

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13925

研究課題名(和文) 静電/電磁混合イオン加速による電気推進機の大推力化

研究課題名(英文) Large-thrust operation of electric propulsion by using electrostatic/magnetic hybrid 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)：化学推進機と比較して高い排気速度を達成可能な電気推進機は、発生する推力が小さいために、軌道遷移に要する時間が長期化することが課題である。そこで本研究では、発散磁場配位下における静電加速と電磁加速の混合、すなわち「静電/電磁混合イオン加速」の実証とこれによる電気推進機の大推力化を目的とした。本研究を通じて、放電室外部に陰極を配置しても高いHallパラメータを維持しつつ静電/電磁混合イオン加速が実現可能なこと、磁場強度を増加させることで推進剤の多価電離が進行し、アルゴン推進剤において3800秒を上回る高い排気速度と30%を上回る推力効率とを達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの宇宙推進機は低い電離エネルギーを有するキセノン推進剤を使用している。しかしながらキセノン推進剤は年間生産量が限定されその価格は高騰し続けている。そこで本提案手法である静電/電磁混合イオン加速をアルゴン推進剤に対して適用することでキセノン推進機に対して1/200の価格でありながら、これまでにない電気推進機の高排気速度作動を実現することができた。本成果は宇宙機の運用コスト削減に大きく貢献するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Electric propulsion have a capability of high-exhaust velocity operation than that of the chemical propulsion operation. However, due to the small thrust, it takes much longer time to orbit rising. In this research, the electrostatic/magnetic hybrid ion acceleration method under the diverging magnetic field was investigated to achieve a large-thrust operation of electric propulsion. Through this research, we have found that even with external cathode operation, the hybrid ion acceleration method was effective by keeping high electron Hall parameter. By increasing magnetic field strength, multiple ionization process was enhanced. As a result, the specific impulse exceeded 3800 s and more than 30% of thrust efficiency was achieved with argon propellant.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：静電/電磁混合イオン加速 電気推進機

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。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い排気速度を達成可能な電気推進機は、衛星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。

これに対して申請者は発散磁場配中におけるイオン加速に注目し、独自の静電加速機 Diverging-magnetic-field electrostatic thruster の開発を通じて、推力密度(推進機の単位開口面積あたりに生じる推力)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印加された発散磁場でイオンを静電加速する。申請者はこれまで陽極近傍にて推進剤の電離を局所的に促進させる陽極近傍電離手法を見出し、発散磁場配位下において、生成したイオンを印加電圧の 90% に相当するエネルギーまで静電加速することに成功した。一方、磁場を横切る電子には電磁力が作用し、電子は運動量を獲得する。電子が獲得した運動量は衝突を介してイオンに輸送され、推進機から排気されることで推力が発生する(電磁加速方式)。これまで発散磁場配位下でのイオン加速は電磁加速方式が主流であった。陽極近傍電離を活用することで、生成したイオンに対して静電加速と電磁加速とが同時に作用する「静電/電磁混合イオン加速」(図 1)が可能となり、静電加速のみでは達成しえない推力密度でのイオン加速が期待できる。

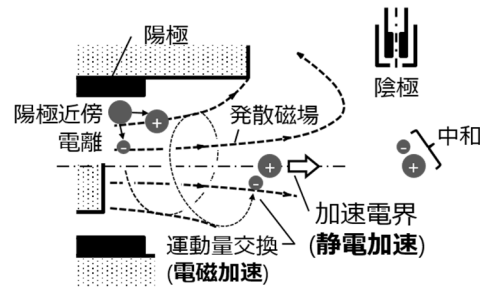


図 1 静電/電磁混合イオン加速機構の概念図

2. 研究の目的

本研究では、発散磁場配位下における静電/電磁混合イオン加速を活用した電気推進機の大推力化を目的とする。具体的には【1】推進剤流量と磁場強度とを変化させた際のイオン加速機構を推定すること、【2】静電/電磁混合イオン加速の実現に必要な作動条件を特定すること、【3】強磁場下での静電/電磁混合イオン加速による大推力作動を実証することである。

3. 研究の方法

【1】推進剤流量と磁場強度とを変化させた際のイオン加速機構の推定

静電加速ないし電磁加速が支配的な場合に発生する推力にはそれぞれ理論値が存在し、静電加速による推力は推進剤流量に、電磁加速による推力は磁場強度に比例する。そこで、推進剤流量と磁場強度とを変化させた際の推力を計測し各理論推力値と比較する。加えて、排気されたイオンの運動エネルギーと質量流束とをエネルギーアナライザーとファラデープローブとを用いてそれぞれ計測する。計測結果からイオン数密度を算出し電子-イオン間の運動量交換衝突における平均自由行程を見積もる。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当該衝突の有無を判定する。以上の結果から推進剤流量および磁場強度を様々に変化させた際の、各作動条件下におけるイオン加速機構を推定する。

【2】静電/電磁混合イオン加速の実現に必要な作動条件の特定

発散磁場配位下におけるイオン加速機構と作動条件との関係解明には、陽極近傍電離によって生成したイオンが印加電圧相当まで静電加速される領域と電子との運動量交換衝突を介して電磁加速される領域とを切り分ける必要がある。そのため、静電プローブ法を用いたプラズマ診断を行う。静電加速領域はダブルプローブによるイオン数密度分布計測とエミッシブプローブによる空間電位分布計測とから特定できる。電磁加速領域はイオンの速度ベクトルを算出することで特定できる。電磁加速を受けるイオンの周方向運動エネルギーは磁場の発散に伴い軸方向運動エネルギーに変換されることから、マハプローブにより周方向・軸方向速度を同時計測し電磁加速領域を特定する。これらの結果に基づきイオン加速機構と作動条件との関係を解明し、静電加速と電磁加速とが混在する静電/電磁混合イオン加速の実現に必要な作動条件を特定する。

【3】強磁場下での静電/電磁混合イオン加速による大推力作動の実証

磁場強度の増加に伴い、磁場を横切る電子の運動が抑制され、これにより誘起される電場がイオンを静電加速する。一方、電磁加速による推力は磁場強度に比例することから、強磁場下での静電/電磁混合イオン加速による大推力化が期待できる。イオン加速機構と作動条件との関係に基づき強磁場印加時において静電加速と電磁加速とが混在する作動条件を算出、それに従い DM-EST の磁気回路を再設計し、当該作動条件下における推力を計測する。計測した推力を静電加速および電磁加速の各理論推力値と比較し、静電/電磁混合イオン加速による推力増加を検証する。

4. 研究成果

推進剤流量と磁場強度とを変化させた際のイオン加速機構の推定

本研究項目に対して使用した推進機概念図を図 2 に示す。リング型の永久磁石で図のように発散磁場を印加した。永久磁石中心部に内径 R_a のリング型陽極を配置し中心軸上に陰極を配置した。陽極近傍から供給する推進剤流量 \dot{m}_a 、磁場強度 B 、放電電圧 V_d とを変化させ推力を測定した。その結果を図 3(a),(b)に示す。静電加速方式による推力は $F = \alpha' \dot{m}_a (2eV_d/m_i)^{1/2}$ で表される。ここで e, m_i はそれぞれ電気素量とキセノン質量である。一方で電磁加速方式による推力は $F = \alpha J_d B R$ と書ける。ここで J_d は放電電流である。図 3(a),(b)より取得した推力は静電加速推力及び電磁加速推力にそれぞれ比例することから静電加速方式・電磁加速方式が同時に作用する静電/電磁混合イオン加速が生じることを確認した。磁場強度に対する α の依存性から発生した推力に対する各加速方式の寄与を見積もると、静電加速方式が 28%、電磁加速方式が 72% となった。この時、各種静電プローブにより電子数密度、電子温度とを測定したところ電子の Hall パラメータ(サイクロトロン周波数に対する運動量輸送周波数の割合)は 55 であった。イオン-電子間のクーロン衝突が無視できず電磁加速方式が卓越したと推察する。

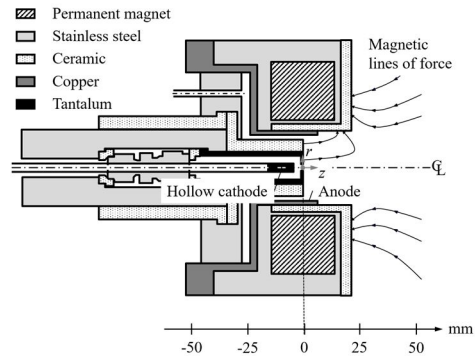


図 2 永久磁石型推進機概念図

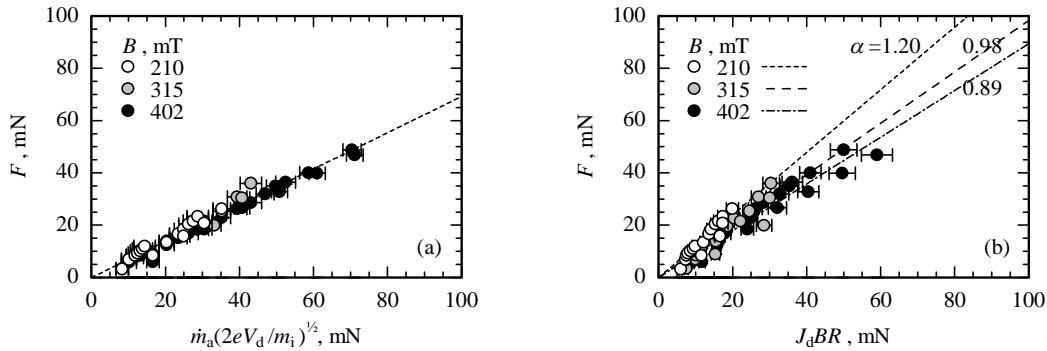


図 3 測定した推力の(a)静電加速特性 (b) 電磁加速特性

静電/電磁混合イオン加速の実現に必要な作動条件の特定

図 2 と同一の推進機において陰極位置を放電室下流に配置した場合の推力特性を取得した。中心軸上に陰極を配置した場合と同様に、測定した推力は静電加速方式及び電磁加速方式における理論推力値にそれぞれ比例した。推力に対する各加速方式の寄与は静電顔が 38%、電磁加速方式が 62% であった。静電/電磁混合イオン加速は陰極を中心に配置した際にのみ達成されてきたが、陰極を放電室外部に配置した本実験においても初めて達成された。と同様の手法で電子の Hall パラメータを概算した結果、陰極を放電室外部に配置することで電子 Hall パラメータは 3140 と見積もられた。各陰極配置における推力密度は中心軸上に陰極を配置した際に 52 N/m^2 、放電室外部に配置した際に 47 N/m^2 となった。現行の Hall スラスタにおいて約 50 N/m^2 であることから、本研究においても同等以上の推力密度を達成した。

強磁場下での静電/電磁混合イオン加速による大推力作動の実証

得られた知見を基に推進機を再設計し推力特性を取得した。再設計した推進機概念図を図 4 に示す。2つの電磁石を用いて発散磁場を印加した。イオンビーム特性及び推力特性を測定した結果、推進剤の多価電離を示唆する結果が得られた。各価イオンの流束、エネルギー分布とから多価イオンの流量及び推力に対する寄与を見積もったところ流束、推力に対する 2 価イオンの寄与はそれぞれ 28%、39% であることが分かった。従来のキセノン推進剤と比較して分子量の低いアルゴン推進剤を使用し、多価電離を促進させることで排気速度が向上する。本研究における比推力は最大 3800 秒に達し 30% を上回る推力効率を達成した。

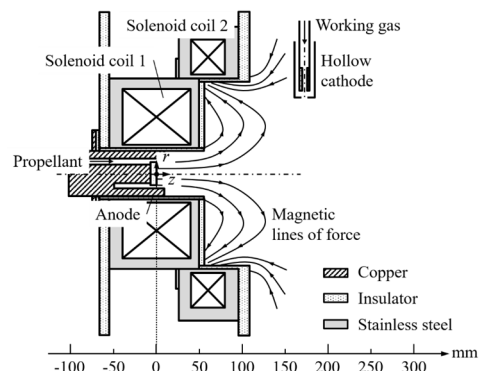


図 4 電磁石型推進機概念図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Ichihara Daisuke, Sasoh Akihiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Similar Thrust Performance in Diverging-Magnetic-Field Electrostatic Thruster with Monoatomic Propellants	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 236 ~ 238
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B37294	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 -

1. 著者名 Ichihara Daisuke, Matsuba Toshihiro, Iwakawa Akira, Sasoh Akihiro	4. 巻 36
2. 論文標題 High-Specific-Impulse Electrostatic Thruster with Argon Propellant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 256 ~ 263
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B37675	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 -

1. 著者名 Ichihara Daisuke, Nakagawa Yoshiya, Iwakawa Akira, Sasoh Akihiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Central and External Cathode Operations in a Diverging-Magnetic-Field Electrostatic Thruster	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 68 ~ 77
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B37636	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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 市原大輔, 佐宗章弘
2. 発表標題 発散磁場静電加速スラスタ（DM-EST）の推力性能に対する推進剤種の影響
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市原大輔, 中川慶哉, 岩川輝, 佐宗章弘
2. 発表標題 発散磁場静電加速スラスターのイオン加速過程に対する陰極位置の影響
3. 学会等名 H30年度宇宙輸送シンポジウム-非化学推進部門-
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Ichihara, T. Matsuba, A. Iwakawa, and A. Sasoh
2. 発表標題 High-Specific-Impulse Operation in Diverging Magnetic Field Electrostatic Thrusters with Argon Propellant
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Ichihara, T. Kato, A. Iwakawa, and A. Sasoh
2. 発表標題 Thrust Generation in Electrostatic-Magnetic Hybrid Plasma Thruster
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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