はやぶさ2 イオンエンジンと今後の展望

尾郷 慶太　渡部 修　碓井 美由紀　吉澤 直樹　清水 裕介　森本 悠介　大井 俊彦

要 旨

小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載されたイオンエンジンは、地球から小惑星「リュウグウ」への往路、そして小惑星でのミッションを終えサンプルを地球へ持ち帰る復路を支えました。更に、今も「はやぶさ2」の次のミッションに向けて稼働を続けています。イオンエンジンのような電気推進システムは、深宇宙探査にはなくてはならないシステムとなり、注目されています。本稿では、宇宙機における推進システムとイオンエンジンの概要から、NECにおけるイオンエンジン開発、及び「はやぶさ2」での運用実績、そして次期探査プロジェクトの深宇宙探査技術実証機「DESTINY$^+$」へ向けた更なる高性能化の状況について紹介します。

KeyWords
はやぶさ／はやぶさ2／イオンエンジン／惑星間飛行（深宇宙探査）／マイクロ波放電／DESTINY$^+$

1. はじめに

2014年12月に小惑星探査機「はやぶさ2」は種子島宇宙センター（鹿児島県）から打ち上げられ、2018年6月に小惑星「リュウグウ」へ到着、2019年に合計5.4gの小惑星サンプルの採取に成功し、2020年12月に地球へ帰還しました。この6年間の旅路を支えたのが、イオンエンジンです。宇宙機の推進システムには主に、化学推進系と電気推進系があります。化学推進系は、化学反応による燃焼で得られたエネルギーを用いて推力を得る方法で、大推力であることが特徴です。一方、電気推進系は、加熱や加速に電気エネルギーを用い、推進剤を加速排気し推力を得る方法で、少ない燃料で遠くの目的地まで到達することができます。イオンエンジンは、この電気推進系の1つです。

図1に、各推進システムの推力密度（噴射口単位面積当たりの推力）と比推力（推進剤消費率当たりの推力（燃費に相当））の関係を示します。図1に示すように、イオンエンジンは、電気推進のなかでも、推力は低いものの、比推力が高いシステムです。「はやぶさ」のような惑星探査ミッションでは、探査機が地球から遠く離れた目的地まで到達できることが重要となるため、イオンエンジンなどの電気推進系が不可欠となります。NECはこれまで、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）様と共同で、マイクロ波放電型イオンエンジンを開発し「はやぶさ」「はやぶさ2」に搭載しました。そこで得られた知見及び新たなミッション要求に応えるべく、性能及び信頼性を更に向

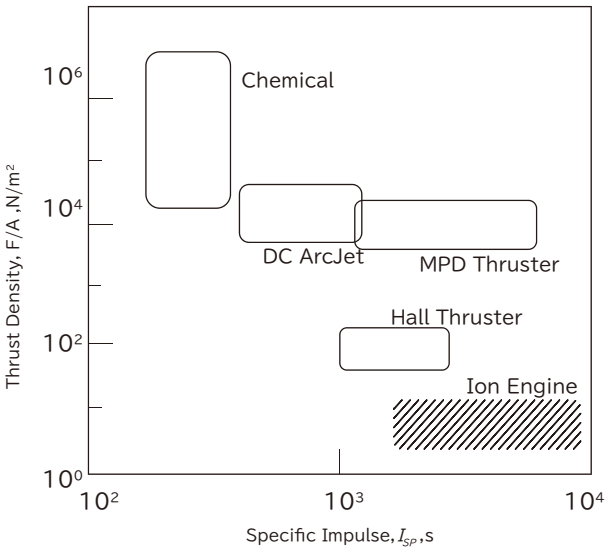


図1　推進系の推力密度と比推力の関係[1)]

上させたモデルを、次期探査プロジェクトである深宇宙探査技術実証機「DESTINY⁺」に搭載予定です。

2. イオンエンジンの概要[2) 3)]

イオンエンジンはプラズマを静電加速して推力を得ることから、静電加速型推進機とも呼ばれます。**図２**にイオンエンジンの概要図を示します。最初に、上流の放電室にて推進剤であるXeガスをプラズマ化し、次に、３枚のグリッドにそれぞれ異なる電位を与えることでイオンを加速し、最後に、中和器においてイオンを電気的に中性化して宇宙空間へ放出し、推力を得る仕組みとなります。最初のプラズマ生成の手法は複数あり、「はやぶさ」「はやぶさ２」に搭載されたマイクロ波放電型イオンエンジンは、その１つです。

マイクロ波放電型イオンエンジンの主な特徴は、２つあります。１つ目は、放電用の電極がないため、寿命制限や地上試験時における大気曝露に対する保護の必要がありません。２つ目は、プラズマ点火に特殊な手順や付加装置が不要で、システム全体の機器の数が少ないことが挙げられます。また、「はやぶさ」「はやぶさ２」に搭載したイオンエンジンは、前述した特徴に加え、中和器からも電極を撤廃することが更なるシステムの簡略化、長寿命化につながり、世界初の完全無電極放電のイオンエンジンとして宇宙空間で性能が実証されました。

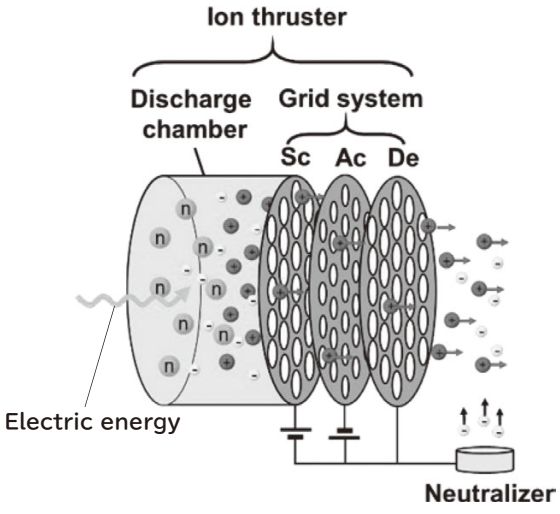


図２　イオンエンジン概要

3. NECにおけるイオンエンジン開発

マイクロ波放電型イオンエンジンをはじめとする電気推進系は、JAXA様宇宙科学研究所（ISAS）の前身である文部省宇宙科学研究所で研究されていました。マイクロ波放電型イオンエンジンは1988年ごろから研究され、NECでは「MUSES-C（はやぶさ）」プロジェクトが発足した1996年から本格的な製品開発が始まりました。

「はやぶさ」のイオンエンジン開発後はJAXA様（ISAS）では更なる性能向上を、NECでは他の衛星にも応用できるよう汎用化、商用化開発を実施しました。2011年に「はやぶさ２」プロジェクトが発足し、「はやぶさ２」に向けた本格的なイオンエンジン開発が進みました。

「はやぶさ」のイオンエンジンに課せられたミッションは、１つ目がイオンエンジンによる推進実験、２つ目がイオンエンジンの長期連続稼動実験、３つ目がイオンエンジンを併用しての地球スイングバイによる加速操作であり、これらの技術を実証することができました。

「はやぶさ」におけるイオンエンジンの技術実証を踏まえ、「はやぶさ２」では、確実に小惑星へ行き地球に帰還する技術を確立することが求められました。

4. はやぶさ２でのイオンエンジン開発[4)]

「はやぶさ」及び「はやぶさ２」のイオンエンジンシステム（IES）の諸元を**表**に、系統図を**図３**、搭載状態を**図４**に示します。

「はやぶさ」からの主な改良点として、まず、中和器の故障を踏まえた長寿命化、次に推力の25%増強（8mNから10mN）が挙げられます[4)]。

「はやぶさ」と「はやぶさ２」は同様の構成となっており、イオンエンジン、高圧電源装置（IPPU）やスラスタ制御装置（ITCU）の他、このシステムの特徴であるマイ

表　「はやぶさ」「はやぶさ２」　イオンエンジン諸元[5)]

	はやぶさ	はやぶさ２
運転/搭載台数	3/4台	3/4台
単体推力	8mN	10mN
比推力@MOL	3,200秒	3,000秒
IES消費電力	1,050W	1,250W
Xe搭載量	66kg	66kg

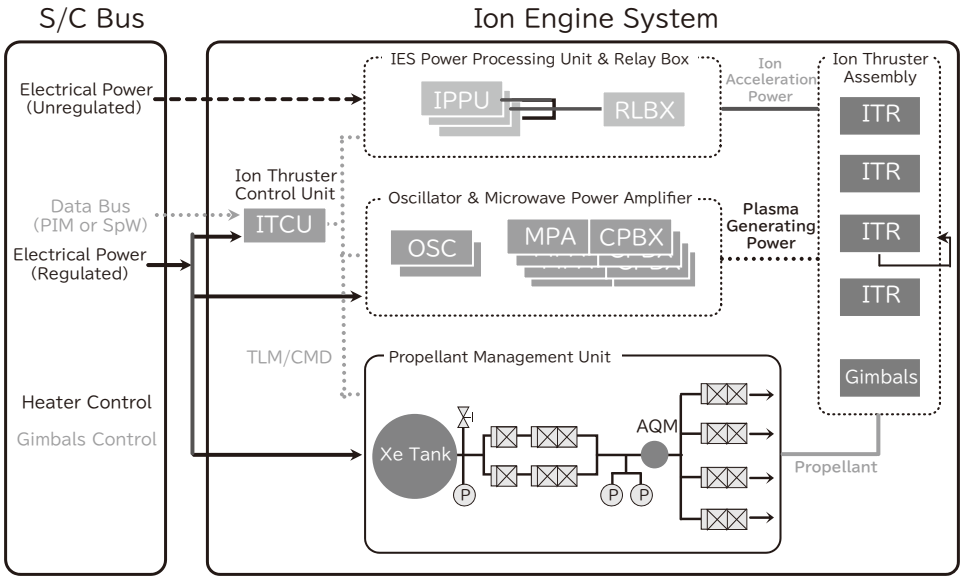
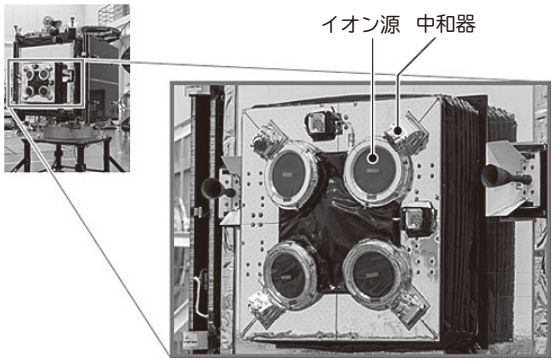


図３ 「はやぶさ２」イオンエンジン系統図



©JAXA　　イオンエンジン

図４ イオンエンジンの搭載状態[6)]

クロ波放電系のシステムを持ちます。イオンエンジンは１枚のプレート上に４台搭載され、最大で同時に３台まで使用することができ、探査機の軌道変更に必要な推力を発生します。また、ジンバル駆動により推力方向を変更できる機能、及び、供給電力の変化に応じて推力を変更できるスロットリング機能があります。

第３章で前述したように、「はやぶさ２」ではより確実な動作、信頼性が求められました。これらを達成するために、信頼性解析を徹底し、実際に行われる運用をベースに、できるだけ宇宙環境に近い条件で試験を行いました。

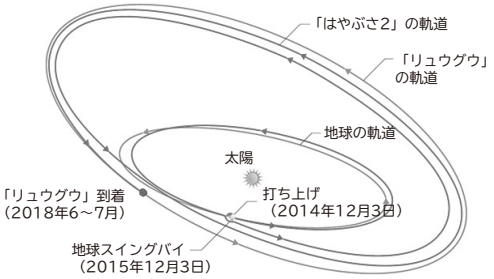
5.「はやぶさ２」でのイオンエンジンの運用実績

図５に、「はやぶさ２」の打ち上げから小惑星までの往路と、小惑星から地球までの復路の軌道を示します。

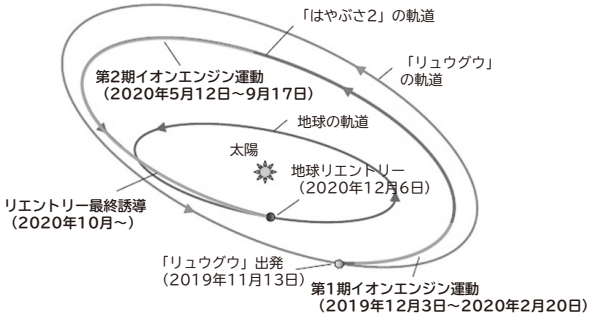
図５の軌道を飛行するにあたり、イオンエンジンを運用し、１台当たり往路約6,400時間、復路約3,000時間の運転を実現しました。「はやぶさ」ではトラブルもあり、最後まですべてのイオンエンジンを運用できませんでしたが、「はやぶさ２」は４台すべてのエンジンが現時点でも健全であり、小惑星と地球の往復に必要な性能と信頼性を確立しました。「はやぶさ２」は地球帰還後、新たな目的地「1998KY26」に向け出発し、今なおイオンエンジンの運転を継続しています。

6. 次期プロジェクトに向けた高性能化

「はやぶさ２」では、イオンエンジンの技術を確立しました。更に性能・信頼性を向上させたイオンエンジンを、次期探査プロジェクトの深宇宙探査技術実証機「DESTINY$^+$」に搭載する予定です。「DESTINY$^+$」はロケットで地球周回軌道に投入後、イオンエンジンによる加速を続けることで周回軌道を離脱し、小惑星軌道に入ります。したがって、地球圏を離脱するための高い推力が求められています。また、「はやぶさ２」とは異なり、長く地球



打ち上げから小惑星までの軌道



©JAXA　小惑星から地球帰還までの軌道

図５ 「はやぶさ２」の軌道[7)]

周回軌道にとどまるため、地球周回軌道上の環境に対応可能な排熱と保温の能力が求められています。これらの性能向上により、小惑星探査に限らず、イオンエンジンの利用可能範囲を拡大していきます。

7. まとめ

本稿ではNECがJAXA様と共同で開発したイオンエンジンについて、概要とその技術を紹介しました。宇宙機開発において、世界的に電気推進系への需要が高まるなか、NECは、今後もイオンエンジンを中心とした電気推進系システムの開発を続けてまいります。最後に、開発において、ご指導とご支援をいただきましたJAXA様に感謝申し上げます。

参考文献

1) 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，Vol.86 No.5，pp.282-292，2010.5
2) 荒川義博 監修、國中均ほか：イオンエンジンによる動力航行，コロナ社，2006
3) 栗木恭一、荒川義博：電気推進ロケット入門，東京大学出版会，2003
4) 西山和孝ほか：はやぶさ２用イオンエンジンの開発状況，平成25年度宇宙輸送シンポジウム 講演集録，2014
5) 西山和孝ほか：小惑星探査機はやぶさ２イオンエンジンの運用状況，平成28年度宇宙輸送シンポジウム 講演集録，2017
6) NEC：「はやぶさ」を継ぐもの 第２回 たくさんの手に導かれて，2015
https://jpn.nec.com/ad/cosmos/hayabusa2/story/02/index.html
7) JAXA：はやぶさ２プロジェクト
https://www.hayabusa2.jaxa.jp

執筆者プロフィール

尾郷 慶太
宇宙システム事業部
マネージャー

渡部 修
宇宙システム事業部
エキスパート

碓井 美由紀
宇宙システム事業部
主任

吉澤 直樹
宇宙システム事業部
主任

清水 裕介
宇宙システム事業部

森本 悠介
宇宙システム事業部

大井 俊彦
宇宙システム事業部

関連URL

宙（そら）への挑戦
https://jpn.nec.com/ad/cosmos/index.html

Hayabusa2 Returns －「はやぶさ２」が還ってきた－
https://jpn.nec.com/ad/cosmos/hayabusa2/return/index.html

NEC 技報のご案内

NEC技報の論文をご覧いただきありがとうございます。
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご一読ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報（日本語）　NEC Technical Journal（英語）

Vol.74 No.1　安全・安心・公平・効率を提供する社会インフラ特集

安全・安心・公平・効率を提供する社会インフラ特集によせて
社会インフラを通じて、すべての人が豊かさを享受できる社会の実現を目指すNECの取り組みについて

◇ 特集論文

社会システムのDXを実現する技術 ～ 政府・行政サービスのDX

デジタル・ガバメントを推進する、これからのクラウド活用
自治体DXに向けた取り組み
音声の可視化による学びの改革 協働学習支援ソリューション

社会システムのDXを実現する技術 ～ 放送システムのDX

映像流通DXが目指す新たな社会インフラ「映像プラットフォームサービス」
未来の放送業界のDXを支える映像符号化技術

社会システムのDXを実現する技術 ～ 空港のDX

空港の税関検査場の混雑緩和とスムーズな手続きを実現する税関検査場電子申告ゲート
顔認証を活用した新しい搭乗手続き「Face Express」（成田国際空港「One ID」）
GPSを利用した航空機進入着陸システム（GBAS）の開発
次世代に向けた航空交通管理への取り組み

社会システムを支えるセンシング技術 ～ 見えないところで活躍するセンシング技術

気候変動観測衛星（しきさい）を支えた光学センサ技術と成果
宇宙から見守るまちの安全・安心 ～衛星搭載合成開口レーダ活用サービス～
ミュオグラフィを活用した内部構造の観測
海中の音波をあやつる可変深度ソーナー
マスト中段配置型艦船用TACAN（電波灯台）アンテナの開発
画像解析を活用して鉄道の沿線検査業務を支援する「列車巡視支援システム」

社会システムを支えるセンシング技術 ～ 検知と認識のセンシング技術

電波識別技術の現状と将来
ディープラーニング技術を用いた指紋照合技術の現状と将来
顔の三次元情報の計測と顔画像照合への応用
インビジブルセンシング技術によるウォークスルーセキュリティ検査

未来の社会を支える最先端技術 ～ 社会に浸透してゆく先端技術

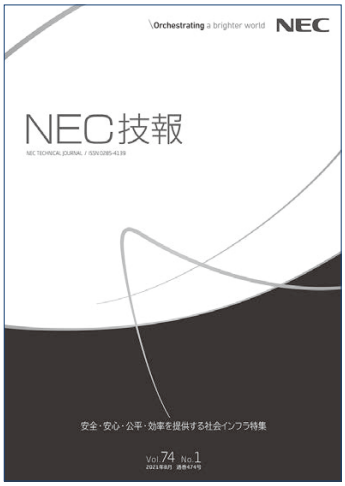
ソフトウェア無線技術のその発展と取り組み
人工衛星運用における自動化・省力化技術
光が導く次世代の暗号技術「量子暗号」
重作業の省人化・無人化を実現するロボティクス技術
海中の無人機に効率良く大電力を伝送できるワイヤレス給電アンテナの開発

未来の社会を支える最先端技術 ～ 宇宙で活躍する先端技術

はやぶさ2 イオンエンジンと今後の展望
はやぶさ2 リュウグウへの高精度タッチダウンを実現した自律航法誘導制御
はやぶさ2の快挙をセンシング技術で支えた「衛星搭載ライダー」
はやぶさ2 システム設計と運用結果
高速・大容量のデータ通信を実現する光衛星間通信技術
美笹深宇宙探査用地上局向け30kW級X帯固体電力増幅装置の開発
世界最高性能の薄膜太陽電池パドルの開発

◇ NEC Information

2020年度C&C賞表彰式典開催



Vol.74 No.1
（2021年8月）

特集TOP