

# 無電極イオン加速： VASIMR と DoubleLayer 加速

安藤 晃\*

Gridless Ion Acceleration – VASIMR and DoubleLayer type plasma thruster –

By

Akira ANDO\*

**Abstract :** 高比推力という特長をもつ電気推進機の大電力化は物資補給や有人探査計画にとって必須の開発項目の一つである。長期ミッションに対応しうるイオン加速手法として、電極を使わずにイオンを加速する手法が有用である。無電極イオン加熱手法として、高周波加熱と磁気ノズルを用いた VASIMR エンジンと、発散型磁気ノズル部に急激に変化する電位構造が形成されイオン加速が行われるダブルレイヤー加速機構について概要と研究内容について報告する。

**Key words :** イオン加速, 磁気ノズル, VASIMR, 電気 2 重層

## 1. はじめに

宇宙開発はロケット開発の時代から月への有人飛行探査の時代を経て、地球帰還型の再利用可能な宇宙機の登場によって地球近傍の周回衛星開発や宇宙ステーションの世代を迎えている。現在では国際宇宙ステーション (ISS) が順調に稼働し、我が国の「きぼう」も搭載され稼働し始めるなど、我が国の宇宙開発も国際協力のもと多くの技術開発力を有するまでになった。宇宙開発は未踏領域の開拓という科学的な目的だけでなく培われてきた技術は気象、資源、通信、宇宙科学探査用など数多くの衛星打ち上げに応用され、我々の生活の利便性を飛躍的に向上させてきた。さらに、宇宙開発に伴い開発された数多くの特殊技術や機能性材料は広く他分野へも応用され、人類共通の資産として多くの人々に役立つ技術となっている。

今後宇宙開発は地球周回軌道を離れ、月から火星へさらには太陽系惑星探査を目指した大型衛星開発など新たな段階を迎えている。このようなミッションでは高速に移動できる宇宙推進システムが要求されるが、従来の化学燃料ロケットでは噴出する高温状態のガス排出速度が数 km/s にとどまるため、衛星の速度増分  $\Delta V$  の値に制限があり実現が困難となる。有人惑星探査では添乗する宇宙飛行士の安全上、ミッション自体の期間短縮が最重要項目であり、このような探査計画ではプラズマを利用した電気推進システムが必要不可欠となる。

電気推進機の開発は 20 世紀中頃より開始され、特に近年は人工衛星の小型化、高機能化に対応し、ペイロード比を増やすことのできる電気推進機が注目され実用に供されつつある。すでに小電力 DC アークジェットやホーススラスターといった推進効率の高い電気推進機が地球周回衛星に搭載されている。宇宙探査機の主力エンジンとして電気推進機が利用され始めたのは 10 年ほど前からで、我が国でも 2003 年に打ち上げられた「はやぶさ」に 4 台のイオンエンジンが搭載され、小惑星「ITOKAWA」とのランデブー後、帰還の途についている。今後月から火星に向けた有人の惑星探査計画が本格化するにつれ、大型の電気推進機の需要が増すものと考えられる。イオンエンジンやホールスラスター、MPD スラスターなどが有望な推進機となりうるが、高い推力を出すために大電力化をした推進機を長期のミッションに耐えて動作させるためには電極の損耗など解決すべき課題が多い。

近年、電極を使わずにイオン加速を行う試みが始まられ基礎実験に成功している。無電極イオン加速手法として本稿では VASIMR エンジンと Double Layer 加速機構について概要と研究内容について紹介する。

---

\* Graduate School of Engineering, Tohoku University

## 2. VASIMR エンジン

### 2.1. VASIMR エンジンとは

比推力可変電気推進機 VASIMR (VAriable Specific Impulse Magneto-plasma Rocket)は NASA の Dr. F.R.ChangDiaz を中心としたグループによって提案され、ジョンソン宇宙センターにある ASPL(Advanced Space Propulsion Lab.)で開発実験が開始された新しいプラズマ推進機である [1,2]。この推進機の概略を図1に示す。このシステムでは、ヘリコン波を用いてプラズマ生成を行い、高周波を用いたイオンサイクロトロン共鳴によって加熱した後、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、一定の印加電力下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。

このような比推力可変型の大出力推進機を用いることによって、1年間で火星まで往復する有人惑星探査ミッションを計画することが可能となる。初期の計画によれば、約 61 トンの火星着陸船を乗せた総重量 188 トンのロケットで地球周回軌道を出発し、30 日間をかけて地球周回を回りながら加速した後約 3 ヶ月で火星に到着する。火星着陸船を切り離した母船は 4 ヶ月に再び火星近傍に近づき、火星表面での作業を終えたクルーと合流する。その後再び 3 ヶ月の飛行を経て地球に帰還する計画が立てられた。この間に、宇宙船のエンジンは電気出力 4MW の推進機を 3 台搭載し、運転を行う。宇宙船の加速ミッションに合わせて推進機の比推力を巡航中に大きく変化させることでこのミッション計画を策定している。このミッションに必要な比推力は最大 5 万秒（地球帰還時）であり、大出力で高比推力動作可能なエンジンの推力／比推力を制御することにより、従来にない短期間での大型輸送船を用いた有人惑星探査計画が可能となる。

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。プラズマの波動加熱は核融合を目指したプラズマ磁場閉じ込め研究で精力的に進められ実績を上げているが、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プラズマを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、閉じ込め plasma とは異なった現象が現れるため、詳細に研究を行う必要がある。また、加熱された plasma の熱エネルギーを効率よく推進エネルギーへと変換する磁気ノズル配位の最適化や、磁力線からの plasma 流離脱現象など解決すべき課題は数多い。下記では、東北大学の HITOP(HIgh density TOhoku Plasma) 装置において、MPDT (Magneto-Plasma-Dynamic Thruster) を plasma 源として行った高速 plasma 流の波動加熱と磁気ノズルによる加速効果の研究について紹介する。

### 2.2. 高周波加熱と磁気ノズルによるイオン加速実験

本研究で用いた HITOP 装置（図2）は全長 3.4m、直径 0.8m の円筒状真空容器中に、plasma 源として MPDT を用いてイオンマッハ数約 1 程度の高速 plasma 流を形成している[3,4]。11 個の大型外部磁場コイルを用いて種々の磁場形状を生成することが可能である。MPDT 下流約 0.6m のところに設置した励起アンテナに、インバータ型電源を用いて高周波電流を給電している。本研究では励起周波数 20kHz～500kHz、入力パワーは 20kW 以下の範囲で実験を行った。図2には実験を行った磁場配位も示す。励起されたイオンサイクロトロン波

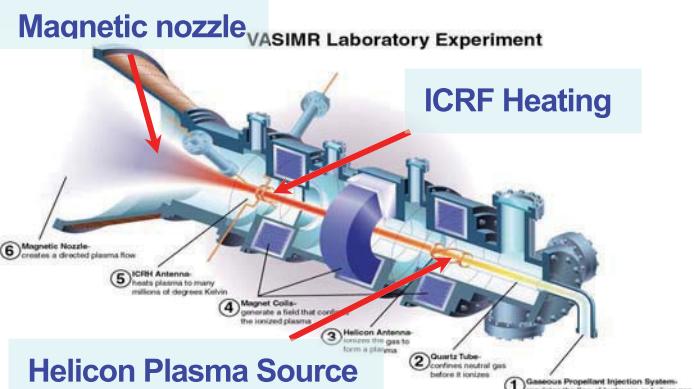


図1 VASIMR エンジンの概略図

の吸収効率を上げるために、MPDT 出口およびアンテナ近傍での磁場強度 ( $B_U$ ) からプラート一部の磁場強度 ( $B_D$ ) 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。さらにその下流部では、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部を設けている。

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、プラズマ蓄積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。

MPDT によって生成されたプラズマ流に対し、ヘリカルアンテナを用いて高周波電力を印加した際の加熱効果を計測するために、アンテナ下流 1.4m 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  $W_{\perp}$  の変化を測定した。典型的な放電波形を図 3 に示す。図に示すように、高周波励起中に急激に熱エネルギー  $W_{\perp}$  が上昇し、MPDA により生成された高速プラズマ流の高周波加熱が起こっていることがわかる。プラート一部の磁場強度 ( $B_D$ ) を変化させたとき  $W_{\perp}$  の増加率 ( $\Delta W_{\perp} / W_{\perp}$ ) が最大となる最適な磁場はイオンサイクロトロン共鳴条件 ( $\omega / \omega_i = 1$ ) を満たす磁場強度よりもやや弱磁場側であった。この傾向は励起周波数を変えた際にも現れており、

プラート一部（加熱部）下流部 ( $Z=2.33\text{m}$ ) と、発散型磁気ノズル下流部 ( $Z=3.13\text{m}$ ) に静電エネルギー分析器を設置して、磁力線と垂直方向のイオン温度と平行方向のイオン温度を計測した。図 4 に印加高周波電力を変化させた場合の依存性を示す。加熱部下流 ( $Z=2.33\text{m}$ ) では、加

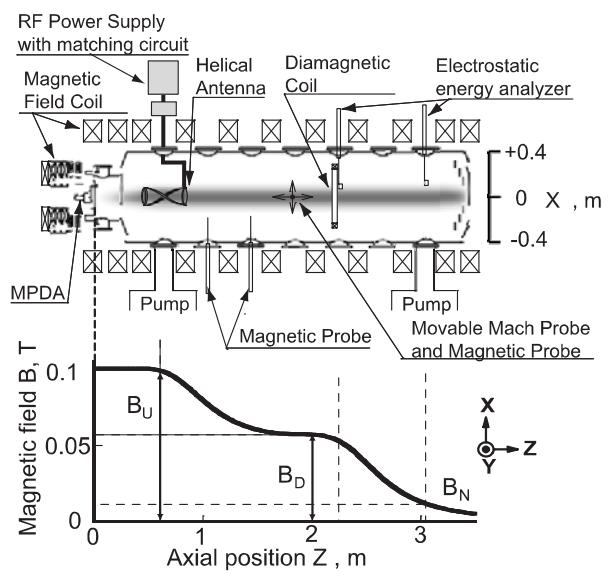


図 2 HITOP 装置概略と磁場配位

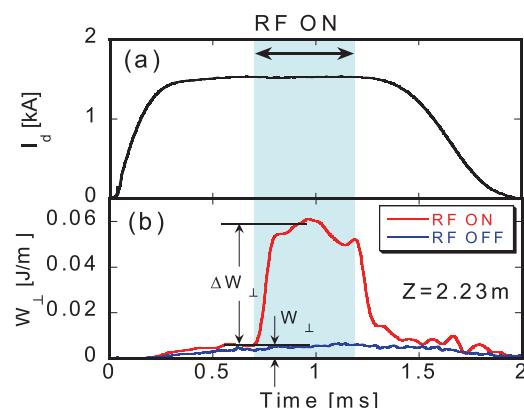


図 3 典型的放電波形 (a)MPDT 放電電流  $I_d$ , (b) 反磁性信号  $W_{\perp}$ .  $P_{RF}=15\text{kW}$ ,  $f_{RF}=0.24\text{MHz}$ ,  $n_e=5.0\times 10^{17}\text{m}^{-3}$ ,  $B_U=0.1\text{T}$ , and  $B_D=58\text{mT}$ .

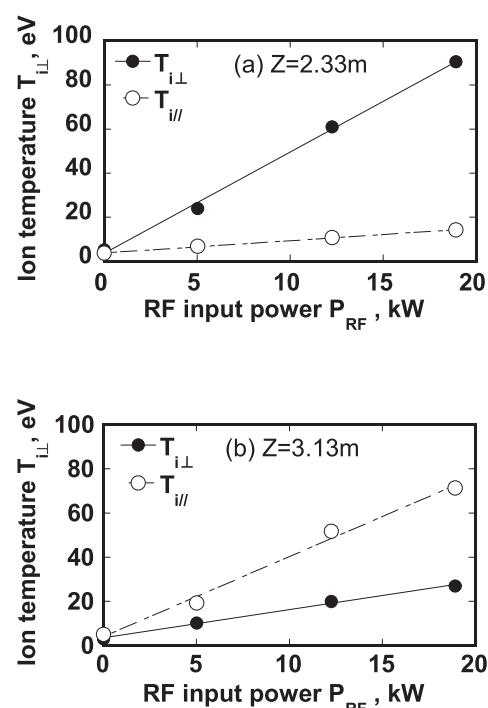


図 4 イオン温度 ( $T_{\parallel}$  と  $T_{\perp}$ ) の高周波電力依存。  
(a) $Z=2.33\text{m}$  及び (b) $3.13\text{m}$ .  $f_{RF}=0.24\text{MHz}$ ,  $n_e=1.0\times 10^{17}\text{m}^{-3}$ ,  $B_D=57.5\text{mT}$ , and  $B_N=17.2\text{mT}$ .

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）が強く増加しているのがわかる。一方で、磁気ノズル下流部( $Z=3.13\text{m}$ )では、磁力線と垂直方向の温度は加熱部下流より減少する一方で推進エネルギー（磁場に平行なエネルギー成分）が増加しており、磁気ノズルによって熱エネルギーから推進エネルギーへと変換されているのが確認された。このとき、垂直方向の温度減少は断熱不変量 $\mu$ 一定の条件で予想される値とほぼ一致した。印加する高周波電力を変化させたとき、印加電力の上昇とともにほぼ線形に推進エネルギーが上昇しており、この手法によって比推力を変化させることが出来ることがわかる[5, 6]。

以上述べたように、MPDTにより生成された高速・高密度プラズマ流に高周波加熱実験を行ったところ、磁気ビーチ磁場配位においてイオンサイクロトロン共鳴加熱が起こり、プラズマ流の熱エネルギーが増加する。さらに、この熱エネルギーは、発散型磁気ノズル部において推進エネルギーへと変換されていることを確認することができた。このように HITOP 装置において、先進宇宙推進機 VASIMR の基本原理実証実験に成功したが、今後、磁力線からのプラズマ脱離問題や高効率化、大出力化に向けた実験研究をさらに進めていく必要がある。

一方、NASA からスピンオフした AdAstra Co.では、F.R.ChanDiazを中心に行われた ASPLでの実験を継続し、大電力化をはかった実験を遂行している。プラズマ源はヘリコン波プラズマ源を用いることで  $10^{19}\text{m}^{-3}$  を越えるプラズマの生成を実現し、イオン加熱効果も確認されている。特に推力を上げるために推進剤としてアルゴンを利用し、RF電力も FET 電源を用いた実験も行っている。現在は印加可能電力を 200kW まであげた VX-200 装置での実験を開始したところである。この実験をふまえて 2012 年をめどにフライタモデルを ISS へ搭載し、宇宙環境下での実証試験を目指している。

### 3. Double Layer イオン加速

ダブルレイヤー（電気2重層）とは、正の電荷層と負の電荷層が隣り合う電場構造であり、プラズマ境界に形成されるシースとともに、古くからその存在が知られ多数の研究がなされてきた。熱陰極放電における陰極前面部や放電管の直径が局所的に変化している場所などに形成されることが典型例として知られている[7,8]。

電気二重層に伴う電位構造は、図 5 に示すように途中に変曲点を持ち、正電位層から負電位層の方向へ単調減少する形をしている。このような電位構造では、低電位側からは電子は加速されて高電位側へ流入するが、イオンは、高エネルギーイオンを除き反射される。一方で、高電位側からはイオンは加速されて低電位側へ流入するが、高エネルギー電子を除く電子は反射される。この際、高電位側のイオンは音速以上の速度で電気二重層に流入する必要があり、低電位側の電子はその熱速度以上で電気二重層に流入することが必要であることがボーム条件から要求される。

電気二重層はこのように互いに逆方向に流れる加速電子とイオンを伴うが、一方で、これらに起因する不安定により電気二重層が破壊される。電気二重層の形成と安定性はプラズマ中における非線形現象の典型例として注目され、これまでにも数多くの理論および計算機シミュレーションが行われている。また、電気二重層は磁力線に沿った方向に電場が形成されるため、磁気圏でのオーロラ現象を生じさせる高速電子の生成機構としてこの電気二重層による沿磁力線方向電界による加速が注目され、衛星観測やシミュレーション研究が進められている。

最近、発散型形状の磁気ノズルの高磁場領域にプラズマ源を置き、磁気ノズルに沿って流出するプラズマ流中に電気二重層が観測され、形成された電位差によってイオン加速が起こっていることが C. Charles や R.W.

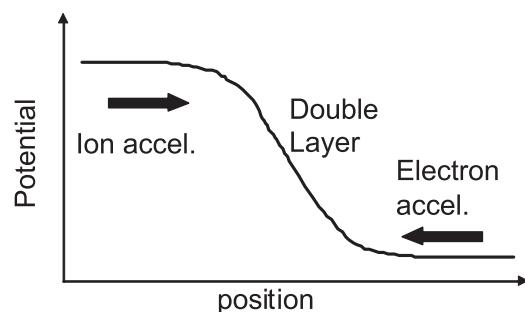


図5 Double Layer（電気2重層）における電位分布

Boswell らのグループによって観測された[9,10].

通常、磁力線に沿って荷電粒子は自由に移動できるため、質量の軽い電子が速く拡散し、イオンを加速する方向に両極性電場が生じる。この電場の大きさ  $\phi(z)$  はボルツマン式  $n(z) = n_0 \exp(e\phi(z)/T_e)$  によって密度分布と電子温度に関連して発生する。

磁场配位や密度条件など、ある特定の条件下において磁场の変曲点近傍で図 6 に示すような電気 2 重層が形成されることがある、その場合、下流部に向かって無電極イオン加速が引き起こされる。これを利用して推進機として利用しようとするのが DoubleLayer 加速推進機である。種々の磁场配位やプラズマ条件下でのイオン加速が観測され、推力計測なども行われている[11]。形成される静電場は電子温度の約 5 倍程度であるため数 10V 程度のイオン加速が期待されるが、今のところ  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  以下の低密度条件下で電気二重層が形成されている。今後、より高密度条件下での電場形成や、電場構造の制御手法などが推進機への応用にとって必要である。

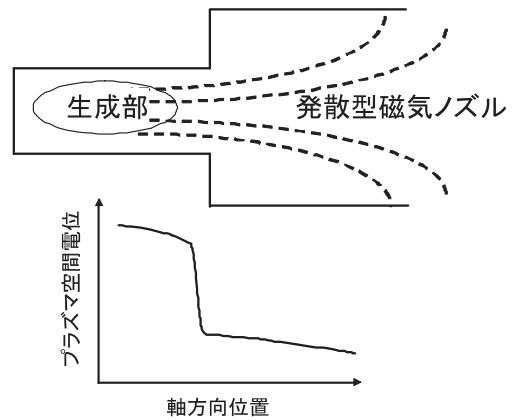


図 6 発散型磁気ノズル配位における Double Layer 形成と電位分布

#### 4. まとめ

今後、地球重力圈外での宇宙開発、利用計画において電気推進機の果たす役割はますます大きくなっていくことは間違いない。電気推進機の持つ高比推力特性を生かし、推力も含めた高い推進性能を發揮するために大電力化は必須の開発項目の一つである。もちろん電気推進機単体での開発だけでなく、太陽電池あるいは原子力利用を含めた電源開発など多様な機器開発とシステム設計が必要であり、長期的な視野に立った研究開発が必須である。本稿では無電極イオン加速手法として注目されている VASIMR ロケットと DoubleLayer 加速機構の概要を紹介したが、このほかにも種々の方式が大電力電気推進機の候補として研究開発が進められている。日本の電気推進技術は、イオンエンジンに代表されるように、宇宙開発技術の中で世界をリードしうる数少ない分野の一つであり、大電力化に向けた戦略的な研究開発の取り組みが期待される。

#### 参考文献

- [1] Chang Diaz F.R. et al., "The Physics and Engineering of the VASIMR Engine", Proc. of 36th Joint Propulsion Conference, ( Huntsville, AIAA-2000-3756), p.1, (2000).
- [2] Squire J.P., et al., "High power light gas helicon plasma source for VASIMR", Thin Solid Films, Vol.506, p.579 (2006).
- [3] Inutake M., et al., "Generation of supersonic plasma flows using an applied-field MPD arcjet and ICRF heating", Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol.49, p.A121 (2007).
- [4] Tobari H., et al., "Characteristics of electromagnetically accelerated plasma flow in an externally-applied magnetic field", Physics of Plasmas, Vol.14, 093507 (2007).
- [5] Ando A., et al., "Alfvén wave excitation and single-pass ion cyclotron heating in a fast-flowing plasma", Physics of Plasmas, Vol.13, 057103 (2006).
- [6] Ando A., et al., "Ion heating and acceleration experiment in hydrogen plasma for the VASIMR-type Thruster", Proc. of the 30th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2007-191, p.1 (2007).
- [7] Block L.P., et al., "A double layer review", Astrophys. and Space Sci. Vol.55, p.59 (1978).

- [8] Allen J.E., "Some researches on double layers", *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, Vol.27, p.1343 (1985) .
- [9] Charles C., "A review of recent laboratory double layer experiments", *Plasma Sources Sci. Technol.* Vol.16, p.R1 (2007).
- [10] Charles C., Boswell R.W., "Current-free double-layer formation in a high-density helicon discharge", *Appl. Phys. Lett.* Vol.82, p.1356 (2003).
- [11] Charles C., Boswell R.W., "Effect of Exhaust Magnetic Field in a Helicon Double-Layer Thruster Operating in Xenon", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.36, p.2141 (2008).