

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K14250

研究課題名(和文)ヘリコンプラズマ静電加速スラスターの推進性能実証

研究課題名(英文) Demonstration of thrust performance of helicon plasma electrostatic thruster

研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH, Akihiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40215752

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)：本研究では、近い将来の大型・高ペイロード比宇宙輸送推進装置として独自技術となる「ヘリコンプラズマ静電加速スラスター」のビームエネルギー特性、イオンビーム電流特性を取得し、本スラスターの作動最適化の指針を得ることを目的と定めた。推進剤流量が比較的低いときには、リング状陽極の内径がヘリコンプラズマ源の出口直径に近いほうが良好なビームエネルギー特性が得られた。このとき、実効的には陽極リングの内面が主要な役割を果たしていることが確かめられた。陽極内径が大きくなると、陽極内面よりも下流側側面の役割が大きくなり、その部分を絶縁体で覆うと、静電加速特性が極端に悪化した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed in investigating the ion beam energy characteristics and ion beam current characteristics to optimize operation condition in helicon electrostatic thruster (HEST), which was an originally-developed, high-power, large-payload space propulsion thruster. With a low propellant flow rate, a ring anode whose inner diameter equaled that of the helicon plasma source exit yielded the best performance. In this case, the inner surface of the anode acted a primary role in the electrostatic acceleration. When the anode inner diameter became larger, the contribution of its side surface became larger; the electrostatic acceleration performance was much degraded when the side surface was covered with an insulator.

研究分野：航空宇宙工学

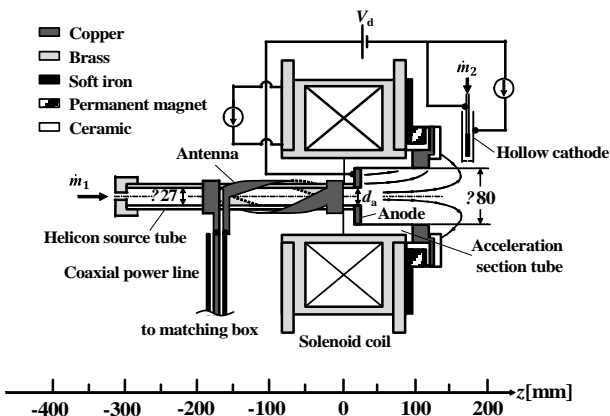
キーワード：電気推進 ヘリコンプラズマ 静電加速

1. 研究開始当初の背景

今後ますます高まる大型・大量宇宙輸送の需要に向けて、高推力密度・高比推力を兼ねる備える大電力電気推進機の開発が重要視されている。欧米ロシアでは、電力10kW程度までに対しては、イオンスラスタ、ホールスラスタなど既存技術の大型化により対応し、100kW以上のクラスではVASIMR(ヘリコンプラズマをさらに高周波加熱し、磁気ノズルで断熱膨張加速する推進機、アメリカ)などの新規開発に大型予算が投じられている。しかし、磁気ノズルによる膨張加速は、推進剤が完全電離し、しかも損失のない場合に有効であるが、原理と現実には大きな乖離がある。これに対して、応募者らの研究グループは、ヘリコンプラズマ源の下流にカスプ磁場を形成し、磁力線を横切る位置に電極対を配することによって、ヘリコンプラズマを静電加速できることを実証した(Harada et al., Applied Physics Letters, 2014)。ただし、この方式を電気推進機に採用するためには、推進剤利用効率(供給する推進剤の中で電離してイオンビームになる割合)をはじめとする性能スペックを高め、宇宙機に搭載可能な構成とするための具体的方策が必要となっている。

2. 研究の目的

本研究は、ヘリコンプラズマをカスプ磁場を利用して静電加速する原理を電気推進機に応用し、図1に示すようなヘリコン静電加速スラスタを開発し、性能実証することを目的とする。そのために、真空中でも作動可能なマッチングボックスを開発し、宇宙機に搭載可能な構成とした上で、プラズマ診断と推力直接計測によって推進性能を評価し、高い推進剤利用効率・推力効率(thrust efficiency、エネルギー変換効率)を得るための具体的方策を見出すことを目的とする。



efficiency、エネルギー変換効率)を得るための具体的方策を見出すことを目的とする。

図1 Helicon Electrostatic Thruster

この研究の特色として、ヘリコンプラズマをカスプ磁場によって静電加速する発想が、応募者らのオリジナルなものであることが挙げられる。ヘリコンは無電極なので電極損耗が問題にならないのが利点とされ、これまでそれによって生成されるプラズマを、電極を用いて静電加速することは試みられてこなかった。しかし、図1のカスプ磁場形状を使えば、陰極を中心軸から遠ざけた位置に配置してイオンビームにさらされることを防げるため、電極を用いても高寿命の推進機が実現できる。

イオンスラスタは空間電荷制限により推力密度に限界があり、大型化に向かない。ホールスラスタは、技術的に欧米に先行されている。本研究のスラスタで良好な推力性能が得られれば、我国独自技術として、世界的にもアピールできるはずである。

3. 研究の方法

本研究は、新規性確保のため単年度で計画した。まず、宇宙空間でも使用可能な、マッチングボックスについて、本装置のシステムに組み込むために開発する。推進機としての有用性に重点を置き、推進剤利用効率、推力効率を評価し向上させるため、陽極形状、磁場形状(磁気回路)、陰極(ホローカソード)位置、推進剤の化学種(アルゴン、キセノン)、質量流量、供給位置を変化させた作動最適化実験を行う。そのために、Retarding Plasma Analyzer(RPA)、静電探針をはじめとするプラズマ診断および直接推力測定のための装置を整備し活用する。

研究期間前半では、磁場の強さを変化させて実験を行う。この場合は、高周波電源ヘリコンアンテナ間には、自動的にインピーダンス整合がとれるオートマッチングボックス(既存)を用いる。しかし、作動最適化実験がある程度進み、インピーダンス整合条件を固定することができるになれば、設計作動条件を決めてそれに合わせた整合条件を持つマッチングボックスを製作する。固定条件のため、静電容量、インダクタンスを固定値とし、可変機構に必要な可動部、潤滑油等を用いず真空下でも使用可能なものとする。

作動最適化実験として、次のパラメータサベイを行う。

(1)電極形状: 本装置にとって陽極をどのような形状でどの位置に置くかは、大変重要な設計要素である。なぜなら、構成する磁気回路で陽極と陰極(中心軸電位と等しいとみなせる)電位間に如何に大きな磁束を形成するかが推進機の性能を左右すると考えられ、空間的な制約からその形状依存性が非常に大きいと考えられるからである。したがって、陽極位置、内径、流れ方向の長さなどを多岐に変化させて、推進性能を詳しく、注意深く調べる。

(2)陰極(ホローカソード)位置:陰極先端は、基本的にカスプ磁場内部のフィールドフリー領域内に配置し、中心軸場がほぼ陰極電位となるようにする。カスプ磁場内のどこに置けば最適推進性能が得られるかは、実験を試みないとわからないが、とにかくリング状陽極の側面ではなく、内面から中心軸に向けて電界が発生することに注意して、設計する。

(3)推進剤の化学種(アルゴン、キセノン):一般的に、静電加速に対して、電離電圧が低く、原子量大きい原子が好ましい。パラメトリックスタディには、コストを低く抑えるために、まずアルゴンを推進剤種とする。そして、最適作動条件を見出したのちに、推進剤種をキセノンに変更し、チューニング実験を行う。その際、磁場の強さが大きな影響を与えるので、注意する。

(4)推進剤質量流量:本研究の実験条件では、推進剤流量に対して、ホローカソードの作動を維持するために必要な気体流量(以降「HC維持気体流量」)を無視することができない。HC維持気体はフィールドフリー領域に供給されるため、静電加速の対象とはならず、できるだけ少量に抑える必要がある。また、ヘリコン源に供給する推進剤流量も、生成されるプラズマの密度、電子温度に敏感に依存するために、これも重要な制御パラメータであり、下記プラズマ診断結果を注意深く検討しつつ、最適化実験を行う。

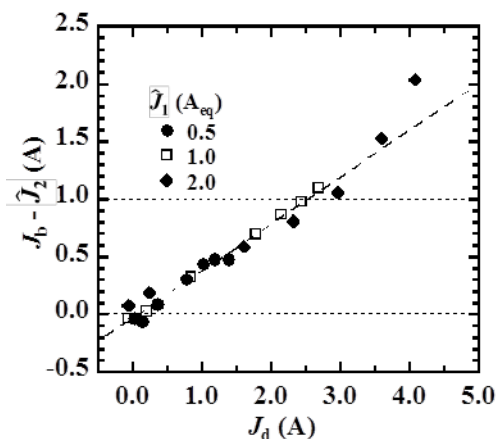
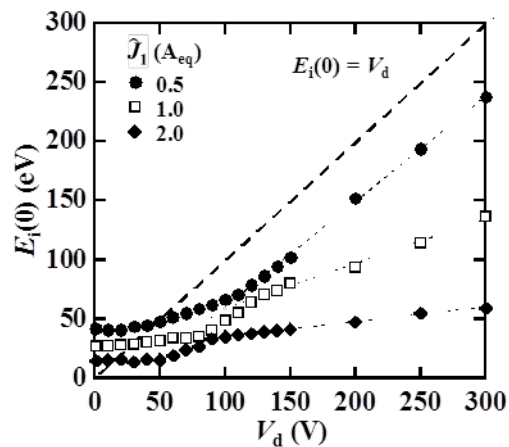


図2 放電電流(横軸)とイオンビーム電流(縦軸)の関係

4. 研究成果

図2に示すように、イオンビーム電流は、推進剤流量に関わらず、放電電流の一次関数となることが分かった。これに対して、イオンビームエネルギーは、推進剤流量に大きく依存し、低流量の場合の方が高い性能を示した。

図3 加速電圧とイオンビームエネルギーの



関係

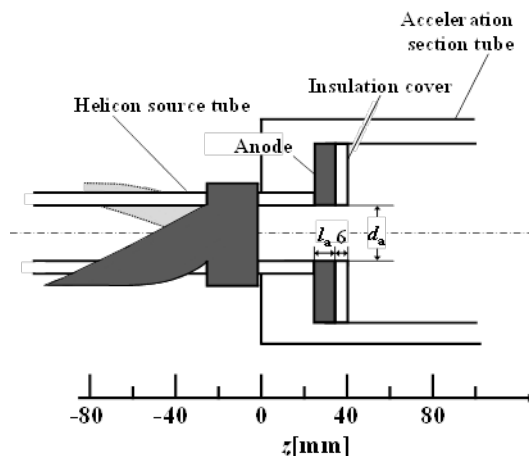


図4 陽極電極配置

図4に示すように、陽極形状とその絶縁条件を変えて、イオンビーム性能を評価し、リング状の陽極の内径を変化させるとイオン加速特性が大幅に変化することがわかった(図5、6)。推進剤流量が比較的低いときには、リング状陽極の内径がヘリコンプラズマ源の出口直径に近いほうが良好なビームエネルギー特性が得られた(図5)。このとき、実効的には陽極リングの内面が主要な役割を果たしていることが確かめられた。陽極内径が大きくなると、陽極内面よりも下流側側面の役割が大きくなり、その部分を絶縁体で覆うと、静電加速特性が極端に悪化した(図6)。

また、宇宙空間でも使用可能な、マッチングボックスを設計、製作して作動試験を行ったが、大気中での予備実験の段階で異常発熱によって故障し、実験は失敗に終わり、熱設計についての課題が残された。

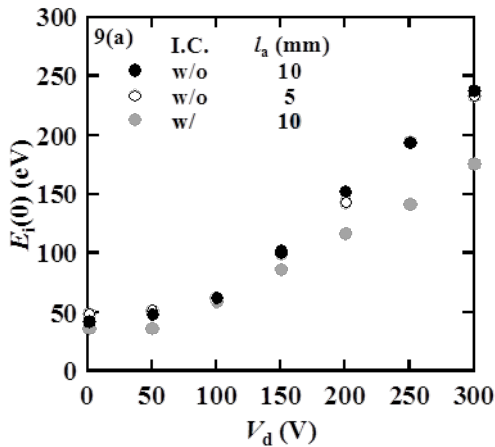


図 5 異なる陽極電極配置に対するイオンビームエネルギー特性 (陽極内径 27mm)

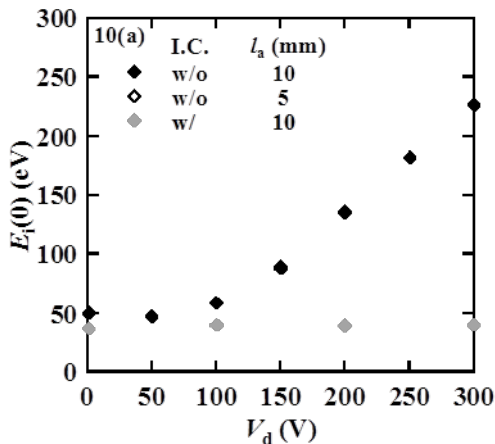


図 6 異なる陽極電極配置に対するイオンビームエネルギー特性 (陽極内径 40mm)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Akira Uchigashima, Teruaki Baba, Daisuke Ichihara, Akira Iwakawa, Akihiro Sasoh, Takuya Yamazaki, Shota Harada, Matsutaka Sasahara, Tomoji Iwasaki, "Anode Geometry Effects on Ion Beam Energy Performance in Helicon Electrostatic Thruster", IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Volume:44, Issue 3, pp 306-313, 2016. DOI:10.1109/TPS.2016.2522079

〔学会発表〕(計 3 件)

内賀嶋瞭、市原大輔、岩川輝、佐宗章弘、山崎拓也、原田翔太、笹原松隆、岩崎知二、ヘリコン静電加速推進機 (HEST) のイオンビームエネルギー特性に対する陽極形状の影響, 第 52 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2015 年

11 月 7 日, 大阪府立大学 I-site なんば (大阪府大阪市)

市原大輔, 内賀嶋瞭, 岩川輝, 佐宗章弘, 原田翔太, 山崎拓也, 笹原松隆, 岩崎知二, ヘリコン静電加速機 HEST におけるプラズマ加速メカニズム, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2015 年 10 月 7 日, 鹿児島県民交流センター (鹿児島県鹿児島市)

Akira Uchigashima, Teruaki Baba, Daisuke Ichihara, Akira Iwakawa, Akihiro Sasoh, Shota Harada, Takuya Yamazaki, Matsutaka Sasahara, Tomiji Iwasaki, "Development of Helicon Electrostatic Thruster(HEST)", 34th IEPC(International Electric Propulsion Conference), 2015 年 7 月 9 日, 神戸コンベンションセンタ (兵庫県神戸市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕 出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH, Akihiro)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 4 0 2 1 5 7 5 2

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし