

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2011～2014
課題番号：23686123
研究課題名(和文)ホールスラストの耐久性向上に関する研究

研究課題名(英文)Lifetime extension in Hall thrusters

研究代表者

山本 直嗣(naoji, yamamoto)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40380711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,900,000円

研究成果の概要(和文)：次世代宇宙用推進機であるホールスラストは、人工衛星の小型化および高機能化を強力に推進するため、各国で競って研究開発が進められている。しかしながらホールスラストには耐久性の向上という課題が残っている。そこで磁場形状と寿命の関係を調査し、長寿命化の指針を得るために必要不可欠なリアルタイムで定量的に寿命が計測できるキャビティリングダウン分光法を用いた寿命評価センサを開発し、寿命と磁場形状の関係を調査した。

研究成果の概要(英文)：Hall thrusters are a class of electric propulsion device in which a propellant gas is ionized and accelerated to produce thrust. They offer an attractive combination of high thrust efficiency (exceeding 50%) and specific impulse (~1,000-3,000 s). A key requirement for the practical use of Hall thrusters is the ability to operate for long durations (more than 10,000 hrs). For optimization of lifetime, what is needed, is a method of quantitatively measuring thruster erosion rates non-intrusively in real- or near real-time, for example by in situ measurement of the eroded wall material. The primary life-limiter for Hall thrusters is acceleration channel wall erosion. Therefore, we have developed a CRDS erosion sensor and have made a study on the dependence of erosion rate on magnetic field configuration.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：ホールスラスト 寿命評価 キャビティリングダウン法 電気推進 光学測定

1. 研究開始当初の背景

宇宙利用コストの大幅な低減が要求されている今日、国際的な宇宙開発の流れとして軌道保持、姿勢制御のための推進系も高性能な電気推進の搭載が不可欠となってきている。電気推進は、小惑星探査機“はやぶさ”で実証されたように、従来のエンジンと比較して5-10倍燃費がよい。そのため大幅な燃料の低減が望め、衛星の小型化の促進が期待できる。電気推進の中でも、ホール電流を利用したホールスラスタ(図1)は比推力1,500-3,000秒でエネルギー変換効率が50%以上と高く、その推進原理上、高密度イオンを排出できるため、同じ推力レベルのイオンエンジンと比較するとサイズは1/3とコンパクトであり、次世代宇宙推進機として最も注目され研究開発が進められている。

ホールスラスタの開発における最重要課題として、耐久性の向上が挙げられる。ホールスラスタの寿命の決定要因は高速イオンの衝突により壁面が損耗することである(図2)。従って耐久性の向上には、イオンの加速に影響を及ぼす磁場形状と寿命の関係を調査し、磁場形状を最適化の必要がある。しかしながら寿命の評価は、数億円の費用と数千時間の時間を費やす耐久試験を行い、壁の損耗度合いを測定するしかない。ゆえに、膨大な時間がかかる耐久試験を複数回行う必要がある「寿命の磁場形状依存性の調査」は現実的ではなかった。この現状を打破するためには、コストと時間がかからないリアルタイムで定量的に寿命が評価できるセンサが必要である。

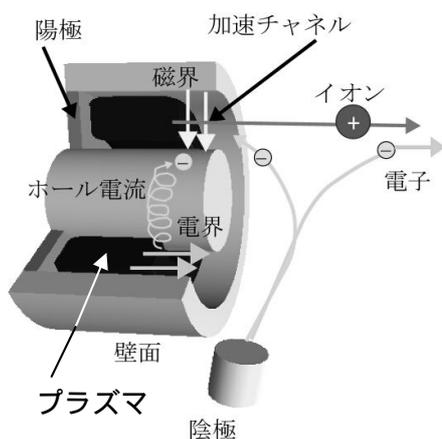


図1 ホールスラスタ概念
電界と磁界によりイオンの生成・加速を制御する。

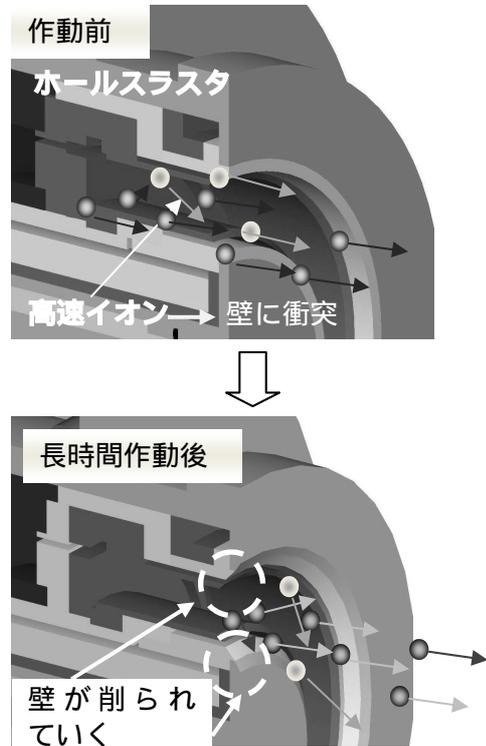


図2 ホールスラスタの損耗のメカニズムおよび寿命評価センサの概念

2. 研究の目的

本研究課題の目的はホールスラスタの寿命を現状の二倍の一万時間以上に延ばすことである。そこで、

1. 寿命評価センサとして、「リアルタイム」で、「定量的」に、壁面の損耗量を算出するセンサを開発し、妥当性の検証を行う。
2. 開発したセンサを用いて、スラスタの磁場形状と寿命の相関関係を調査する。
3. 並行して、プラズマ密度・温度の2次元分布を計測し、壁面に衝突するイオンの生成・加速過程と磁場形状の関係を定量的に解明し、最適な磁場形状を探索する。壁の損耗とともに最適な磁場形状は変化していく。
4. 開発した寿命評価センサを用いて、電源自身が自己判断で、磁場を作る複数のコイルに流す電流を制御して常に最適な磁場で作動できるシステムを開発する。

得られた知見をもとにホールスラスタを再設計し、一万時間以上の耐久性を実証する。

3. 研究の方法

図2に示したとおり，ホールスラストの寿命の決定要因は，壁面がイオンによって削られ，損耗することである．そこで，寿命を壁面からスパッタされた電極材料の原子の流束をリアルタイムで計測することにより，電極の損耗量すなわち寿命をリアルタイムで評価することが可能となる．

そこで光学測定法の一つであるキャピティリングダウン法をもちいて，壁面材料原子の密度および速度を計測し，流束を算出した．

キャピティリングダウン法は非常に感度のよい，レーザー吸収分光法の一つであり，スパッタされた原子の検出方法として，数多くの研究がなされてきた．この手法は2枚の高反射ミラー（99.99%以上）で光学キャピティを構成し，プローブ光の光路長を稼ぎ感度を向上させる手法である．ほかの吸収分光法と同様に，下順位（基底状態）の測定を行う．従来の吸収分光法と比較すると，非常に小さい感度まで測定が可能で，一般にその感度限界は，1秒間の測定で， 10^{-8} - 10^{-11} cm⁻² である．

図3のように宇宙空間を模した真空容器内に，ホールスラストおよび光学キャピティを設置し，キャピティリングダウン法を用いた損耗量評価システムを用いて壁面の損耗量を計測した．光学システムは，レーザーと様々な光学機器からなる．光源として，外部共振器付半導体レーザーを用いた．

レーザーの大まかな波長は波長計によってモニタリングし，相対周波数の較正には，ファブリーペロー型干渉計を用いた．光学キャピティの長さは0.55 mであり，2つの高反射ミラー（直径 25.4 mm，1 m の曲率）で構成されている．レーザービームはスラスト下流 3 cm を通過している．

計測結果は Lab view を用いてデータ処理している．図4に解析プログラムの表示例を示すが，得られた信号から損耗量が算出できるようにしている．

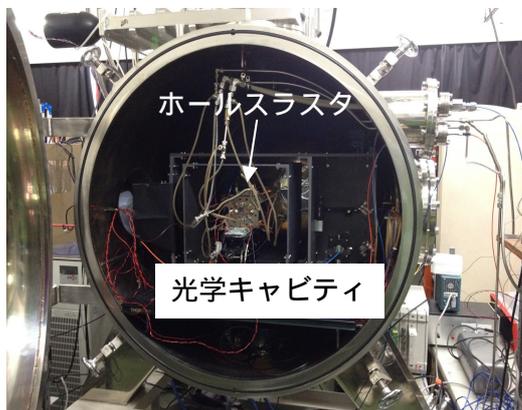
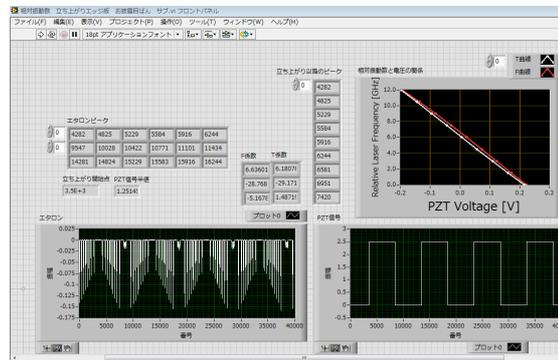


図3 キャピティリングダウン法実験装置外観



4. 研究成果

キャピティリングダウン法を用いて、スパッタされた壁面物質を計測する耐久性センサを開発した。測定は壁面材料であるアルミニウムの 394.5 nm の吸収ラインを用いて行った。放電電圧 150 V、キセノンガス流量 14 sccm において、スラスト停止時とスラスト作動時のリングダウンタイムの例を図 6 に示す。このようにスラスト作動中は壁面が削られ、スパッタされた粒子によりリングダウンタイムが減少している。これを積分して算出された密度は $2.1 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ であった。さらに寿命と磁場依存性を調査し、磁場の増加に伴い寿命が延びていることを確認した。

ニューロ制御システムの構築のために、ニューラルネットワークの学習がうまく動作するかを確認した。推進剤流量を 1.36 mg/s に設定し、放電電圧を 200V、250V、300V の 3 パターンで行った。この時、内部コイル、外部コイルにかかる電流を徐々に増やすことで磁場を強くし、それに応じて変化する放電電流振動の大きさを測定した。この測定によって得られたデータをニューラルネットワークの教師データとして学習させた。この結果として実験値とニューラルネットワークによる出力を比較したのが図 7 である。ニューラルネットワークの出力により求めた最適磁場は、放電電圧が 200V、250V、300V のそれぞれに対して内部コイル電流が 0.675A、0.748A、0.926A の時であるということが得られた。この結果により、実際にホ

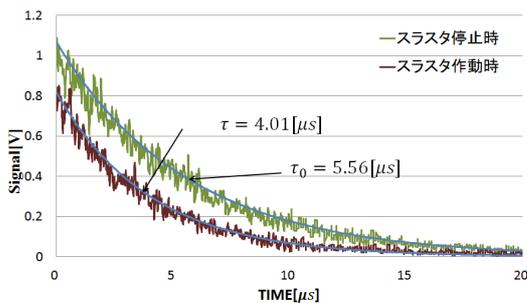


図 6 リングダウンタイムの例

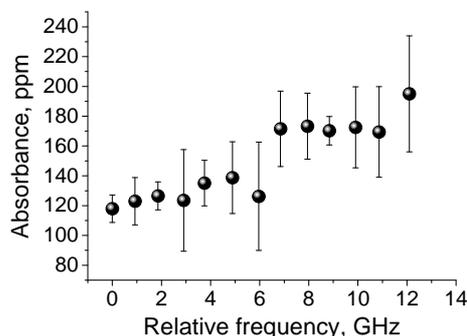


図 7 ホールスラスト作動時の吸収スペクトル、放電電圧 150 V、ガス流量 1.36 mg/s

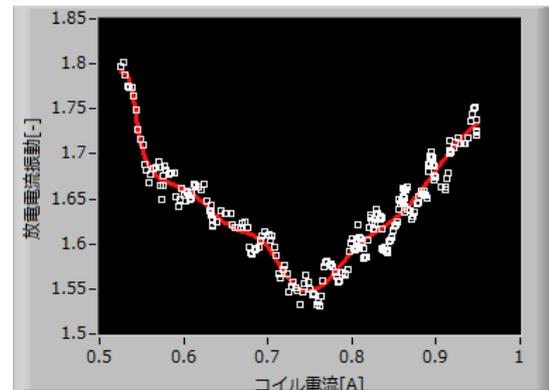
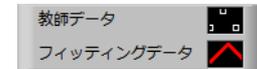


図 7 ニューラルネットワークによる出力

ールスラストを作動させるときの最も性能がよくなるコイル電流値を得ることができた。さらに、教師データを得るために内部コイルにかけた電圧を変化させた。『学習データ作成』と示した範囲で磁場を徐々に変化させた時のデータを所得し、次にそのデータをニューラルネットワークに学習させ、学習によって得られた最適値の出力にコイル電流を制御する事に成功した。

次に、キセノンプラズマでもレーザートムソン散乱法が使える事を示すため、レーザーのエネルギーを変更させながらトムソン散乱信号 (530.5 nm) を計測した。図 8 にレーザーのエネルギーに対する 5000 ショット当たりの信号数を示す。レーザーエネルギーが 50 mJ 以下では理論通りレーザーエネルギーに対して比例しているが、50 mJ を超えると信号がレーザーエネルギーの 3 乗に比例しており、光電離が起こっているが分かる。このときの準安定順位 $6s [3/2]_2^0$ の数密度は吸収分光法より、 $1.7 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ であり、このようなプラズマではレーザートムソン散乱をする際のプローブレーザー光の強度を $1 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$ 以下にする必要があることが分かった。

レーザー強度を下げる方法として、レーザーの出力を下げる方法が最も簡易であるが、信号が減少するため計測に時間がかかる。そこで、強度は下げて検出効率をそのままにするために、レンズを変更し、さらに計測効率向上のために、従来の円形ミラーではなく、楕円ミラーを用い、また散乱光の検出器として、光電子増倍管ではなく、Gen の ICCD カメラを用いて計測を行ったところ、検出効率がレーザー強度を下げたにもかかわらず 3 倍に上がることを確認した。

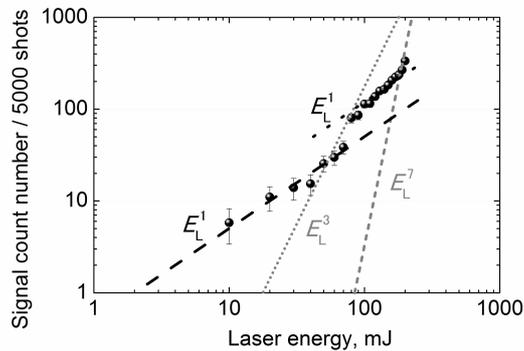


図8 レーザートムソン散乱信号

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- (1) Performance Improvement of Hall Thrusters Using a Pulse-Synchronous Driver System, T. Tamida, H. Osuga, N. Yamamoto, H. Takegahara, J. Aoyagi, and K. Kuriki. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 3 (2015), pp. 956-961.
- (2) Performance Improvement of Hall Thrusters Using a Pulse-Synchronous Driver System Development of a novel power processing unit for Hall thrusters, N. Yamamoto, H. Takegahara, J. Aoyagi, K. Kuriki, T. Tamida, H. Osuga, *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. 43, NO. 1, JANUARY 2015
- (3) Thomson Scattering Diagnostics in the Plasma of an Ion Thruster, N. Yamamoto, Y. Hiraoka, K. Sugita, T. Kurita, K. Tomita, K. Uchino, H. Nakashima, *Trans. of the Jap. Soc. FOR Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 10 (2012), 2012 Pb_79-Pb_83.
- (4) Measurement of xenon plasma properties in an ion thruster using laser Thomson scattering technique, N. Yamamoto, K. Tomita, K. Sugita, T. Kurita, H. Nakashima, and K. Uchino, *Review of Scientific Instruments*, 83, 073106 (2012);
- (5) Thrust performance of a low power Hall thruster, N. Yamamoto, T. Ezaki and H. Nakashima, *Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, 9, ists28, 2012.05.
- (6) High Efficiency Control Method for the Hall Thruster System through Constant Flow Rate Control by Power Supply Control, H. Osuga, F. Kurokawa, T. Tamida, N. Yamamoto, *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, Vol. E95-B, No. 1, pp. 133-142, 2012.01.
- (7) ホールスラスタの振動マップの規格化と電力制御技術大須賀 弘行, 黒川 不二雄, 民田 太郎, 山本 直嗣, 三浦 末志, *航空宇宙技術*, Vol. 11, No. 1, pp. 19-25, 2011.08.
- (8) Plasma Properties in a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster, T. Ezaki, N. Yamamoto, T. Tsuru, Y. Kotani, H. Nakashima, N. Yamasaki,

K. Tomita, and K. Uchino, *Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, 8, ists27, pp. Pb_39-Pb_44., 2011.

(9) Development of Real-time Erosion Monitoring System for Hall Thrusters by Cavity Ring-Down Spectroscopy, N. Yamamoto, L. Tao, A. P. Yalin, *Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology, Japan*, 8, ists27, pp. Pb_39 - Pb_44, 2011.

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) Measurement of Aluminum Erosion Rate by Cavity Ring-Down Spectroscopy, A. Yamaguchi, *ISTS-paper 2015-b-17-s*, 2015.7, kobe, Japan.
- (2) キャピティリングダウン法を用いたグリッド損耗評価システムの構築, 木邊 厚視, 山口 敦, 山本 直嗣, 森田 太智, 中島 秀紀, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会 1L12, 2014 年 11 月, 長崎
- (3) パルス重畳電源を用いたホールスラスタの性能調査及び回路モデルの構築, 伊藤 匠, 山本 直嗣, 中島 秀紀 (九大), 竹ヶ原 春貴, 栗木 恭一 (首都大), 大須賀 弘行, 民田 太郎 (三菱電機)
- (4) パルス重畳電源を用いたホールスラスタのイオンエネルギー分布, 伊藤匠, 山本直嗣, 中島秀紀, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 2014 年 1 月, 神奈川県相模原市
- (5) アノードレイヤ型ホールスラスタの陽極形状と推進性能, 伊藤匠, 山本直嗣, 中島秀紀, 平成 25 年度航空宇宙学会西部支部会, 2013 年 11 月, 山口
- (6) Development of a novel power processing unit for Hall thrusters, N. Yamamoto, H. Takegahara, J. Aoyagi, K. KUriki, T. tamida, H. Osuga, *IEPC2013*, 2013 年 10 月, ワシントン D.C., アメリカ合衆国
- (7) Erosion Sensor for Anode Layer Type Hall Thruster, N. Yamamoto, A. Kibe, and H. Nakashima, 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013 年 6 月, Nagoya, Aichi, Japan.
- (8) Cavity Ring Down Spectroscopy Sensor for Lifetime Estimation of Ion Thrusters, A. Kibe, a, 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013 年 6 月, Nagoya, Aichi, Japan.
- (9) キャピティリングダウン分光法を用いたイオンスラスタの寿命評価システムの開発, 山本 直嗣, 木邊 厚視, 中島 秀紀, 第 53 回航空原動機・宇宙推進講演会, 2013 年 3 月 4 日 倉敷, 岡山県
- (10) ホールスラスタのパ同期駆動方式開発, 山本, 直嗣, 民田 太郎, 大須賀 弘行, 竹ヶ原 春貴, 栗木 恭一, 平成24年度宇宙輸送シンポジウム, 2013年01月, 神奈川県相模原市
- (11) 5kW級アノードレイヤ型ホールスラスタの設計とさらなる大型化への指針, 山本直

嗣, 横田茂, 小紫公也, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会 2012 年 11 月, 大分県別府市.

(12) Dependence of lifetime on magnetic field configuration in a Hall thruster, N. Yamamoto, et al., 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 30 July 2012, Atlanta, Georgia, USA

(13) Development of a Miniature Microwave Discharge Ion Engine, N. Yamamoto, Asian Joint Conference on Propulsion and Power, 2012 年 3 月 2 日, 西安, 中華人民共和国

(14) 小型イオンエンジンシステムの開発. 山本直嗣, 平岡義章, 杉田健策, 平野賢治, 中島秀紀, 坂本雄樹, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 2011 年 11 月 30 日, 愛媛県松山市

(15) Measurement of Plasma Property in an Ion Thruster using Laser Thomson Scattering Technique, N. Yamamoto, et al., IEPC2011, 2011 年 9 月, ウィズバーデン, ドイツ

(16) Thomson Scattering Diagnostics in the Plasma of an Ion Thruster, Naoji Yamamoto, et al., The 28th international Symposium on Space Technology and Science, 2011 年 6 月, Ginowan city, Okinawa

〔その他〕

ホームページ等

<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/members/yamamoto/houga/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 直嗣 (YAMAMOTO NAOJI)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号: 40380711