の熱エネルギー計測用反磁性コイルを設置している。さらにその下流部には、加熱されて得た熱エネルギーを推進エネルギーへと変換させるための発散型磁気ノズル領域を設けている。

3. 2. プラズマ加熱及び加速実験

アンテナ下流 1.4 m の位置に設置した反磁性コイルを用いてプラズマ熱エネルギー W_{\perp} の測定を行った結果を図 4 に示す。実験条件は密度 $0.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ で、高周波励起周波数 236 kHz、アンテナ径 $\phi 160 \text{ mm}$ である。励起中に熱エネルギー W_{\perp} が急激に上昇し 1 桁以上の増加が見られた。この時、静電エネルギーアナライザ、静電プローブにより反磁性コイル位置でのイオン温度、電子温度を計測したところ、励起中にイオン温度が急激に上昇し、一方で密度分布はほぼ変化していなかった。この結果より、MPDA により生成された高速プラズマ流への高周波印加によるイオン加熱が起こっていることが確認された [4]。

この磁場配位において、プラトー領域の磁場強度を変化させて測定した W_{\perp} の増加率 $(\Delta W_{\perp} / W_{\perp})$ の磁場依存性を測定した。最適な磁場条件はイオンサイクロトロン共鳴条件 $(\omega / \omega_{ci} = 1)$ を満たす磁場強度よりもやや弱磁場側に現れている。この傾向は励起周波数を変えた際にも現れており、プラズマ流に起因するドップラー効果の影響と考えられる。

印加する高周波電力を増加すると、印加電力の上昇とともにほぼ線形に熱エネルギーおよびイオン温度が上昇していることが確認された (図 5 参照)。この時の密度条件は $0.1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ である。実験ではアンテナとプラズマとの結合を改善し加熱効率を上げるために、ヘリカルアンテナの直径を 160 mm から 130 mm へ変更した (プラズマ直径は約 100 mm)。この結果、同じ印加電力に対してイオン温度の上昇率は約 2 倍以上となりイオン温度も約 100 eV まで加熱することに成功した。

このイオンサイクロトロン共鳴加熱効果の密度依存性を図 6 に示す。図に示すように密度が 10^{18} m^{-3} 以下になると急激にイオン温度が上昇していることがわかる。高密度条件下でイオン加熱が顕著に見られない理由として、高密度になるとイオン同士の衝突頻度が大きくなり、イオンがサイクロトロン運動できないためであると考えられる。より高密度条件下での実験を行うためにはイオン同士の衝突周波数の 10 倍以上の周波数の高周波を印加する必要がある、従ってより高い磁場強度が必要となる。

プラトー領域下流部に設置した発散型磁気ノズル部において、加熱によって増加した熱エネルギー (磁場に垂直なエネルギー成分) が推進エネルギー (磁場に平行なエネルギー成分) へと変換されているかを確認するため、静電エネルギー分析器を用いてイオン温度を計測した。分析器の粒子捕集面を流れに対して平行方向に向けて測定した温度を T_{\parallel} 、垂直方向に向けて測定した温度を $T_{i\perp}$ として計測を行った結果、図 7 に示すように磁気ノズル部を通過させることで $T_{i\perp}$ は 90 eV から 27 eV へと減少し、一方で T_{\parallel} は 14 eV から 71 eV へと上昇していた。このとき、垂直方向の温度減少は断熱不変量 μ 一定の条件で予想される値とほぼ一致した。またイオンエネルギー分布関

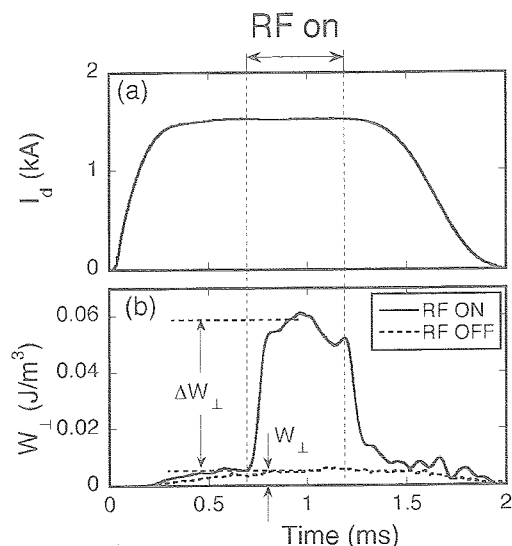


図 4 (a) MPDA 放電電流と (b) プラズマの熱エネルギーの時間変化。

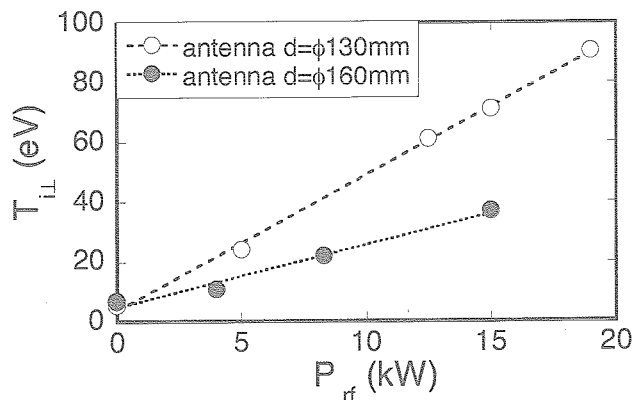


図 5 イオン温度の印加電力依存性。

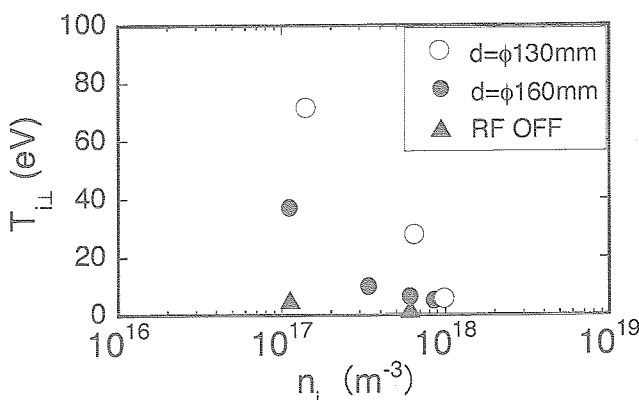


図 6 イオン温度の印加電力依存性。 $P_{rf} = 15 \text{ kW}$ 。

数の計測値からもイオンエネルギーの平行方向成分の増加が確認された。

以上の結果より、高周波によるイオン加熱と磁気ノズルを用いたエネルギー変換によるプラズマ加速が実験的に確認され、100 eVに近づくイオン温度まで加熱することに成功した。さらに、この2つの効果を組み合わせた結果、図8に示すように、印加電力値を変えることで、磁気ノズル下流部から噴出するプラズマ流の T_{\parallel} を変化させることが出来ることも実験的に確認を行った。この結果はVASIMR推進機にて求められる高周波電力制御による比推力の直接制御が可能であることを示す結果である。

4. まとめと今後の課題

有人火星探査用の主エンジンとして期待されているVASIMR推進機の開発の現状と課題について述べた。HITOP装置において、VASIMR推進機の基本技術である高速プラズマ流中のイオンサイクロトロン加熱と磁気ノズル加速に関して実験を行った。ヘリウムを動作ガスとしてMPDAにて高速プラズマ流を生成し、共鳴領域を一度だけ通過する間にイオンが加熱され数eVから約100 eVまでイオン温度が上昇したこと、および磁気ノズル部でのエネルギー変換が磁気モーメント保存則に従って行われたことなど非常に有用な成果を得ることが出来た。一方で、VX-10装置の実験では 10^{19} m^{-3} の高密度プラズマがヘリコン波を用いて生成され、高密度条件下でのアンテナ抵抗が上昇しプラズマとアンテナとの結合度が上昇したことなどの成果が得られている。これらの成果は、VASIMR推進機実現にとって必要な3つの基本技術が実証されたことを示している。

今後、実用化への課題として、 10^{19} m^{-3} 以上の高密度条件下でのイオン加熱の実証、プラズマ生成効率、加熱効率の向上、不要な中性ガスを発生させない動作条件の確立などを実験的に探求する必要がある。また、このような高密度条件下では印加周波数は10 MHz以上となり、共鳴磁場も1 T以上の強磁場が必要となる。これを発生する超伝導コイルの宇宙環境下での実証研究や、噴出したプラズマが磁場から離脱しうるかどうかなど地上では実験が困難な課題などについて宇宙ステーションなどを利用した実証研究を進めていく必要がある。

謝 辞

本研究の遂行にあたり協力頂いた大学院生の柴田雅希君、笠嶋悠司君に感謝致します。なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号15340196）のもと遂行されました。同時に核融合科学研究所一般共同研究および宇宙科学研究所共同研究として実施され、議論頂きました多くの共同研究者の方々に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] F.R. ChangDiaz, et.al., "The Physics and Engineering of the VASIMR Engine" Proc. of 36th JPC, (Huntsville, 2000), AIAA-2000-3756, pp.1-8.

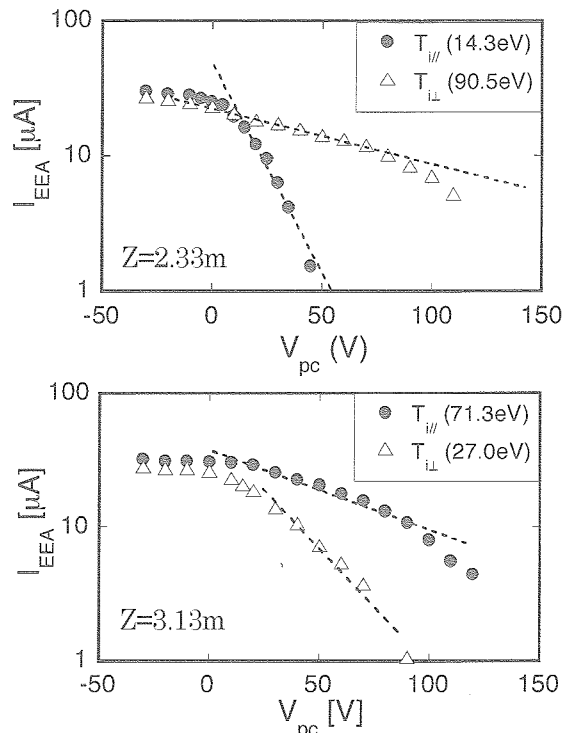


図7 磁気ノズル部の上流部 ($Z = 2.33 \text{ m}$) 及び下流部 ($Z = 3.13 \text{ m}$) でのイオン温度計測結果。

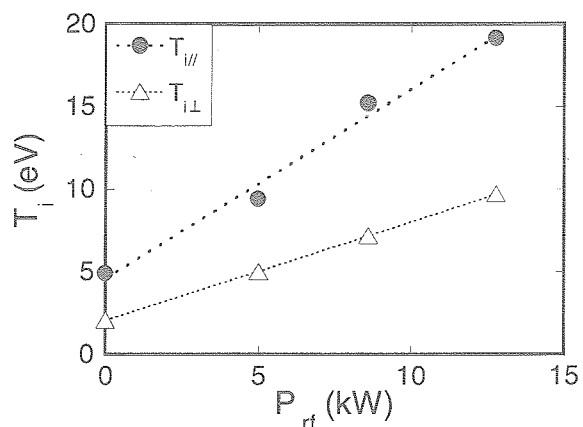


図8 磁気ノズル部の下流部 ($Z = 3.13 \text{ m}$) でのイオン温度の印加高周波電力依存性。

- [2] M. Inutake, A.Ando, K. Hattori, et.al., “Characteristics of a Supersonic Plasma Flow in a Magnetic Nozzle” J. Plasma Fusion Res., 78, 1352 (2002).
- [3] M. Inutake, A. Ando, K. Hattori, et.al., “Magnetic-Nozzle Acceleration and Ion Heating of a Supersonic Plasma Flow” Transactions of Fusion Technology, 43, 118 (2003).
- [4] A. Ando, H. Hosokawa, et.al., “Ion Heating Experiment by a Helical Antenna in a Fast Flowing Plasma” Thin Solid Films, 506–507C, 601 (2006).