

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656540

研究課題名（和文）キャビティリングダウン分光法を用いたイオンエンジンの寿命評価システムの開発

研究課題名（英文） Development of ion engine lifetime estimation system using Cavity ring down Spectroscopy technique

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

研究成果の概要（和文）：

「はやぶさ」の成功でその有益性が実証されたイオンエンジンではあるが、普及に向けた最大の課題として耐久性の向上が挙げられる。イオンエンジンの耐久性は引き出し電極の損耗が最大の要因であるため、従来の評価方法に代わり、「リアルタイム」で、「定量的」にイオンエンジンの寿命が評価可能な、光学測定法の一つであるキャビティリングダウン法を用いたシステムを構築した。

研究成果の概要（英文）：

Ion thruster and other Electric propulsion devices have become alternatives to traditional chemical propulsion for space application. HAYABUSA developed by JAXA succeeded in gathering samples from an asteroid and return to the Earth. The ion engines require long operational period of more than 10,000 hours, due to the limitation of electric power supply in space. It makes assessment for lifetime difficult. The experiment of durability certification requires several tens of thousands hour and enormous cost. Instead of conventional lifetime validation methods, real time lifetime estimation sensor is required. The lifetime limiter of the ion thrusters is wear of the accelerator grid. Therefore, lifetime of the ion thruster can be estimated by detecting wear amount of the acceleration grid, which is obtained by detecting sputtered particles from the acceleration grid. Therefore, we developed detection system of sputtered particles using cavity ring down spectroscopy (CRDS) technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：イオンエンジン， 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

温暖化ガスの監視や地震等の災害時に
おける通信など、宇宙利用はますます盛んにな
ると予想される。一方、人工衛星は一機あたり
数百億円と宇宙利用の敷居はまだまだ高い。
この敷居を下げる革新技術のひとつに、
次世代推進機であるイオンエンジン(図 1)が
ある。イオンエンジンは小惑星探査機「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 10 -100 倍燃費がよい。そのため、
衛星の重量の大部分を占めていた燃料を大
幅に削減でき、人工衛星の小型・高機能化を
もたらす。

イオンエンジンの普及に向けた最大の課
題は長寿命化である。長寿命化には寿命とイ
オン加速用電極の形状との依存性の解明が
必要不可欠であるが、従来の寿命評価方法
では莫大な時間(1万時間以上)と費用(数億
円)がかかるため、複数回の測定が必要な依
存性の調査は現実的ではなかった。この問題
を解決する革新技术が「リアルタイム」で「定
量的」に寿命を計測できるシステムである。

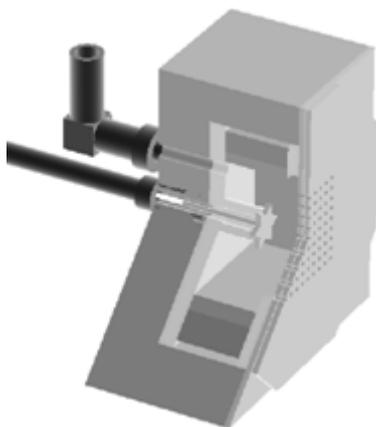


図 1 イオンエンジン概略図

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、イオンエンジンの寿
命を「リアルタイム」で「定量的」に寿命を
計測できるシステムを開発することである。

これと並行して寿命評価のための数値解
析ツールを改良して、寿命最適化ツールを開
発する。

3. 研究の方法

図 2 に示したとおり、イオンエンジンの寿
命の決定要因は、イオン加速電極がイオン
によって削られ、損耗することである。そこ
で、寿命をイオン加速電極からスパッタされ
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。

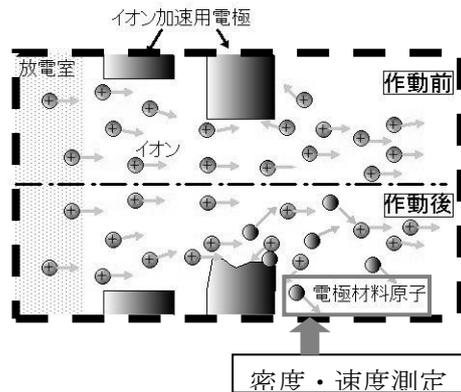


図 2 電極損耗の様子

そこで光学測定法の一つであるキャビティ
リングダウン法をもちいて、電極材料原子の
密度および速度を計測し、流束を算出した。

キャビ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
ビティを構成し、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。

リングダウン法はキャビティ内から漏れ
る光の強度が指数関数的に減衰していくそ
の減衰率 $S(t, \nu)$ を測定することによっ
ても止まる。

$$S(t, \nu) = S_0 \exp[-t/\tau(\nu)]$$

$$1/\tau(\nu) = \frac{c}{l} \left[\int k(x, \nu) dx + (1-R) \right] \quad (1)$$

ここで ν はレーザーの周波数、 τ はリング
ダウン時間と呼び、 $1/e$ になる時間、 c は光
速、 l はキャビティの長さ、線積分の方向 x は
ビーム方向、 k は吸収係数、 $1-R$ はミラーの
ロス(散乱やキャビティロスを含む)である。
吸収される物質の線密度はリングダウンタ
イムの変化から計算できる。吸収体が長さ
 l_{abs} の柱状態では均一であるとする
と、 $\int k(x, \nu) dx$ は $k(\nu) l_{abs}$ となる。実
際、測定されたリングダウン信号は指数関
数でフィッティングされ、リングダウン時
間 τ が求まる。 τ と τ_0 から、サンプ
ルの吸収度 $Abs(\nu)$ と吸収係数が求まる。

$$Abs(\nu) = \int k(x, \nu) dx = \frac{l}{c} \left[\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right] \quad (2)$$

レーザーの周波数を掃引し、得られた吸
収度のプロファイルを積分することにより、レ

ーザーの通り道上で積分された下順位の密度 $N_i dx$ が以下の式で求められる。

$$\int N_i dx = \frac{V_{ki}^2}{c^2} 8\pi \frac{g_i}{g_k} \frac{1}{A_{ki}} \left(\int Abs(v) dv \right) \quad (3)$$

また、波長スペクトルは微細構造だけでなく、測定対象の速度分布を反映したスペクトルとなる。すなわち、ドップラーシフトにより、吸収スペクトルは変化する。一般にスパッタ粒子の速度分布関数はトムソン分布を持つことが知られているため、これを考慮した関数でフィッティングすることにより、吸収スペクトルからターゲット原子の速度を算出することができる。この妥当性はこれまでの研究により確かめられている。

このようにして、CRDS法により速度と密度が算出されるため、ターゲットの流束、すなわち損耗量が算出可能となる。そこでCRDS損耗量算出システムを構築した。

一方、JAXAが開発中の電極の寿命評価のための数値解析ツールを、寿命最適化ツールに改良した。実験結果と比較検証を行い、数値解析ツールの検証を行うとともに、長寿命化の指針を得ることを。最適化のツールとして、利用のしやすさや任意の最適化ができるという観点から遺伝アルゴリズムを用いた。本研究では、この遺伝アルゴリズムにJIEDIコードを組み込み、グリッド最適化ツールの開発を行った。

損耗解析コードのフローチャートを図3に示す。このコードでは、中性粒子・イオンの軌道計算、損耗計算、メッシュの再構築を繰り返すことによりグリッドの崩壊や電子の逆流までのグリッド損耗をシミュレートする。解析領域は、グリッド近傍のイオン生成部から中和部までの領域を対象とする。図4に示すように、多数の孔が空いているグリッドの一孔部分に注目し、さらに対称性を利用し、一孔の1/12を解析領域とする。

遺伝アルゴリズム (GA:Genetic Algorithms) は、生物の進化(選択淘汰、突然変異)の原理に着想を得たアルゴリズムである。選択・交叉・突然変異といった遺伝的操作と評価を繰り返すことにより、最適な解を見つける手法である。評価については、任意に設定した関数により行い、目的に沿って設定することができる。

本研究では、評価関数として、電子逆流が始まるまでの時間×推力係数として、寿命と性能の両方で評価した。初期状態での損耗量を評価関数とすることと比較して、計算コストはかかるが、より正確に寿命を評価できるため、このような評価関数を採用した。

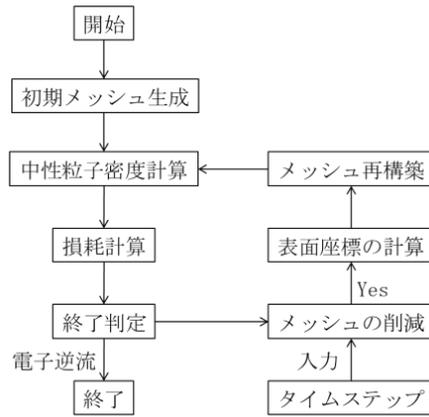


図3 損耗解析コードのフローチャート

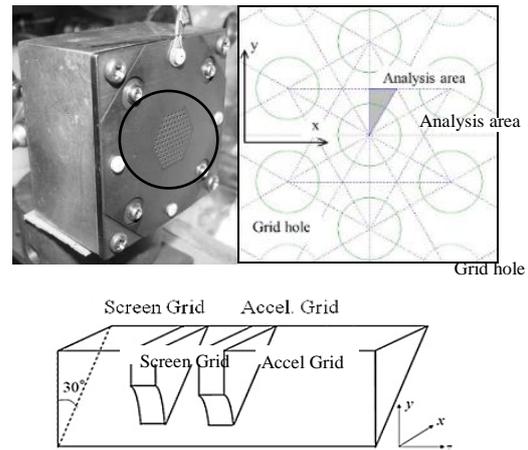


図4 解析領域

4. 研究成果

今回開発した光学システムの概略図を図5に示す。光源として、外部共振器付半導体レーザーを用いた。このレーザーは22 GHz以上の幅でモードホップせずに掃引でき、線幅は1 MHz以下である。レーザーに戻り光が戻ってこないように、光学アイソレーターを用いている。レーザーはファイバケーブルを用いて、偏光面保持のシングルモードファイバに導入し、真空チャンバ内に導入している。キャビティを出た光はアバランシェフォトダイオード (APD) もしくはフォトマルチチューブ (PMT) に導入し、信号を検出した。バンドパスフィルタを用いて、信号成分だけを検出するようにしている。

レーザーの周波数とキャビティの共振周波数が一致すると、APDの信号が増加する。これを閾値回路が検出しトリガーを音響光学変調器 (AOM) に送る。トリガー信号がくると、AOMはレーザーを遮断し、それ以上レーザーがキャビティに行かないようにする。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、同時にモードホップが起っていないかを確認している。相対周波数

の校正には、ファブリーペロー型干渉計を用いた。図6にキャビティの外観を示す。光学キャビティの長さは55cmであり、2つの高反射ミラー（直径25.4mm、1mの曲率）で構成されている。レーザービームはスラスタ下流3cmを通過している。何も無い状態でのリングダウン時間はおよそ20 μ sである。コンタミネーション物質がミラーにつきにくいように複数のアイリスを用いた。これは同時にプルームからの発光を除去することにも貢献している。

本研究対象として、本研究室で開発した小型マイクロ波放電型イオンスラスタを図7に示す。放電室の内径は21mmであり、スラスタの外形は50mm \times 50mm \times 30mmである。磁気回路は数個のサマリウムコバルト(Sm-Co)磁石と軟鉄製のヨークからなる。イオン源内部の磁場強度はSm-Co磁石の数を変更することによって変えることができる。マイクロ波の周波数は2.45GHzで実験を行った。

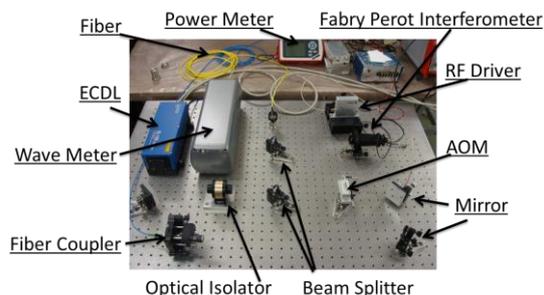


図5 光学系外観図

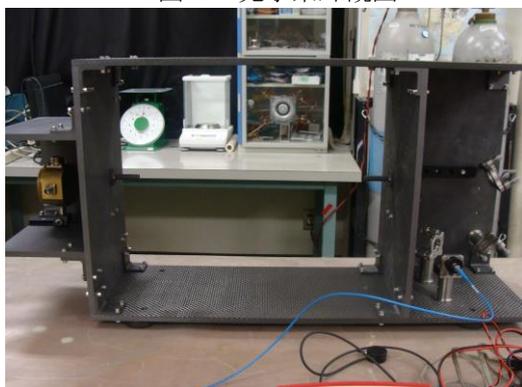


図6 CRDS キャビティ外観図

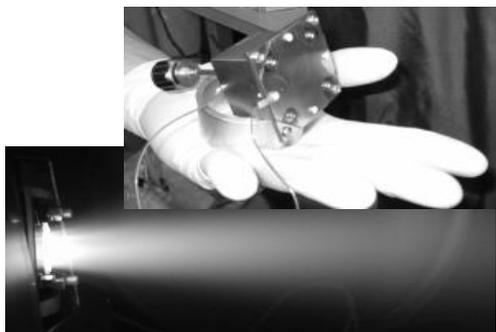


図7 小型イオンエンジン外観

アンテナ形状に関して、過去の研究より星型が最も性能が良かったため星型のアンテナを用いた。

イオンエンジンのアクセルグリッドの損耗量を測定するためのCRDSを用いた計測システムを構築した。

図8にリングダウン信号の一例を示すが、リングダウン時間は1.7 μ sであり、リングダウン時間の標準偏差は0.02 μ sで会ったことから、構築したシステムの検出限界は $4 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$ と想定される線密度 $6 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$ よりも小さい事が分かった。さらなる検出限界の改善が求められる事が明らかになった。

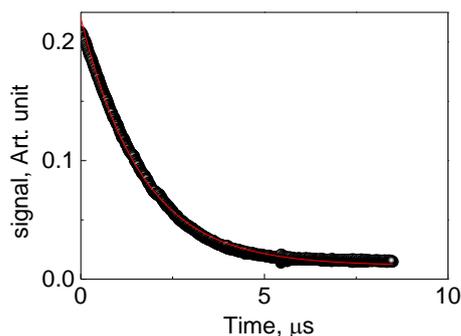
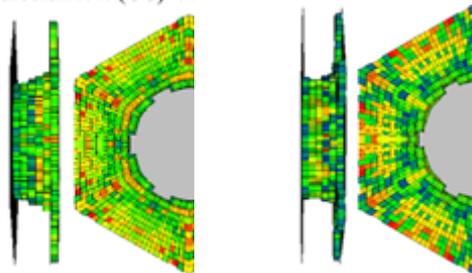


図8 リングダウン信号の一例

遺伝アルゴリズムを用いたグリッド最適化ツールの開発を行った結果、従来研究室で使っていたグリッドの寿命38000時間程度だった寿命が86000時間と2倍程度の長寿命化されたグリッドを設計することができた。

図10に作動開始3万時間後の損耗状況を示す。損耗状況を比較すると、GAが最適と選出した条件では電極の損耗が抑えられていることが分かる。軸上の最小電位の変化に注目すると、動作開始時に注目すると、アクセルグリッドの印加電圧が大きい分、当研究室のモデルと比べ2倍程度、電位の谷は深くなっている(図10参照)。また、電位の上昇率は、グリッドの損耗状況が小さいため、当研究室のモデルよりも抑えられている。そのため、電子逆流が生じる時間が2倍程度延びたと考えられる。これらの成果によりグリッド設計の最適化ツールの開発に成功した。



(b) Laboratory Model (a)GA Model

図9 グリッドの損耗状況の比較

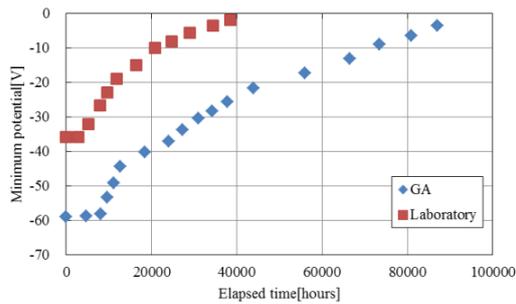


図 11 電子逆流までの軸上最小電位の変化

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

(1) 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, 査読有り, http://dx.doi.org/10.2322/tastj.10.Pb_79

(2) 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); 査読有り <http://dx.doi.org/10.1063/1.4737144> (6 pages)

(3) イオン加速グリッド損耗解析におけるメッシュサイズおよび時間幅の検討, 中村祐輔, 山本直嗣, 中島秀紀, 中野正勝, プラズマ応用科学, Vol. 20, No. 1, pp33-38, 2012, 査読有り

[学会発表] (計 8 件)

(1) 山本直嗣, キャビティリングダウン分光法を用いたイオンスラスターの寿命評価システムの開発, 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

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

(3) N. Yamamoto, Development of a Miniature Microwave Discharge Ion Engine, Asian Joint Conference on Propulsion and

Power, 2012 年 3 月 2 日, 西安, 中華人民共和国

(4) 中村祐輔, 中野正勝, 山本直嗣, 中島秀紀, 小型イオンエンジンに対する JIEIDI コードの適用と求解速度の向上, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, 2012 年 1 月 19 日, 神奈川県相模原市

(5) 山本直嗣, 平岡義章, 杉田健策, 平野賢治, 中島秀紀, 坂本雄樹, 小型イオンエンジンシステムの開発, 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

(6) N. Yamamoto, et al., Measurement of Plasma Property in an Ion Thruster using Laser Thomson Scattering Technique, IEPC2011, 2011 年 9 月 13 日, ウィズバーデン, ドイツ

[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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: