

電気推進の現状と今後の展望

國 中 均 *¹

Diverse Expansion of Electric Propulsion

By

Hitoshi KUNINAKA*¹

Abstract: The microwave discharge ion engine $\mu 10$ has long life and high reliability because of electrode-less plasma generation in both the ion generator and the neutralizer. Four $\mu 10$ s, each generating a thrust of 8 mN, propelled Hayabusa explorer to asteroid Itokawa. Electric propulsions including DC arcjets, MPD arcjets, Hall thrusters as well as ion engines generate jets much faster than those of chemical rockets and make spacecraft fly by power in deep space so as to reach planets and objects. Diverse space technologies such as the orbit determination, orbit planning, automation, space communication, space propulsion, and so on, will establish the new concept and real system on “Deep Space Transportation” between near Earth and deep space progressing from Space Transportation System between Earth surface and LEO/GEO.

概 要

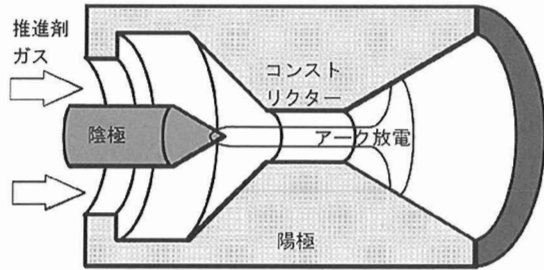
日本独自のシステムとして、長寿命・高信頼を特徴とするマイクロ波放電式イオンエンジンが開発され、「はやぶさ」小惑星探査機に応用された。これ以外にも、DC アークジェット、MPD アークジェット、ホールスラスタなど、各種電気推進が研究開発されている。これらは、従来の化学推進より高い噴射速度をもち、効率的な推進剤利用によって宇宙機の長寿命化に貢献する。また、慣性（弾道）飛行していたこれまでの「人工惑星」「人工衛星」とは異なり、電気推進を搭載する宇宙機は、動力航行する能力を持ち、大型ロケットを用いずとも遠方への到達を可能にし、「宇宙船」に分類されるべき新しい技術である。今後立案される深宇宙探査においては、数百 kg のペイロードを目的天体へ運ぶ、1 トン級の宇宙機の実現が見込まれる。これは、地球表面と近地球を往復する旧来の宇宙輸送系に対して、近地球と深宇宙を結ぶ「深宇宙輸送システム」という新しい概念を導くであろう。

1. 電 気 推 進

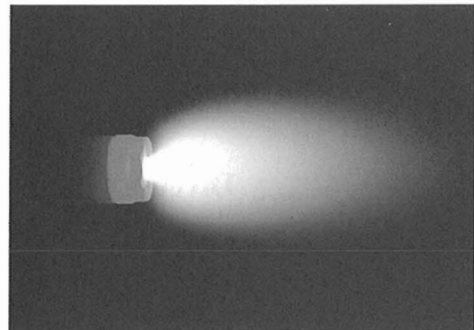
最小の初期質量で出発して、最大の最終質量を目的地に届かせること、つまり少ない推進剤消費が、宇宙推進に課せられた最大の命題である。そのためには、宇宙にて大電力を調達するとともに、高速噴射ジェットを発生させる必要がある。従来の化学推進では、噴射速度 5 km/s が上限であった。これを優に上回る電気推進には、長年に亙り多くの研究開発努力が注がれてきた。図 1 に、代表的な電気推進を掲げる。DC アークジェットは電熱加速、MPD アークジェットは電磁加速を主な機構としている。ホールスラスタは、旧ソ連にて開発され、最も盛んに研究開発が進められている。イオンエンジ

* 1 Professor, Department of Space Transportation Engineering, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, kuminaka@isas.jaxa.jp

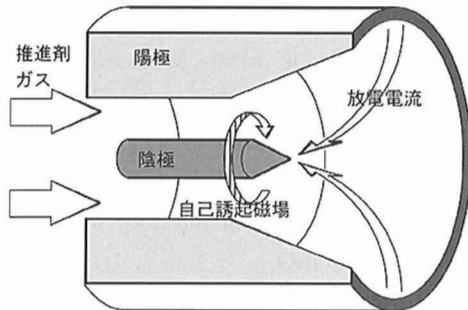
ンは、宇宙作動実績のある電気推進である。尚、図1はいずれも ISAS 電気推進工学部門で試験中に撮影された写真である。



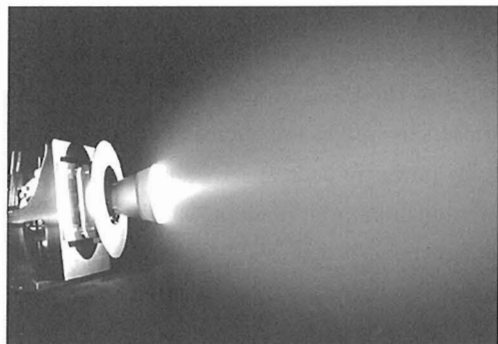
(a) DCアークジェット



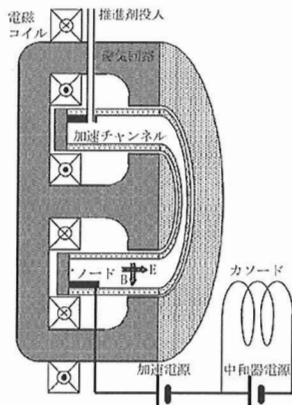
SAGAMI シリーズ



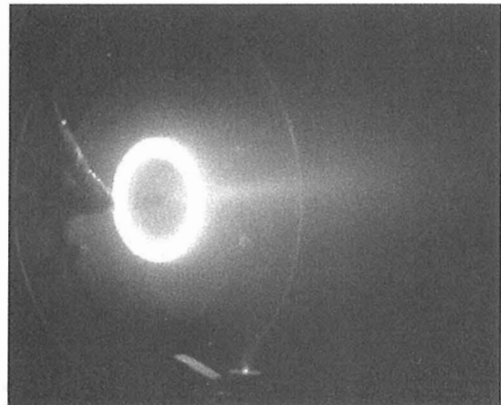
(b) MPDアークジェット



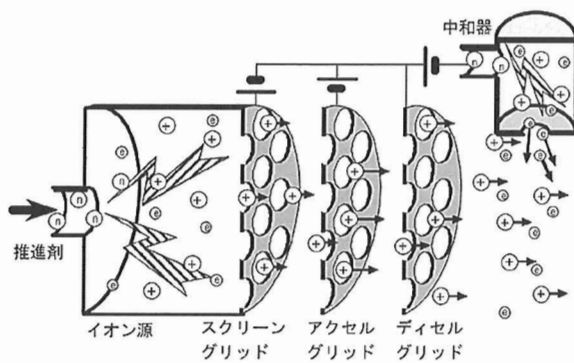
KOMABA シリーズ



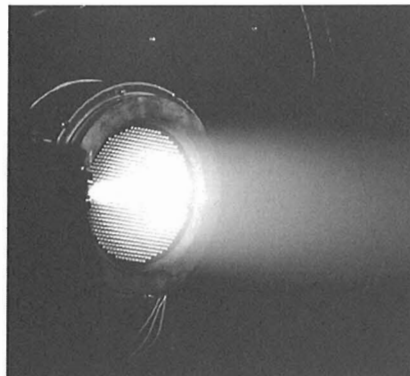
(c) ホールスラスタ



OHNO シリーズ



(d) イオンエンジン



YOSHINO シリーズ

図1 各種電気推進

2. はやぶさ小惑星探査機

「はやぶさ」小惑星探査計画は MUSES-C プログラムとして宇宙科学研究所が1995年に開発に着手した。イオンエンジンによる深宇宙動力航行と地球スイングバイ航法を組み合わせた世界初の軌道変換を用い、2年半かけて地球から小惑星「いとかわ」に遷移してランデブーを果たした¹。打ち上げ全質量約500 kgで、両翼2葉の太陽電池により地球近傍にて2.6 kWの発電能力があり、搭載4台のイオンエンジンのうち最大3台までを同時運転し、24 mNの推力にて1日約4 m/sの増速を得ることができる。宇宙作動の想像図を図2に掲げる。

「はやぶさ」は2003年5月9日、鹿児島宇宙空間観測所からM-Vロケット5号機にて深宇宙へと投入された²。打ち上げ当初の試験運転にて、イオンエンジンを点火すると探査機が増速して行く様を通信波のドップラーシフトから実時間で確認した(図3参照)³。11時15分ころに3台のイオンエンジンが順番に点火されると、地上管制室のマヌーバモニタが描画する探査機の数値曲線がみるみる上昇を始め、12時45分にエンジン停止とともに平坦に復帰している。このようなデータから発生推力を宇宙作動実績として計測に成功し、地上試験値とのよい一致を得た。太陽距離に依存して発生電力が大きく変動するので、効率的に推力発生するために、スロットリング機能や運転台数を調整して軌道変換を実施した。その様子を図4に2004年9月からの1ヶ月半の動作状況を示す。太陽距離の拡大に伴って徐々に発生電力が小さくなる。これに合わせて週替わりで推力を次第に絞る運転を実施し、10月に初めには3台から2台運転に切り替えた。図中1日単位で電力の変動がみられるが、これは普段はなるべく多くの電力をイオンエンジンに供給し、地球との通信時間帯になるイオンエンジンを1台停止して搭載送信機をパワーオンする。通信が終了すると、送信機をオフしてイオンエンジンを再起動するシーケンスの繰り返しを示す。一度送信機をオフしてしまうと、「はやぶさ」の状況を知る術がなくなるので再起動が正常に履行されたか否かは翌日の確認となるのだが、このような自動運転が予定通り実施できることは、このマイクロ波放電式イオンエンジンの信頼性と操作性の高さを示している。2004年2月に近日点距離0.86天文単位、2005年2月に遠日点1.7天文単位を無事通過して、深宇宙動力航行する宇宙船として地球公転軌道の内側外側両方の最遠を走破した

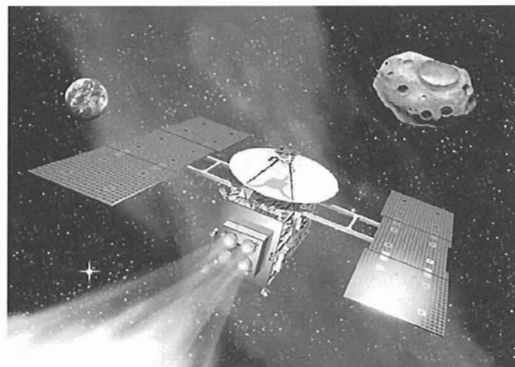


図2 はやぶさ小惑星探査機の宇宙動力航行

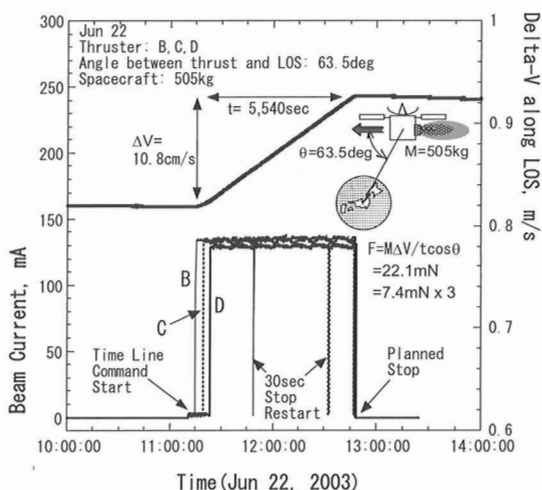


図3 イオンエンジンによる探査機加速の実測

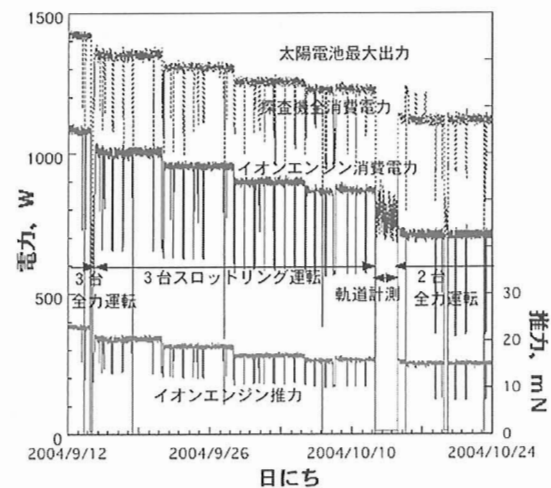


図4 スロットリング運転

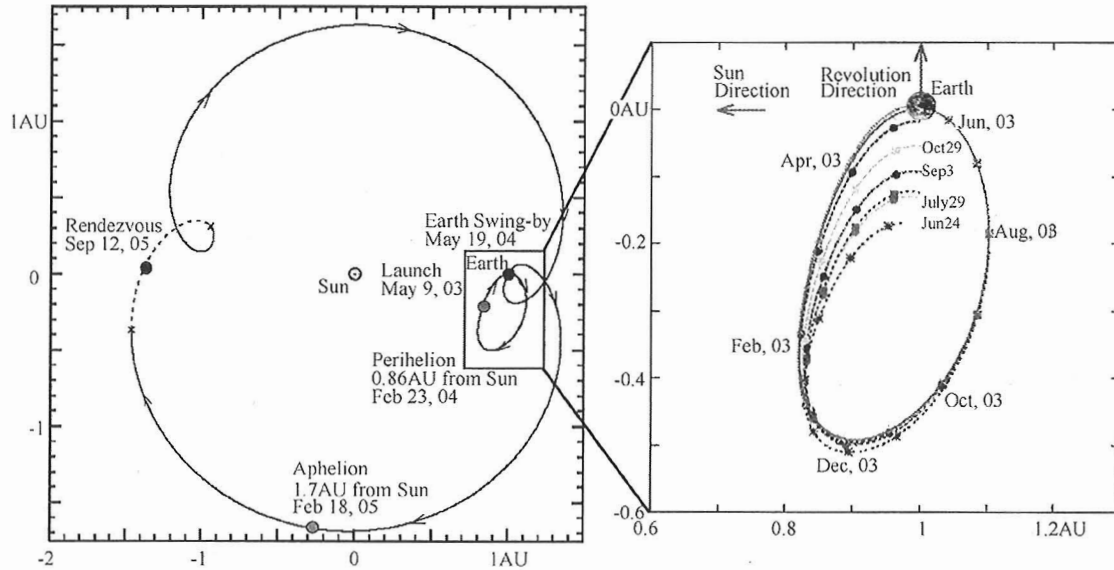


図5 はやぶさ小惑星探査機の軌道変換

(図5参照). 2年4ヶ月に及ぶ宇宙航海を経て, 2005年9月に目的天体へのランデブーを成功させた. その間, マイクロ波放電式イオンエンジンは延べ2万6千時間の作動を行った.

3. 「宇宙輸送系」から「深宇宙輸送システム」へ

マイクロ波放電式イオンエンジンが「はやぶさ」往路で達成した約2万6千時間の延べ作動時間は, 世界の宇宙機関や組織がその宇宙実績確立に切磋琢磨するイオンエンジン技術の中にあつてトップクラスの成果である. これまでの宇宙機はロケットにより初速を与えられた以降は慣性飛行しており, その運動の様は月や惑星と同じであるから「人工衛星」「人工惑星」と呼ばれる. 図6にこれまで宇宙科学研究所が打ち上げ運用を行ってきた深宇宙科学探査機の軌道変換能力と推進剤搭載率の変遷を示す. 打ち上げの度に軌道変換能力は倍々の割合で上昇している. 「はやぶさ」では軌道変換能力 4 km/s を越えているが, この値は地上打ち上げロケットの1段当たりには匹敵する. これと並行して燃料搭載率も次第に上昇し, 化学推進を利用するシステムではついには50%にまで達した. 一方, 電気推進を擁する「はやぶさ」では推進剤量は僅か13%, 混載する化学推進が用いる燃料を含めても25%に抑えている. 宇宙機が自ら軌道変換能力を得ることは, ロケットの巨大化を伴わずに深宇宙探査を実現できるので, まさに「宇宙船」の称号が相応しい.

宇宙機の軽量化と大電力化がさらに進みつつある. 「はやぶさ」では 5 kW/トン という質量・電力比により深宇宙動力航行を実現したが, 米国ではさらに大電力化を図った宇宙機の打ち上げが控えている. 大電力に支えられて電気推進を大推力化すればより積極的な宇宙機動が実現される. この状況に対応するため, 「はやぶさ」で実証したイオンエンジン $\mu 10$ の技術を継承して, さらに技術展開を窺っている. 研究開発中3機種イオンエンジンの推力・電力の分布と, 応用展開分野の関係を, 図7に掲げる. $\mu 10$ は消費電力 350 W , 推力 8 mN であるが, これを 900 W , 27 mN に性能向上させた $\mu 20$ と, $\mu 10$ を元にさらに3倍の高速噴射を目指すのが $\mu 10 \text{ HIsp}$, 微小推力に対応する $\mu 1$ である.

$\mu 10$ が推力 8 mN にて, 初期質量 500 kg のはやぶさ探査機を宇宙機動したことを考え合わせれば, $\mu 20$ を主推進として用いれば, 1トン級の宇宙機が実現し得る. この規模であれば, 数百 kg のペイロードを搭載し, 目的天体に到達させることが可能であり, 「はやぶさ MKII」宇宙ミッションとして実現を目指している. この技術は, 新しい宇宙システム概念「深宇宙輸送システム」を創成する. これまでの宇宙輸送系が地球表面と近地球とを往復するのに対し, 近地球あるいは宇宙港と深宇宙の往来を担う. 本稿で力点を置いて記述している宇宙推進技術のみならず, 軌道決定・軌道計画・自動化・超遠距離通信など多くの宇宙技術の集積によって初めて実現できるシステムである. 火星を越えたさらに深遠な宇宙に到達するには, $\mu 10$ よりも高速噴射ジェットを発生する $\mu 10 \text{ HIsp}$ が期待される. スピン安定による薄膜軽量太陽電池を用いて, 宇宙で大電力を調達し, イオンエンジンを駆動する「電力ソーラーセイル」にて木星を狙う計画を進めている.

深宇宙にのみ留まらず, 近地球においても電気推進は宇宙活動に深く貢献できる. はやぶさにてその長寿命と高信頼を実証した $\mu 10$ イオンエンジンを小型静止衛星に利用する研究開発に新たに着手した. 電気推進を静止衛星の南北制御に, 他は化学ロケットを用いるのが従前であるが, 東西・離心率・軌道半径・姿勢制御を含むすべてに電気推進を用いる「全

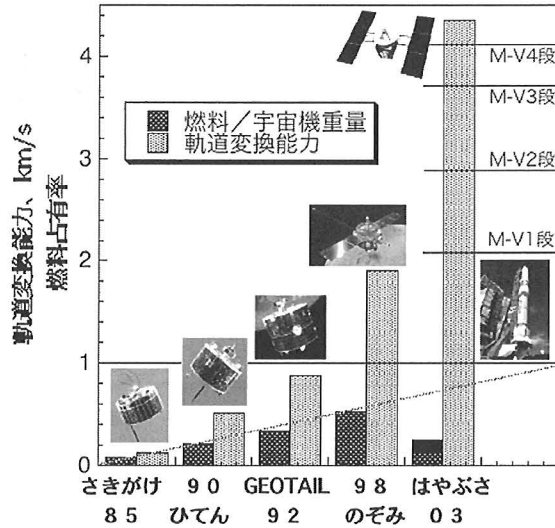


図6 深宇宙機の軌道変換能力と推進剤占有率

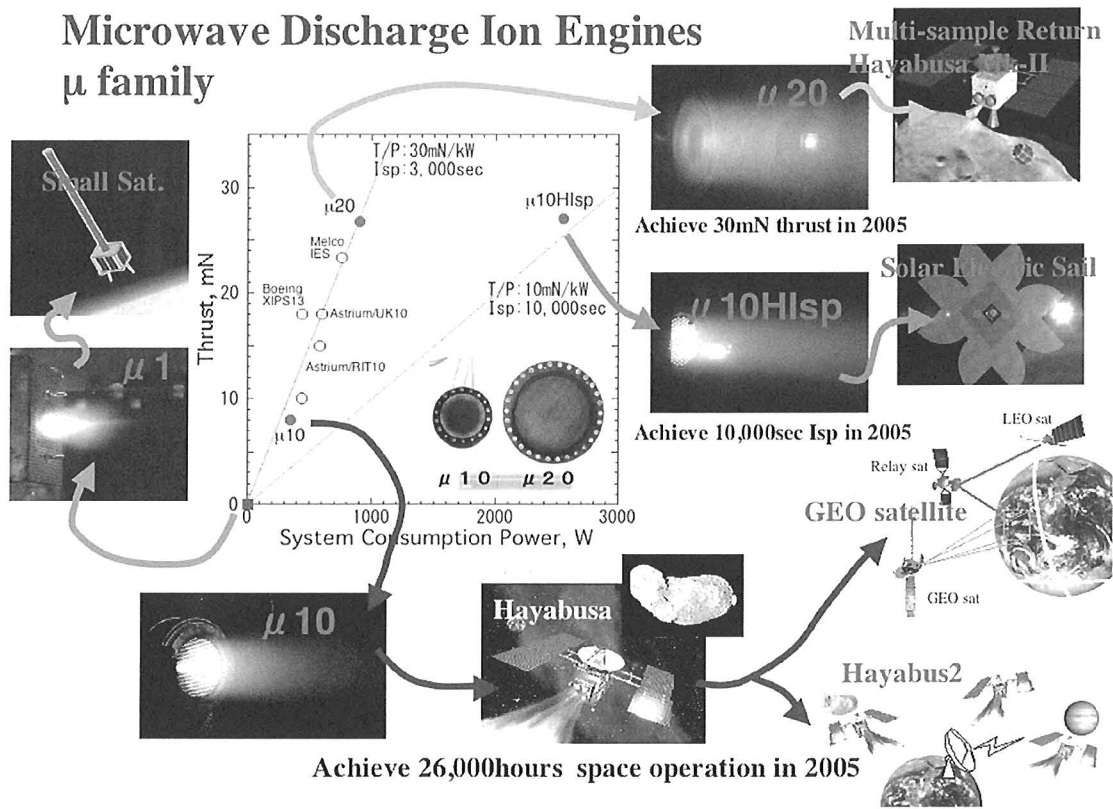


図7 マイクロ波放電式イオンエンジンの宇宙展開

電化」への世界的トレンドがある。また、小型衛星をドラッグフリー作動させて、科学観測に利用するニーズがあり、これに対応するためのアクチュエータとしてμ1イオンエンジンの研究を進めている。

4. ま と め

これまでのケプラー運動に準拠した単純な軌道運動から進捗し、電気推進を用いた動力航行がはやぶさ小惑星探査機により実現した。この達成は、軌道決定・軌道計画・自動化・超遠距離通信・宇宙推進など多くの宇宙技術を集積させ、近地球と深宇宙を繋ぐ「深宇宙輸送システム」への発展を導く。また、限定された並進制御だけに留まらず、姿勢制御をも含む広範囲に電気推進を用いる「全電化」への移行を加速するであろう。これらの概念を支える電気推進は、大推力化・

高比推力化・多機能化をさらに推し進め、より先鋭に深宇宙動力航行を達成し、人類の「知」と「活躍」の地平を宇宙に拡大させるであろう。

参 考 文 献

- [1] 川口, 松岡, 「はやぶさの概容と軌道計画について」, 日本航空宇宙学会誌, 第53巻, 第618号, 2005年7月, p. 1-7
- [2] 國中, 堀内, 西山, 船木, 清水, 山田, 「「はやぶさ」搭載マイクロ波放電式イオンエンジン」, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 53, No. 618, 2005
- [3] 國中, 西山, 清水, 都木, 川口, 上杉, 「小惑星探査機「はやぶさ」搭載マイクロ波放電式イオンエンジンの初期運用」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 52, No. 602, 2004