

# JAXA 宇宙科学研究所の太陽系宇宙探査計画

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
國中 均

## 概要

日本の宇宙技術は、1955年ペンシルロケット水平発射から始まった。不断の努力により技術は洗練化されて、2003年に打ち上げた「はやぶさ」小惑星探査機は2010年に地球帰還を果たした。日本は、独自の技術で海外と協力しながら20機近い探査機を太陽系宇宙に散りばめて、自ら科学を探求する能力がある。このような事業実施に当たり、多額の費用と優秀な人材と長期間を要することに国民の理解を求める努力を厭わない。

## 1. 宇宙開発の黎明

日本の宇宙技術は、故・糸川英夫教授を開祖として1955年ペンシルロケット水平発射から始まった。弾道ロケットは1957年国際地球観測年（IGY）を契機に高度100kmに到達し、超高層大気や電離層プラズマの研究に供された。さらに技術を進捗させ、ラムダ・ロケットにて1970年「おおすみ」の地球周回軌道投入に至る。さらに射程を



図1 小惑星サンプルリターン小研究会（1985年）冊子の表紙 [1]。宇宙飛行士が小惑星に取り付いて、削岩機で表面を削りサンプル採取する様子が描かれている。

伸ばし1985年には、「さきがけ」「すいせい」と2機の探査機がミュー3型ロケットにて太陽周回軌道に投入されて、ハレー彗星の観測を行った。この同じ年に「小惑星サンプルリターン小研究会」[1]という集まりが宇宙科学研究所にて催されている。図1にその小冊子の表紙を示す。宇宙飛行士が小惑星に取り付いて、削岩機で表面に穴を開けて標本を取り出して、地球に持ち帰ろうとする様が描かれている。当時の実力からして、到底実現するはずのない崇高な目標であったが、このような未来を拓くために、科学技術研究開発に果敢に挑戦をしていた。さらなる超遠距離飛行を達成するため、次にミュー5型ロケットを完成させ深宇宙に500kgを投入し本格的深宇宙探査に乗り出すことが、1990年代初頭の宇宙科学研究所の最大テーマであった。我々電気推進工学部門も、この次期ロケットに最適化された電気推進の研究開発を続けていた。

## 2. 小惑星サンプルリターン

ミュー5型ロケット開発が具体化するにつれ、深宇宙探査機の机上検討が開始される。複数候補から、技術的成立性があり多くの工学研究分野を包含し且つ科学的価値ある宇宙ミッションが選別され、1993年11月に「ネレウス小惑星サンプルリターン計画90日検討会」が招集された。この勉強会を契機に、小惑星サンプルリターン法の技術実証を目的

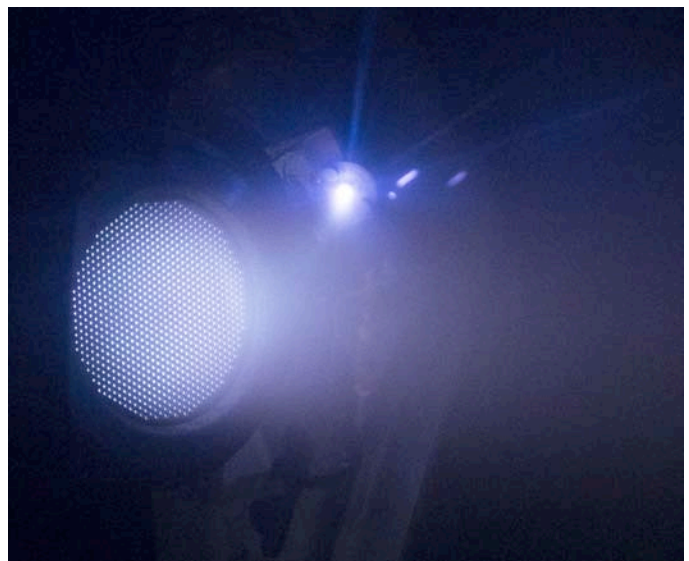


図2 マイクロ波放電式イオンエンジンのプラズマ噴射。多孔グリッドからイオンが高速噴射され、右斜上の中和器から電子が供給されている。

として工学試験機MUSES-C (Mu Space Engineering Satellite-C) 開発が着手される。小惑星サンプルリターンを実現するには、地球～小惑星間を往復できる長距離飛行を実現するには、電気ロケットが必須である。私は、電気推進イオンエンジン [2] (図2参照) の担当として本計画に加わり、世界標準とは一線を画した無電極でプラズマを生成するマイクロ波放電式イオンエンジンの宇宙実現に挑戦した。突拍子もないアイデアなど成就するはずがない、日本なんかにはそんな大事業は出来るはずがないと揶揄されつつも、批判をバネとして跳ね返す意気込みで邁進してきた。幸いなことに、システム設計・電気推進機器設計・耐久試験設備の建設・耐久試験・フライトモデル製造試験・宇宙機組み立てと順調に進んだ [3]。地上において2年半を要する2万時間の長時間耐久試験を2度実施して、合計5年間を費やし宇宙運用に備えた。

小惑星着陸とサンプルリターンを目標とするMUSES-C改め「はやぶさ」は、野心的な工学の粋をたった500kgのボディーに最適化して詰め込んで完成し、2003年5月9日にミュー5型ロケット5号機により深宇宙投入された。直ぐさまイオンエンジンによる動力航行を開始し (図3参照) [4]、2005年9月12日に小惑星とのランデブーに成功した。イオンエンジンを停止して慣性飛行で接近するに連れて、日々小惑星が詳らかにされて行く2週間は、まさに「技術イノベーションによるフロンティア開拓」を実感する至福の時であったと記憶する。往路運用にて、イオンエンジンは延べ25,800時間運転、22kgの推進剤を消費し、1,400m/sの増速を行った。小惑星の遠隔観測の後、2回の着陸を敢行した。しかし、姿勢制御用リアクションホイール (RW) 3台のうち2台の機能を喪失し、さらに2005年12月8日に化学推進用燃料が漏洩して姿勢制御を失い行方不明となった。幸運にも2006年1月23日に通信が回復し、電力を用いず四つのイオンエンジンからキセノ

ンガスをそのまま噴射することにより、スピン姿勢安定の状態では探査機の復旧に成功した [5]。

残存した健全なRW1台を作動させて、バイアスモーメント方式の非スピン姿勢安定を確立し、イオンエンジンによる並進加速を再開して地球帰還を目指した [6]。地球帰還目前に、部分故障が発生したものの、本来の組み合わせを超え、健全なイオン源と中和器をバイパス回路で接続し、急ごしらえの1式のイオンエンジンとして作動させる「クロス運転」にて窮地を脱した。第1期復路軌道変換を2007年4月から10月まで、第2期として2009年2月から2010年3月まで実施し、地球～小惑星間の往復宇宙航行を達成した。この間イオンエンジンは延べ39,600時間の宇宙作動を行い2,200m/sの増速にて、「はやぶさ」小惑星探査機の地球～小惑星間往復動力航行を完遂した [7]。

技術的な観点から、図4に示すような order of magnitude の技術革新を主張したい。「はやぶさ」以前では、望遠鏡やレーダーしか小惑星の観測手段はなく、その空間分解能は100mがせいぜいであった。「はやぶさ」がランデブーや着陸を果たした時、それは1mや1mmに改善された。採取された小惑星試料は、顕微鏡を介してミクロン級でその姿を現した。原子レベルの分析は、オングストロームの精度に至る。両者とも赤丸で囲む点に過ぎないが、図4の最左と最右の写真は隔世の技術差を示している。もはや、太陽系宇宙研究は、望遠鏡によるリモートセンシングや現場観測ではなく、物質を採取して地球で研究する時代になり、「小惑星サンプルリターン」が有効な観測手法であることを世界に知らしめた。「はやぶさ」の地球～小惑星往復探査は、科学や技術の範囲を越えて大きな社会反響をもたらし、映画がいくつも作られたことは我々の想定外であった。



図3 宇宙動力航行する「はやぶさ」小惑星探査機。地球と小惑星は、はやぶさ探査機による実写。

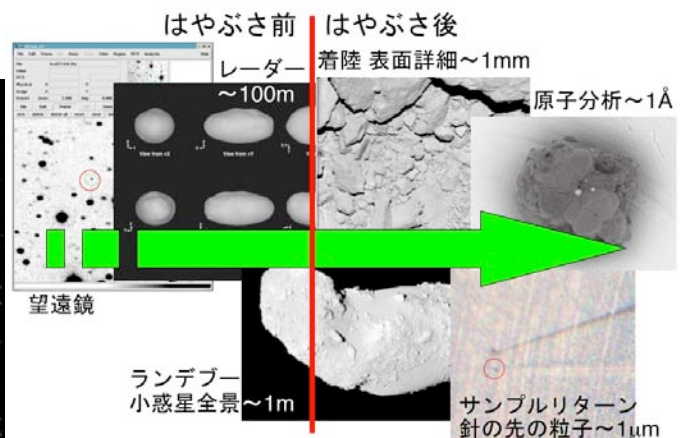


図4 「はやぶさ」による観測分解能の向上経緯 (2003年～2010年)。天文単位からオングストロームへ、21桁の技術革新・イノベーションの事例である。

### 3. はやぶさ2小惑星探査

工学技術試験機として運用された「はやぶさ」にて培われた技術を用いて、次の小惑星探査を目指した「はやぶさ2」ミッションが進行している[8]。2014年12月にH2Aロケットで打ち上げられた600kgの探査機(図5参照)は、イオンエンジン加速と地球スイングバイを組み合わせたΔVEGA(Delta-V Earth Gravity Assist)航法にて巡航中である。目的天体に2018年ランデブーし、リモートセンシングの後、標本採取のための着陸運用を複数回行い、再度イオンエンジン動力航行にて2020年に地球帰還する計画だ。

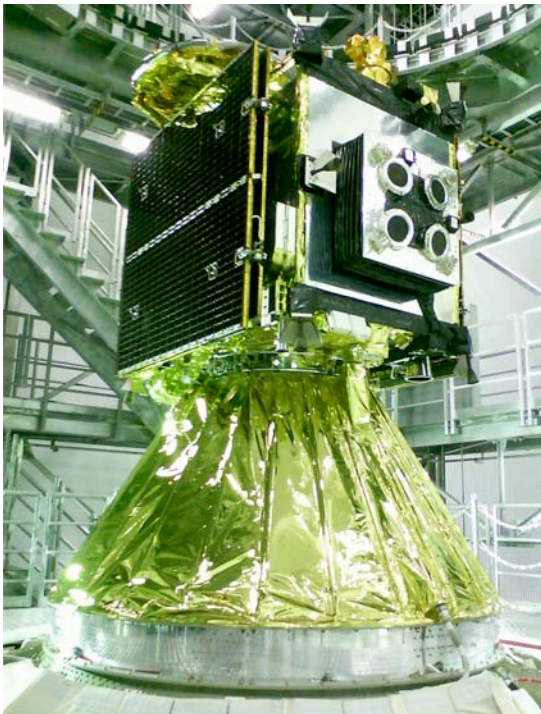


図5 打上直前の「はやぶさ2」小惑星探査機(2014年11月、種子島宇宙センターにて)。円錐形のPAF(Payload Attach Fitting)の上に搭載された探査機。4台のイオンエンジンが見える。

### 4. 宇宙研の太陽系宇宙探査

今現在「はやぶさ2」のみならず、金星周回軌道において「あかつき」が観測を続けている。本年秋には、水星に向け「BepiColombo」の打ち上げが控えている。また、月着陸「SLIM」計画、火星フォボスからのサンプルリターン「MMX」計画、木星ガニメデ探査「JUICE」計画の開発を進めている。図6に、過去・現在・未来の探査計画をまとめる。日本は、独自の技術で海外と協力しながら20機近い探査機を太陽系宇宙に散りばめて、自ら科学を探求することができる。このような事業には、多くの費用と人材と、10年20年に及ぶ日月を必要とする。多額の開発運用費を拠出いただくことに納税者のご理解とご支援をもとめる努力を引き続き行いたい。また、長期の事業を実現するために多く

の若い優秀な人材に参画を求めたい。

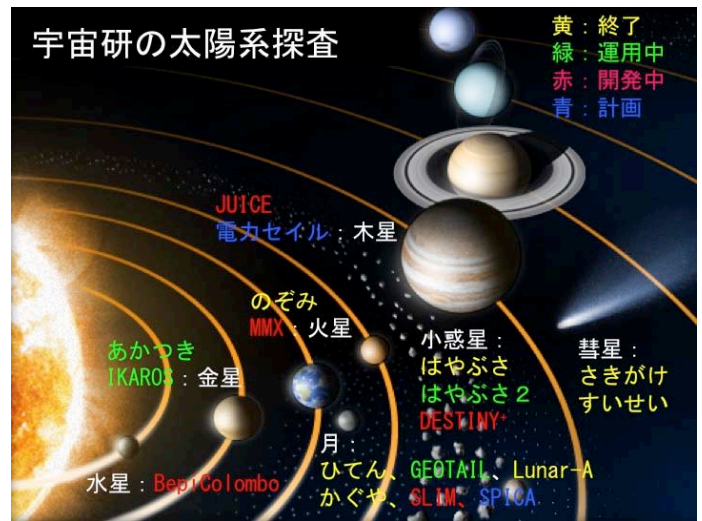


図6 宇宙科学研究所の太陽系宇宙探査計画

### 参考文献

- [1] 「小惑星サンプルリターン小研究会」、1985年、宇宙科学研究
- [2] H. Kuninaka and S. Satori, “Development and Demonstration of a Cathode-less Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster”, Journal of Propulsion and Power, Vol.14, No.6, Nov-Dec 1998, pp.1022-102
- [3] 國中均、「無電極マイクロ波放電式イオンプラズマの研究・開発」、日本航空宇宙学会誌、第46巻、第530号、1998年3月、ページ174-18
- [4] 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、第52巻、第602号、2004年、ページ129-13
- [5] 川口淳一郎、「はやぶさによる小惑星イトカワの探査」、學士會会報、第858号、2006年、ページ100-11
- [6] 細田聡史, 國中均、「イオンエンジンによる小惑星探査機はやぶさの帰還運用」、プラズマ核融合学会誌、第85巻、第5号、2010年、ページ282-29
- [7] K. Nishiyama, S. Hosoda, H. Koizumi, D. Nakata, Y. Shimizu, I. Funaki, H. Kuninaka and J. Kawaguchi, “Hayabusa's Way Back to Earth by Microwave Discharge Ion Engines”, AIAA-2010-6862 (2011)
- [8] H. Kuninaka and Hayabusa-2 Project, “Deep Space Exploration of Hayabusa-2 Spacecraft”, ISTS-2015-k-61, 30th ISTS, Kobe July 2015