

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01530

研究課題名（和文）微小電極間エレクトロスプレー現象解明による超小型宇宙推進機の多用途化

研究課題名（英文）Elucidation of the electrospray phenomena between microelectrodes for versatile use in ultra-small space propulsion devices

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） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：用途に応じて推力レベルが可変となる超小型宇宙推進機の候補としてエレクトロスプレー推進機がある。本研究では微小電極間におけるエレクトロスプレー現象の学術基盤を構築するため、1-100  $\mu\text{m}$ の2桁にもわたるスケールの異なるエミッタを作製し、イオンビーム特性評価を行った。スケールを小さくすることにより高電流密度を実現し、また、イオンビームを構成するイオン種のほとんどが単量体で構成される条件を同定できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エレクトロスプレー推進機に利用される電極構造の従来スケールは100  $\mu\text{m}$ 以上の領域であり、本研究において初めて10  $\mu\text{m}$ 以下を含めた2桁にわたるスケールでのエレクトロスプレー現象を実現できた。多様なエレクトロスプレーイオン源の創出は、用途に応じて推進機を選定可能な自由度を与えることになり、今後の超小型衛星の活躍の場を広げることに貢献することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Electrospray thrusters are a candidate for a very small space propulsion system with variable thrust levels depending on the application. In this study, to establish the fundamental physics for the electrospray phenomenon between microelectrodes, emitters with scales varying from 1 to 100 micrometers were fabricated, and ion beam characteristics were evaluated. Reducing the scale resulted in high current density, and conditions were identified in which most ion species constituting the ion beam were monomers.

研究分野：航空宇宙工学

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 電気推進 超小型衛星

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

今や超小型衛星は単体利用に留まらず、コンステレーション等の多数基同時利用、そして、深宇宙探査にまで活躍の場が広がっている[1]。各用途に応じた推進機が求められる中、図1に示すエレクトロスプレー推進機の注目が世界的に高まっている[2]。同推進機は、図が示すようにエミッタ電極と対向する引き出し電極から構成され、これらの電極間に発生する高電界を利用して推進剤のイオン液体から直接イオンを引き出すことで推力を得る。同推進機の利点は、(i)推進剤から直接イオンを抽出するため高効率、(ii)イオンエンジンと同等の高比推力(燃費が良い)で高い速度増分を達成可能、(iii)エミッタ電極の数に応じて効率・比推力を維持したまま推力が可変になる点、(iv)推進剤にイオン液体を用いると正負両方のイオン抽出が可能で中和器が不要になる点、さらに、(v)高圧ガス機器が不要で推進機全体が飛躍的にコンパクトになる点等である。1 cm角程度の超小型モジュール化も可能なため、各モジュールで電極実装密度を変えて複数組合せると推力可変、かつ、冗長性も備える推進システムができる。しかし、推力密度の小ささとイオンビームのバラつきが課題でもある。

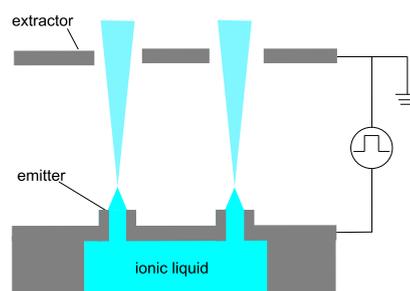


図1. エレクトロスプレー推進機概念図。Source: [2], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

エミッタ電極1つから得られるビーム電流は0.1~1  $\mu\text{A}$ 、結果、推力も数~数10 nNと極小になる。宇宙重力波望遠鏡等に必要の緻密な制御には使える一方、推力が必要な場面では多数のエミッタが必要となる。高実装密度化の取り組みは各方面で行われているが、100  $\mu\text{m}$ スケールの電極を削って作製するトップダウン型の従来プロセスでは500個/ $\text{cm}^2$ 程度の実装密度が最大であり、イオンエンジンと比較しても推力密度が1桁小さい(~10  $\mu\text{N}/\text{cm}^2$ )。このような中、研究代表者らはボトムアップで電極を形成する電界放出電子源(Field Emitter Array: FEA)の作製技術を応用することでエミッタ間隔を2桁小さく1  $\mu\text{m}$ スケールにし、実装密度を4桁増加させる400万個/ $\text{cm}^2$ の超高密度実装を実現した[3]。ここまで小さい系は研究代表者らが世界に先駆けて実施した内容であり、世界最高電流密度となる従来比100倍超の43  $\text{mA}/\text{cm}^2$  (> 1  $\text{mN}/\text{cm}^2$ 相当)に至っている[4]。

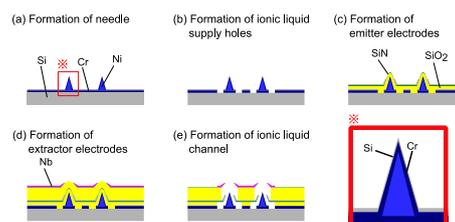


図2. 二重エミッタ構造を持つ1  $\mu\text{m}$ スケールのエレクトロスプレーイオン源作製プロセス。Source: [5], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

一方、エレクトロスプレーは電界により液体から直接イオンを引き出す現象のため、イオンに加えて液滴も一緒に引き出される場合がある。イオンと液滴が混在すると桁違いの質量差からビーム軌道が大きく異なり、また、効率が下がることも分かっている。ビーム軌道によっては引き出し電極に衝突し寿命にも直結するよって、可能な限りイオンのみを引き出し(Purely Ionic Regime: PIR)、かつ、引き出し電極に衝突しないことが望ましいが、その条件については未だ体系化されていない。この条件を同定し体系化することは、従来の100  $\mu\text{m}$ スケールから1  $\mu\text{m}$ スケールまで共通、かつ、解決すべき課題である。

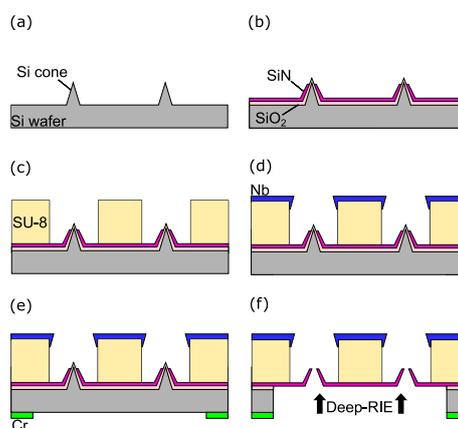


図3. SU-8を利用した10  $\mu\text{m}$ スケールのエレクトロスプレーイオン源作製プロセス。Source: [2], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

### 2. 研究の目的

本研究では、まず既存の100  $\mu\text{m}$ と1  $\mu\text{m}$ スケールに加え、10  $\mu\text{m}$ スケールのエレクトロスプレーイオン源を作製し、高速なイオンを排出するエミッタ電極の高密度実装を行う。これらのイオン源に対してイオンビーム計測と数値解析を行うことで、引き出し電極に衝突せずPIRとなり安定したビーム引き出しが可能な条件を同定する。イオン引き出し機構を体系化することで1~100  $\mu\text{m}$ にわたる微小

電極間エレクトロスプレー現象の学術基盤構築を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 素子作製方法

図 2~4 に本研究で利用したエミッタ作製方法を示す。

図 2 は  $1 \mu\text{m}$  スケールで利用した二重エミッタ構造を持つエレクトロスプレーイオン源の作製プロセスである [5]。(a)FEA の作製プロセスと同様にコーン形状を作製し、(b)イオン液体供給用の穴を形成する。(c)イオン液体の流路にもなる二重エミッタ電極構造を積層して作製し、(d)同様に引き出し電極を形成する。(e)イオンビームの通り道となるよう引き出し電極の一部を開口し、そこからイオン液体流路を形成する。最後に裏面から深堀エッチングにより貫通穴を作製することでイオン液体の供給機構を実現する。

図 3 は厚膜フォトレジスト材料である SU-8 を電極間絶縁材料に利用した  $10 \mu\text{m}$  スケールのエレクトロスプレーイオン源の作製プロセスである [2]。(a)エッチングによりコーン形状を形成、(b)成膜によりエミッタ電極構造を作製する。(c)SU-8 を積層しエミッタ部を開口、(d)その後、斜め蒸着により引き出し電極を成膜する。(e)電極取り出しとマスクを兼用する Cr を成膜した後、(f)深堀エッチングにより貫通穴を作製してイオン源素子とする。

図 4 は  $100 \mu\text{m}$  スケールのエレクトロスプレーイオン源の作製プロセスである [6]。(a)グレースケール・リソグラフィを利用することで Si 基板に転写したい構造をフォトレジストで作製する。(b)異方性エッチングを行うことで、フォトレジストの構造が形成されることになる。

#### (2) イオンビーム引き出し実験

図 5 にイオンビーム引き出し実験のセットアップを示す [7]。エミッタアレイに  $0.1 \mu\text{l}$  のイオン液体を滴下し、エミッタ電極に電圧印加することでイオンビーム引き出しを行う。電源にはソース・メジャー・ユニットを利用し、正負電位を  $1\sim 5 \text{ Hz}$  で繰り返し反転して印加する。引き出されたイオンは対向するコレクタ電極でも電流計測を行い、確実にイオン放出が行われていることを検証する。なお、 $1\sim 10 \mu\text{m}$  スケールのエミッタアレイに関しては 1 つのチップに複数のエミッタアレイ素子を配置している都合、各素子を独立させてイオンビーム引き出し実験を行うためにはエミッタ側を接地電位にし、引き出し電極側を高電位にしている点を付記しておく。それに合わせてコレクタ電極も引き出し電極以上の電位にして計測を行う。

#### (3) イオンビーム特性把握実験

イオン源から放出されるイオンビームの構成種を把握する計測手法の一つに、図 6 に示すイオン源からコレクタ電極に到達するイオンビームの飛行時間差から質量電荷比を求める Time of Flight (TOF) 法がある。本研究においても、TOF 計測系の構築を行い上記イオン源に対してイオンビーム特性把握実験を行った [7]。

#### (4) イオン引き出し過程の数値解析

粒子計算の一種である PIC (Particle-in-Cell) 法によりビーム軌道の解析を行うためにはエミッタ先端の境界条件が必要となる。本研究では、米国 Sandia 国立研究所が開発した古典分子動力学 (Molecular Dynamics: MD) オープンソース LAMMPS を利用して、液滴およびエミッタ先端に固定したイオン液体に電場が印加された際のイオン抽出過程、特に引き出されるイオンビームの角度/速度分布、イオン種を把握する。

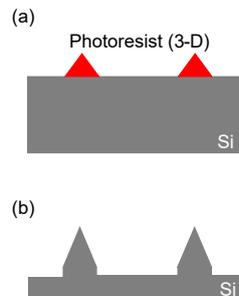


図 4. グレースケール・リソグラフィを利用した  $100 \mu\text{m}$  スケールのエレクトロスプレーイオン源作製プロセス. Source: [6], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

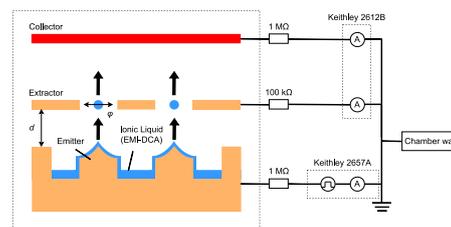


図 5. イオン引き出し実験のセットアップ. Source: [7], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

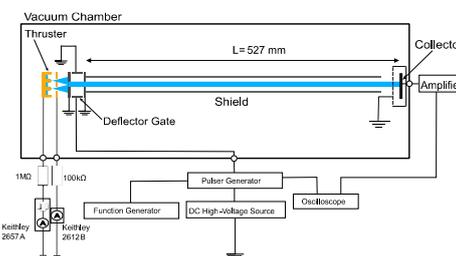


図 6. 構築した TOF 計測系. Source: [7], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

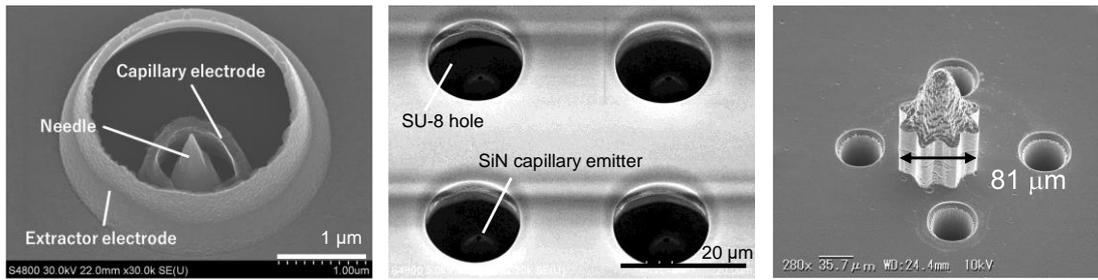


図7. 作製した各エレクトロスプレーイオン源のSEM像(左: 1  $\mu\text{m}$ , 中: 10  $\mu\text{m}$ , 右: 100  $\mu\text{m}$ スケール). Modified figure based on the original figures from [2, 5, 6], under CC BY 4.0 license. This modified figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. Changes made include color adjustments and annotations.

#### (5) 推進性能評価

イオン源が非常にコンパクトになることを利用し、真空槽に入れた精密分析天秤の上にイオン源を載せて推力を直接計測することで推進性能を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 素子作製結果

図7に作製した各エレクトロスプレーイオン源のSEM像を示す[2, 4, 5]。1  $\mu\text{m}$ スケールでは二重エミッタ構造と引き出し電極の実現が、また、10  $\mu\text{m}$ スケールではSU-8の底部にエミッタの形成が確認でき、100  $\mu\text{m}$ スケールではエミッタ先端から緩やかに傾斜が付いたニードル構造が実現できていることが分かる。

#### (2) イオンビーム引き出し実験結果

イオン液体 1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide (EMI-DCA)を利用した結果を一例として報告する。1  $\mu\text{m}$ スケールに関しては最大 88  $\text{mA}/\text{cm}^2$ の電流密度まで到達し、10  $\mu\text{m}$ スケールに関しても最大で 18  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 程度の電流密度が得られた。なお、前者は 75 V 印加時であるが、後者はSU-8利用により電極間距離を 10  $\mu\text{m}$ 程度確保でき、最大 800 V 程度の電位差を印加できるようになった。100  $\mu\text{m}$ スケールに関しては、図8が示すようにグレースケール・リソグラフィを利用することにより引き出し電極で遮られる電流を以前のエミッタ形状時より大幅に減らすことに成功した[6, 7]。

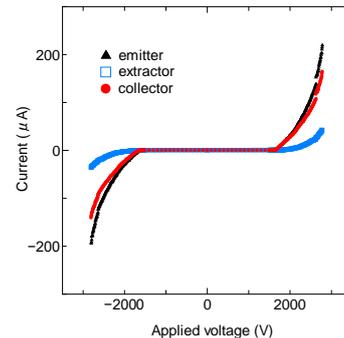


図8. 電流電圧特性結果の一例. Source: [6], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

#### (3) イオンビーム特性把握実験結果

エレクトロスプレー推進機において引き出されるイオン種は、例えば、EMI-DCAを利用する際には、 $\text{EMI}^+$ ,  $\text{DCA}^-$ の単量体だけでなく、 $[\text{EMI-DCA}]_n, \text{EMI}^+$ 等の多量体 ( $n = 1, 2, \dots$ )を一部含むことが分かっているため、電流計測だけでは正確な推進性能を求めることが出来ない。そこで、TOF計測系を実施したところ、図9が示すように正側はほとんどが二量体まで、負側は単量体までで構成されていることが明らかになった[7]。

#### (4) イオン引き出し過程の数値解析結果

MD解析の結果、イオン液体の液滴クラスターへイオンが引き出されるとされる外部電場を 1.3-1.7  $\text{V}/\text{nm}$ と設定して解析することでイオンが引き出される様子が確認できた。また、引き出されるイオンはほとんどが単量体になっており、上記のTOF計測結果とも合致していることが分かった。

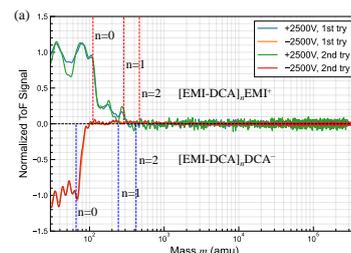


図9. TOF計測結果の一例. Source: [7], under CC BY 4.0 license. This figure is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

#### (5) 推進性能評価結果

高電圧印加を伴うため静電引力による疑似推力発生が生じたが、静電遮蔽を行うことにより推力計測を行うことが可能になった。イオンビーム電流値と1価のモノマーイオンのみから構成されるとする推力計算から求まる推力と計測から求まる結果

は概ね良い一致を示す事が分かり、ここからも TOF 結果との整合性が明らかになった。

<引用文献>

- [1] SpaceWorks Enterprises, Inc., “Nano/Microsatellite Market Forecast,” 2020.
- [2] Shingu, T.; Nagao, M.; Murakami, K.; Murata, H.; Khumpuang, S.; Hara, S.; Takao, Y., “Fabrication and Demonstration of SU-8 Based Emitter Arrays for Ionic Liquid Electrospray Thrusters,” *J. Evolv. Space Activ.*, 2023, **1**, 30.  
<https://doi.org/10.57350/jesa.30>.
- [3] Inoue, N.; Nagao, M.; Murakami, K.; Khumpuang, S.; Hara, S.; Takao, Y., “Fabrication of a High-Density Emitter Array for Electrospray Thrusters Using Field Emitter Array Process,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2019, **58**, SEEG04.  
<https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab0fee>.
- [4] Suzuki, K.; Nagao, M.; Liu, Y.; Murakami, K.; Khumpuang, S.; Hara, S.; Takao, Y., “Fabrication of Nano-Capillary Emitter Arrays for Ionic Liquid Electrospray Thrusters,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2021, **60**, SCCF07.  
<https://doi.org/10.35848/1347-4065/abf2d5>.
- [5] Guo, S.; Nagao, M.; Murakami, K.; Murata, H.; Takao, Y., “Fabrication of a Double-Emitter Structure for Higher Current Density of Ionic Liquid Electrospray Thrusters,” *J. Evolv. Space Activ.*, 2024, **2**, 142.  
<https://doi.org/10.57350/jesa.142>.
- [6] Matsukawa, K.; Takao, Y., “Evaluation of Grooved Needle Emitter Performance for Ionic Liquid Electrospray Thrusters,” *J. Evolv. Space Activ.*, 2024, **2**, 149.  
<https://doi.org/10.57350/jesa.149>.
- [7] Matsukawa, K.; Nakashima, Y.; Naemura, M.; Takao, Y., “Emission Measurements and In-Situ Observation of Ionic Liquid Electrospray Thrusters with Longitudinally Grooved Emitters,” *J. Electr. Propuls.*, 2023, **2**, 23.  
<https://doi.org/10.1007/s44205-023-00057-8>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Matsukawa Koki, Nakashima Yuiko, Naemura Momoko, Takao Yoshinori	4. 巻 2
2. 論文標題 Emission measurements and in-situ observation of ionic liquid electro spray thrusters with longitudinally grooved emitters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Electric Propulsion	6. 最初と最後の頁 23-1-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s44205-023-00057-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shujun GUO, Masayoshi NAGAO, Katsuhisa MURAKAMI, Hiromasa MURATA, and Yoshinori TAKAO	4. 巻 2
2. 論文標題 Fabrication of a Double-Emitter Structure for Higher Current Density of Ionic Liquid Electro spray Thrusters	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 142-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koki MATSUKAWA and Yoshinori TAKAO	4. 巻 2
2. 論文標題 Evaluation of Grooved Needle Emitter Performance for Ionic Liquid Electro spray Thrusters	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 149-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Momoko NAEMURA and Yoshinori TAKAO	4. 巻 2
2. 論文標題 Time-of-Flight Measurements of Ion Beam Compositions in Electro spray Thrusters	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 146-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takaaki Enomoto, Shehan M. Parmar, Ryohei Yamada, Richard E. Wirz, Yoshinori Takao	4. 巻 1
2. 論文標題 Molecular Dynamics Simulations of Ion Extraction from Nanodroplets for Ionic Liquid Electro spray Thrusters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Electric Propulsion	6. 最初と最後の頁 13-1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s44205-022-00010-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Akane NISHIMURA, Hirohide KATSUTA, Yoshinori TAKAO, Toshiyuki TSUCHIYA	4. 巻 1
2. 論文標題 Design and Fabrication of Ionic Liquid Electro spray Thruster with Two-Stage Electrodes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 7-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.57350/jesa.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takumi SHINGU, Masayoshi NAGAO, Katsuhisa MURAKAMI, Hiromasa MURATA, Somawan KHUMPUANG, Shiro HARA, Yoshinori TAKAO	4. 巻 1
2. 論文標題 Fabrication and Demonstration of SU-8 Based Emitter Arrays for Ionic Liquid Electro spray Thrusters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 30-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.57350/jesa.30	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鷹尾 祥典	4. 巻 90
2. 論文標題 次世代宇宙産業を担う超小型衛星に不可欠なマイクロスラスタ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 298 ~ 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.5_298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計40件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 Takumi Shingu, Masayoshi Nagao, Katsuhisa Murakami, Hiromasa Murata, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Fabrication and Characterization of an Ionic Liquid Electro spray Thruster using SU-8 Thick-Film Photoresist
3. 学会等名 37th International Electric Propulsion Conference, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki Matsukawa, Hirohide Katsuta, Yuiko Nakashima, Akane Nishimura, Toshiyuki Tsuchiya, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Fabrication and Performance Characterization of an Ionic Liquid Electro spray Thruster with a Grooved Needle Emitter Shape
3. 学会等名 37th International Electric Propulsion Conference, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinori Takao, Kanta Suzuki, Shujun Guo, Masayoshi Nagao, Katsuhisa Murakami, and Hiromasa Murata
2. 発表標題 High-Current-Density Ionic Liquid Electro spray Thruster with a Nano-Capillary Emitter Array
3. 学会等名 37th International Electric Propulsion Conference, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Shingu, Masayoshi Nagao, Katsuhisa Murakami, Hiromasa Murata, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Ionic Liquid Electro spray Ion Sources using SU-8 Photoresist for Microspacecraft Propulsion
3. 学会等名 22nd International Vacuum Congress, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki Matsukawa, Hirohide Katsuta, Yuiko Nakashima, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Ionic Liquid Electrospray Ion Sources with Grooved Needle Emitters for Precise Thrust Control
3. 学会等名 22nd International Vacuum Congress, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 郭樹俊, 長尾昌善, 村上勝久, 村田博雅, 鷹尾祥典
2. 発表標題 超高実装密度エレクトロスプレースラストのための二重エミッタ構造の試作
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会, 熊本城ホール, 熊本市
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松川晃己, 鷹尾祥典
2. 発表標題 溝付きエミッタ構造を持つエレクトロスプレースラストの作製とイオンビーム特性評価
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会, 熊本城ホール, 熊本市
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鷹尾祥典
2. 発表標題 イオン液体を推進剤とした電気推進機
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会, 熊本城ホール, 熊本市
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新宮拓実, 長尾昌善, 村上勝久, 村田博雅, 鷹尾祥典
2. 発表標題 超小型衛星のための厚膜レジストSU-8を用いたエレクトロスプレーイオン源
3. 学会等名 電子デバイス研究会「電子・イオンビーム応用」、名古屋大学東山キャンパスおよびウイック愛知、名古屋市
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 郭樹俊, 長尾昌善, 村上勝久, 村田博雅, 鷹尾祥典
2. 発表標題 超高実装密度エレクトロスプレーイオン源のための二重エミッタ構造の試作
3. 学会等名 電子デバイス研究会「電子・イオンビーム応用」、名古屋大学東山キャンパスおよびウイック愛知、名古屋市
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木公貴, 月崎竜童, 西山和孝, 山下裕介, 鷹尾祥典
2. 発表標題 多孔質エレクトロスプレーラスタにおけるイオン引き出しのモデリング
3. 学会等名 令和4年度 宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所, 相模原市
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新宮拓実, 長尾昌善, 村上勝久, 村田博雅, 鷹尾祥典
2. 発表標題 高電圧作動可能な高実装密度エレクトロスプレーラスタ
3. 学会等名 令和4年度 宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所, 相模原市
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松川晃己, 鷹尾祥典
2. 発表標題 溝付きエミッタ構造を持つエレクトロスプレースタのイオンビーム特性評価
3. 学会等名 令和4年度 宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所, 相模原市
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinori Takao, Masayoshi Nagao, Toshiyuki Tsuchiya, and Ryudo Tsukizaki
2. 発表標題 Ionic Liquid Electrospray Thrusters with Different Types of Emitter Structures
3. 学会等名 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Kanazawashi Cultural Hall, Kanazawa, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akane Nishimura, Toshiyuki Tsuchiya, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 IONIC LIQUID ELECTROSPRAY THRUSTER WITH TWO-STAGE ELECTRODES ON GLASS SUBSTRATE
3. 学会等名 36th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Science Congress Center Munich, Germany (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新宮 拓実, 長尾 昌善, 村上 勝久, 村田 博雅, クンプアン ソマワン, 原 史朗, 鷹尾 祥典
2. 発表標題 厚膜レジストSU-8を用いたエレクトロスプレースタの試作
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西邑 亜香音, 鷹尾 祥典, 土屋 智由
2. 発表標題 イオン液体エレクトロスプレースラストのための二段電極構造の作製
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝田 紘英, 松川 晃己, 中島 惟子, 鷹尾 祥典
2. 発表標題 飛行時間型質量分析によるエレクトロスプレースラストのイオンビーム特性評価
3. 学会等名 令和3年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Shingu, Masayoshi Nagao, Katsuhisa Murakami, Hiromasa Murata, Somwan Khumpuang, Shiro Hara, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Fabrication of SU-8 Based Emitter Arrays for Ionic Liquid Electro spray Thrusters
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akane Nishimura, Yoshinori Takao, and Toshiyuki Tsuchiya
2. 発表標題 Design and Fabrication of Ionic Liquid Electro spray Thruster with Two-Stage Electrodes
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松川 晃己, 勝田 紘英, 中島 惟子, 鷹尾 祥典
2. 発表標題 溝付きエミッタ構造を持つエレクトロスプレースタの作製
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki Takagi, Ryudo Tsukizaki, Yusuke Yamashita, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Effects of Tip Curvature on Multiple Emitted Ion Beams in Porous Ionic Liquid Electro spray Thrusters
3. 学会等名 2024 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shujun Guo, Masayoshi Nagao, Katsuhisa Murakami, Hiromasa Murata, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Ionic Liquid Electro spray Thrusters with a Double-Emitter Structure for High Current Density
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koki Matsukawa and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Improvement of Grooved Needle Emitter Performance for Ionic Liquid Electro spray Thrusters
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Momoko Naemura and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Time-of-Flight Measurements of Ion Beam Compositions in Electrospray Thrusters
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koki Takagi, Ryudo Tsukizaki, Yusuke Yamashita, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Performance Evaluation and Modelling of Ion Extraction for Porous Electrospray Thrusters
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinori Takao
2. 発表標題 Ionic Liquid Electrospray Ion Sources for Space Propulsion
3. 学会等名 The 243rd ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鷹尾祥典, 青木里奈, 苗村桃子, 中島惟子
2. 発表標題 エレクトロスプレーズラスタを対象としたイオンビーム診断と推進性能評価
3. 学会等名 第63回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高木公貴, 月崎竜童, 鷹尾祥典
2. 発表標題 イオン液体エレクトロスプレーラスタにおける多孔質エミッタ針からのマルチサイトイオン放出
3. 学会等名 第63回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 郭樹俊, 長尾昌善, 村上勝久, 村田博雅, 鷹尾祥典
2. 発表標題 FEA作製技術を用いたエレクトロスプレーイオン源の開発
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松川晃己, 鷹尾祥典
2. 発表標題 エレクトロスプレーラスタにおける溝付きエミッタ形状の改善およびイオンビーム特性評価
3. 学会等名 令和5年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高木公貴, 月崎竜童, 鷹尾祥典
2. 発表標題 ポーラス型エレクトロスプレーラスタのエミッタ先端曲率半径がイオン放出に与える影響
3. 学会等名 令和5年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中島惟子, 鷹尾祥典
2. 発表標題 エレクトロスプレースラスタのための逆電位アナライザ計測系の構築
3. 学会等名 令和5年度 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 郭樹俊, 長尾昌善, 村上勝久, 村田博雅, 鷹尾祥典
2. 発表標題 キャピラリ・ニードルエミッタ構造を有するエレクトロスプレーイオン源の性能向上に向けた作製プロセスの最適化
3. 学会等名 電子デバイス研究会「電子・イオンビーム応用」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高木公貴, 月崎竜童, 鷹尾祥典
2. 発表標題 ポラス型エレクトロスプレースラスタのエミッタ形状がイオン放出に与える影響
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青木里奈, 鷹尾祥典
2. 発表標題 エレクトロスプレースラスタを対象とした直接推力測定系の構築
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島惟子, 鷹尾祥典
2. 発表標題 逆電位アナライザを用いたエレクトロスプレースラスタのイオンビーム特性評価
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 苗村桃子, 鷹尾祥典
2. 発表標題 エレクトロスプレースラスタを対象とした飛行時間型質量分析の計測系依存性
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青木里奈, 鷹尾祥典
2. 発表標題 エレクトロスプレースラスタの直接推力測定
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第54期定時社員総会および年会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 苗村桃子, 鷹尾祥典
2. 発表標題 エレクトロスプレースラスタを対象とした飛行時間型質量分析系の精度評価
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第54期定時社員総会および年会講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Takao Lab  
http://www.takao-lab.ynu.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	土屋 智由  (Tsuchiya Toshiyuki)  (60378792)	京都大学・工学研究科・教授   (14301)	
研究分担者	長尾 昌善  (Nagao Masayoshi)  (80357607)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長   (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	University of California, Los Angeles		