

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14950

研究課題名（和文）多価イオンの静電・電磁複合加速による電気推進機の大推力化

研究課題名（英文）High Thrust Density Operation by Electrostatic-Magnetic Hybrid Multi-Charged-Ion Acceleration

研究代表者

市原 大輔 (Ichihara, Daisuke)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80815803

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では入れ子状のソレノイドコイルを用いて環状発散磁場を形成し、コイル電流比を通じた排気イオンビームの発散半角制御に主に取り組んだ。排気プラズマの画像と整合する形でビーム発散半角も最小値を示しており、本作動条件下においては発散半角を40度まで低減できた。コイル電流比の増加と共に放電電圧及び全イオンビーム電流値も増加した。特に内側コイルに対して外側コイルの電流比を1.4倍とした結果、全イオンビーム電流値は1.0を上回っており多価イオンの生成が強く示唆される結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の静電加速型電気推進機には、多価イオン生成時に生じる自由電子を活用した推力発生機構が存在しない。そのため、電子電流の増分は推力効率低下の要因であり多価イオンの生成を抑制する手法がとられてきた。本研究のキーワードは静電・電磁複合加速である。Coulomb衝突を介した電子-イオン間の運動量輸送機構を組み込むことで電磁加速が可能となり、これと静電加速とを組み合わせることで、推力効率を維持しつつ推力密度そのものを向上させる点が従来と異なるアプローチである。これにより電気推進機の単機運転における大推力作動を実現し、軌道遷移時間の短縮につなげる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we formed an annular divergent magnetic field using a nested solenoid coil, and mainly worked on the divergence half-angle control of the exhaust ion beam through the coil current ratio. The beam divergence half-width also showed the minimum value in a form consistent with the image of the exhaust plasma, and the divergence half-width could be reduced to 40 degrees under this operating condition. As the coil current ratio increased, the discharge voltage and the total ion beam current values also increased. In particular, as a result of multiplying the current ratio of the outer coil to the inner coil by 1.4 times, the total ion beam current value exceeded 1.0, which strongly suggested the generation of multi-charged ions.

研究分野：電気推進機

キーワード：多価イオン 推力密度 静電・電磁複合加速

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

エネルギー保存則並びに作用・反作用の法則に基づくと、推進機への投入電力が一定である場合、発生する推力と推進剤の排気速度とは反比例関係にあることが導かれる(S. Mazouffre, 2016). これは推進機の種類に依らず成立する関係であり、電気推進機も例外ではない。化学推進機と比較して高排気速度を達成可能な電気推進機は、宇宙機の姿勢制御から軌道遷移にまで活用されるものの、上述の反比例関係により発生する推力が小さく、その結果、軌道遷移に要する時間が長期化するという課題に直面している。現行の電気推進機はイオンを無衝突静電加速しその反作用で推力を得る静電加速方式が主流である。衝突に伴うエネルギー損失が抑制されるため高い推力効率(電気エネルギーから運動エネルギーへの変換効率)を達成する一方で、無衝突加速の維持には推進剤流量を限定する必要がある、推進機の単位開口面積当たりにも生じる推力(以下、推力密度)には上限値が存在する(A. A. Shagaya et al, 2013). そのため大推力化には、低い推力密度を実効的な開口面積の拡大で補わざるを得ず、推進機の大口径化や複数台同時運転による大推力化が考案された(D. M. Goebel et al, 2008). しかしながらこれらの方法は推進機の重量増加やシステムの複雑化を招き、大推力作動の実現方法は未だ確立されていない。

これに対して申請者は発散磁場中におけるイオン生成/加速に注目し、独自の静電加速機Diverging-magnetic-field electrostatic thruster (以下DM-EST, 図 1)の開発を通じて、推力密度そのものを向上させる方法に取り組んでいる。DM-ESTは上流の陽極と下流の陰極との間に発散磁場を有しており、これまで種々の推進機作動条件下にて推力測定に取り組んできた。陽極近傍にて局所的に生成されたイオンは陽極-陰極間の電位差で静電加速される。一方で、磁場を横切る電子はLorentz力による電磁加速を受け運動量を獲得する。この運動量は

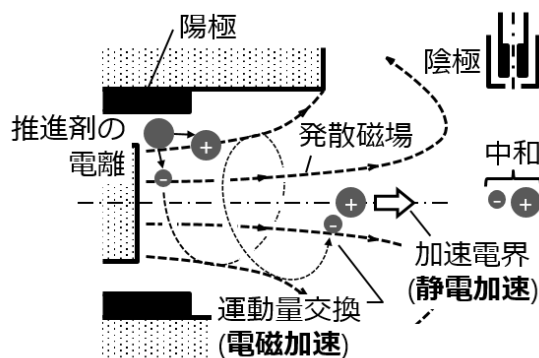


図 1 DM-EST における静電・電磁複合加速

Coulomb衝突を介してイオンに輸送され電磁加速推力として推進機に作用する。従来の無衝突静電加速に電磁加速を追加した静電・電磁複合加速方式を見出し、電気推進機の推力密度向上に対する新たなアプローチを実験により実証した。推進機からの排気プラズマ流束を測定した結果、供給した推進剤流量の最大3倍に相当するイオン流束が測定された(図2)。これは放電室内部での多価イオン生成を強く示唆するものである。多価イオンの生成はLorentz力が作用する電子数の増加を招き、電磁加速推力も増加する。加えて、イオンが静電場から受ける力は価数の平方根

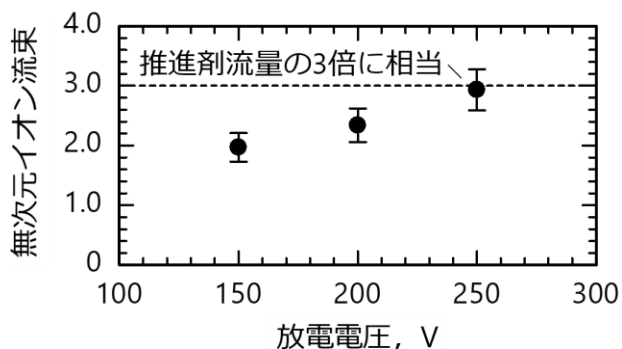


図 2 イオン流束の放電電圧に対する依存性

に比例するため多価イオンの増加は静電加速推力の増加にもつながる。このように多価イオンの生成は静電加速と電磁加速の双方の推力値を増加させることから、静電・電磁複合加速方式の採用により、1価イオンの無衝突静電加速のみでは達成しえない推力密度が期待できる。

## 2. 研究の目的

発散磁場配位下における多価イオンの静電・電磁複合加速を活用した電気推進機の大推力化を目的とする。そのため、多価イオンの生成に関しては電離反応の平均自由行程長に、排気に関しては排気多価イオンの運動量ベクトルにそれぞれ注目する。具体的には

【1】多価イオン生成に必要な推進機の作動条件を特定すること，【2】環状発散磁場を用いて排気多価イオンの運動量ベクトルを制御すること，これらの成果を踏まえ【3】最適静電・電磁加速比を算出し電気推進機の大推力作動を実証することである。

## 3. 研究の方法

研究項目は以下の3点である。推進機の作動条件が電磁場中の電子・重粒子の運動に及ぼす影響を解明し、多価イオンの静電・電磁複合加速を活用した電気推進機の単機運転における大推力作動の実証を目標とする。

### 【1】多価イオン生成に必要な推進機作動条件の特定

多価電離反応における平均自由行程長の算出には、電子の状態量(数密度・温度)に加えて中性粒子の流速(放電室壁面温度に相当する熱速度)および数密度情報が必要である。電子の状態量測定にはダブルプローブ法を用いる。中性粒子の流速は熱電対による放電室壁面温度測定から推定し(C. F. Book et al, 2010)，数密度は推進剤流量と流速推定結果とに基づいて算出する。中性粒子数密度は推進剤流量に比例する一方で、電子の運動は電子温度と磁場強度とで決定される。そのため推進剤流量・放電電圧及び磁場強度を変化させた際の平均自由行程長を算出する。これを陽極-陰極間距離と比較することで放電領域における多価電離衝突の有無を判定する。以上の結果から多価イオン生成に必要な推進機の作動条件を特定する。

### 【2】環状発散磁場を用いた排気イオンの運動量ベクトル制御

推進機に作用する推力は排気イオンの運動量ベクトルのうち推進機進行方向成分のみであり、これと垂直方向成分は推進機の運動エネルギー変化に寄与しない(発散角損失)。

静電加速におけるイオンの運動量ベクトルは加速領域での電場形状で決定される。そこで、発散磁場を環状として推進機中心軸上に陰極を設置し、陽極から陰極に向かう内向き加速電場で排気イオンの集束を試みる(図

3)。環状の発散磁場(以降、環状発散磁場)は2つの電磁石を入れ子状に配置して印加する。環状発散磁場の形状は各電磁石に供給する電流比で決定される。電流比を変化させた際の発散角損失と排気イオンに含まれる各価イオンの流束割合を Faraday プロブ及び  $E \times B$  プロブによりそれぞれ測定する。多価イオン生成に伴う発散角損失を低減可能な環状発散磁場形状を特定し、排気イオンの運動量ベクトル制御を実現する。

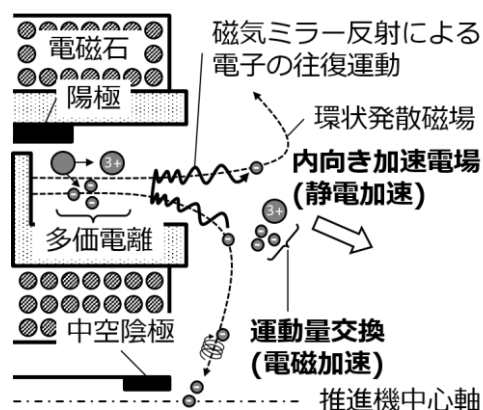


図 3 環状発散磁場による排気イオンの運動量ベクトル制御

### 【3】最適静電・電磁加速比の算出と大推力作動実証

静電加速推力と電磁加速推力との間には電場によるイオン集束と衝突散乱とのトレードオフを通じて推力密度を最大化する最適比が存在する。磁場強度に対する推力値の依存性から静電加速推力と電磁加速推力との割合を算出し、発散角損失を最小化する静電・電磁加速比を見出す。また、排気された多価イオン中に含まれる各価イオンの速度並びに流束割合を E×B プローブを用いて測定する。これにより測定された推力値に対して各価イオンが寄与する割合を算出し、多価イオン生成による推力密度の向上を実証する。

### 4. 研究成果

本報告書では主に研究項目 2 に関してその成果をまとめる。製作した推進機概念図を磁力線と共に図 4 に示す。内側コイルと外側コイルとに供給する電流値  $J_c$  と電流比  $J_{c,out}/J_{c,in}$  とをそれぞれ変化させ、磁場強度と磁力線形状とを制御した。内側コイルと外側コイルとの間には円環状の放電室を設け、外側コイルに沿わせる形で銅製の陽極を設置した。また、内側コイル内部には中心軸上にホローカソードを設置した。推進剤(キセノン)は陽極近傍のみから供給した。排気イオンビームの測定にはガードリング付きの Faraday プローブを用い、陰極電位から -20V にバイアスした。Faraday プローブは中心軸上の推進機出口面を基準点とし、半径 475mm で周方向に回転させた。

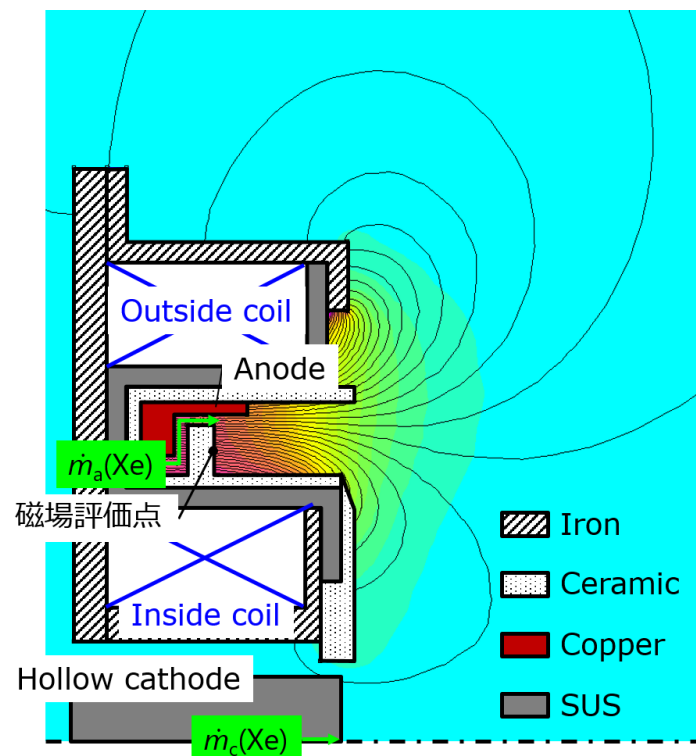


図 4 推進機概念図と印加磁場形状

コイル電流を  $J_c=9A$  に固定し、コイル電流比  $J_{c,out}/J_{c,in}$  を変化させた際の排気プラズマの様子を図 5 に示す。当初の狙い通り、電流比に応じて、即ち磁力線の形態に応じて、排気プラズマの形態が変化していることが分かる。特に  $J_{c,out}/J_{c,in}$  が 1.2 から 1.3 の領域において推進機の中心軸方向に収束するような排気イオンビームを生成することができた。次に、Faraday プローブにより取得したイオン電流密度分布とこれを基に算出

したビーム発散半角とを図 6 に示す。排気プラズマ画像と整合する形でビーム発散半角も最小値を示しており、本作動条件下においては発散半角を 40 度まで低減できた。最後に、コイル電流比に対する放電電圧と全イオンビーム電流値とを先述の発散半角と合わせて図\*\*に示す。コイル電流比の増加と共に放電電圧及び全イオンビーム電流値も増加した。特に  $J_{c,out}/J_{c,in}=1.4$  において全イオンビーム電流値は 1.0 を上回っており多価イオンの生成が強く示唆される結果となった。

このように限定的ではあるものの、環状発散磁場を用いることで排気イオンビームの発散半角を能動制御することに成功したことが本事業の主要な成果である。

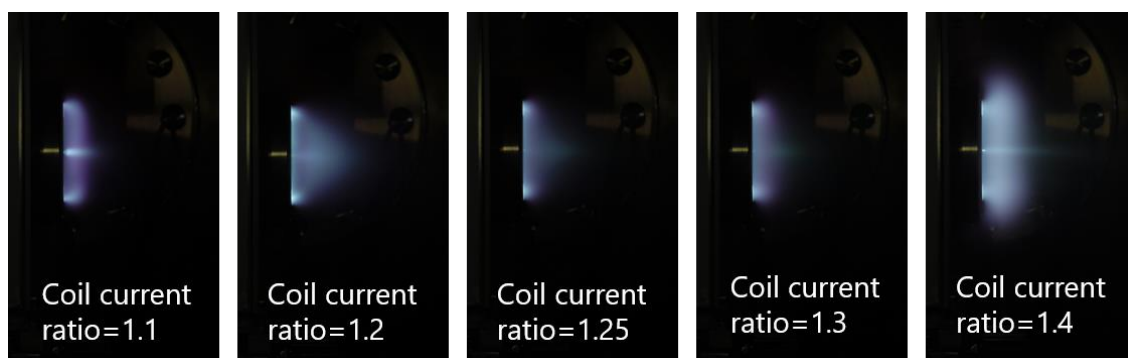


図 5 コイル電流比に対する排気イオンビームの様子； $\dot{m}_a=1.0\text{Aeq(Xe)}$ ,  $\dot{m}_c=0.36\text{Aeq(Xe)}$ ,  $J_d=8\text{A}$ ,  $B=90\text{mT}$ .

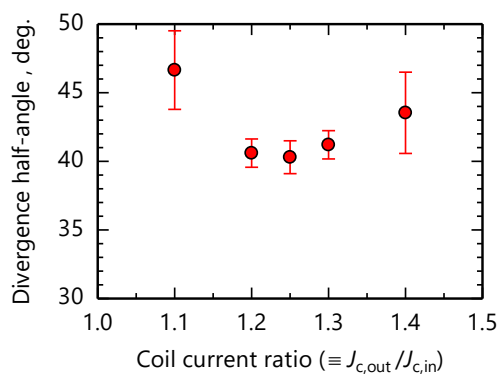
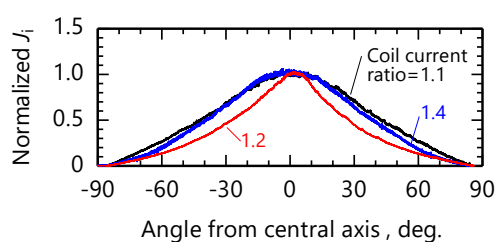


図 6 コイル電流比に対するイオンビーム密度と発散半角； $\dot{m}_a=1.0\text{Aeq(Xe)}$ ,  $\dot{m}_c=0.36\text{Aeq(Xe)}$ ,  $J_d=8\text{A}$ ,  $B=90\text{mT}$ .

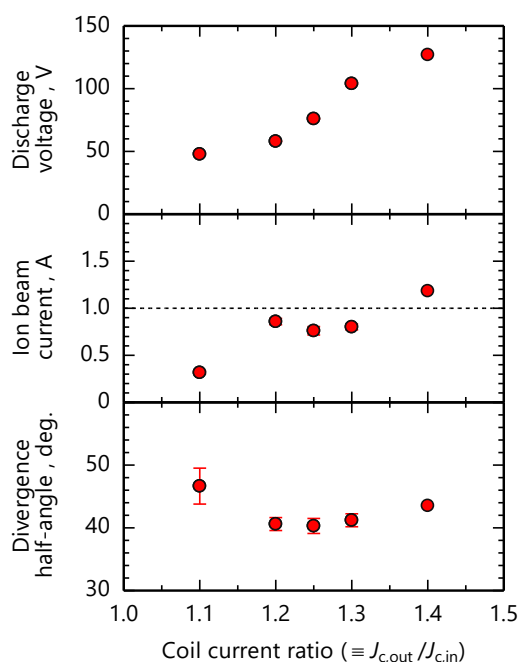


図 7 コイル電流比に対する放電電圧，全イオンビーム電流，発散半角； $\dot{m}_a=1.0\text{Aeq(Xe)}$ ,  $\dot{m}_c=0.36\text{Aeq(Xe)}$ ,  $J_d=8\text{A}$ ,  $B=90\text{mT}$ .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ichihara D., Nakano R., Nakamura Y., Kinefuchi K., Sasoh A.                       | 4. 巻<br>130                   |
| 2. 論文標題<br>Electrostatic-magnetic hybrid ion acceleration for high-thrust-density operation | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>223303 ~ 223303 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/5.0066083  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>市原大輔                         |
| 2. 発表標題<br>静電・電磁複合イオン加速特性に対する推進剤供給位置の効果 |
| 3. 学会等名<br>2020年度宇宙輸送シンポジウム             |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>市原大輔                                 |
| 2. 発表標題<br>フィラメント陰極を用いた発散磁場型静電加速スラスタの低電力・高比推力作動 |
| 3. 学会等名<br>2020年度宇宙輸送シンポジウム                     |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|