

# イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発

國中 均\*

## Research and Development of JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) Tool for Numerical Evaluation of Ion Engine Grid Lifetime.

By

Hitoshi KUNINAKA\*

**Abstract:** The ion engines onboard ETS-VIII and Hayabusa explorer open the era of electric propulsion. Especially the microwave discharge ion engines  $\mu 10$  achieved 26,000-hour space operation and succeeded to rendezvous with an asteroid. These technologies will be expand to the Deep Space Transportation System and various kinds of satellites. In order to realize such a vast expansion of the ion engines in space the numerical analysis on life time of the electro-static grid system, that is JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) tool, has a top priority to develop. This paper reports the development scheme, proposed schedule and application scenario.

**Key words:** Ion Engine, Grid Lifetime, Hayabusa,  $\mu 10$ , Deep Space, Transportation System

### 1. 電気推進の意味

最小の初期質量で出発して、最大質量のペイロードを目的地に届かせる、または最長時間宇宙の特定点に留まること、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、高速噴射（高比推力）ジェットを発生させる電気推進は長年に亘り多くの研究開発努力が注がれてきた。そして、ETS-Ⅲ・ETS-Ⅵ・COMETSを経て、きく8号（ETS-Ⅷ）にてようやく静止衛星における本格的なイオンエンジン利用が始まろうとしている。はやぶさ小惑星探査機による小惑星ランデブーは、電気推進に地球周辺に留まらない深宇宙動力航行という新しい活躍の場を与えた。これまで手の届かなかった世界に人類の知を到達させ、小惑星の詳細な映像を地球に伝えた。未踏峰の宇宙を開拓することこそが電気推進の真の意義であることを強調したい。

本稿では、今後期待される電気推進の応用場面を紹介する。次に、これに対応するための電気推進の発展シナリオの例を示す。そして、イオンエンジンが宇宙技術の根幹をなすために必要とされる技術要素、グリッド最適化設計・寿命予測／認定ツール JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) の開発意義、概念、スケジュールについて述べる。

---

\* ISAS/JAXA

## 2. 「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  $\mu 10^1$  が「はやぶさ」を小惑星へのランデブー成功に導いたことは、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おいてトップクラスの成果である<sup>2</sup>。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1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  $4 \text{ km/s}$  を越えているが、この値は地上打ち上げロケットの1段あたりに匹敵する。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。

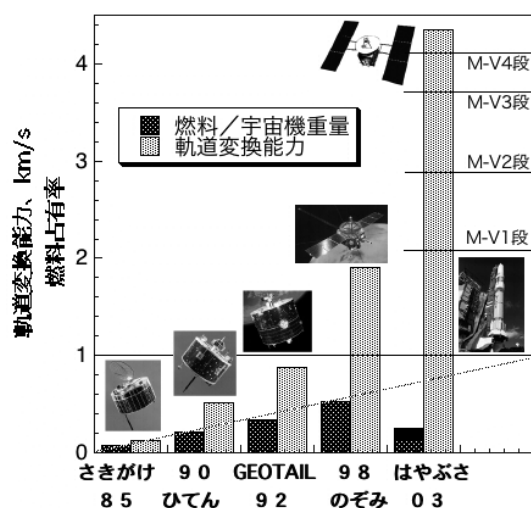


図1 深宇宙機の軌道変換能力と推進剤占有率

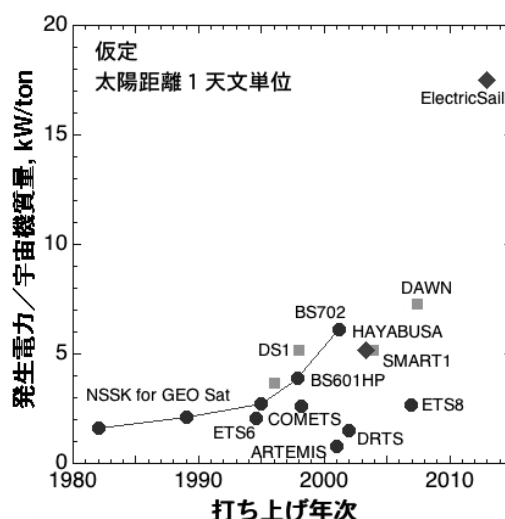


図2 宇宙機の発生電力/質量の変遷

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  $5 \text{ kW/ton}$  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（図2参照）。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。 $\mu 10$  が推力  $8 \text{ mN}$  にて、ペイロード  $30 \text{ kg}$  を含む初期質量  $500 \text{ kg}$  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、さらに推力の大きい電気推進を用いれば、1トン級の宇宙機が実現し得る。この規模であれば、数百  $\text{kg}$  のペイロードを搭載し、目的天体に到達させさらに復路の確保も可能である。この技術は、新しい宇宙システムの新概念「深宇宙輸送システム」を創成する（図3参照）。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。宇宙輸送系の代表である使い捨てロケットは慣性誘導されておりビークルとして閉じた制御系をなしているのに対し、当面の「深宇宙輸送システム」は地球から電波誘導される。よって、本稿で力点を置いて記述す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。深宇宙輸送システムに課せられる課題は、十分な質量のペイロード運搬と、広い打ち上げ窓の確保である。EPΔ VEGA（Electric Propelled Delta-V Earth Gravity Assist）航法<sup>3</sup>を用いれば、遷移期間を要するもの、実行ΔVの低減化と、直接打ち上げに関する declination 制約を緩和することができる。火星を越えてさらに深遠な宇宙に到達するには、通常のイオンエンジン比推力  $3,000$  秒よりも高速噴射ジェットを発生する型式が期待される。スピン展開安定による薄膜軽量太陽電池を用いて、宇宙で  $15 \text{ kW/ton}$  を越える大電力（図2参照）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。イオンエンジンに追従して他の電気推進技術の躍進にも大きな期待が寄せられる。

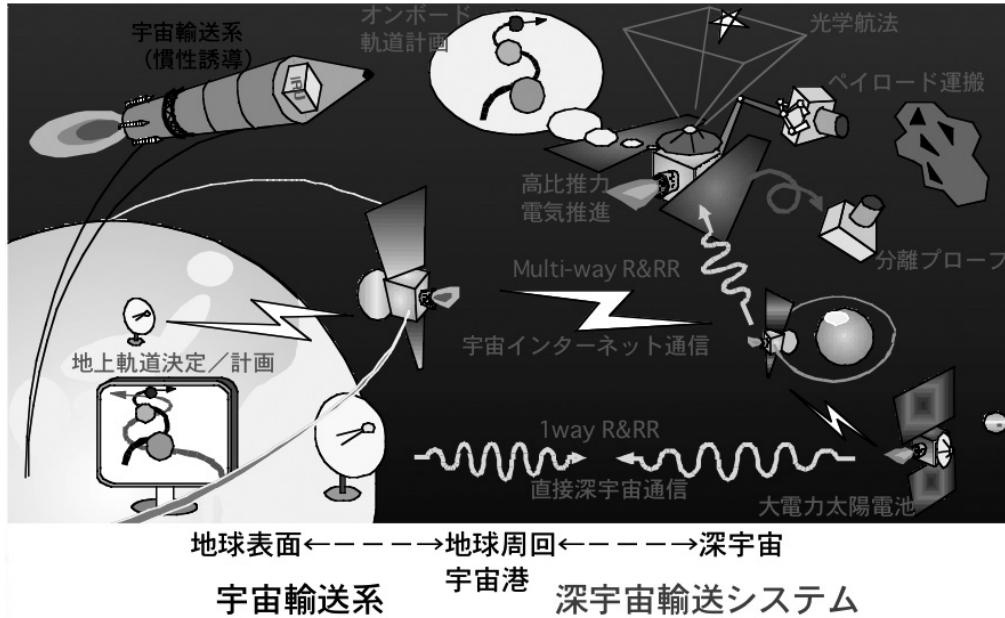


図3 宇宙輸送系から「深宇宙輸送システム」への発展

### 3. 近地球応用

電気推進を静止衛星の南北制御に、東西制御に化学ロケットを用いるのが従来技術であるが、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「全電化」への世界的トレンドがある。図4に、化学推進を用いた古典的方式と、電気推進による先進的の東西制御の例を示す<sup>4</sup>。軌道制御法則が根本的に異なることが分かる。現状では緯度方向に0.5度の刻みで静止軌道上の静止点が確保されているが、図4から理解されるもう1つ別の観点は、すでに1スロットに複数の衛星が運用されることである。さらに混雑が進むと経度方向の配置では不足、電気推進の推力を常時発生させ、理想的静止点よりも上方または下方にて24時間の軌道周期を得ることもできる。静止点高度への投入に電気推進を用いるEOTV (Electric Orbit Transfer Vehicle) という利用も一部実用化されている。単純なスパイラル上昇だけでなく、スーパーシンクロナス軌道を経由する方式も提案されている<sup>5</sup>。

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

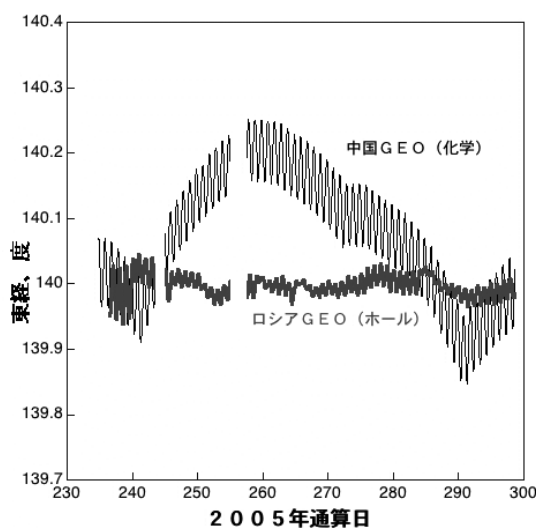


図4 静止衛星の東西制御<sup>4</sup>

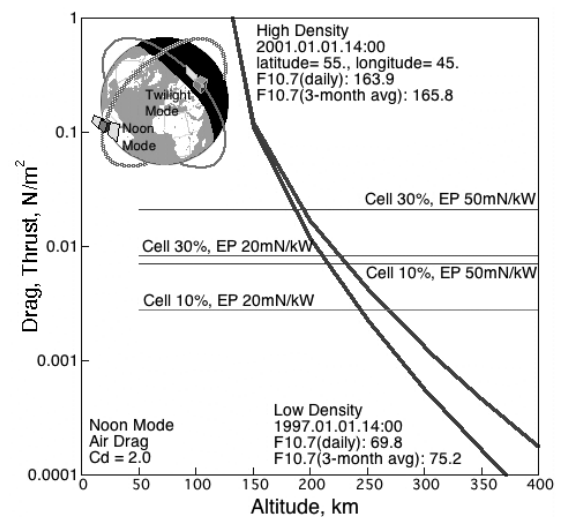


図5 電気推進による極低高度軌道衛星

して連続推力型電気推進の応用が考えられる。また、精密な地上観察を目的に極低高度軌道衛星が想定されていて、大気抵抗補償のために電気推進の応用が期待される。図5には、軌道高度と大気抵抗の関係と、太陽電池と電気推進の性能の組み合わせに応じて達成される最低高度を示す。高度 200 km 程度が実現し得る。

#### 4. 宇宙応用シナリオ

実験室における額面性能がいくら高くても、宇宙での作動実績が伴わないと、ユーザーの信頼を得られず、結局宇宙へ進出が叶わない。幸い、「はやぶさ」のイオンエンジンでは、他国技術と比肩しても遜色のない、宇宙における単体作動1万時間、1,700回のオンオフ繰返し、総合積算時間2万6千時間を達成している。このヘリテージを最大利用して、後続の電気推進の宇宙応用展開を目指すのが最も現実的である。「はやぶさ」で実証したイオンエンジン $\mu 10$ 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 $\mu 10$  HiSp、微小推力に対応する $\mu 1$ を軸に、それぞれを「はやぶさ2」「小型静止衛星」「はやぶさ MkII」「電力セイル」「DECIGO」へと宇宙ミッション化を狙う。このように複数の宇宙プログラムを並走させることにより、電気推進の必須性の潮流を醸成する。そして、電気推進コミュニティの拡大も促され、多くの研究者が集い、後続の電気推進が発展するであろう。また、関連宇宙産業の参画が、各種電気推進の宇宙進出に大きく寄与する。

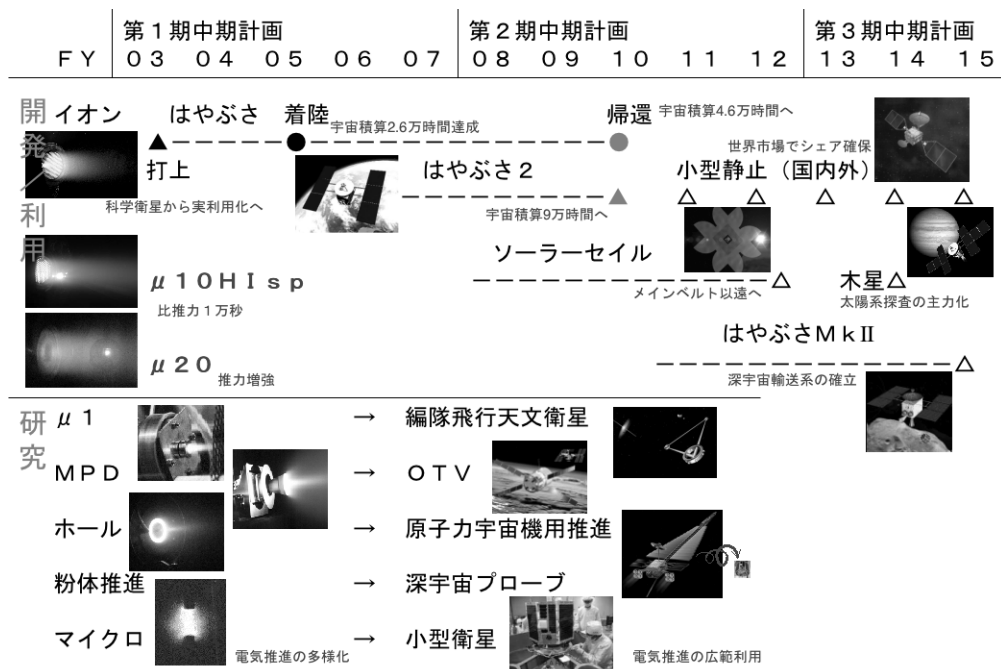


図6 宇宙科学研究本部・電気推進部門が想定する電気推進の応用展開ロードマップ

## 5. JIEDI ツール

イオンエンジンのFM (Flight Model) 開発に当っては、これまではPM (Prototype Model)を製作し、これに数万時間級の寿命試験を施し、耐久認定を実施してきた<sup>6</sup>。耐久性が向上し、また要求寿命の進展に伴い、このような旧態然とした開発方式では、時機を得た宇宙機の実現がもはや実施不可能である。ここで開発を目指す新しい耐久認定 JIEDI 方式とは、イオン・オプティクス数学モデルを実作動試験結果により校正した後、数値解析により積算作動数万時間後、または特定の作動履歴後の寿命評価を実施する。これにより、実時間耐久試験に頼らない迅速な耐久認定が実施し得る。これはイオンエンジンの将来には必須の技術である。まずは、ワークショップ形式で計算手法の取捨選択を実施し、平成 19 年度後半からツールの開発に着手して、将来ミッションへの体制を整えたい。

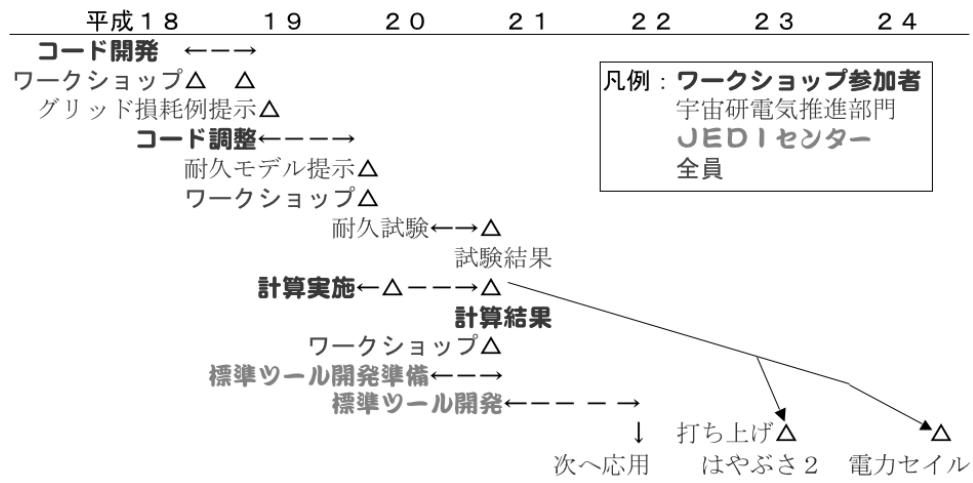


図 7 JIEDI ツール開発スケジュール案

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 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 年 7 月．
- [ 2 ] The Year Review, “Electric Propulsion”, Aerospace America, AIAA, December 2006, p.62.
- [ 3 ] H. Kuninaka, “Deep Space Exploration by Electric Propelled Delta-V Earth Gravity Assist (EPΔVEGA), -MUSES-C toward JUPITER-”, AIAA 2002-3970, Joint Propulsion Conference & Exhibition, July 2002.
- [ 4 ] 川瀬，「電波干渉計による静止衛星追尾と軌道推定フィルタリングの開発」，電子情報通信学会論文誌 B Vol.J89-B No.7 pp.1104-1111, 2006.
- [ 5 ] 荒川，國中，中山，西山，「イオンエンジンによる動力航行」宇宙工学シリーズ，コロナ社，2006 年 12 月．
- [ 6 ] I. Funaki, H. Kuninaka, K. Toki, Y. Shimizu, K. Nishiyama, and Y. Horiuchi, “Verification Tests of Carbon-Carbon Composite Grids for Microwave Discharge Ion Thruster”, Journal of Propulsion and Power Vol.18, No.1 January/February 2002. pp.169-175.