

小惑星探査機「はやぶさ」と電気推進機

Ion Engine System (IES) onboard

HAYABUSA Explorer for Asteroid Sample Return Mission

宇宙科学研究本部 試験技術開発グループ 清水幸夫

ISAS/JAXA SHIMIZU Yukio

Abstract

The Electron Cyclotron Resonance (ECR) microwave discharge Ion Engine System (IES) onboard Hayabusa has been operated in deep space. IES consists of four pair of ion thrusters and neutralizers on a rectangle shaped gimbals plate. Each engine has an exhaust nozzle of 10 cm in diameter and three grids made of Carbon-Carbon composite material. Weight of 66.2 kg Xenon propellant was loaded in a titanium alloy tank of 51 liter in volume before the launce of Hayabusa in April 2003. ECR microwave discharge generates Xenon plasma, and electric static field of 1500 volts accelerates Xenon ions to over 30 km/sec exhaust velocity. Each engine generates thrust of 8 mN, specific impulse of 3,200 seconds, and consumes 350 watts of electric power. During the three-year flight operation, IES generated a delta-V of 1,400 m/s while consuming 22 kg Xenon propellant. The total operation time of IES is 25,900 hours. IES successfully propelled Hayabusa to the asteroid Itokawa on September 2005. During the three-month period, in-site activities such as scientific observation of Itokawa and collection of asteroid sample materials were carried out. Now Hayabusa is cruising on the Itokawa orbit waiting for the time of departure. IES is ready to propel Hayabusa back home to the Earth. IES will be operated again in early next year and Hayabusa will arrive to the Earth in middle of 2010.

1. はじめに

昭和 60 年 6 月 29 日 (土曜)、東京都目黒区駒場にあった旧宇宙科学研究所 45 号館 5 階会議室において「小惑星サンプルリターン小研究会」が開催された。会の主宰は当時の宇宙科学研究所の鶴田浩一郎教授で、ハレー彗星探査機「すいせい」の打上げを無事成功させた時期であった。当時、宇宙科学研究所が行なう将来研究の指針として、

- 1) 科学に新しい視野をもたらすものであること、
- 2) 広範囲の科学者、技術者が情熱を持てるものであること、
- 3) 目標達成の各段階に成果が期待できること、
- 4) 組織的な技術開発により達成可能であること、
- 5) できれば文化史的な意義を持つ物であること、

が挙げられ、これらの条件を満たすものの一つとして小惑星探査計画が提案された^[1]。1)の指針について当時この計画に期待されたことは、地上からの観測以外の直接探査が未踏の天体であること、小惑星と隕石との相関が解明できること、原始太陽系の化石と考えられている小惑星の探査が太陽系科学の解明に寄与できること、小惑星は母天体が破壊された小天体が起源と考えられているので固体惑星の内部構造の解明に寄与すること、などであった。2)の指針については上記科学分野の目標の他、軟着陸を果たすための宇宙航法、プラズマ推進技術、通信技術、サンプル採集ロボティクスなどの技術分野を挙げていた。3)の指針については、最初のフライバイ時期、初期の光学観測によるリモートセンシング時期、ランデブー時期、赤外スペクトル観測による表面構造の解明、軟着陸、サンプルリターンの各段階での成果を期待できていた。図1はこの「小惑星サンプルリターン小研究会」の論文集の表紙である。表紙の絵は当時の地質調査所の田中剛氏、河村幸夫氏、水谷任氏による。この小研究会論文集の電気推進の研究提案には都木恭一郎現東京農業工業大学教授と筆者がMPDアークジェットによる小惑星エロス探査を提案した。

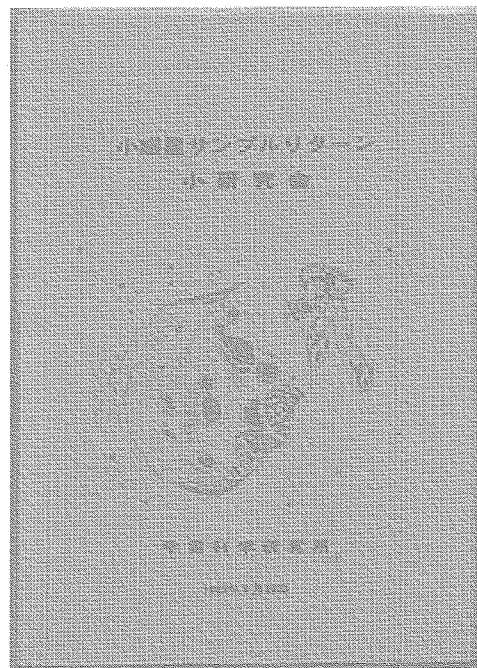


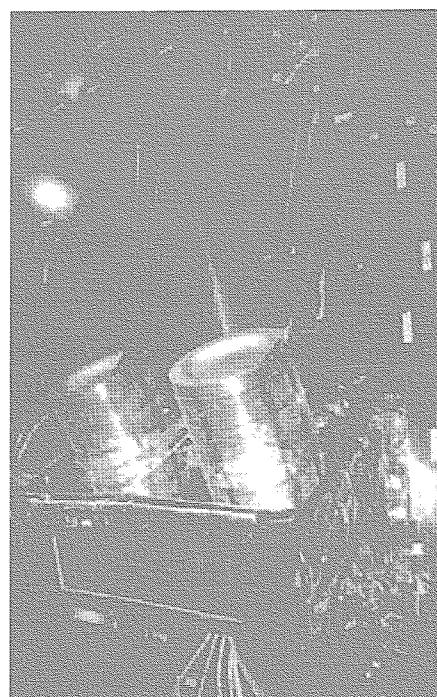
Figure 1. Front page of the proceedings for asteroid sample return mission studies.

この小研究会を母体に、1994年3月には小惑星探査ワーキンググループとして小惑星ネレウスを探査目標天体とする「小惑星サンプルリターン計画書」が発行された^[2]。この時点で搭載される電気推進機に小惑星探査機「はやぶさ」に搭載のものとほぼ同じ仕様のマイクロ波放電型イオンエンジンが現宇宙科学研究本部國中均教授により提案されている。翌1995年3月にはMUSES-Cプロジェクト提案書が発行され、プロジェクトとして本格的に動きだした。

2. 研究概要

(1) イオンエンジンの開発・運用

イオンエンジンは1990年代には電気推進機の中でも完成度の高い推進機であった。世界的にも米国、英国、ドイツ、日本などがイオンエンジンの宇宙試験を行っていた。日本では、旧宇宙開発事業団が1982年9月に打上げた「きく4号(ETS-III)」、1994年8月に打上げた「きく6号(ETS-VI)」、1998年2月に打上げた「かけはし(COMETs)」などの人工衛星にイオンエンジンが搭載された。図2に「かけはし(COMETs)」に搭載されたイオンエンジンを示す。また、欧州の探査機「アル



「テミス」や米国の探査機「ディープスペース1」などにもイオンエンジンが搭載されそれぞれ活躍した。しかしながら、当時、主にグリッドと呼ばれる電極と中和器の耐久性に改良の余地を残していた。

Figure 2. Ion engines onboard COMETS

Table 1 Ion Engines in Space

Country	Engine Name	Company/Organization	Thrust (mN)	Isp (Sec)	Consumption Power, (W)	Number of Engines in Space	Total Operation Time (hours)
Japan	μ -10	JAXA/NTS	8	3,000	350	4	26,000
Japan	IES	JAXA/MELCO	20	2,200	700	8	200
UK	UK10	ESA/ QinteQ	25	3,000	700	2	700
USA	XIP13	Boeing	18	2,500	550	52	55,000
USA	XIP25	Boeing	165	2,500	4,500	24	24,000
USA	NSTAR	NASA	90	2,500	2,500	1	16,000

表1に今までに宇宙で運用された主なイオンエンジンの実績を示す。従来のイオンエンジンはいわゆる放電によりプラズマを生成し、プラズマからイオンを引き出して推力を発生する。このプラズマ生成過程に耐久性の弱点があると考えた國中らはマイクロ波と強磁場による電子サイクロトロン共鳴を利用した放電によりプラズマを効率良く生成することに成功した^[3]。これはマイクロ波による電界振動と電子サイクロトロン周期が一致する場所で電子を加速し周りの中性ガスに衝突させてプラズマを生成しようという物で、放電方式のイオンエンジンに必要な放電電極と放電用電源が無い。また、國中らはイオンエンジンに不可欠な中和器（イオンを排出するだけでは宇宙機は帯電しイオンの逆流が起こり推力に寄与しない）についてもこの方式を採用することに成功した^[4]。こうして旧宇宙科学研究所のイオンエンジン開発グループは、世界に類の無いマイクロ波放電型イオンエンジンを発明し国際特許を取得した。図3に、小惑星探査機MUSES-C（後の「はやぶさ」）に搭載されたマイクロ波放電型イオンエンジンを示す。

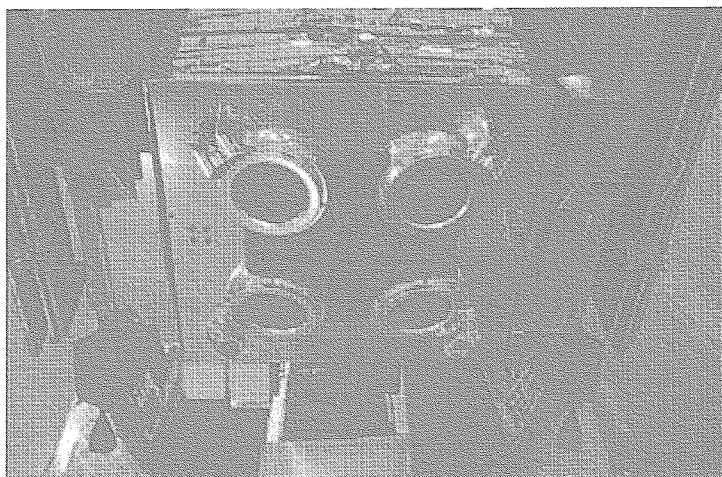


Figure 3. Microwave discharge ion engines onboard MUSES-C.

フライトモデルの開発にあたり、専用の耐久試験設備の設計・運用^[5]、推進剤のキセノン充填装置の研究・開発・設計についても電気推進グループが実施した^[6]。当初MUSES-C計画の電気推進への要求は、14,000時間の運用時間であった。その後目的天体の変更もあり、1999年に18,000時間の積算運転を2003年には20,000時間の積算運転を完了し、イオンエンジンの耐久性に問題の無いことを実証した。電気推進グループはその他にも、サブシステムとしての電磁干渉試験、モリ

ブデン電極に替わる耐久性のよい炭素複合材グリッドの開発・試験、最終的な動作試験として熱真空試験でのプラズマ噴射試験を行なった。小惑星探査機「はやぶさ」は2003年5月9日にM-V型ロケット5号機によって打上げられた。搭載されたイオンエンジンについては参考文献【7】【8】を参照されたい。打上げ時のキセノンガス充填量は66kgであった。「はやぶさ」に搭載されたイオンエンジンの性能評価は実際の発生推力から求めることができた。図4にイオンエンジンの作動履歴と探査機の世界速度変化の関係を示す。イオンエンジンを作動させることにより探査機の世界速度増分が現れ、停止により慣性運動に戻ることが判る。この事からエンジン1台当りの推力が8mN、比推力3,200秒、推力電力比23mN/kWであることが判った。これらの数値は地上試験で得られたものと良く合致していた。こうして、打上げ一年後の2004年5月19日に地球高度3,700kmで地球スイングバイを行い、探査機が太陽から遠くなることによる発生電力制限に対応したイオンエンジンのスロットリング運転・減台数運用を経て、ついに2005年9月12日に目的小惑星「イトカワ」に到着した。図5には「はやぶさ」が打上げられてから小惑星「イトカワ」に到着するまでの期間のイオンエンジン運転状況を示した。

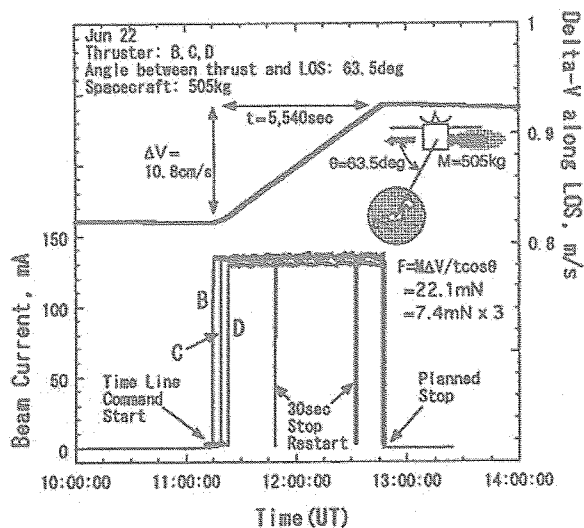


Figure 4. Ion engine operation and spacecraft velocity.

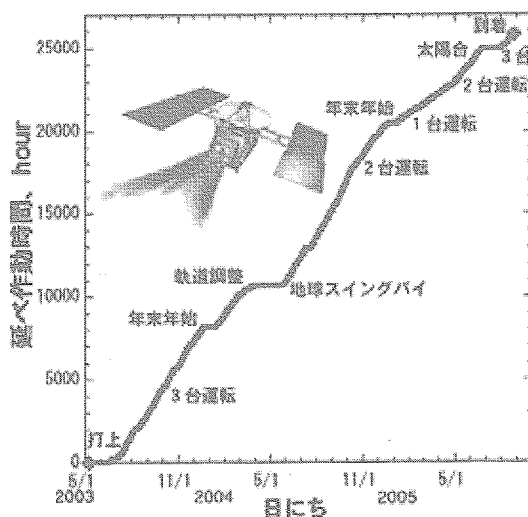
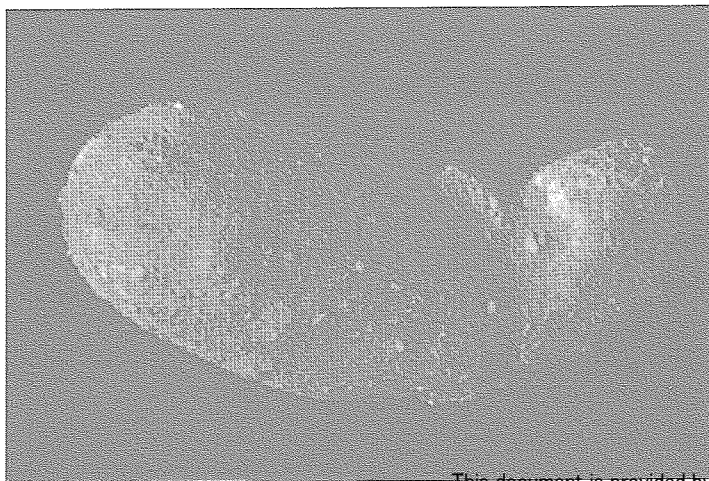


Figure 5. Ion engine operation chronology.

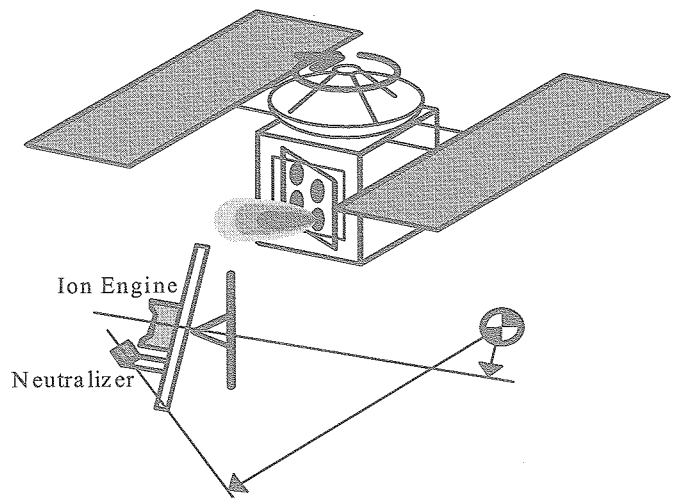
(2) 小惑星「イトカワ」

「はやぶさ」の目的地である小惑星「イトカワ」は地球近接天体の一つで、地上からの観測でS型小惑星であることが予想されていた。到着してからの2ヶ月の間、「はやぶさ」は可視分光撮像カメラ、近赤外線分光器、蛍光X線分光器、レーザー高度計などの観測機器を駆使して深宇宙におけるその場観測を成功させた。図6に代表的な「イトカワ」の撮像写真を示す。可視分光撮像カメラは「イトカワ」上空から1500枚以上の撮像を行った。撮影された写真から、「イトカワ」の表面はクレーターが少なく「ボルダー」と呼ば



れる多数の岩塊が存在することが明らかになった。近赤外線分光器は8万以上の赤外線スペクトルデータを取得し、「イトカワ」表面の鉱物組成の解明に貢献した。蛍光X線分光器は6千以上のX線スペクトルデータを取得し、表面元素の解明に貢献した。これらのスペクトル観測から地球に落下する隕石のうち普通コンドライトの中のLLコンドライトに分類される隕石と非常に近い組成であることが判明した。レーザー高度計を使って、「イトカワ」の微細な表面状態を求めることができ、探査機の軌道解析から「イトカワ」の質量を推測することが出来た。非常に正確な「イトカワ」の形状も同時に求められたことから、「イトカワ」の密度が1.9であることが判明した。このことは世界中の科学者を興奮させるに十分な成果で、すなわち、「イトカワ」が太陽系創成時の天体衝突でできた微小天体の寄せ集めで、がさがさの空隙の天体であると推測できたことである。実際にこのような天体が見つかったのは初めての事だそう。今までに得られた観測結果については参考文献の【9】から【11】に詳しい。こうして「はやぶさ」は、4つの観測機器を駆使して深宇宙におけるその場観測を成功させた。引き続き小惑星「イトカワ」へのタッチダウンおよび表面サンプル採集を行なうべく、2005年11月9日に「イトカワ」の高度70mまでの第1回リハーサル降下を行い、最初のターゲットマーカを投下した。地球から遠く離れた宇宙にあって日本の探査機がこのような難しい作業を行なうことは初めてであった。最初のマーカは「イトカワ」表面に届けることは出来なかったが、沢山の知見と運用チームに自信を与えた。11月12日には高度55mまでの2回目のリハーサル降下を行ない、探査ロボット「ミネルバ」を投下した。タイミング悪く「はやぶさ」が危険を察知して緊急離脱したため、「ミネルバ」は「イトカワ」表面を飛び跳ねることは出来なかったが、宇宙で「はやぶさ」の写真を撮影すること、「はやぶさ」と通信すること、その場の温度を計測することなどに成功した。11月20日には高度40mから2個目のターゲットマーカを投てきすることに成功し、第1回目のタッチダウンが行われた。着陸地点には「ミューゼスの海」と名付けられた岩の無い平坦地が選ばれタッチダウンに成功した。後の解析によれば、このとき「はやぶさ」は「イトカワ」表面におよそ30分間停留した。11月26日には第2回目のタッチダウンが行われた。表面サンプル採集のための弾丸発射は確認できていないが、第1回タッチダウン時にサンプラーホーンが巻き上げた表面物質を採集した可能性があるものと期待されている。後の解析によれば、第2回目のタッチダウン直後からRCSの燃料漏えいが起こったと推測された。このため、11月28日には通信が途絶え、29日に低利得アンテナでリンクを確立できた。このとき既に2つのリアクションホイールとRCS機能を喪失していた運用チームは、イオンエンジンのキセノンガスによる姿勢制御方式を考案し、姿勢回復が試みられた。この姿勢制御方式を図7に示す。12月8日、探査機内部に凍着したRCS燃料の気化による物と思われる大きな姿勢外乱により再び通信不能

Figure 6. Photograph of Asteroid Itokawa.



に陥り、救出運用が始まった。2006年1月23日、 Figure 7. Xenon gas-jet for attitude control.
「はやぶさ」からの通信ビーコンを再び受信することに成功し、キセノンガスによる姿勢制御を行なって3月上旬に地球指向を完了した。5月にはイオンエンジンの試運転も終え、0.2 rpm (周期約5分) のスピンレートで安定して待機軌道にある。2007年春から再びイオンエンジンの帰路運用を行ない、2010年6月の地球帰還を目指す。

3. 成果概要とまとめ

1節で紹介した「小惑星サンプルリターン小研究会」が掲げた将来研究の5指針は見事なまでにほぼ完遂しているといつて良いだろう。2節、研究概要で記述したように、小惑星探査機「はやぶさ」計画そのものは、まだ完遂していない。非常な困難はあるがプロジェクト関係者一丸となつて、2010年6月の地球帰還を目指す。再突入カプセルの切り離し・回収を経て小惑星「イトカワ」表面サンプルの入手が期待されている。さらに、出来るだけ早い時期に炭素成分組織があると考えられているC型小惑星からのサンプルリターン計画が行なわれようとしている。また、世界にも優秀なエンジンであることを証明した JAXA のイオンエンジンが、科学探査機のみならず実用衛星にも有用であることから、適宜搭載候補とならんことを期待する。

【参考文献】

- 【1】 宇宙科学研究所発行「小惑星サンプルリターン小研究会」論文集、1985年9月
- 【2】 宇宙科学研究所小惑星探査ワーキンググループ発行「小惑星サンプルリターン計画書」、1994年3月
- 【3】 Kuninaka H. and Satori S., 'Development and Demonstration of a Cathode-less Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster', J. Propulsion and Power, Vol.14, pp1022-1026, 1998.
- 【4】 Kuninaka H., Miyoshi H., Kuriki K., Horiuchi Y. and Iida H., 'Microwave Ion Engine Integrated Neutralizer', AIAA 90-2627, 21st International Electric Propulsion Conference, Colorado, 1990.
- 【5】 船木一幸、國中均、「マイクロ波放電式イオンエンジン用耐久試験装置の開発」、日本航空宇宙学会誌、Vol.47, pp411-418, 1999年
- 【6】 Y. Shimizu, H. Kuninaka and K. Toki, "Xenon Loading Device for MUSES-C Ion Engine System", IEPC 99-056, International Electric Propulsion Conference, kitakyushu, October 1999.
- 【7】 國中均、西山和孝、清水幸夫、都木恭一郎、川口淳一郎、上杉邦憲 「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, pp129-pp134, 2004年3月
- 【8】 國中均、堀内泰男、西山和孝、船木一幸、清水幸夫、山田哲哉、「はやぶさ」搭載マイクロ波放電式イオンエンジン」、日本航空宇宙学会論文集 Vol.53, No.618, pp203-pp210, 2005年7月
- 【9】 Science、2006年6月2日号、「はやぶさ」特集
- 【10】 Abstract for 2nd International Hayabusa Symposium, Univ. of Tokyo, July 12-14, 2006

【 1 1 】 JAXA 宇宙研ホームページ、<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/hayabusa/today.shtm>