

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14247

研究課題名(和文)3D-MEMS加工技術を利用したマイクロ宇宙推進機の抜本的な推進効率の向上

研究課題名(英文)Drastic improvement of efficiency for micro space propulsion using 3D-MEMS fabrication technique

研究代表者

鷹尾 祥典(Takao, Yoshinori)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80552661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：超小型人工衛星にも搭載可能な推進機の有効候補となっているエレクトロスプレースタスタを対象に、微細加工技術を利用したエミッタアレイ電極の製作、イオンビームの電圧電流特性評価を行うとともに、粒子計算モデルを利用したイオンビーム軌道解析を行った。その結果、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ることが分かり、効率的なイオン引き出しにはこの電圧領域にて運用することが望ましいことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We have fabricated an emitter array by a microfabrication process, measured the voltage-current characteristics of ion beams, and conducted a numerical analysis of the ion beam trajectory using a particle model for an electrospray thruster, which is one of the candidate microthrusters that can be mounted on micro satellites. As a result, we have found that there is a stable region of applied voltages for ion beam extraction and this region is suitable for efficient thruster operation.

研究分野：工学

キーワード：エレクトロスプレー イオン液体 イオンビーム 超小型衛星 電気推進 粒子計算 微細加工

1. 研究開始当初の背景

近年、超小型人工衛星 (< 50 kg) は大幅なコスト削減と開発期間の短縮により、ベンチャー企業や大学においても開発・運用を可能とし、宇宙利用をより活発で身近なものへ変え始めている。しかし、超小型衛星の打ち上げは主衛星打ち上げの余剰リソースを活用する方式がほとんどであり、その投入軌道は自分では決められず主衛星によって制約される。また、運用終了後、低軌道の衛星以外はその軌道を周回し続けて宇宙のゴミとなるデブリ化の問題が残っている。

これらの状況を打破できるのが、超小型衛星自らが自由に軌道を選べる超小型宇宙推進機が存在であり、最近、ようやく既存の推進機を小型化して搭載した小型衛星も運用され始めている。しかし、いずれも効率が極めて悪く (< 10%)、電力に限られる小型衛星には依然搭載が難しい。これは主に表面積/体積比が増加することに起因している。この効率問題を解決できる可能性を秘めたスラスタの一つが図 1 に示すように表面を積極的に使うエレクトロスプレー型のマイクロ電気推進機 (エレクトロスプレースラスタ) である。

エレクトロスプレースラスタは主に μm オーダの寸法で作られているエミッタ電極と抽出電極、さらにイオン液体を貯蔵する貯蔵部から構成される。イオン液体は蒸気圧がほぼゼロのため真空中における貯蔵も問題ない。エミッタと抽出電極間に数 kV 程度の電

圧を印加することで、貯蔵部にあるイオン液体がエミッタの先端部に導かれる。エミッタの先端部は非常に小さな曲率半径 (< 数 μm) となっているため、そこで強い電場が形成される。この強い電場のために、イオン液体はエミッタの先端に Taylor cone と呼ばれる流体の種類や印加電圧の大きさに依存せずに中心角が 49.29° となる円錐形状を形成する。そしてこの電場の強さがエミッタ表面とイオン液体との間に働く表面張力より大きくなった時、電界放出現象が生じてイオン液体からイオンが脱離し放出される。さらに、エミッタと抽出電極間の電位差によってこのイオンを静電加速し、推力を発生することができる。以上が基本的なエレクトロスプレースラスタの作動原理である。

一般に静電加速型電気推進機では、正イオンの放出に伴って電子を中和器から放出することによって、宇宙機全体で電気的中性を保つ必要がある。しかし、エレクトロスプレースラスタでは、印加する電圧の符号を逆にするだけで容易に陰イオンを引き出すことができ、陽イオンと同様に陰イオンも推力として利用することができる。このため、両極性パルス電圧を印加することで正負双方のビームを引き出し、中和しながら推力を発生させることが可能である。

エレクトロスプレー現象における問題は、完全にイオン単体として引き出し可能な機構が達成できずに、液滴が混ざってイオンが引き出されると効率が大幅に下がる (< 20%) 点である。また、液滴としてビームが引き出されることにより、エミッタ電極と抽出電極間にショートが生じ、スラスタとしての寿命が短くなることも知られている。エレクトロスプレースラスタが実用化されるためにも、これらの問題解決が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、前述の問題を解決するために、どのような電極構造が望ましいか、また、どのような印加電圧方法等の作動条件が望ましいかについて、実験と数値計算の両面から解析することで、高効率なマイクロ電気推進機の実現につながる基盤技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 微細加工によるエミッタ電極製作

エミッタ電極の製作方法を以下に簡単にまとめる (図 2)。(a) ピラニア溶液で表面を洗浄したシリコン基板を用意する。(b) フォトリソグ (PMER P-LA900PM) を塗布し、フォトマスクを密着させた状態で紫外線 (UV) を照射する。(c) 現像液によりフォトマスクを転写したフォトリソグ層をエッチングし、ドライエッチングに使うマスクを製作する。(d) 等方性ドライエッチングを行いシリコンウエハ上に鋭角状のエミッタを製作する。(e) ボッシュプロセスによる異方

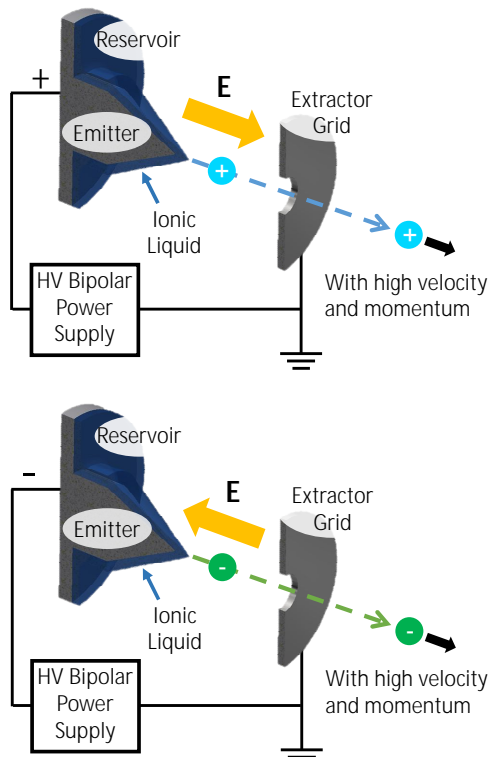


図 1. エレクトロスプレースラスタの概念図。エミッタ電極と抽出電極の間に正負の高電圧を印加することで正負のイオンを高速ビームとして引き出す事で推力を得る。Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

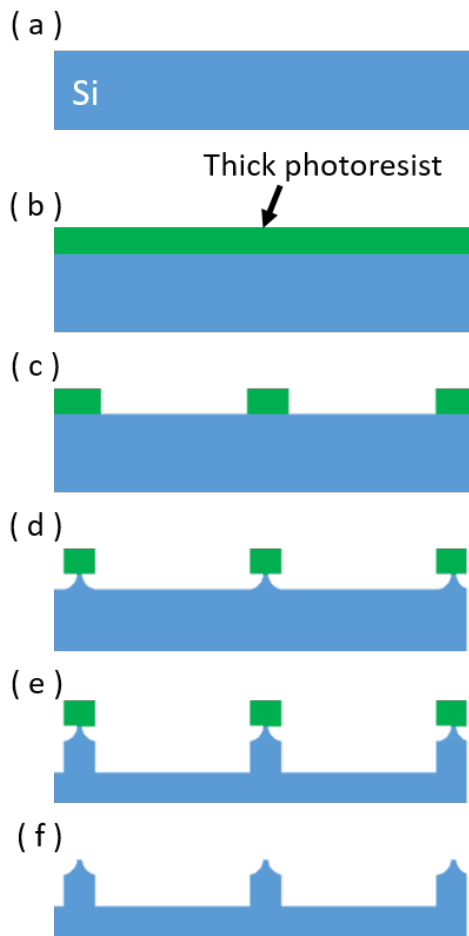


図2 . 微細加工技術を用いたエミッタ電極製作法。Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

性ドライエッチングを行うことで、エミッタ電極の高さを出し、イオン液体の貯蔵部を製作する。(f)残ったフォトレジストをエッチング液とアッシャーを使うことで完全に除去する。

(2) 電圧電流特性評価

図3にイオンビーム引き出し時における電圧電流特性評価を行う実験系を示す。エミッタ電極と抽出電極はそれぞれ $1 \times 3 \text{ cm}^2$ のチップから製作されており、それらを機械式ジグにはめて、エミッタ電極と抽出電極の位置合わせを行う。また、引き出された電流を計測するためのコレクタ電極も抽出電極後方に配置する。これら電極とジグ一式は宇宙空間を模擬する真空槽に入れ、真空槽の外部に置いた高電圧パルス源により電圧印加を行うとともに、抽出電極とコレクタ電極に流れる電流をシャント抵抗の電位降下を測ることで計測する。

(3) 数値計算によるビーム軌道解析

イオン液体のビーム軌道計算には、粒子計算モデルを利用する。粒子計算は計算負荷が大きいので、二次元円筒座標系を用い、エミッター一つを計算対象とする。なお、実験結果

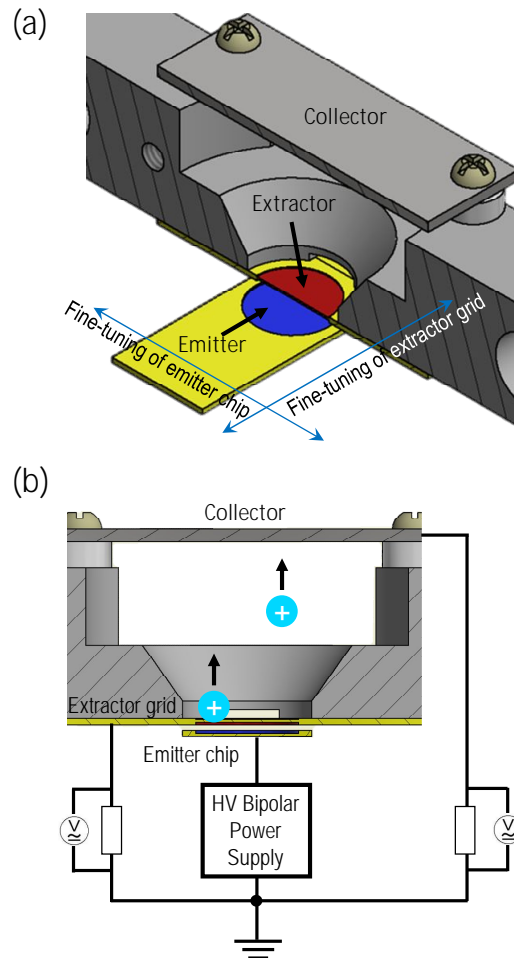


図3 . (a)エミッタ電極、抽出電極、コレクタ電極を配置する機械式ジグ。(b)電圧電流特性評価を行う実験系の概略図。Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

と比較するために、実験に合わせた寸法および計算条件とした。

4 . 研究成果

(1) 微細加工によるエミッタ電極製作

図4に製作したエミッタ電極の走査型電子顕微鏡撮影図の一例を示す。直径 $100 \mu\text{m}$ のエミッタが $250 \mu\text{m}$ ピッチで整然と並んでいる様子が分かる。

(2) 電圧電流特性評価

図5にエミッタ電極と抽出電極間に両極性パルス電圧を印加した時の電圧電流特性を示す。この時の電極間距離は(a) 0.2, (b) 0.3, (c) 0.4 mm であり、電圧印加繰り返し周波数は 0.5 Hz である。図が示すように、イオンビーム引き出し開始電圧は電極間距離の増加とともに増加することが分かる。また、陽イオンと陰イオンとでは引き出し特性が異なり、陽イオンの方が電流を引き出し易いことが分かる。印加電圧の増加とともにコレクタ電流も増加するが、同様に抽出電極に流れる電流もやや増加する傾向にあり、電極配置のさらなる改善が求められる。

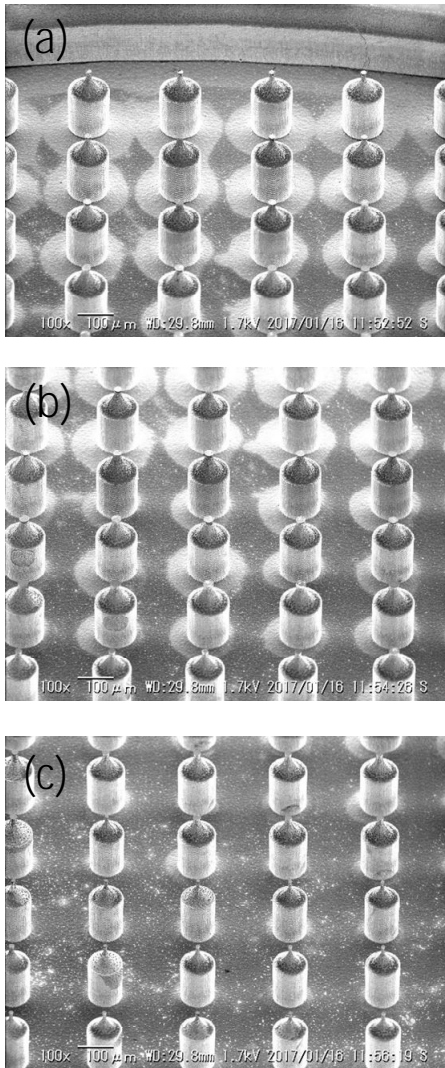


図4 . 製作したエミッタ電極の走査型電子顕微鏡撮影図。 Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

実験に用いた電源は ± 4 kVまで印加できるため、図5に示す電圧以上の印加も試みた。しかしながら、このような高電圧印加を行うと電流特性が非常に不安定になった。図6に典型的な電圧・電流の時間変化の例を示す。図6 (a)では電圧の振幅が2.2 kVの時であり、この場合はコレクタ電流および抽出電極に流れる電流ともに安定している様子が分かる。一方、図6 (b)では電圧の振幅が3 kVの時であり、この場合はいずれの電流も非常に不安定になっており、抽出電極に流れる電流がコレクタ電極と同等かそれ以上になる様子が分かる。また、印加電圧の振幅を3 kVと設定しているのにも関わらず、たまに電位降下も確認できることから、この時にはイオン液体を介してエミッタ電極と抽出電極との間でショートが発生していると考えられる。高電圧印加を行うと、エミッタ電極の先端だけでなく、複数の場所から電界放出によるイオン引き出しが生じることが知られており、本実験においても、このような現象が

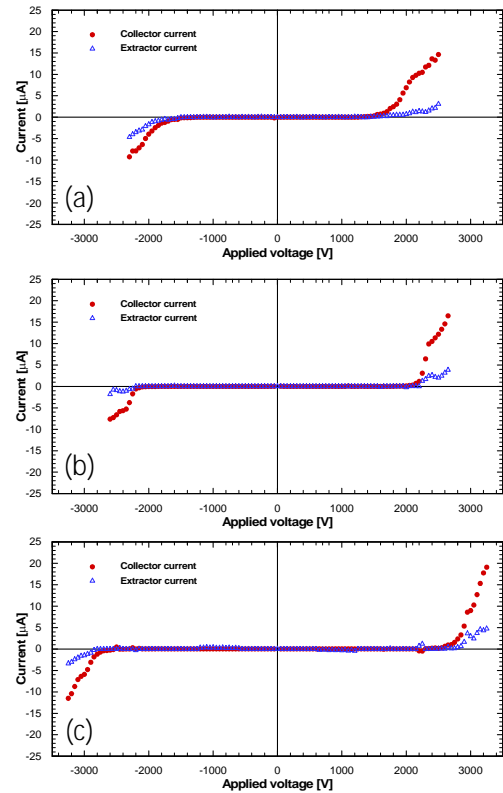


図5 . 電圧電流特性評価結果。 Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

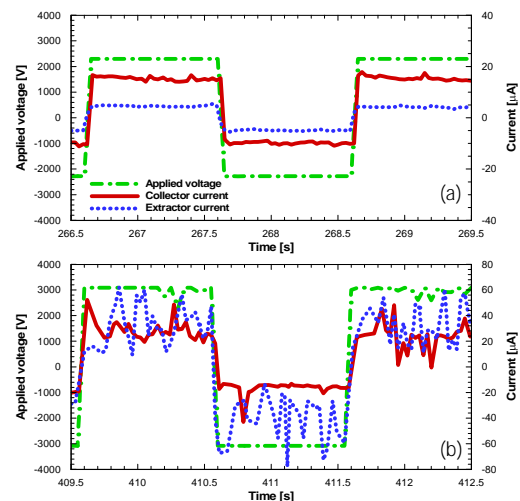


図6 . 電圧・電流の時間変化。 Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

生じていると考えられる。図5に示す結果から、どの電極間距離の条件においても、引き出し開始電圧から800 V程度までが安定してイオンを引き出せる電圧領域であり、この領域での運用が効率的なイオンビーム引き出しになることが明らかになった。

なお、エミッタの構造としては、ボッシュプロセスを用いた異方性エッチングは不可欠となることが分かった。これは等方性エッチングのみで製作した円錐状のエミッタでは、エミッタ間の液溜めとエクストラクタ間で多数のショートが発生し、安定したイオン

引き出しが不可能となるためである。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、エミッタのピッチとしては400 μm程度までに留める必要があるということも明らかになった。

(3) 数値計算によるビーム軌道解析

粒子計算を用いた陽イオンのビーム軌道計算を行ったところ、その密度の最大値はエミッタ先端付近において約 10^{19} m^{-3} であり、最小値はビーム外縁部において約 10^7 m^{-3} であった。陽イオンのエネルギーはエミッタ電極先端から抽出電極にかけて徐々に増加し、抽出電極直下では約+4 keVであった。

イオンビーム発散半角を見積もると約 10° であり、先行研究における測定結果よりも小さい角度であった。しかし、エミッタ先端におけるイオンの温度を変化させたところ、イオンビーム発散半角も変化した。ゆえに、エミッタ先端における境界条件がイオンビーム軌道を決定していると言える。イオンの初速度およびビーム電流についてはより詳細な検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Kaito Nakagawa, Toshiyuki Tsuchiya, and Yoshinori Takao, Microfabricated emitter array for an ionic liquid electrospray thruster, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 56, No. 6S1, 2017, pp. 06GN18-1-8.
DOI: 10.7567/JJAP.56.06GN18

〔学会発表〕(計9件)

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ズラスタ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10日, 沖縄県市町村自治会館(沖縄県・那覇市)

中川洋人, 井上直樹, 土屋智由, 長尾昌善, 鷹尾祥典, 高密度化したエミッタチップを用いたエレクトロスプレーズラスタの製作と電流特性計測, 平成28年度宇宙輸送シンポジウム, 2017年1月20日, JAXA宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

江本一磨, 土屋智由, 鷹尾祥典, Particle-in-Cell法によるイオン液体を用いたエレクトロスプレーズラスタの性能評価, 平成28年度宇宙輸送シンポジウム, 2017年1月20日, JAXA宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

Kaito Nakagawa, Toshiyuki Tsuchiya, and Yoshinori Takao, Microfabricated Emitter Arrays for an Ionic Liquid Electrospray Thruster, 29th

International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016), November 10, 2016, ANA Crowne Plaza Kyoto (Kyoto)

江本一磨, 土屋智由, 鷹尾祥典, イオン液体を用いたエレクトロスプレーズラスタにおけるイオンビーム引き出し機構の数値解析, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 2016年9月7日, 函館アリーナ(北海道函館市)

中川洋人, 土屋智由, 鷹尾祥典, イオン液体を用いたエレクトロスプレーズラスタにおけるビーム引き出し特性の電極形状依存, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 2016年9月7日, 函館アリーナ(北海道函館市)

中川洋人, 土屋智由, 鷹尾祥典, イオン液体を用いたエレクトロスプレーズラスタにおけるイオンビーム抽出特性, 日本航空宇宙学会第47期定時社員総会および年会講演会, 2016年4月14日, 東京大学山上会館(東京都文京区)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: イオン源
発明者: 鷹尾祥典、長尾昌善、村上勝久
権利者: 横浜国立大学、産業技術総合研究所
種類: 特許
番号: 特願2016-200401号
出願年月日: 平成28年10月11日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.takao-lab.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鷹尾 祥典 (TAKAO, Yoshinori)
横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 80552661

(2) 研究分担者

土屋 智由 (TSUCHIYA, Toshiyuki)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 60378792

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

中川 洋人 (NAKAGAWA, Kaito)
江本 一磨 (EMOTO, Kazuma)
井上 直樹 (INOUE, Naoki)