

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分
平成31年3月6日現在

超小型衛星の多目的実用化時代に向けたオールラウンド超小型
宇宙推進系の実現
All-round Micro-propulsion System for Multipurpose
Utilization of Microsatellites

課題番号：16H06370

小泉 宏之 (KOIZUMI, HIROYUKI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授



研究の概要（4行以内）

世界的に超小型衛星キューブサットの実利用機運が高まる中、本研究では完全無毒な「水」を推進剤とした統合型スラスタを実現させることを目的とする。このために水イオンスラスタ実験、プラズマ計算、ビーム計算の三者の融合的研究から設計指針を得て、水レジストジェットを通した推進系と宇宙機システムの統合設計開発では宇宙飛行機会を獲得した。

研究分野：総合工学

キーワード：航空宇宙工学、推進・エンジン、超小型衛星、電気推進、プラズマ

1. 研究開始当初の背景

2015年、宇宙利用は超小型衛星の多目的実用時代に突入している。これからの鍵は小型推進系の実現であるが、これまでの選択肢は高圧ガスの噴射に頼る低効率推進機のみであった。相乗り打ち上げからの軌道遷移や高度なミッションには、イオンスラスタに代表される高効率な推進機が必須である。

この中で研究代表者は、小型低電力イオンスラスタの研究を進め、50-kg級小型衛星ほどよし4号において世界で初めての小型イオンスラスタ宇宙作動実証に成功した。さらには、研究分担者の船瀬と共に、欧米に先んじて世界初の50-kg級小型深宇宙探査機PROCYONと世界初の深宇宙における多機能型小型推進系の実用化に成功した。

しかし、その後、さらに小さい10-kg級超小型衛星「キューブサット」の実用化がビジネス／探査の両面で急速な成長を見せはじめた。世界初のキューブサットを成功させた日本が今後も世界をリードし続けるには、実績を活かし次世代キューブサット用超小型推進系を実現することである。しかし、高圧ガス機器の小型化は困難である上、必要な推進機能は多様化の一途を見せており、従来とは一線を画す革新的な軽量／安全なキューブサット用超小型推進系が不可欠である

2. 研究の目的

本研究の目的は、完全無毒な「水」を推進剤とした統合型のスラスタを実現させることである。推進系に求められる能力は、高効率／大推力／多軸制御可能と多岐にわたる。したがって、制約の多い小型推進系では統合

型のオールラウンドな推進系が求められるのである。また、水は従来から有望視されていたが、これまでメジャー利用には至っていない。これは大型衛星では性能が最優先されること、水の有する大きな潜熱や酸化特性が要因と言える。しかし、安全性や取扱性が重視される小型衛星ではその魅力が急上昇し、さらに近未来における月等での水採掘機運から注目を受けている。本研究では、排熱を利用する常温型レジストジェットと酸化に強いマイクロ波イオンスラスタを統合し、この点を解決する。

3. 研究の方法

本研究の方法的特色は、実験と数値計算を融合させた推進機研究と、推進系と宇宙機システムの統合的設計開発の2点にある。

分子性の水プラズマは単原子のキセノンプラズマよりも、はるかに複雑な特性をもち内部の物理現象把握が困難であり性能向上の障害となる。本研究では、実績のある実験研究に3D-Full-PICプラズマ計算とイオンビーム計算を融合し性能向上を図る。

超小型衛星の難しさは、そのサイズ故に全ての機器間結合が強いこと、そして、開発期間が極端に短いことである。このため、インターフェースを区切り独立開発と統合を行う従来方式は最適ではなく、研究段階からのシステム統合による課題解決が不可欠である。本研究では推進系と宇宙機システムの両専門家が研究段階から共同で研究開発を進める。これにより実機開発におけるスムーズな統合と、何時の飛行チャンスにも対応できる状況を生み出す。

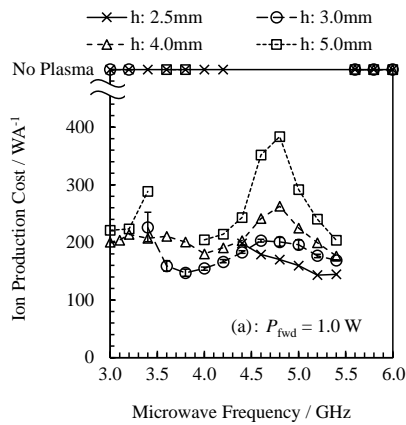


図 1. イオン生成コストの周波数依存性³⁾

4. これまでの成果

4. 1. 水イオンスラスタ実験的最適化

現在、「水」の利用は、世界的に大きな注目を集めているが、水を推進剤としたイオンスラスタの作動に成功しているのは本研究グループのみである。この中で、本研究では、微小流量水蒸気の高精度供給系、マイクロ波周波数を自由に掃引する実験系、放電室内の電位を変更する実験系、これらを一元的制御する実験系を構築し、水イオンスラスタの基本性能²⁾、周波数依存性(図1)³⁾および壁面電位依存性を得て性能向上の指針を得た。

4. 2. 三次元 Full-PIC プラズマ計算

本研究では「3次元 Full-PIC 計算、電子/イオンの実質量比、対称性を使用しない全域計算、分子性プラズマ」を達成した(図2; この後全領域拡張)⁴⁾。国際的電気推進業界に見てこのような数値計算は過去に例がない。これは超小型という特性を利用して、多数の研究が走る大型電気推進プラズマの先手をとった形である。また、電子源高性能化の要である内部電子輸送の要因が周方向プラズマ振動であることが明らかとなった。

4. 3. 全孔ビーム計算

これまでイオンスラスタのビーム計算は、対称性を利用した少数孔の計算と上流プラズマの等方性仮定が使われてきた。これに対し、本研究では小型さを逆にとり、かつプラズマ解析コードと組み合わせることにより、周辺部効果と上流プラズマの非等方性を取り入れた全孔計算に成功した⁵⁾。これは世界的にみても最初の試みである。

4. 4. 水レジストジェットスラスタ実現

常温での水蒸発を利用した「排熱再利用型」の水レジストジェットスラスタの実現に成功した。微小流量故の低レイノルズ数による性能低下に関しては、非定常供給により高レイノルズ数領域を生み出し、平均推力を向上させることで克服した。さらに、衛星との熱結合システムモデルにより排熱利用のための条件を明らかにした。

4. 5. 小型衛星システムの統合設計

本研究課題の1つである水レジストジェ

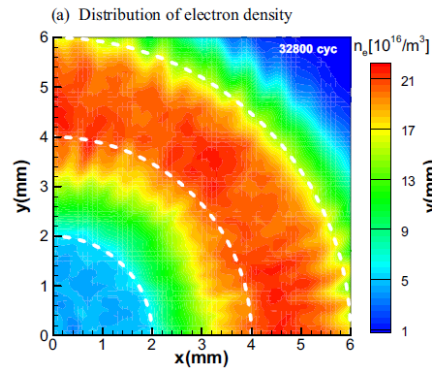


図 2. 3D-Full-PIC 計算による電子密度分布³⁾

ットスラスタの宇宙飛行機会を獲得した⁶⁾。これにより検証方法を実験室レベルでの検証からフライト実機に変更した。このため、システムレベルの完成度は、実験室レベルで達成されるものよりも各段に進んだ。スラスタシステムを衛星システムに組み込んだ状態での熱結合の最適化、推力特性評価、衛星からの排熱利用達成条件の実証が得られた。

5. 今後の計画

これまでに実験および数値計算により得られた知見を統合して、最終的な水イオンスラスタモデルを設計し性能評価を行う。また、レジストジェットよりも高い推力領域をカバーするスラスタについての研究を進める。多軸スラスタスタンドを開発し衛星シミュレータと統合させる。同装置を用いて水レジストジェット/イオンスラスタ統合推進系¹⁾の性能評価を行う。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1) Koizumi, H., et al. "Assessment of Micropropulsion System Unifying Water Ion Thrusters and Water Resistojet Thrusters," J. Spacecr. Rokekts, accepted, 2019.

2) Nakagawa, Y., et al. "Performance characterization of a miniature microwave discharge ion thruster operated with water," Acta Astronautica, in press, 2019.

3) 富田大貴, 他: 水イオンスラスタにおけるマイクロ波周波数及び放電室高さがイオン引き出し性能に及ぼす影響, 日本航空宇宙学会論文集, 66 (2018), pp.153-158, 2018.

4) Nakamura, et al. "Numerical Analysis of a Miniature Microwave-discharge Ion Thruster Using Water as the Propellant," Trans. JSASS, 61(2018), pp. 152-159,

5) Nakano, M., et al. "Numerical simulation of full-aperture-pair ion optics in a miniature ion thruster," Phys. Plasmas, 25 (2018), p. 013524

6) Asakawa, J., et al. "Fundamental Ground Experiment of a Water Resistojet Propulsion System: AQUARIUS Installed on a 6U CubeSat: EQUULEUS," Aero. Tech. Jpn., 16(2018), pp. 427-431. 他に原著論文9件

7. ホームページ等

<http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/koizumi/html/htdocs/>