

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820376

研究課題名(和文)イオンエンジンにおけるスワールトルク発生機構の解明

研究課題名(英文)Azimuthal velocity measurements of ion thruster by laser-induced fluorescence spectroscopy

研究代表者

月崎 竜童(Tsukizaki, Ryudo)

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・助教

研究者番号：70720697

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：推力軸回りの旋回トルク発生メカニズム解明のため、イオンエンジンの推力軸回りのキセノンイオンの旋回速度について、レーザー誘起蛍光法を用いて行った。旋回トルクは宇宙機の姿勢を乱しイオンエンジンの活用妨げになっている。この発生メカニズムは、従来、イオングリッドによるミスアライメントが主たる原因との学説が提唱されてきた。地上計測特有の低速イオンの影響を排除し、秒速45km/sで加速されるイオンに対して、最大70m/s程度の誤差で旋回速度を計測できる精密な測定系を構築した。これによりイオンエンジン内部の磁場で旋回したイオンがグリッド通過後も旋回速度を保ちトルクを生み出していることが初めて明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study reports the first ground study to measure the azimuthal velocities of an ion thruster that produces roll torque. Through the operation of ion thrusters in space, it has been confirmed that thrusters cause an unexpected roll torque about the ion beam axis. To reveal the physical mechanism that produces this torque, laser-induced fluorescence spectroscopy was applied to a microwave ion thruster. This technique can be used to measure the azimuthal velocity by estimating the Doppler shift of xenon ions. By deconvolving these spectra, the azimuthal velocities were successfully measured, which was accurately reproduced by the simulated velocity profile obtained using a model including the effects of the misalignment of the grids and the Lorentz force produced by the magnetic field of the discharge chamber. A roll torque of  $0.5 \mu\text{m}$  about the thrust axis was calculated from the velocity profile; this prediction agrees well with the flight data for the spacecraft.

研究分野：電気推進

キーワード：イオンエンジン プラズマ レーザ誘起蛍光法 マイクロ波

### 1. 研究開始当初の背景

1990年代以降の電気推進機の本格的な宇宙運用を通じて、従来の地上試験環境では確認できなかったイオンビーム周りのスワールトルクが発生していることが判明した。特に、小惑星探査機「はやぶさ」を始め、NASAの「Deep Space 1」や「Dawn」などの深宇宙探査機は、数万時間に及びイオンエンジンの運用が行われ、スワールトルクによる姿勢擾乱は無視できないほど大きなものになった。この擾乱はイオンエンジン単体では解消できず、最終的にRCS(化学スラスタ)やリアクションホイールによる姿勢制御が必須であった。化学燃料は比推力が低く燃料は限られており、燃料の枯渇が宇宙機の寿命律速要因の一つとなっている。またリアクション・ホイールは低軌道に比べ、静止軌道や深宇宙では高真空により潤滑剤の揮発などにより寿命管理が一段と難しく、「はやぶさ」では真っ先にイオンビーム軸のリアクションホイールが故障し、イトカワへのランデブー時への不時着とその後の幾多のトラブルを誘発した。また2013年ではNASAの「ケプラー宇宙望遠鏡」ではリアクションホイールの故障により、ミッションが終了するなど、未だその信頼性は低い。今後、イオンエンジンの深宇宙探査機や静止衛星の南北姿勢制御への活用を進めていく上で、このスワールトルクが姿勢制御上、大きな制約の一つとなっている。しかしながら、スワールトルクの発生メカニズムは未だ明らかになっておらず、この実験的解明が必須であると考えられる。

他の推進機を含め、スワールトルクの地上環境下での研究は、2010年にアメリカ空軍の研究チームによりホールスラスタでイオンの旋回流速度測定の実験結果が報告されている。<sup>3)</sup>またフランスの研究チームが、中和器によって、イオンの旋回流速度が変化していることを発見している。しかしながら、イオンエンジンにおいては、未だ研究報告がない。本研究はイオンエンジンにおける初めてのスワールトルク解明に向けた実験的研究である。

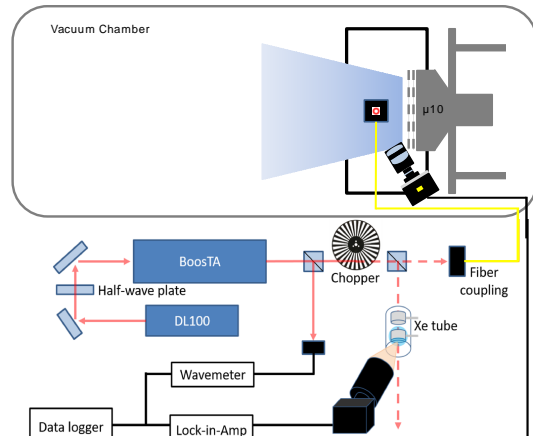
### 2. 研究の目的

1990年代以降のイオンエンジンを始めとした電気推進機の本格的な宇宙運用を通じて、イオンビームの軸を中心としたイオン旋回流によるトルクが発生していることが判明した。この現象は、「スワールトルク」と呼ばれ、 $1-100 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ 程度と微弱な為に、地上試験環境では直接計測が困難である。実際の宇宙運用においては、最終的にリアクション・ホイールや化学スラスタなどによるアンローディングが必須であり、電気推進機の大きな制約になっている。

本研究ではレーザー誘起蛍光法を用いて、地上環境下でイオンの旋回流速度を実験的に求め、スワールトルク発生の原因を突き

止めることを目的とする。

### 3. 研究の方法



上図に示すように、レーザー誘起蛍光法によるイオン旋回流速度測定を行う。外部共振器レーザーから出た光は複数に分岐され、真空チャンバには光ファイバフィードスルーを通じて内部に導入される。真空チャンバでは測定対象のスラスタが設置されており、レーザー光をプラズマに照射する。以下の原理によって速度は求められる。

プラズマ中の電子のエネルギー準位間に等しい波長のレーザーをプラズマに入射することで、電子を上準位に励起させる。

上準位に励起された電子が、違う波長の蛍光線を出し、他の準位に落ちる。

この蛍光線は、粒子の速度に依存して波長がシフトする。(ドップラーシフト)放電管の蛍光線との波長シフトを求めることで粒子の速度を求めることができる。

測定対象のイオンエンジンの磁場を反転させ、磁場の影響とグリッドのミスアライメントの影響を実験的に分ける。

本測定では、地上環境特有の電荷交換衝突による低速イオンの信号が混在していることが判明した。解析的に信号を分離することでイオンの旋回流速度 $\pm 700 \text{ m/s}$ に対して10%程度の誤差で測定が可能になった。

### 4. 研究成果

イオンエンジン内部の磁場で旋回したイオンがグリッド通過後も旋回流速度を保ちトルクを生み出していることが初めて明らかになった。

グリッドが支配的な要因と提唱されていたが、イオンエンジンの磁場が主たる原因であることが初めて明らかになった。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

1. 月崎電重、山本雄大、細田聡史、西山和

- 孝、國中均，マイクロ波放電式イオンスラストにおける放電室分割による推進性能への影響，*日本航空宇宙学会論文*，Vol. 65, No. 1, pp. 17-20, 2017
2. Daiki Koda, Hitoshi KUNINAKA and **Ryudo TSUKIZAKI**, Demonstration of Negative Fullerene Ion Thruster Combined with Positive Xenon Ion Thruster, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sections, Aerospace Technology Japan, Vol.14, (2016), No.ists30, p.Pb\_203-Pb.208
  3. Kasutaka NISHIYAMA, Satoshi HOSODA, Kazuma UENO, **Ryudo TSUKIZAKI**, Hitoshi KUNINAKA, Development and Testing of the Hayabusa2 Ion Engine System, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sections, Aerospace Technology Japan, Vol.14, (2016), No.ists30, p.Pb\_131-Pb.140
  4. **月崎竜憲**、山本雄大、神田大樹、細田聡史、西山和孝、國中均，レーザ誘起蛍光法によるマイクロ波放電式イオンスラスト  $\mu 10$  の旋回流計測，*プラズマ応用科学*，Vol.23 No.2，pp.69-74，2016
  5. 谷義隆，**月崎竜憲**，西山和孝，細田聡史，國中均，マイクロ波放電式中和器における2価イオンの流量依存性，*プラズマ応用科学*，Vol. 22, No. 2, pp.75-80, 2015
  6. 伊勢俊之，**月崎竜憲**，都甲浩芳，小泉宏之，國中均，電気光学素子ファイバプローブを用いたマイクロ波放電式イオンスラスト  $\mu 10$  の内部現象解明，*日本航空宇宙学会論文集*，Vol. 62, No. 6, pp. 212-218, 2014.
  7. **Ryudo Tsukizaki**, Toshiyuki Ise, Hiroyuki Koizumi, Hiroyoshi Togo, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka., Thrust Enhancement of a Microwave Ion Thruster, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 5 (2014), pp. 1383-1389. doi: 10.2514/1.B35118
- [学会発表](計 27 件)
1. **Ryudo TSUKIZAKI**, Yoshitaka Tani, Satoshi HOSODA, Kazutaka NISHIYAMA and Hitoshi KUNINAKA, XeIII Measurement of Microwave Cathode in Throttling Operation, B-2, The 23rd Annual Meeting off IAPS/The 9th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Bangkok, Thai, March 2016
  2. Yoshitaka Tani, **Ryudo Tsukizaki**, Daiki Koda, Hitoshi Kuninaka “Development of 1A-class Microwave Discharge Cathode”, The 8th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, AJCPP2016-164, Kagawa, Japan, March 2016
  3. Shunichiro Ide, **Ryudo Tsukizaki** and Hitoshi Kuninaka, A Development of power supply for AF 2D-MPD, AJCPP2016-143, Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Takamatsu Japan, March 17 2016
  4. **Ryudo Tsukizaki**, Ippei Nishiyama, Satoshi Hosoda, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka, Improvement of the Thrust Force of the  $\mu 10$  Microwave Ion Thruster by Optimizing the Potential of the Conductive Wall, IEPC-2015-332/ISTS-2015-b-332, 34th International Electric Propulsion Conference, Kobe Japan, July 10 2015
  5. Kazutaka Nishiyama, Satoshi Hosoda, Kazuma Ueno, **Ryudo Tsukizaki**, Hitoshi Kuninaka, Development and Testing of the Hayabusa2 Ion Engine System, IEPC-2015-333/ISTS-2015-b-333, 34th International Electric Propulsion Conference, Kobe Japan, July 10 2015
  6. Satoshi Hosoda, Kazutaka Nishiyama, **Ryudo Tsukizaki**, Hitoshi Kuninaka, Initial Checkout after Launch of Hayabusa2 Ion Engine System, IEPC-2015-334/ISTS-2015-b-334, 34th International Electric Propulsion Conference, Kobe Japan, July 10 2015
  7. Yoshitaka Tani, **Ryudo Tsukizaki**, Daiki Koda, Satoshi Hosoda, Hitoshi Kuninaka “1-A class Microwave Discharge Cathode Using Impregnated Tungsten”, The 34th International Electric Propulsion Conference, IEPC-166/ISTS-2015-b, Kobe, Japan, July 2015
  8. Kazutaka Nishiyama, Satoshi Hosoda, **Ryudo Tsukizaki**, and Hitoshi Kuninaka. "In-Flight Operation of the Hayabusa2 Ion Engine System in the EDVEGA Phase", 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Propulsion and Energy Forum, (AIAA 2015-3718), July 2015, <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-3718>
  9. **Ryudo Tsukizaki**, Status of the Japanese Hayabusa2 Asteroid

Explorer Mission, NASA Hyper Wall  
日本地球惑星連合講演会, 幕張メッセ,  
2015年5月

10. **Ryudo Tsukizaki**, Ippei Nishiyama, Satoshi Hosoda, Kazutaka Nishiyama and Hitoshi Kuninaka, Improvement of the thrust force of the microwave ion thruster by optimizing the potential of the discharge chamber wall, B-2, The 22nd Annual Meeting off IAPS/The 8th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Hawaii, USA, March 2015
11. **Ryudo Tsukizaki**, PLASMA DIAGNOSTICS OF THE MU10 MICROWAVE ION THRUSTER, IAC-14.C4.4.8, 65th International Astronautical Congress, Toronto, Canada, Sep.-Oct. 2014
12. Yoshikawa Makoto, **Ryudo Tsukizaki**, STATUS OF THE JAPANESE HAYABUSA-2 ASTEROID EXPLORER MISSION, IAC-14.A7.3.4, 65th International Astronautical Congress, Toronto, Canada, Sep.-Oct. 2014
13. Ippei Nishiyama, **Ryudo Tsukizaki**, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka. "Experimental Study for Enhancement Thrust Force of the ECR Ion Thruster  $\mu 10$ ", 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Propulsion and Energy Forum, (AIAA 2014-3913), July, 2014  
<http://dx.doi.org/10.2514/6.2014-3913>
14. **Ryudo Tsukizaki**, Toshiyuki Ise, Hiroyuki Koizumi, Hiroyoshi Togo, Kazutaka Nishiyama, Improvement of the thrust force of the microwave ion thruster of HAYABUSA, 14th International Space Conference of Pacific-basin Societies, Xian, China, May, 2014

国内発表他 13件以上

宇宙輸送シンポジウム 2015、2016、2017

宇宙科学技術連合講演会 2015、2016

育志賞発表会 2014 など多数

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：

番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.ep.isas.jaxa.jp/eplab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
月崎 竜童 (Tsukizaki, Ryudo )  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
助教  
研究者番号：70720697

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：

(4) 研究協力者  
山本 雄大 (Yamamoto, Yuta )