

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号:12601

研究種目:基盤研究(B)

研究期間:2009 ~ 2011

課題番号:21360415

研究課題名(和文)

多層コーティングによる電気推進機の寿命評価

研究課題名(英文)

Lifetime Evaluation of Electric Propulsion by Using Multilayer Coating

研究代表者

荒川 義博(ARAKAWA YOSHIHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号:50134490

研究成果の概要(和文):電気推進機は一般に高比推力である一方、低推力であるため、長時間作動が必要とされ、推進機の寿命評価は実用化の上で最も重要な課題となっている。ホールスラスタの寿命評価や、推進機の長寿命化への指針を得るため、実験的な損耗量測定法の確立と、数値的な寿命解析モデルの構築を行った。損耗量測定法では、多層コーティングによりほぼリアルタイムに損耗を可視化する手法を確立した。また数値解析を用いて、損耗のメカニズムや、損耗低減に向けた指針を得ることができた。

研究成果の概要(英文):Whereas electric propulsions perform extremely high specific impulse compared with chemical propulsions, their lifetime performance is critically important because their low thrust. In this study, an experimental erosion measurement method and a numerical lifetime simulation model were developed towards long-life Hall thruster. As a result, real-time erosion visualization method was established by utilizing nano-meter order multilayer coating. Furthermore, plasma-wall interaction was simulated by the developed numerical code and clues toward long-life Hall thruster were obtained.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目:航空宇宙工学

キーワード:電気推進機, ホールスラスタ, イオンエンジン, 寿命評価, 薄膜コーティング

1. 研究開始当初の背景

電気推進機とは、推進剤をプラズマ化し、電気的に加速・排出することで推力を発生させるもので、従来の化学反応を利用して推力を得る化学推進機に比べ、比推力を1桁以上も大きくすることができ、中でもホールスラスタとイオンエンジンは推進効率が高いため、宇宙機用エンジンとして非常に有望であ

る。

ホールスラスタの作動原理を図1に示す。陰極から放出された電子を磁場によって放電室に閉じ込め、陽極奥より供給される推進剤と電離衝突させ、生成したイオンを電場で加速、排出し、その反作用として推進力を得る、というものである。電気推進の中でも特にエネルギー変換効率と推力密度が高く、次

世代電気推進としてもっとも注目されている。

しかしながら、ホールスラスタは化学推進と比較して低推力であるため、長時間作動が必要とされ、推進機の寿命評価は実用化の上で最も重要な課題となっている。一般に推進機の寿命はプラズマによる損耗によって決定されるため、現在、世界各国で損耗の計測や数値シミュレーションが行われている。

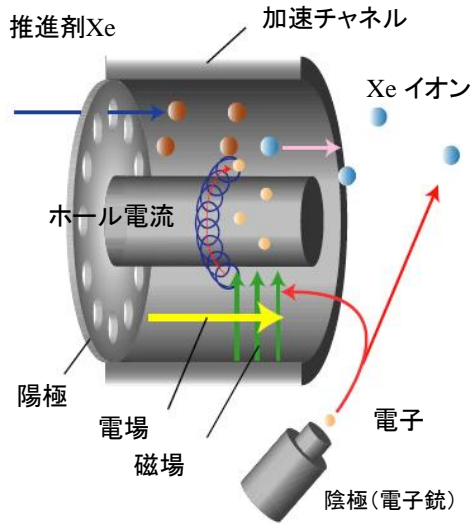


図1 ホールスラスタの作動原理

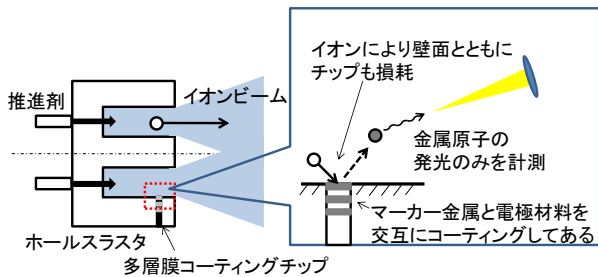


図2 多層膜コーティングチップによる損耗の計測

2. 研究の目的

一般的に行われている寿命評価法は、数千時間におよぶ作動による損耗量の計測などであり、リアルタイムでの計測はこれまで行われてこなかった。このような状況から、申請者らは電極表面の一部に多層のナノコーティングされたチップを設けて、短時間の作動でそのコーティング材が剥がれる様子を観測することにより、損耗率を求めようとする方法を着想し、試験的にホールスラスタに適用して、計測を試みた。

本研究の目的は、薄膜コーティングを施したチップを用いて、リアルタイムで損耗量の分布を計測する手法を確立し、作動パラメー

タによる損耗量の計測を行うことである。さらに、数値解析コードを作成し、そのシミュレーション結果と計測結果を比較して検証された数値解析モデルを構築することにより、ホールスラスタの寿命評価と長寿命化の指針を得る。

これは申請者らが考案した、独創的な方法で、推進機の寿命評価に役立つだけでなく、今後の長寿命化にも大いに貢献するものと期待できよう。また、この手法は、半導体エッチングの検査等への応用が考えられ、広く産業技術へ貢献することも期待される。

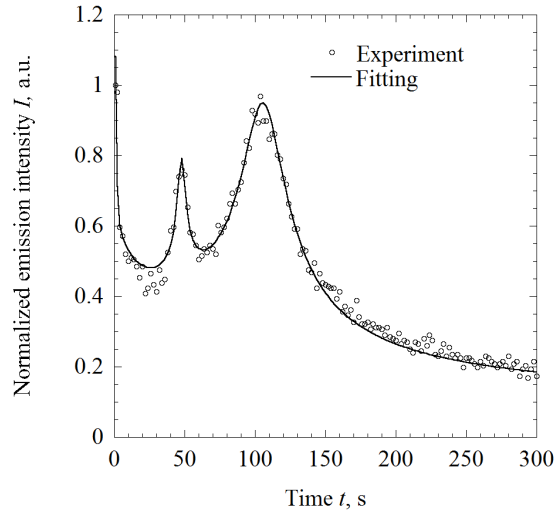


図3 多層膜の発光の時間履歴

3. 研究の方法

まず、図2に示すように、マーカーの役目をする金属薄膜と壁面材料膜を交互に多層コーティングされたチップを壁面に埋め込み、マーカー金属原子の発光の時間履歴をとると、マーカーが削られた時のみ発光スペクトルが得られる。そのため、図3で示すようなスペクトルの時間差から壁面材料の損耗率が極めて短時間で求められる、という計測法である。多層膜コーティングチップを用い、損耗率を多点同時に観測。これを長時間作動からの結果と比較、検証を行い、損耗率測定システムとして、確立させる。

次に、測定データをもとに、非定常のプラズマ粒子シミュレーションコードの開発を行う。ホールスラスタの作動状態の電極損耗への影響を調べるためには、ホールスラスタ内部のプラズマ診断が不可欠であるが、電極付近のプラズマを計測するのは困難であるため、数値解析によって内部のプラズマの状態を模擬し、観測する。具体的には、当研究室にて開発された非定常、非線形領域が解析可能な数値解析コードを、本研究で測定対象とするホールスラスタに適応し、壁面損耗の

効果を加え、ホールスラストの壁面損耗を模擬する数値解析コードを開発する。これにより、プラズマと壁面材料の相互作用の関係を明らかにし、損耗低減への指針を得る。

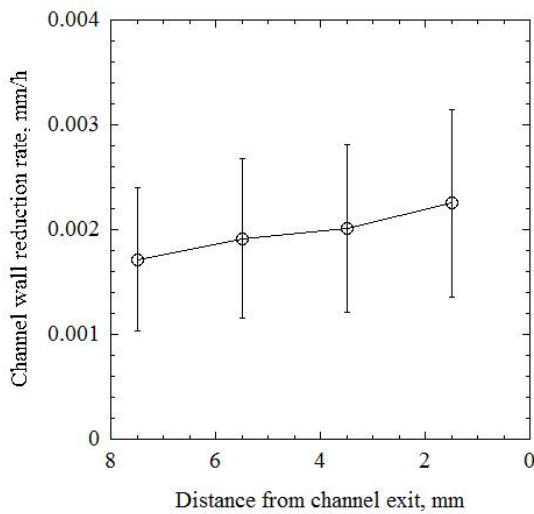


図3 損耗量の軸方向分布

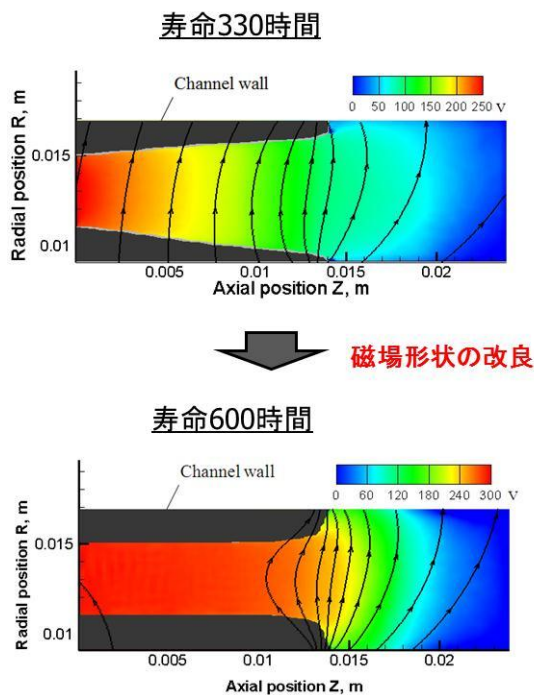


図4 磁場形状による推進機寿命の改善

4. 研究成果

(1) 多層膜コーティングチップによる電極損耗量の計測手法の確立

ホールスラストの実際の電極損耗率は、軸方向に異なる。従って、全損耗量を計測する

には、損耗率の軸方向分布を測定する必要があり、多数のチップを軸方向に埋め込む必要がある。

まず、チップごとの信号を区別するために、チップに施すコーティング金属の種類を変え、金属ごとに異なる発光波長の時間履歴を取得する必要がある。このために用いる金属の選定を行った。この結果、銅、銀およびパラジウムが使用可能であることを見出した。

また、これらを用いて損耗量の軸方向分布の計測を行った。この結果、図3のように推進機の出口付近にて、損耗量が最大になることなどが確認された。このような損耗量の定評評価や空間分布評価は、従来の手法では計測不可能であった。

また、測定法の妥当性確認のため、損耗量の磁場強度依存性を測定し、発光分光法による測定結果と比較し、よい傾向の一致が得られた。

(2) プラズマ粒子シミュレーションコードの構築 (ホールスラスト)

本研究の最終目標は電極損耗から寿命評価を行い、長寿命化への設計指針を得ることである。そのため、数値解析コードにより推進機内部を観測し、プラズマの状態と電極損失のつながりについて、物理的に明らかにする必要がある。まずその第一歩として、壁面における境界条件を見出すため、電子のみを流体として扱うハイブリッド粒子法数値解析コードを作成した。その結果、損耗を正しく解析するためには、電場解析の際に用いる境界条件として、二次電子放出を加味したシースを考慮した上で、第三種境界条件を用いる必要があることを見出した。また、正確な損耗評価のためには、放電室壁面の誘電体を含めた電場解析を行うことが有効であることがわかった。

次に、推進機内部のプラズマの状態の変化に伴う損耗量の変化を模擬した。この結果、上記の多層コーティング法による測定結果とよく一致する計算結果が得られた。さらに、計算された壁面損耗率にしたがって、放電室形状の更新を行うことで、放電室壁面が完全に損耗しきる状態まで、推進機寿命の模擬を行った。これにより、多層コーティング法による計測と組み合わせることで、推進機寿命を短時間で評価することが可能になった。実際に本手法を異なる作動条件や推進機設計に適用し、図2で示すようにホールスラストの長寿命化のためには、強磁場領域を放電室出口付近に集中させること、磁力線の壁面に対する傾斜をなくすこと、などが効果的であることを見出した。また、損耗による放電室形状の変化が推進性能にも影響を与えることがわかった。

以上得られた結果や知見は、通常数千時間

にわたる耐久試験を行なってはじめて得られるものであるため、非常に画期的な成果であるといえる。今後これらを活かした、推進機設計を行い、耐久試験を行うことで、実際に推進機の長寿命化が達成されていることを確認することで、長寿命ホールスラスタの実現や、日本初のホールスラスタの実機搭載に大きく近づくところが期待される。

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 6 件)

- ① S. Cho, S. Yokota, Y. Fukushima, K. Hara, Y. Arakawa, K. Komurasaki, and A. Kobayashi, Application of lifetime Evaluation Method Using Multilayer Coated Chips, Plasma Application & Hybrid Functionally Materials, 査読あり, 18 巻, 2009, 84, <http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/200902240039865397>
- ② 張科寅, 横田茂, 福島靖博, 原健太郎, 荒川義博, 小紫公也, 小林明, 多層コーティングチップによる損耗速度計測, プラズマ応用科学, 査読あり, 17-1 巻, 63-66, <http://ci.nii.ac.jp/naid/40016816945>
- ③ 張科寅, 横田茂, 原健太郎, 高橋大祐, 荒川義博, 小紫公也, 小林明, 多層コーティング損耗速度計測法の評価, プラズマ応用科学, 査読あり, 17-2 巻, 2009, 154-158, <http://ci.nii.ac.jp/naid/40017020605>
- ④ S. cho, S. Yokota, Y. Arakawa, et al., Development of Lifetime Evaluation Method Using Multilayer Coating Method, Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, 査読あり, 8 巻, 2010, 51-54, <http://ci.nii.ac.jp/naid/130000450575>
- ⑤ 金子亮太郎, 横田茂, 荒川義博, 他, 発光分光法によるホール型推進機の壁面損耗評価, プラズマ応用科学, 査読あり, 18-1 巻, 2010, 37-42, <http://ci.nii.ac.jp/naid/40017301363>
- ⑥ 細田誠也, 張科寅, 荒川義博, 他, 多層コーティング法における BN スパッタリング特性について, プラズマ応用科学, 査読あり, 19-2 巻, 2011, 151-154, <http://jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201202231856621617>

[学会発表] (計 15 件)

- ① S. Cho, S. Yokota, K. Hara, D. Takahashi, Y. Arakawa, K. Komurasaki, and A. Kobayashi, Development of lifetime evaluation method using multilayer

coating chip, the 27th international Symposium on Space Technology and Science, 2009, Tsukuba, Japan

- ② S. Yokota, R. Kaneko, S. Cho, K. Hara, D. Takahashi, K. Komurasaki, Y. Arakawa, Erosion Measurement of a Hall Thruster Using Optical Emission Spectroscopy, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, 2010, Miyazaki, Japan
- ③ S. Cho, S. Yokota, K. Hara, D. Takahashi, Y. Arakawa, K. Komurasaki, A. Kobayashi, Improvement of Erosion Rate Measurement Using Multilayer Coated Chip, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, 2010, Miyazaki, Japan
- ④ S. Cho, S. Yokota, K. Hara, D. Takahashi, Y. Arakawa, K. Komurasaki, A. Kobayashi, Hall Thruster Channel Wall Erosion Rate Characteristics Measurement by Multilayer Coating Chip, The 17th Annual Meeting of IAPS, 2010, Busan, Korea
- ⑤ S. Yokota, R. Kaneko, S. Cho, K. Hara, D. Takahashi, K. Komurasaki, Y. Arakawa, Evaluation Method of Wall Erosion in Hall Thruster Using Optical Emission Spectroscopy, The 17th Annual Meeting of IAPS, 2010, Busan, Korea
- ⑥ S. cho, S. Yokota, Y. Arakawa, et al., Hall Thruster Channel Wall Erosion Rate Measurement Method Using Multilayer Coated Chip, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2010, Nashville, USA
- ⑦ S. cho, S. Yokota, Y. Arakawa, et al., Development of Cylindrical Hall Thruster, 61th International Astronautical Congress, 2010, Prague, Czech
- ⑧ 張科寅, 横田茂, 荒川義博, 他, 小型ホールスラスタの推進性能及び壁面損耗評価, 平成 22 年度宇宙輸送シンポジウム, 2011, 神奈川, 日本
- ⑨ S. cho, S. Yokota, Y. Arakawa, et al., Channel Wall Erosion Modeling of a SPT-type Hall Thruster, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011, Okinawa, Japan
- ⑩ S. cho, S. Yokota, Y. Arakawa, et al., Experimental and Numerical Study on a Hall Thruster Insulator Erosion, 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011, Wiesbaden, Germany
- ⑪ 張科寅, 横田茂, 荒川義博, 他, 粒子法を用いた小型ホールスラスタの放電シミ

ュレーション, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 2011, 松山, 日本

- ⑫ 細田誠也, 張科寅, 荒川義博, 他, 多層コーティング法における成膜BNのキセノンイオンに対するスパッタリング特性について, 第55回宇宙科学技術連合講演会, 2011, 松山, 日本
- ⑬ 張科寅, 荒川義博, 他, 磁場形状によるホールスラスターの推進性能と寿命の改善に関する数値解析, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, 2012, 神奈川, 日本
- ⑭ S. cho, Y. Arakawa, et al., Numerical Analysis of the Impact of Channel Wall Erosion on the Thruster Performance of a Laboratory Model Hall Thruster, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2012, 2012, Xi' an, China
- ⑮ S. cho, Y. Arakawa, et al., Development of a 300 W class SPT-type Hall Thruster by Using Multilayer Coating Method and Numerical Simulation, The 19th Annual Meeting of IAPS, 2012, Taipei, China

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒川 義博 (ARAKAWA YOSHIHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 50134490

(2) 研究分担者

小紫 公也 (KOMURASAKI KIMIYA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 90242825

小泉 宏之 (KOIZUMI HIROYUKI)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号: 40361505