

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

イオン液体から放出するイオンの 理論モデルを開発

次世代の超小型・省電力・高効率な宇宙用推進機である
多孔質型イオン液体エレクトロスプレースタの推力生成メカニズム

本研究のポイント

- 多孔質エミッタから放出されるイオン電流を定式化する理論モデルを構築
- 本理論モデルを用いてイオン電流の実験結果を精度良く再現することに成功
- 今後、推進機の性能向上に向けた設計への活用に期待

【研究概要】

横浜国立大学の高木公貴大学院生（博士課程後期2年、JST創発プロジェクト・リサーチ・アシスタント、東京大学大学院修士課程修了）と鷹尾祥典准教授（JST創発研究者）は、JAXAの西山和孝教授、月崎竜童准教授、東京大学の山下裕介博士（現スタンフォード大学）とともに、真空中でイオン液体を含浸した多孔質エミッタからイオンを放出して推力を発生させる物理メカニズムに関して、マルチスケールな解析を不要とする簡易な理論モデルを構築し、放出イオン電流の実験結果を精度良く説明することに成功しました。今後、イオン液体を利用した宇宙推進機の性能予測への活用が期待できます。

本研究成果は、国際科学誌「Journal of Applied Physics」（2024年6月27日付）に掲載され、特に注目すべき研究成果としてFeatured Articleに選出されました。なお、本研究は主にJST創発的研究支援事業とJAXA戦略的開発研究費（工学）の助成を受けて実施されました。

【社会的な背景】

現在、宇宙開発では超小型衛星の開発が非常に注目を集めています。多数の衛星を用いたコンステレーションによる通信インフラの整備が急速に進められるなど、新たな産業基盤として構築されつつあります。しかしながら、超小型衛星に搭載できる低電力で効率の良い推進機の選択肢が現状ほとんどありません。従来のプラズマを利用する電気推進機では、小型化に伴い多くのエネルギー損失を生じるからです。本研究では、このボトルネックとなっているプラズマを介すことなく、推進剤となるイオン液体から直接イオンを放出して推力を発生させることで、大幅な効率改善を図ります。本推進機技術の確立により、超小型宇宙機も自由に宇宙空間を動力航行できることが期待できます。

【研究成果】

イオン液体を浸透させた多孔質エミッタの表面に高電界を加えるとイオンを効率よく放出できることから、宇宙推進機としての利用を目指して世界中で研究開発が進められてい

ます。しかし、多孔質表面に存在するイオン液体界面からイオンが引き出される物理現象はマルチスケールにわたり複雑なため、どれだけのイオンが放出されるのかを予測するには時間を要する数値シミュレーションが必要でした。こうした中、エミッタ内部のイオンの流れがイオン放出を決定していることを示唆する先行研究から着想を得て、多孔質構造によって抑制されるイオンの輸送をオーム則に基づく簡易なモデルで表し、しきい値電界を越える領域からイオンが放出されるとする定式化を行いました。その結果、複雑な表面の状態を考慮しない簡易なモデル化にも関わらず、モデルから予測される電流値は実験値と非常に良い一致を示すことに成功しました。

【実験・解析手法】

約 1 mm の微小な突起形状を持つ多孔質エミッタの形状を正確に計測し、その形状から数値計算で表面電界を算出します。一方、真空装置内でイオン液体を含浸させたエミッタ表面に高電界を与えることで放出されるイオンを電流値として直接計測しました。これらの電界と電流密度の関係を理論モデルで定式化し、マイクロスケールとナノスケールの異なる多孔質を用いて多孔質抵抗を変化させることで、イオンの輸送の違いがイオン放出に与える影響を調べました。

【今後の展開】

本論文で構築した理論モデルを用いると非常に低コストな計算で、スラストの形状設計に対する放出イオンを予測することが可能となります。その結果、今後の推進機開発において本理論モデルを活用することで、高性能化へ向けた設計の効率化が期待されます。本スラストが実用化されれば、超小型衛星を使ったコンステレーション、フォーメーションフライトや深宇宙探査の実現に貢献します。

掲載論文 (Featured Article)

Koki Takagi, Yusuke Yamashita, Ryudo Tsukizaki, Kazutaka Nishiyama, and Yoshinori Takao, “Simple model of multi-scale and multi-site emissions for porous ionic liquid electrospray thrusters,” *Journal of Applied Physics*, **135**, 244502 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0195699>

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR2129、JAXA 戦略的開発研究費 (工学)、JSPS 科研費 JP21H01530、キャノン財団、有人宇宙活動や宇宙探査活動に関わる萌芽研究による助成を受けて実施されました。実験に用いた多孔質エミッタは、日本電気硝子株式会社から提供されたポーラス材料を使用し、その加工は JAXA 宇宙科学研究所先端工作グループにおいて行われました。

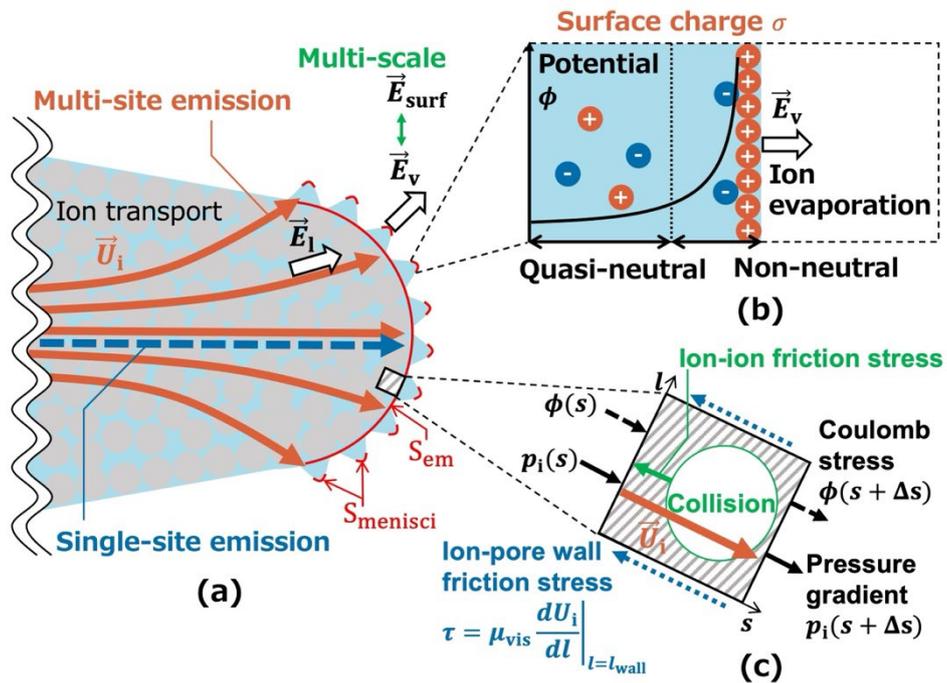


図 理論モデルの概要。多孔質エミッタの内部から表面に至るまでの流れがイオン放出を決定していることを表している。(出典は掲載論文より: licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International (CC BY-NC-ND) license.)

本件に関するお問い合わせ先
 横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授 鷹尾祥典
 e-mail: takao@ynu.ac.jp