

持続可能な宇宙開発に不可欠な超省電力 マイクロ宇宙推進機の実現

所属： 横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門

助成対象者：鷹尾 祥典

共同研究者：長尾 昌善（産業技術総合研究所）

概要

本研究では、イオン液体を利用したエレクトロスプレースタを実現するため、まず MEMS プロセスの微細加工技術を利用して 250-500 μm 間隔のエミッタアレイをシリコンウェハ上に製作し、その電圧電流特性を測定した。その結果、エミッタとエクストラクタの電極間距離 0.2 mm において ± 1.6 kV の両極性電圧を印加することで EMI-BF₄ のイオン液体からイオンビームを引き出すことができた。このイオンビームの軌道解析には粒子計算モデルを利用した。また、エレクトロスプレースタの推力密度を上げるため、電界放出電子源 (FEA: Field Emitter Array) の製作プロセスを利用することで、エミッタ間隔が 5 μm となる超高実装密度エミッタアレイも製作した。

abstract

We have fabricated 250- and 500- μm pitch emitters on a silicon wafer by a MEMS process to develop ionic liquid electrospray thrusters, and measured the voltage-current characteristics. The ion beams of EMI-BF₄ ionic liquid were able to be extracted at the applied voltage of ± 1.6 kV for the gap distance of 0.2 mm between the emitter and the extractor electrodes. Particle-based numerical simulations have also been carried out to investigate the mechanism

of ion beam extraction. To increase the thrust density of electrospray thrusters, we have also fabricated an ultra-high-density emitter array by applying field-emitter-array (FEA) fabrication process, where the emitter pitch can be reduced to $5 \mu\text{m}$.

研究内容

「背景・目的」

近年、数 10 kg 級の超小型人工衛星の開発が盛んであり、年間打ち上げ基数も 100 基を越える状態になっている¹⁾。この中で比較的大きな 50 kg 級の小型衛星には、従来型の高性能推進機であるイオンスラスタ等を小型化したものを搭載した例が出てきているが²⁾、大部分は 10 kg 以下の超小型衛星であり、そのサイズの制約上、推進機をほとんど搭載できていない。現状のままでは、低軌道に投入された衛星以外は運用終了後に宇宙のゴミ（デブリ）となる問題が無視できなくなる。よって、デブリ化を防止することで持続可能な宇宙開発を実現するためにも、超小型衛星にとって超小型宇宙推進機は必要不可欠な存在である。しかし、従来型推進機を単純にスケールダウンするだけでは小型・省電力化に限界がある。

このような中、高圧ガス系が不要なイオン液体を推進剤とし電界放出現象を利用したエレクトロスプレー式推進機（ILEST: Ionic Liquid Electrospray Thruster）が注目を集めており、特に欧米で早くから盛んに研究が行われている³⁻⁵⁾。ここで、イオン液体とは陽イオン（カチオン）と陰イオン（アニオン）のみから構成される有機塩のことであり、イオン間に働くクーロン力のため蒸気圧がほぼゼロとなり、常温付近の広い温度範囲において液相として存在し得ることに特徴がある⁶⁾。また、カチオンとアニオンがあるため、両極性パルス電圧を繰り返し印加することにより両イオンが引き出せ、自己中和するとともにカチオンと同程度の質量があるアニオン

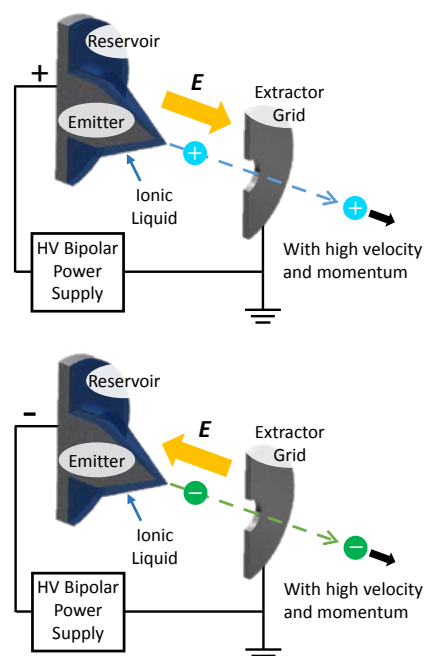


図 1 エレクトロスプレー式イオンスラスタの概念図 [成果物・論文発表 2]。Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

も推力に寄与する利点がある。これは従来、静電加速型推進機にとって必須であった中和器（電子源）が不要となることを意味し、この点も小型化に大きく貢献する。

図 1 に ILEST の概略図を示す[成果物・論文発表 2]。ILEST のエミッタ先端は数 μm 程度以内となっており、このエミッタと抽出電極の間に高電圧を印加することによって、エミッタ先端部のイオン液体に強い電場が生じる。この電場による力とイオン液体の表面張力が釣り合うことによって、先端角が 49.3° で一定の Taylor コーンと呼ばれる円錐状の液柱が形成される⁷⁾。そして電場による力が表面張力を上回ったとき、液体からイオンが放出されてエミッタチップと抽出電極間の電位差で加速される。しかし、エミッタ電極一つから得られる電流は最大 $1\ \mu\text{A}$ 程度であり、実用的な推力を得るには多数のエミッタをアレイ状に製作する必要がある。

本研究では、エレクトロスプレー式推進機の推力密度を実用レベルまで高めるため、まずは $250\text{--}500\ \mu\text{m}$ 間隔のエミッタアレイを製作し、そのビーム電流特性評価を行った。また、エミッタ近傍に生じる現象を実験的に観測することは難しいため、数値解析を用いたイオンビーム引き出し機構の解析を行った。その後、推力密度をさらに向上させるために、電界放出電子源（FEA: Field Emitter Array）の製作技術を応用し⁸⁾、エミッタ間隔が従来と比較して 2 桁程度小さい（実装密度は 4 桁増となる）エミッタチップを製作した。ページ数の制約から数値解析結果については成果物の論文発表 1) に委ね、以下には実験結果について報告する。

「結果」

図 2 に MEMS プロセスにより製作したエミッタの SEM 画像を示す[成果物・論文発表 2]。

エミッタの直径は $100\ \mu\text{m}$ であり、 SF_6 ガスを用いた等方性エッチングにより先端部を鋭利に加工し、その後、ボッシュプロセスによる異方性エッチングによりイオン液体の貯蔵部を製作する。結果としてエミッタは鉛筆型の構造となる。なお、エミッタ間隔は 250 または $500\ \mu\text{m}$ とした（図 2 は $250\ \mu\text{m}$ の例）。

実験には、エミッタの他にイオンビームを引き出す抽出電極およびビーム電流計測のためのコレクタ電極を配置する。本研究では外部から

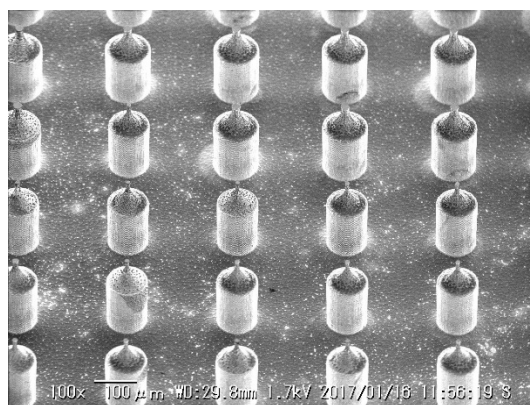


図 2 製作したエミッタの SEM 像[成果物・論文発表 2]。Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

のイオン液体供給機構は設けずに、あらかじめイオン液体を貯蔵部に貯めた状態でエミッタチップを他の電極とともに真空槽に入れ、 1.0×10^{-3} Pa 以下に減圧した後計測を行った。ここで、本研究で用いたイオン液体は EMI-BF₄ (1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate) である。抽出電極とコレクタ電極には真空槽外部にシャント抵抗を直列に接続し、それらの電位降下から各電極に流れる電流を計測した。なお、抽出電極はエミッタ先端から 0.2 mm 離して接地し、エミッタにはファンクションジェネレータと高電圧アンプを接続することで、最大±4 kV の両極性高電圧パルスを繰り返し印加した。

図 3 にコレクタ電極に流れるエミッタ 1 つ当たりの電流の印加電圧依存性を示す[成果物・論文発表 2]。電極間距離が 0.2 mm の時には図の通り±1.6 kV 程度でイオン引き出しが開始し、印加電圧増加とともに電流が増加している様子が分かる。なお、電極間の低下に伴い電場が強くなることでイオン引き出し開始電圧も低下する。一方、引き出される電流値に関しては、電極間距離とともに電位差が増加することで大きくなる。ただし、エクストラクタへの電流値も増加する。また、安定してイオンを引き出し可能な電圧領域にはある幅があり、この電圧領域以上の電圧印加は電流値が不安定になることが分かった。また、ビーム発散角の見積から、現状のスケールで製作した電極構造の場合、エミッタのピッチは 400 μm 程度までに留める事が必要ということも明らかになっている。

研究背景で述べた通り超小型衛星の実装面積が限られている点から、1つの素子から得られる電流は高い方が望ましい。そのための対策の一つが電極の高密度実装である。図 4 に FEA 製作技術を応用して製作したエミッタ電極の例を示す[成果物・口頭発表 1]。従来のトップダウンプロセスでは 500 μm ピッチで電極が並んでいたものと比較して 100 分の 1 となる 5 μm 間隔でエミッタが並んでいる様子が分かる。よって実装密度としては従来比 4 桁増加となる。仮にエミッタ 1 つ当たり同じ電流が引き出されると推力密度も 4 桁増加になる。

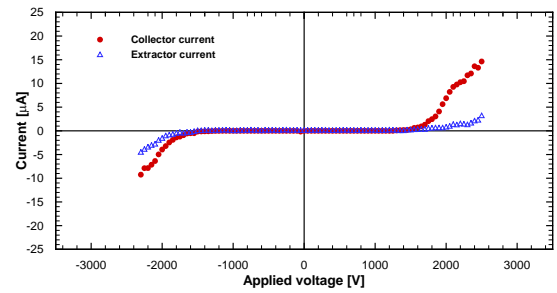


図 3 コレクタ電極に流れる電流の印加電圧依存性 [成果物・論文発表 2]。Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

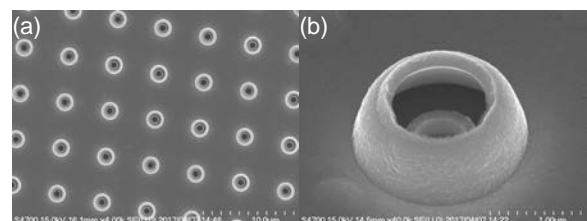


図 4 (a)電界放出電子源の製作技術を用いたエミッタの試作 SEM 像と (b)その拡大図 [成果物・口頭発表 1]。

「今後」

本研究では MEMS の微細加工技術によりエミッタ電極の製作を行い、イオン液体を用いたエレクトロスプレー式推進機のビーム電流測定、および、その引き出し機構解明のための粒子モデルによる数値解析を行った。これらに加え、新たに電界放出電子源の製作技術を応用したエミッタ電極の大規模集積化とそのイオンビーム特性評価を進めている。

本研究ではイオン液体を推進剤として利用する方法を紹介したが、高密度実装イオン源にヒーターも実装することで、液体金属の推進剤利用も可能になると考えられる [成果物・その他 1]。ただし、この場合は正イオンしか引き出しができないため、電子源が必要となる。このような電子源にふさわしいのは推進剤を必要としない電界放出型電子源であり、現在、新しい電子源として低電圧 (10 V 程度)・低真空で作動可能なグラフェンを用いた平面型電子源の研究を進めている^{9,10)}。このような電子源との組み合わせによるエレクトロスプレーラスタのさらなる発展が期待できる。

なお、本報告書は第 61 回宇宙科学技術連合講演会にて発表された予稿を一部改変、加筆したものである [成果物・口頭発表 7]。

引用文献

- 1) Nano/Microsatellite Market Forecast 2017, SpaceWorks Enterprises, Inc.
- 2) Koizumi, H., Kawahara, H., Yaginuma, K., Asakawa, J., Nakagawa, Y., Nakamura, Y., Kojima, S., Matsuguma, T., Funase, R., Nakatsuka, J., and Komurasaki, K.: Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System Installed on Small Space Probe: PROCYON, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, **14**, pp. Pb_13-Pb_22, 2016.
- 3) Guerra-Garcia, C., Krejci, D., and Lozano, P.: Spatial uniformity of the current emitted by an array of passively fed electrospray porous emitters, J. Phys. D, **49**, pp. 115503-1-12, 2016.
- 4) Dandavino, S., Ataman, C., Ryan, C. N., Chakraborty, S., Courtney, D., Stark, J. P. W., and Shea, H.: Microfabricated electrospray emitter arrays with integrated extractor and accelerator electrodes for the propulsion of small spacecraft, J. Micromech. Microeng., **24**, pp. 075011-1-13, 2014.
- 5) Legge, R. S. and Lozano, P. C.: Electrospray Propulsion Based on Emitters Microfabricated in Porous Metals, J. Propul. Power, **27**, pp. 485-495, 2011.
- 6) 渡邊 正義: イオン液体研究の広がり, 表口科学, **28** (2007), pp. 298-303.
- 7) Taylor, G.: Disintegration of Water Drops in an Electric Field., Proc. R. Soc. London A, **280** (1964), pp. 383-397.
- 8) Nagao, M. and Yoshida, T.: Fabrication of gated nano electron source for vacuum nanoelectronics, Microelectron. Eng., **132**, pp. 14-20, 2015.
- 9) Murakami, K., Tanaka, S., Miyashita, A., Nagao, M., Nemoto, Y., Takeguchi, M., and Fujita, J.: Graphene-Oxide-Semiconductor Planar-Type Electron Emission Device, Appl. Phys. Lett., **108** (2016), pp. 083506-1-4.
- 10) 古家遼, 村上勝久, 長尾昌善, 鷹尾祥典, 超小型イオンエンジン用高効率平面型グラフェン電子源の開発, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 20a-B303-5, 2018

本助成に関わる成果物

[論文発表]

- 1) Kazuma Emoto, Toshiyuki Tsuchiya, and Yoshinori Takao, "Numerical Investigation of Steady and Transient Ion Beam Extraction Mechanisms for Electrospray Thrusters," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 16, No. 2, Mar. 2018, pp. 110-115.
- 2) Kaito Nakagawa, Toshiyuki Tsuchiya, and Yoshinori Takao, "Microfabricated emitter array for an ionic liquid electrospray thruster," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 56, No. 6S1, Jun. 2017, p. 06GN18 (8pp).

[口頭発表]

- 1) Yoshinori Takao, Kaito Nakagawa, Naoki Inoue, Kazuma Emoto, Toshiyuki Tsuchiya, and Masayoshi Nagao, "Microfabrication of a Massive Emitter Array for Higher Thrust Density of Ionic Liquid Electrospray Thrusters," The 35th International Electric Propulsion Conference, October 8-12, 2017, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, IEPC-2017-341.
- 2) Naoki Inoue, Kaito Nakagawa, Toshiyuki Tsuchiya, and Yoshinori Takao, "Evaluation of Ion Beam Characteristics for Ionic Liquid Electrospray Thrusters," Joint Conference of the 31st International Symposium on Space Technology and Science, 26th International Symposium on Space Flight Dynamics and, 8th Nano-satellite Symposium, June 3-9, 2017, Himegin Hall, Matsuyama-Ehime, Japan, 2017-b-63.
- 3) 鷹尾祥典, 井上直樹, 江本一磨, 山田涼平, 土屋智由, 長尾昌善, 村上勝久, 「電子源技術を使った超小型宇宙推進機の開発」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 17-20 日, 早稲田大学 西早稲田キャンパス, 19p-C102-5.
- 4) 鷹尾祥典, 井上直樹, 江本一磨, 山田涼平, 土屋智由, 長尾昌善, 村上勝久, 「高実装密度イオン源の開発と超小型宇宙推進機への応用」, 日本学術振興会真空ナノエレクトロニクス第 158 委員会 第 121 研究会 第 15 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, 2018 年 3 月 1-2 日, アクトシティ浜松コンgresセンター 22・23 会議室.
- 5) 鷹尾祥典, 「エレクトロスプレー現象を利用した高電流密度イオン源の開発と超小型宇宙推進機への応用」, 仙台プラズマフォーラム・電気通信研究所共同プロジェクト研究会『プラズマ流中マルチスケール構造形成による新規反応場に関する研究会』, 2018 年 2 月 23-24 日, 東北大学工学研究科 電気情報系 南講義棟 103 講義室.
- 6) 山田涼平, 鷹尾祥典, 「分子動力学計算によるエレクトロスプレーラスターの液滴分裂過程の解析」, 平成 29 年度 宇宙輸送シンポジウム, 2018 年 1 月 18-19 日, 宇宙科学研究所, STEP-2017-002.
- 7) 鷹尾祥典, 井上直樹, 江本一磨, 古家遼, 山田涼平, 土屋智由, 長尾昌善, 村上勝久, 「超小型高推力密度エレクトロスプレーラスターの開発」, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2017 年 10 月 25-27 日, 朱鷺メッセ, 1E08 (JSASS-2017-4106).
- 8) 井上直樹, 長尾昌善, 鷹尾祥典, 「電界放出電子源の製作技術を利用した高密度実装エレクトロスプレーラスターの試作」, 日本航空宇宙学会 第 48 期定時社員総会および年会講演会, 2017 年 4 月 13-14 日, 東京大学 山上会館, 2D04 (JSASS-2017-1102).
- 9) 中川洋人, 江本一磨, 井上直樹, 土屋智由, 長尾昌善, 鷹尾祥典, 「イオン液体を使ったエレクトロスプレーラスターにおけるビーム抽出実験と数値解析」, 第 57 回 航空原動機・宇宙推進講演会, 2017 年 3 月 9-10 日, 沖縄県市町村自治会館, 2A17 (JSASS-2017-0069).

[ポスター発表]

該当無し

[その他]

- 1) 鷹尾祥典, 長尾昌善, 村上勝久: イオン源, 特願 2017-197041.