

平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

◆ 記入に当たっては、「平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書記入要領」を参照してください。

ローマ字		ARAKAWA YOSHIHIRO					
①研究代表者氏名		荒川 義博			②所属研究機関・部局・職 東京大学・大学院工学系研究科・教授		
③研究課題名	和文	ホール型推進機における放電振動の抑制と高密度プラズマイオンの抽出					
	英文	Suppression of Discharge Oscillation in a Hall Thruster and its High Density Plasma Extraction					
④研究経費		平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度	総合計
18年度以降は内約額 金額単位：千円		27,600	16,600	19,200	11,600	10,100	85,100
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者） *平成18年3月31日現在							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
荒川 義博	東京大学・大学院工学系研究科・教授	宇宙推進工学	研究計画の立案，装置の設計，および総括				
田原 弘一	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教授	プラズマ工学	推進機の推進特性の計測実験の計画ならびに実験の実施				
小紫 公也	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教授	宇宙推進工学	イオン生成および加速に関する数値計算の実施				
山本 直嗣	九州大学・大学院総合理工学研究院・助手	宇宙推進工学	イオン生成および加速に関する解析モデルの構築				
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>近年、宇宙の商業利用、国際的競争の激化に伴い、宇宙開発コストの大幅な低減が要求されている。国際的な宇宙開発の流れとして軌道投入や軌道保持、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。電気推進の中でも静電加速方式のホール型推進機は50%以上という高いエネルギー変換効率（推進効率）と高比推力を発生し、空間電荷制限則を受けない高密度プラズマイオンを排出することが可能であるため、次世代宇宙推進機として現在最も注目され日欧米で競って研究開発が進められている。</p> <p>またホール型推進機は半導体のエッチング、光学薄膜の緻密化やX線スーパーミラーの作成等の材料加工や薄膜形成用のイオンビーム源として、産業界から期待と需要が高まっている。</p> <p>しかしながら、ホール型推進機は一般に放電不安定性を伴っている。この振動は、推進機の作動停止および壁面損耗の促進による寿命の低下を引き起こすため、電機推進機にとって克服すべき最重要課題となっている。さらに、イオンビーム源として使用する際には、不安定性によってイオンビーム密度を制限する要因、またナノメートル単位の制御が必要な薄膜作成における障害となっている。</p> <p>このような背景に基づき、本研究課題の目的は、ホール型推進機における振動の要因を明らかにすると同時に、作動範囲全域にわたり振動を抑制することにある。具体的には振動解析モデルを構築し、それに基づいて放電振動の抑制された高密度プラズマイオンの抽出可能なホール型推進機を開発することである。</p>							

⑦これまでの研究経過 (研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。)

次世代宇宙推進機として現在最も注目され日欧米で競って研究開発が進められているホール型推進機において、不安定作動の誘発や推進機損傷の要因と考えられる放電振動の原因の解明とその抑制を目的とした研究を行った。これまでの研究から、放電振動は周波数帯域の異なる振動モードが混在していることがわかっている。このため、放電振動現象を調べるために、平成16年に購入した高周波現象が撮影可能な超高速デジタルフレーミングカメラ(～100 MHz)、および平成17年度に購入したコマ数の制限がなく長時間撮影が可能な高速度ビデオカメラ(～250 kHz)を用いて、放電電圧、放電電流、推進剤流量等の作動パラメータを変えて、放電の時間的変化を観察した。図1に高速度ビデオカメラによる撮影結果を示す。

高速度カメラおよび数値計算による振動現象の解析

高速度カメラによる観察と並行して、1次元および2次元の放電振動モデルを構築した。前者の目的は、放電振動の原因を特定することであり、後者は振動を抑制するためには推進機の物理的形状、磁場形状を含めて、どのような作動環境が適しているかを把握するためである。前者の1次元モデルは、これまでに構築した微小擾乱解析モデルと異なり、非線形な解析モデルであり、不安定振動の作動領域の特定だけでなく、放電振動の振幅を算出可能にしたモデルである。2次元モデルについては、個々の電子とイオンの運動を追跡するPIC-DSMC法による数値解析を行うものであり、計算時間は要するが、様々な作動環境に応じて正しい解を与えるモデルと期待されるものである。これらのモデルを用いて数値計算を実行するため、今年度新たに設備備品として高速並列計算機と大容量並列計算機を購入した。

これまでに得られた結果、特に高速度カメラによる実験結果と1次元解析結果などから、放電振動は、イオン生成・加速部を通過する推進剤中性粒子の局所的枯渇による電離不安定性に起因しているものと断定した。また、推進機の印加磁束密度を強めていくと放電振動の振幅も大きくなることから、実験、数値解析の両面から確かめることができた。

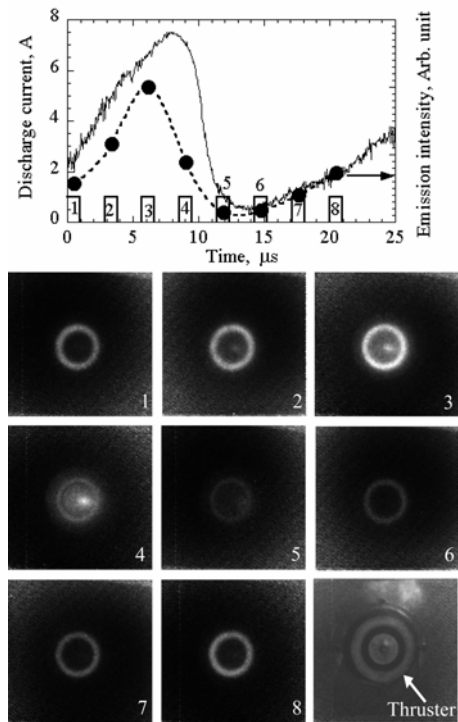


図1 振動の様子

可視化ホール型推進機の開発 振動現象の要因となっているイオン加速チャンネルの内部状態を観察・測定するために、可視化ホール型推進機を設計し実験を行った。これまでに、推進機の推進性能および振動特性を測定し、可視化ホール型推進機の特性を明らかにした。今後、加速チャンネル部の中空陽極の役割を明らかにするため、チャンネル内における高速度カメラによる観察およびプラズマ密度の測定を行う。

吸収分光法によるプルーム密度測定 加速チャンネル外部のイオンビームの定量的な評価のために、半導体レーザーを用いた吸収分光法による測定を行った。図2に密度分布の測定例を示す。数値シミュレーションの妥当性を示すデータとして十分な精度の結果を得ることが出来た。

壁面損耗のリアルタイムモニタリング 寿命を定量的に評価するため、吸収分光法により壁面物質の数密度を測定した。この結果、従来の評価方法である長時間作動時間前後質量損失量の結果と定性的に一致した。今後より分解能を上げ、正確な速度分布を測定することにより定量的なリアルタイムモニタリングシステムとなりえることが示された。

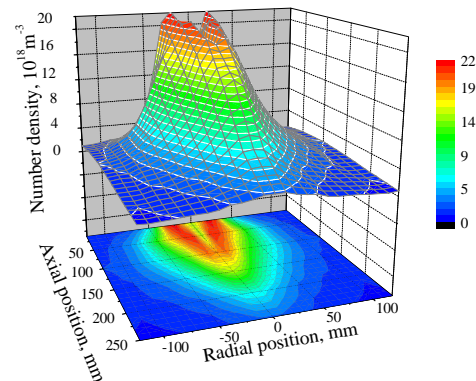


図2 スラスタ外部の中性粒子

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

- 1) 様々な状況下における振動抑制に成功した。
- 2) 1次元モデルによる振動現象の定量的な再現に成功した。
- 3) PIC-DSMC コードによって中空陽極のもつ役割を明らかにした。
- 4) 寿命のリアルタイムモニタリングシステムの可能性を見出した。

1) 振動の抑制成功

高速度ビデオカメラによる観察により得られた知見から、振動抑制を試みた。この結果、スラストのタイプによらず、広範な作動範囲において振動の抑制に成功した（下図において、青色の部分が拡大している）。

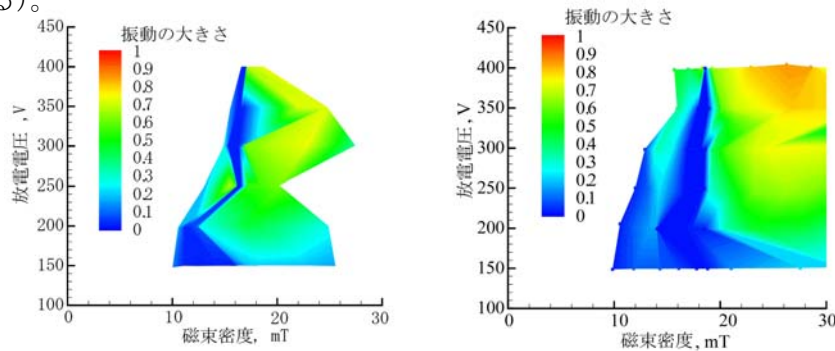


図3 安定作動領域 (左:改良前、右:改良後)

2) 1次元モデルによる振動現象の定量的再現

1次元非線形解析モデルを用いて、不安定振動の作動領域の特定および放電電流の定量的な予測を可能にした。また、この結果から、放電振動はプラズマ過熱部に到達する中性粒子の局所的枯渇による電離不安定性に起因しているものと断定した。

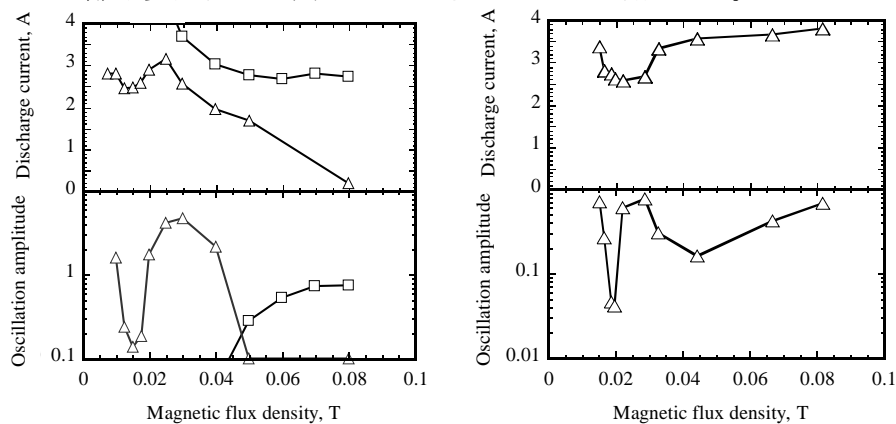


図4 放電電流 (上) および振動振幅 (下) の計算値 (左) と実験値 (右) の比較

3) PIC-DSMC コードによる中空陽極の役割の解明

放電振動を抑制するために用いられる中空陽極の役割がPIC-DSMC コードによって明らかになった。安定作動時には中空陽極内部にてプラズマが生成され、陽極表面にイオンシースが観測された。不安定作動時には陽極内部で電子が不足し、放電維持のための電子シースが観測された。これにより、中空陽極を用いる事により、典型的な平面陽極における電離振動の誘発を抑えられていることが明らかになった。

4) 寿命のリアルタイムモニタリングシステムの可能性

現在、各国においてホールスラストの寿命 (損耗) 診断が注目を浴びているが、これまでリアルタイムの損耗診断に成功した例は報告されていなかった。本研究では、紫外半導体レーザーを用いて壁面物質である鉄の吸収分光を行い、寿命リアルタイムモニタリングシステムの可能性を示すことに成功した。

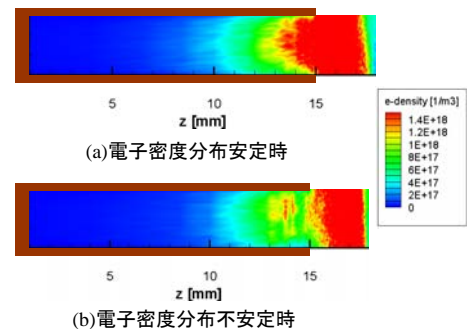


図5 中級陽極内の電子密度分布
a) 安定作動時、b)振動作動時

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

—学術雑誌に掲載した論文—

- ①) Naoji Yamamoto, Kimiya Komurasaki and Yoshihiro Arakawa, "Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters," Journal of Propulsion and Power, Vol.21, No.5, 2005, pp.870-876
- ②) Naoji YAMAMOTO, Shigeru YOKOTA, Keiko WATANABE, Akihiro SASOH, Kimiya KOMURASAKI, Yoshihiro ARAKAWA, "Suppression of Discharge Current Oscillations in a Hall Thruster," Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.48 No.161, 2005, pp.169-174
- ③) 上田善太郎、山本直嗣、荒川義博, "ホールスラスタにおける放電振動の一次元数値解析," プラズマ応用科学, Vol.13, 2005, pp.69-74
- 4) Naoji Yamamoto, Shigeru Yokota, Makoto Matsui and Kimiya Komurasaki, Yoshihiro Arakawa, "MEASUREMENT OF EROSION RATE BY ABSORPTION SPECTROSCOPY IN A HALL THRUSTER," Review of Scientific Instruments, Vol.76, No.8, 2005, Article No.83111
- 5) 田原弘一, 弓削政郎, 白崎篤司, 吉川孝雄, "宇宙推進用ホール型プラズマ加速器の性能特性とイオンビーム計測," 高温学会誌, Vol.31, No.2, 2005, pp. 129-136
- 6) 弓削政郎, 田原弘一, "宇宙推進用アノードレイヤー型ホール効果プラズマ加速器の性能特性," 高温学会誌, Vol.31, No.5, 2005, pp.299-306
- 7) 田原弘一, 弓削政郎, 白崎篤司, マヌエルマルチネスサンチェス, "簡易一次元流れ場計算によるホールスラスタのプラズマ生成・イオン加速過程の解明と推進性能予測," 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 52, No.608, 2004, pp. 408-415

—国際会議における発表状況—

- 1) Shigeru YOKOTA, Kimiya KOMURASAKI, and Yoshihiro ARAKAWA, "Plasma Instability Inside a Hollow Anode of Anode-Layer Hall," Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2006, Beijing, China, 2006
- 2) Matsui, M., Yokota, S., Takayanagi, H., Koizumi, H., Komurasaki, K. and Arakawa, Y., "Plume Characterization of Plasma Thrusters using Diode Laser Absorption Spectroscopy," 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA, 2006, AIAA Paper 06-0767
- 3) Shigeru YOKOTA, Kimiya KOMURASAKI, and Yoshihiro ARAKAWA, "Discharge Instability Inside a Hollow Anode of Anode-Layer Hall," The 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, 2005
- 4) Atsushi Shirasaki and Hirokazu Tahara, "Plume Measurements and Miniaturization of the Hall Thrusters with Circular Cross-Sectional Discharge Chambers," The 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, USA, 2005, IEPC 05-051

⑨研究成果の発表状況（続き）（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）

—国際会議における発表状況（つづき）—

- 5) Naoji Yamamoto, Shigeru Yokota, Makoto Matsui, Kimiya Komurasaki, and Yoshihiro Arakawa, "Estimation of Erosion Rate by Absorption Spectroscopy in a Hall Thruster," The 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, USA, 2005
- 6) Hirokazu Tahara, Katsumi Imanaka and Seiro Yuge, "Effects of Channel Wall Material on Performance and Plasma Characteristics of Hall Thrusters," The 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, USA, 2005, IEPC 05-015
- 7) Yuge Seiro and Hirokazu Tahara, "Performance Enhancement of a 1-kW Anode-layer Hall Thruster," The 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, USA, 2005, IEPC 05-020
- 8) Shigeru YOKOTA, Shinsuke YASUI, Kimiya KOMURASAKI, and Yoshihiro ARAKAWA, "Plasma Instability Inside a Hollow Anode of Anode-Layer Hall Thruster," Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2005, Kitakyushu, Japan, 2005
- 9) Hirokazu Tahara and Katsumi Imanaka, "Effects of Channel Wall Material on Performance and Plasma Feature of Hall Thrusters," Proceedings of 5th International Symposium of Applied Plasma Science, Vol.5, 2005, pp.133-138
- 10) Hirokazu Tahara, "Plasma Plume Characteristics of Electric Thrusters," Proceedings of 9th Spacecraft Charging Technology, 2005, Paper No. 4
- 11) Naoji Yamamoto, Kimiya Komurasaki and Yoshihiro Arakawa, "A Suppression method of Discharge Current Oscillations in a Hall Thruster," 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion conference and exhibit, Florida, USA, 2004
- 12) K. Komurasaki, S. Yokota, S. Yasui and Y. Arakawa, "Particle Simulation of Plasma Dynamics Inside an Anode-Layer Hall Thruster," 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Florida, USA, 2004, AIAA-2004-3954
- 13) Naoji Yamamoto, Keiko Watanabe, Akihiro Sasoh, Kimiya Komurasaki, Yoshihiro Arakawa, "Control of Discharge Current Oscillations in Hall Thrusters," 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, 2004
- 14) Naoji Yamamoto, Keiko Watanabe, Akihiro Sasoh, Kimiya Komurasaki, Yoshihiro Arakawa, "Control of Discharge Current Oscillations in Hall Thrusters," Proceedings of the 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, 2004, pp.191-196
- 15) Katsumi Imanaka, Atsushi Shirasaki, Seiro Yuge, Hirokazu Tahara and Takao Yoshikawa, "Effects of Channel Wall Material on Hall Thruster Performance," Proceedings of the 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, 2004, ISTS 2004-b-30
- 16) Seiro Yuge, Hirokazu Tahara and Takao Yoshikawa, "Performance Characteristics of a 1-kW Anode-Layer Type Hall Thruster," Proceedings of the 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, 2004, ISTS 2004-b-31

⑨研究成果の発表状況(続き) (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

17) Atsushi Shirasaki, Hirokazu Tahara and Takao Yoshikawa, "Performance Characteristics of Low Power Hall Thrusters with Circular Cross-Sectional Discharge Chambers," Proceedings of the 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, 2004, pp.203-208

18) Hirokazu Tahara, Seiro Yuge, Atsushi Shirasaki and Manuel Martinez-Sanchez, "Performance Prediction of Hall Thrusters Using One-Dimensional Flow field Calculation," Proceedings of the 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, 2004, ISTS 2004-b-53

19) Hirokazu Tahara, Atsushi Shirasaki, Seiro Yuge and Takao Yoshikawa, "Acceleration Channel for Low Power Hall Thrusters," Proceedings of the 24th Int. Symposium on Space Technology and Science, 2004, pp.264-273

—国内会議における発表状況—

1) 松井信, 横田茂, 佐孝大地, 長尾直樹, 高柳大樹, 小泉宏之, 小紫公也, 荒川義博, "レーザー吸収分光法によるホールスラスタプルーム内のキセノン原子分布測定," 平成17年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2006

2) 長尾直樹, 横田茂, 佐孝大地, 小泉宏之, 小紫公也, 荒川義博, "2重振り子式スラスタスタンドの開発," 平成17年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2006

3) 上田善太郎, 山本直嗣, 小泉宏之, 小紫公也, 荒川義博, "ホールスラスタにおける放電振動の一次元数値解析," 平成17年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2006

4) 田原弘一, 今中勝己, 弓削政郎, "アノードレイヤー型ホールスラスタの推進性能におけるホローアノード内磁場強度分布の影響," 平成17年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2006

5) 弓削政郎, 田原弘一, 荒川義博, "ホールスラスタにおける放電振動の一次元数値解析," 平成17年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2006

6) 白崎篤志, 田原弘一, "円形断面放電室をもつホールスラスタのプラズマ計測とその小型化," 平成17年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2006

7) 横田茂, 小紫公也, 荒川義博, "アノードレイヤー型ホールスラスタのホローアノード内部の数値解析," プラズマ応用科学第13回年会, 福岡, 2006

8) 田原 弘一, 山今中 勝己, 北市 泰寛, 吉川 孝雄, "ホールスラスタの性能とプラズマ特性に及ぼす加速チャンネル材質の影響," 平成16年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2005, pp.233-237

9) 上田善太郎, 山本直嗣, 荒川義博, "ホールスラスタにおける放電振動の数値解析," 平成16年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2005, pp.233-237