

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20421

研究課題名（和文）深宇宙航行に向けた高比推力型マイクロ波放電式イオンエンジンの実現

研究課題名（英文）Realization of a High Specific-Impulse Microwave Discharge Ion Engine for Deep Space Exploration

研究代表者

田畑 邦佳 (Tabata, Kuniyoshi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：80963959

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、木星以遠の外惑星探査に資する超高比推力マイクロ波放電式イオンエンジンの実現を目的とした。先行研究では、イオン加速電圧7.5 kVにおけるイオン引き出しの不安定性が課題だった。本研究では、マイクロ波が伝播する導波管の表面状態が動作不安定性に強く関連していることを明らかにし、推進機設計を微調整することで安定作動を実現した。その結果、推力25 mN、比推力6,600秒を達成できた。また、一万時間級の長時間運転により、導波管上にグリッド由来のカーボンが堆積し波長短縮効果が現れるが、この効果を考慮した長期的視点での最適設計を実施することが耐久性向上に有効であることも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実現した7 kVの高い耐電圧をもつガス絶縁器は、ホールスラストなど他の電気推進システムにも適用可能であり、学術的価値が高い。また、長時間運転によるマイクロ波放電式イオンエンジンの比推力劣化現象の原因と対策も明らかにした。本研究により、比推力を従来の2倍以上に向上させただけでなく、その比推力を長期間維持できる解決策を提示できたことで、増速量10 km/s以上を要するミッションや、小惑星のマルチフライバイ探査など、推進剤重量の削減が鍵となる深宇宙探査ミッションに大きな貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to realize a high specific-impulse microwave discharge ion engine for deep space exploration beyond Jupiter. A previous study identified the instability of ion extraction at an ion acceleration voltage of 7.5 kV. This study revealed that the surface conductivity of the waveguide through which microwaves propagate significantly contributes to the instability and achieved stable operation by fine-tuning the thruster design. Consequently, a thrust of 25 mN and a specific impulse of 6,600 s were achieved. Besides, this study demonstrated that the optimal design from a long-term perspective is crucial in enhancing the ion engine system's durability, considering the wavelength shortening effect caused by grid-derived carbon deposition on the waveguide after long-time operation.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：電気推進 高比推力 イオンエンジン マイクロ波放電 DESTINY+ はやぶさ2

### 1. 研究開始当初の背景

近年、小惑星探査からのサンプルリターンなどの高難易度な深宇宙探査を実現するべく、化学推進に比べ低燃費な電気推進が研究されている。宇宙用エンジンの燃費は比推力（単位は秒）で表され、この値が大きいほど低燃費であることを示す。電気推進の一つであるイオンエンジン（図1）は、比推力が化学推進のおよそ10倍の3000秒と高い<sup>1)</sup>。しかし、将来の木星以遠の外惑星探査を見越して、現在はより高い比推力が求められている。

電気推進においてプラズマを生成する方式には様々な種類がある。その一つであるマイクロ波放電式は電極を用いないため耐久性に優れ、特に日本が世界からリードする技術である。このエンジンは、マイクロ波伝播用の導波管、プラズマを生成する放電室、イオンを加速する3枚のグリッド電極からなる。先行研究では、グリッド電極および放電室への印加電圧（以後、イオン加速電圧と呼ぶ）を従来の5倍の7.5 kVとイオンの排気速度を高めることで、比推力7,000秒の達成が試みられた。しかし、高電圧印加時にイオン引き出しが不安定化し、理論的に到達可能と考えられているビーム電流値200 mAが達成できないという課題があった。<sup>2)</sup> その結果、本研究の到達目標である推力25 mN、比推力7,000 sが未達であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、主に次の3点である。

- (1) ガス絶縁器の耐電圧向上
- (2) 高電圧印加時にイオン引き出しが不安定化するメカニズムの解明
- (3) 推進機設計の改良によるイオンエンジンの高比推力化

本研究では最初に、7.5 kVという従来比5倍の高い電圧を安定して印加できる実験系、ガス絶縁器の設計を行い、その耐電圧を評価した。次に、高電圧印加時のイオン引き出しが不安定となるメカニズムを解明するために、イオンエンジンを構成する部品の寸法を微修正しながら、スラスト性能への感度を調査した。

尚、研究開始当初の目的として、発光分光計測による作動不安定原因の解明を行う予定としていた。しかし研究活動のなかで、イオンエンジンの不安定な作動が主にマイクロ波伝播に起因することが明らかになったため、本研究ではマイクロ波の整合状態に焦点を当てて研究を進めた。

### 3. 研究の方法

- (1) ガス絶縁器などの周辺機器の改良による高電圧7.5 kV安定作動の達成

ガス絶縁器は、高電圧が印加される推進機に、燃料タンクから推進剤を電気絶縁しながら導入する機器である（図2）。従来のガス絶縁器の耐電圧は2.0 kVほどであり本研究では使用できない。そこで新たに、セラミック3D造形により、機械加工では製造できない微細構造を実装することで電子の加速を妨害し、推進剤のガス放電を防ぐ方式を採用した。

- (2) 高電圧印加時にイオン引き出しが不安定化するメカニズムの解明

イオン加速電圧1.5 kVでの実験の際、同様にイオン引き出しが不安定化する現象に直面した。そこで、まずは1.5 kVにおいて、イオンエンジンを構成する各部品の寸法がその性能に与える影響を調査した。

- (3) 推進機設計の改良によるイオンエンジンの高比推力化

研究(2)で、マイクロ波を伝播させて放電室に導く役割を果たす導波管の表面状態に依存して、イオンエンジン作動の安定性が大きく変化することが分かった。そこで、研究(3)では、安定作動を実現する導波管の寸法を実験的に調査し、さらにマイクロ波の伝播を再現するために1次元のヘルムホルツ方程式を解くことで、実験結果の妥当性を検証した。

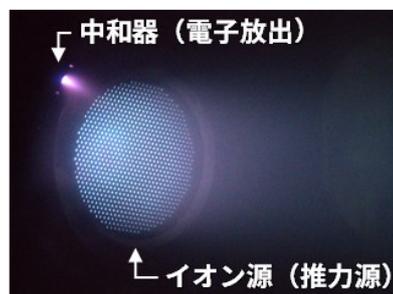


図1 作動中のイオンエンジン。

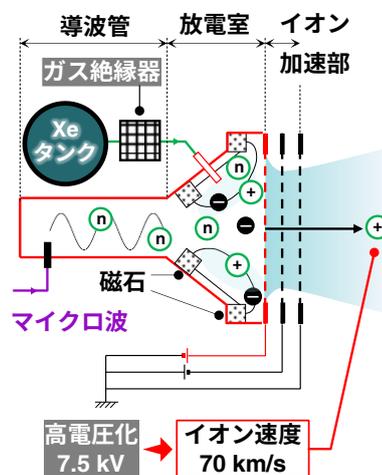


図2 マイクロ波放電式イオンエンジンの推力生成メカニズム。

#### 4. 研究成果

##### (1) ガス絶縁器の耐電圧向上

研究対象のガス絶縁器は、3D 造形された非常に複雑な流路を持ち、これにより電子の有効加速距離（これを1段と呼ぶ）を1 mm 以下まで抑えられた。本研究では、電気推進機の推進剤として使用される希ガス（キセノン、クリプトン、アルゴン）を流し、その圧力や印加電圧を変化させることで、ガス絶縁器の耐電圧を実験的に明らかにした。また、この実験結果を受けて、電子の有効加速距離1段を電極間距離とみなすことで、火花放電の放電開始電圧を記述する一般的なパッシェンの式で整理可能であることが分かった。従って、ガス絶縁器内部の圧力分布を考慮しつつ、有効加速距離とそこが受け持つ電圧を最適化することで、要求の耐電圧を満足するガス絶縁器を設計できることが示された<sup>3)</sup>。

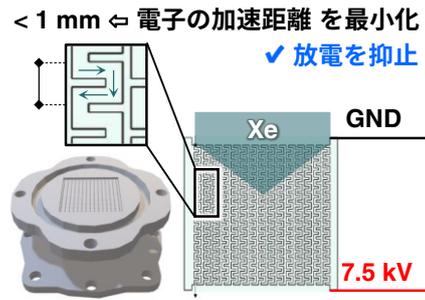


図 3 3D 造形により複雑な流路を実現したガス絶縁器。電子の加速距離を最小化することで、放電を抑止した<sup>3)</sup>。

##### (2) 高電圧印加時にイオン引き出しが不安定化するメカニズムの解明

イオン加速電圧 1.5 kV での実験において、マイクロ波のインピーダンス整合状態が作動安定性に最も影響する要素であることが分かった。特に導波管の表面状態が真空チャンバー由来の金属やエンジン部品由来の物質で汚染された場合、整合状態が大きく変化することが明らかになった。

さらに、当初想定していなかった最も重要な発見は、ダイヤモンドライクカーボン (DLC) のような電気伝導度の低い物質が堆積したときにマイクロ波の波長短縮効果が生じることが判明した点である。イオンエンジンのグリッドにはカーボン材が使用されており、長時間運転によりイオンによりスパッタされ、導波管表面に堆積する。小惑星探査機「はやぶさ」や「はやぶさ 2」の軌道上運用ではイオンエンジンの性能劣化が確認されている<sup>4)</sup>。本研究は、その根本的な原因が波長短縮効果によるインピーダンス不整合であることを明らかにし、さらに導波管の長さ短縮などの具体的な対策を打つことに成功した<sup>5)</sup>点で、大きな発展があったと言える。

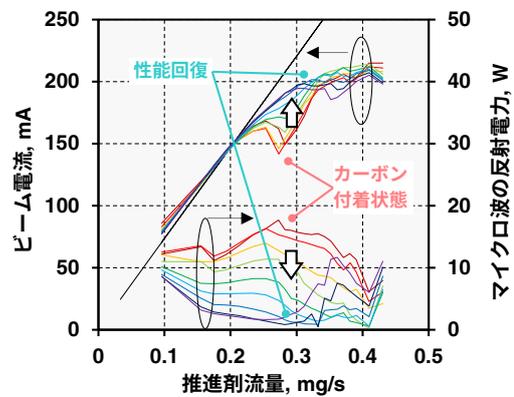


図 4 ビーム電流と推進剤流量の関係。カーボン付着状態ではマイクロ波の波長短縮が見られるため、導波管長さを短縮することで性能回復可能<sup>5)</sup>。

##### (3) 推進機設計の改良によるイオンエンジンの高比推力化

イオン加速電圧 1.5 kV において、波長短縮効果を考慮して導波管の全長を従来からおよそ 15 mm 程度短縮することで、カーボンで導波管が汚染された状態でもマイクロ波の反射電力を抑え、高性能を実現した (図 4)。そこで、本研究の 7.5 kV 作動においても同様の導波管を使用した性能取得を行ったところ、推力 25 mN、比推力 6,500 s (中和器流量込み) を達成できた。カーボン付着状態でも高性能を維持できていることから、軌道上での劣化が少ない耐久性の高いエンジンであると言える。現在、導波管表面でのオーム損失を考慮した 1 次元ヘルムホルツ方程式を解くことで、上述の波長短縮効果の再現を試みている。今後より定量的な議論を進め、イオンエンジンの耐久性について議論を深めていく。

以上要するに、本研究では「はやぶさ」に搭載されたマイクロ波放電式イオンエンジンをさらに高比推力化することを達成したと同時に、軌道上での性能劣化原因が導波管へのカーボン付着による波長短縮効果であることを明らかにしたうえで、わずかな設計変更によりその対策を施すことに成功した。今後はさらに、エンジン性能の温度依存性、振動耐性、軽量化など、宇宙機搭載に向けたより詳細な設計改良を続け、信頼性の高いイオンエンジンに仕上げていく。

#### <引用文献>

- 1) K. Nishiyama, et al., *Acta Astronautica* **166** (2020), pp. 69–77.
- 2) 清水裕介, 東京大学修士論文 (2019).
- 3) 田畑邦佳, その他 2 名, 令和 4 年度宇宙輸送シンポジウム (2023).
- 4) R. Shirakawa, et al., *Acta Astronautica* **174** (2020), pp. 367–376.
- 5) 田畑邦佳, その他 4 名, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Barquero S., Tabata K., Tsukizaki R., Merino M., Navarro-Cavalle J., and Nishiyama K.	4. 巻 211
2. 論文標題 Performance characterization of the $\mu 10$ electron-cyclotron-resonance ion thruster using alternative propellants: krypton vs. xenon	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 750 ~ 754
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2023.06.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 K. Tabata, R. Tsukizaki, S. Imai, T. Morishita, K. Nishiyama
2. 発表標題 Development Status of the Microwave Ion Engine for JAXA 's DESTINY+ Mission
3. 学会等名 38th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Tabata, R. Tsukizaki, S. Imai, T. Morishita, K. Nishiyama
2. 発表標題 Development status of the microwave ion thruster for JAXA 's deep space mission DESTINY+
3. 学会等名 34th International Conference on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Barquero, K. Tabata, R. Tsukizaki, M. Merino, J. Navarro-Cavalle, K. Nishiyama
2. 発表標題 Performance Characterization of the Hayabusa2 and DESTINY+ $\mu 10$ ECR Ion Thrusters Using Alternative Propellants: Krypton vs. Xenon
3. 学会等名 34th International Conference on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Miya, K. Tabata, Y. Yamashita, R. Tsukizaki, K. Nishiyama
2. 発表標題 Performance evaluation of an air-breathing ion engine with the microwave discharge ion engine $\mu 10$ shaped ion source
3. 学会等名 34th International Conference on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Koiso, Y. Yamashita, K. Tabata, R. Tsukizaki, K. Nishiyama
2. 発表標題 Performance improvement of microwave discharge ion thruster by increasing the microwave frequency
3. 学会等名 34th International Conference on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Takao, O. Mori, M. Matsushita, K. Nishiyama, R. Tsukizaki, K. Tabata, N. Ozaki, Y. Kubo, R. Funase
2. 発表標題 A Rendezvous Mission to outer Solar System Bodies using a 100-kg-Class Solar Power Sail
3. 学会等名 6th International Symposium on Space Sailing (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田畑邦佳, 月崎竜童, 今井駿, 森下貴都, 西山和孝
2. 発表標題 深宇宙探査技術実証機DESTINY+イオンエンジンの開発状況
3. 学会等名 令和5年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 月崎竜童, 田畑邦佳, 森下貴都
2. 発表標題 低圧キセノンMOFタンクの開発
3. 学会等名 令和5年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮優海, 山下祐介, 田畑邦佳, 月崎竜童, 西山和孝
2. 発表標題 大気圧縮性能と推進機性能を統合した大気吸い込み式イオンエンジンの性能調査
3. 学会等名 令和5年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 魚住承吾, 月崎竜童, 田畑邦佳, 西山和孝
2. 発表標題 マイクロ波放電式イオンエンジンの経年劣化に関する実験的研究
3. 学会等名 令和5年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田畑邦佳, 西山和孝, 月崎竜童, 今井駿, 森下貴都
2. 発表標題 DESTINY+イオンエンジン系の開発
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 月崎竜童, 森下貴都, 今井駿, 田畑邦佳, 西山和孝
2. 発表標題 はやぶさ2探査機表面損耗とイオンエンジンの中和器制御
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森治, 高尾勇輝, 松下将典, 杉原アフマッド清志, 宮崎康行, 佐藤泰貴, 奥泉信克, 久保勇貴, 尾崎直哉, 船瀬龍, 西山和孝, 月崎竜童, 田畑邦佳, 森下貴都
2. 発表標題 小型セーラー電力セイルによる外惑星領域探査
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田畑邦佳, 西山和孝, 月崎竜童
2. 発表標題 黄道面脱出のための高比推力イオンエンジン $\mu$ 10HISP研究開発状況
3. 学会等名 SOLAR-C時代およびその先の次世代太陽圏研究の検討会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高尾勇輝, 尾崎直哉, 西山和孝, 月崎竜童, 田畑邦佳, 小川秀朗, 鳥海森, 堀田英之, 八田良樹, 関井隆, 今井晋亮
2. 発表標題 太陽極域観測に向けた電気推進を用いた黄道面脱出軌道
3. 学会等名 第33回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田畑邦佳, 月崎竜童, 西山和孝
2. 発表標題 μ10Hisp作動に向けた3Dプリンター製ガス絶縁器の耐電圧性能
3. 学会等名 令和4年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田畑邦佳, 月崎竜童, 今井駿, 森下貴都, 西山和孝
2. 発表標題 深宇宙探査技術実証機DESTINY+イオンスラスターの開発状況
3. 学会等名 令和4年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 魚住承吾, 西山和孝, 月崎竜童, 田畑邦佳, 宮優海, 小磯拓哉
2. 発表標題 マイクロ波放電式イオンエンジンの性能劣化に関する実験的研究
3. 学会等名 令和4年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西山和孝, 月崎竜童, 今井駿, 田畑邦佳, 森下貴都
2. 発表標題 DESTINY+イオンエンジン系の開発
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

JAXA電気推進研究室 <a href="https://stage.tksc.jaxa.jp/wp-eplab/">https://stage.tksc.jaxa.jp/wp-eplab/</a> あいさすAGTE <a href="https://www.isas.jaxa.jp/home/research-portal/project-research-associate/05_tabata/">https://www.isas.jaxa.jp/home/research-portal/project-research-associate/05_tabata/</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------