

## 「はやぶさ」宇宙運用報告

國中 均、西山和孝、清水幸夫、都木恭一郎  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学本部  
相模原市由野台3-1-1  
kuninaka@newslan.isas.ac.jp

### 1. はじめに

2003年5月9日、鹿児島宇宙空間観測所からM-V5号機により「MUSES-C」は深宇宙に直接投入され「はやぶさ」と命名された。本ミッションは約2年掛けて小惑星「ITOKAWA」にランデブーし、表面から試料を採取後、4年後に地球へ帰還する(図1参照)。このような高 $\Delta V$ マヌーバは高比推力の電気推進でしか成しえない。その主推進としてマイクロ波放電式イオンエンジン「 $\mu 10$ 」は宇宙生まれ(Space-borne)となった。打上げ後、数週間の真空暴露を経て1ヶ月に及ぶ試運転を実施、7月には巡航運転が開始、1日当たり数m/sの定常加速がなされている。端緒には科学衛星に電気推進を搭載することはその重量ペナルティからは到底考えられなかったが、イオンエンジンそのものの技術躍進は素より衛星およびロケット全般技術の革新、深宇宙探査へのニーズに支えられてこの域に到達しえたことは言及するまでもない。ここで改めて関連各位のご努力に敬意を表したい。ここで宇宙実用されたマイクロ波放電式イオンエンジン「 $\mu 10$ 」は他のイオンエンジンとは異なる独自の着想のもと宇宙科学研究所電気推進工学部門が研究開発を進めてきた。図2に小惑星探査機「はやぶさ」の全容を、図3に $\mu$ イオンエンジンの概念図を示す。単体推力8mN、比推力3,200秒のイオンエンジンを4台搭載し、最大3台を同時運転する。以下に技術的特徴を列挙する。

- (1) プラズマ生成にマイクロ波放電を利用。寿命限界の一要因となっていた放電電極を利用しないため、長寿命・高信頼が期待できる。
  - (2) イオン源のみならず中和器にもマイクロ波放電を利用。ホローカソードを完全撤廃したことにより、推進剤中の不純物に耐性および大気暴露無制限。
  - (3) イオン源・中和器を単一マイクロ波電源で駆動。軽量化、運転ロジックの簡便化を達成。
  - (4) カーボン・カーボン複合材を静電加速グリッドに実用。耐久性向上を実現。
- 本稿では $\mu 10$ の初期運用に関して報告を行う。

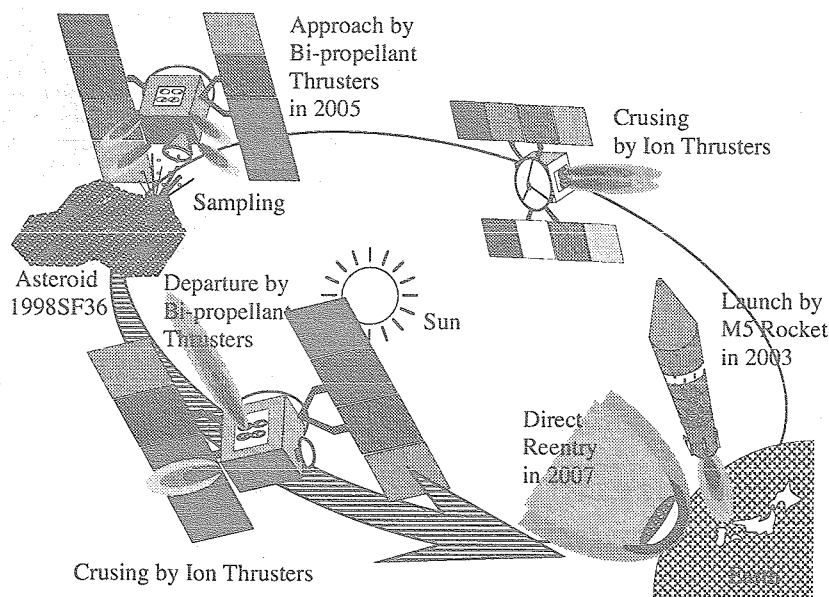


図1 ミッション概要

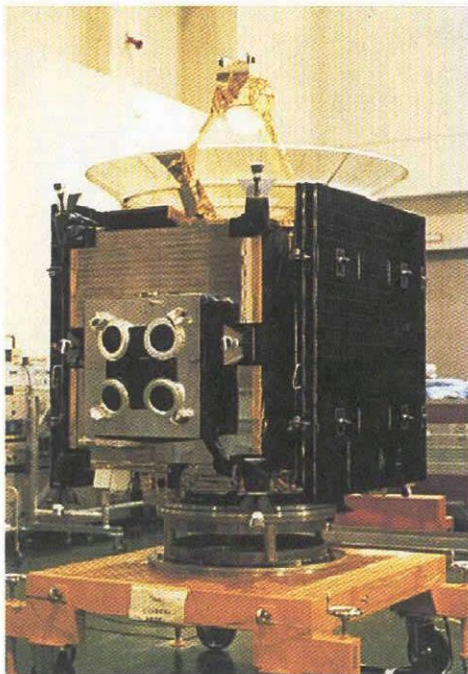


図2 小惑星探査機「はやぶさ」

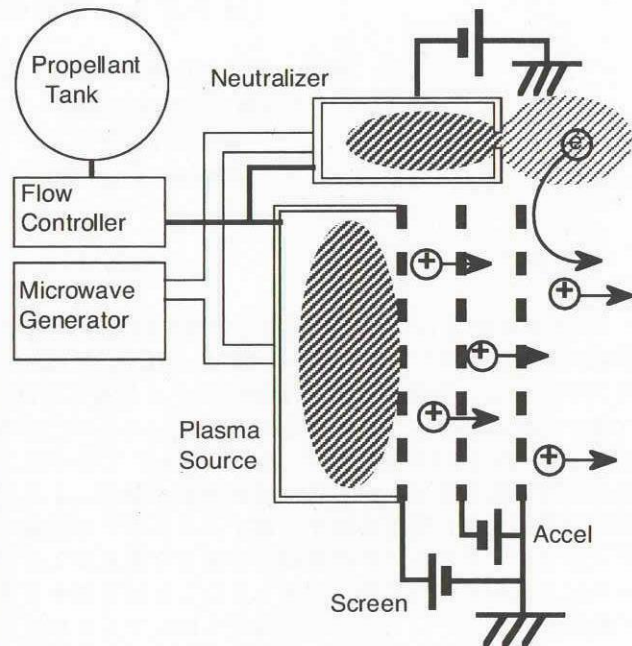


図3 マイクロ波放電式イオンエンジン

## 2. 打ち上げ前作業

組み上がった探査機に打ち上げ前の最終関門として2003年1月にシステム熱真空試験が実施された。宇宙機熱設計の妥当性を評価することが試験の目的である。各4台のスラスタのプラズマ点火機能を確認後、スラスタCとDについて48時間プラズマ点火状態を維持しマイクロ波電源を熱平衡に到達させた。この際、推進剤はフライト形態と同じく探査機タンクから流量制御系を介して供給された。イオン加速用高電圧電源はその出力を真空タンク外に引出し、抵抗に通電して発熱模擬を実行した。これによりイオンエンジンを含むMUSES-C宇宙機全体の熱設計の健全性を確認した。熱真空試験に引き続きイオンビーム噴射試験を実施した。試験の必要性和危険性に関し議論があったものの、打ち上げ前に探査機上にてイオンエンジン動作させる唯一の機会であり機能健全性確認には必須との我々の主張が受け入れられこの試験に望んだ。事前の予備試験の結果を参考に、探査機自体と熱真空試験装置の保護のためにビームターゲットとコンタミ養生カバーを設けた。各スラスタに関し30分程度のビーム加速を実施しその機能健全性を証明した。探査機近傍におけるTQCMによるモニターでは $2.5 \text{ \AA}$  (密度 $1 \text{ g/cc}$ を仮定)のコンタミ量であった。この量は宇宙システムに与える影響はほとんど無視しえる範囲であり、その起源は電気推進そのものではなくビームターゲットに由来すると考えられる。各試験を乗り越えたMUSES-Cは3月に相模原から鹿児島に陸送された後、月末から4月上旬にかけてキセノン充填を行った。このプロジェクトのために新たに開発した液化充填方式にて $66 \text{ kg}$ のキセノンが探査機に搭載された。事前準備が整然と行われたこと、2交代24時間作業、探査機タンクの空冷などが功を奏し、予定の日数以内で完了できた。

## 3. 宇宙運用

5月9日にM-V5号機は正確に飛翔を行い、所定の深宇宙軌道にMUSES-Cを投入した。太陽電池展開、太陽捕捉はDSNゴールドストーン局受信テレメより確認され、日本時間同日夕方鹿児島局にて「はやぶさ」のテレメ受信に成功した。投入軌道が決定され、ロケットの投入誤差範囲内であるものの $\Delta V$ 換算で $30 \text{ m/s}$ 程度不足であることが判明した。決して少ない値ではないが電気推進の軌道変換能力で十分取り戻せるため、化学推進によるトリム軌道調整は見送られた。第1可視にはイオンエンジンのジンバル・ロンチロックの解除を実施した。その後、熱真空試

験のデータを根拠にイオンエンジンを0℃に維持し真空暴露を数週間維持した。6月末に1台ずつプラズマ点火、イオン加速を達成した。続けて2台同時運転進んだが、放電が頻発して周辺機器への影響が確認された。温度上昇によりアウトガスが発生していると考えられた。そのため、太陽光とヒータ加熱によりイオンエンジン周辺を50℃にてベーキング2日を実施した。これにより放電頻度が低下して可視時間中に性能データ取得、他サブシステムとの協調運転、2台同時運転、3台同時運転に成功した。非可視時の自動運転のためのソフト書き換えを行った後、1台24時間運転、2台24時間運転を達成した。しかし3台同時運転を行うと数時間も経過すると放電頻発し1台が停止してしまう。遠隔部位からのアウトガスの影響と考え、+Xパネル全体を40℃のベーキング24時間を再度履行した。これにより3台24時間運転が実施可能となり、計画のΔVを日夜実施する巡航運転が7月に開始された。この間のアクセル電流の変化を図4に示す。イオンエンジン周辺に中性粒子密度が高いとアクセル電流が上昇する特性があり、2回のベーキングの後にその値が急減していることが分かる。宇宙機に含有した気体成分が多いこと、エンジンから遠隔部位までベーキングが必要なこと、イオンエンジンの放電が他サブシステムに甚大に影響を与えることが改めて認識された。9月中までの作動積算時間の経緯を図5に示す。11月冒頭には6,000時間・台を突破し、作動時間はもとより発生インパルスビット、発生ΔV、消費推進剤量、消費電力量、オンオフサイクルすべての項目に関し国産電気推進としては最大の、世界レベルでも一流の宇宙作動実績を達成したことを特記する。当初の1年間「はやぶさ」は長半径1AUの軌道に

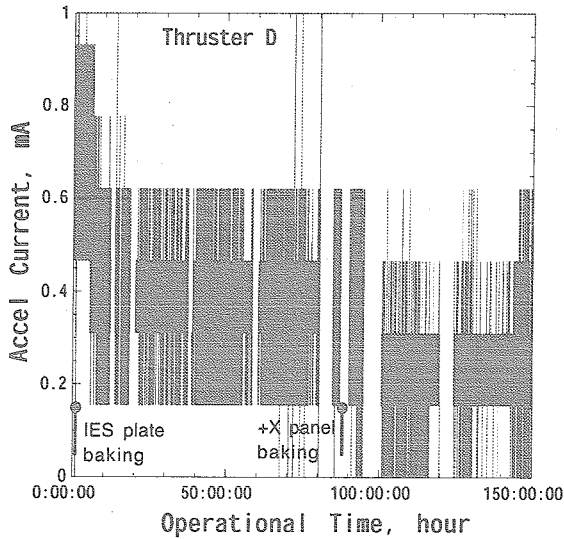


図4 アクセル電流の時間変化

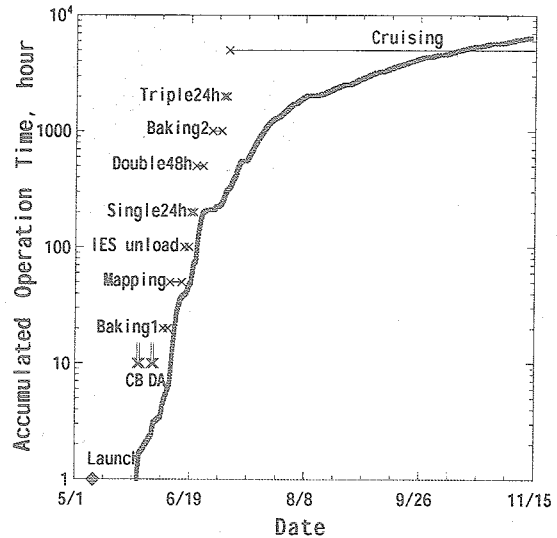


図5 作動積算時間推移

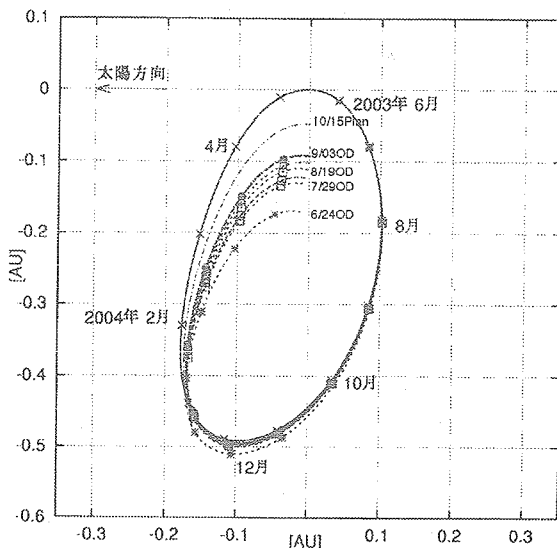


図6 「はやぶさ」の軌道マヌーバ

留まり豊富な発電電力にて電気推進加速を実施、1年後地球スウィングバイにより小惑星遷移軌道へと移行する計画である。図6に2003年10月現在の回転座標表示による「はやぶさ」の軌道を示す。座標原点に地球、-Y方向に太陽を固定し、太陽・地球に対する「はやぶさ」の相対位置を示す。地球スウィングバイを達成するのは再度原点に復帰する必要がある。打上げ当初は地球に達しない軌道であったが、イオンエンジンのマヌーバにより予測軌道が地球に漸近する様分かる。2004年1月頃には地球会合に必要な軌道変換を達成する予定である。

#### 4. 性能評価

地上局のレンジレート計測によりイオンエンジンの加速度が実時間で測定された。視線方向速度変化量と各スラスターのビーム電流の時間変化を図7にそのデータを示す。スラスターB, C, Dが作動した2時間弱の間に探査機の視線方向速度変化が通信波のドップラーシフトにより捕らえられている。読み取り精度は0.1 mm/s以下であり計測精度は十分と言える。スラスターはタイムラインコマンドで計画された時間に起動し停止された。途中放電などによる30秒停止が2回発生しているが、自動で再起動されている。発生した $\Delta V$ 量、視線方向と推力軸との角度、探査機重量よりイオンエンジンの推力を得ることができる。

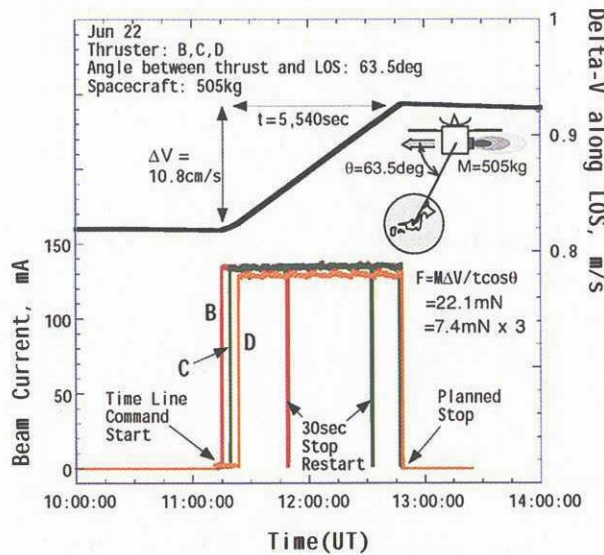


図7 探査機速度変化の測定

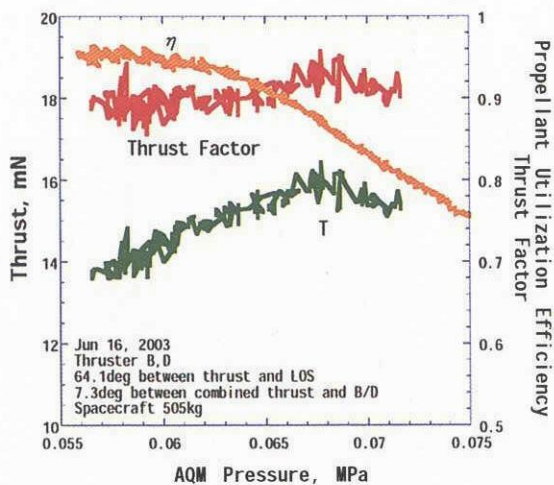


図8 イオンエンジン性能その1

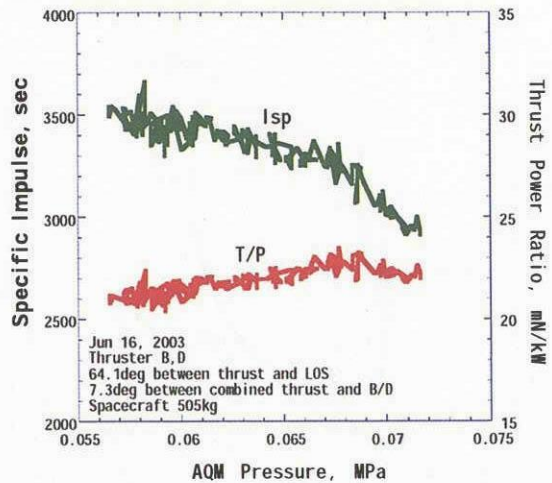


図9 イオンエンジン性能その2

推力を宇宙データとして得ることが出来たので、イオンエンジン性能を評価することができる。単体推力は約8 mNであるのでこれを地上試験として高精度で得ることは多大な労力を要することをコメントする。推力T、推進剤利用効率 $\eta$ 、推力係数、比推力、推力電力比T/Pの推進剤供給圧力に対する特性を図8、9に示す。データの集計は2台同時運転時になされたので、値は2台の合計値または平均値となる。単体最大推力8 mNで、その作動点における推力計数93%、推進剤利用効率87%、比推力3,200秒、推力電力比23 mN/kWである。事前に地上で得た値とほぼ一致している。

複数台同時運転時に中和器から放出される電子電流が不均衡となる現象が知られている。「 $\mu 10$ 」システムでは対となるイオン源と中和器に電流が一致するように自動制御される。図10には中和器の作動電圧の時間変化を示す。スラスタDが停止するとスラスタBの電圧が数V上昇しているが、その変動幅はわずかでありよく制御されていると判断する。

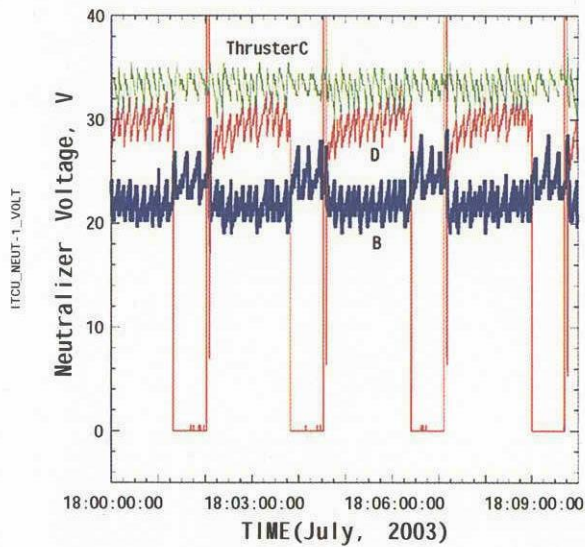


図10 中和器作動電圧の揺動