

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13932

研究課題名（和文）C60フラレーン負イオンによるホールスラスト放電のプラズマ乱流抑制

研究課題名（英文）Controlling Hall thruster discharge instabilities by C60 negative ions

研究代表者

張 科寅（Shinatora, Cho）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：40710596

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙用電気推進のホールスラストは、衛星の主推進系を担うようになってきているが、その主なエネルギー損失や損耗の要因と考えられる、電子乱流の発生要因については、未だ結論が出ておらず、更なる高性能化・高密度化の妨げとなっている。本研究では、不安定性制御の可能性を探るため、前例がないC60を導入したホールスラスト放電を行った。結果として、C60導入により、放電モードが明確に変化し、また条件次第で放電が大きく不安定化することがわかった。PIC解析により、負イオン比率が一定量以上になると、急速に放電が不安定化することがわかった。このため、C60の活用には負イオン比率の制御が重要であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気推進ロケットのひとつであるホールスラストは、そのロバスト性ならびに近年の性能・耐久性向上から、衛星の主推進系を担うようになってきており、宇宙運用が本格化している。本研究はホールスラストのエネルギー損失や、損耗の主要因となっている電子乱流の現象説明や制御につながるものであり、より高効率長寿命なスラストの実現は、宇宙輸送コストの低減により宇宙開発の発展に資するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Hall thrusters is an efficient In-space electric propulsion, which becoming one of the main propulsion systems for satellites. However, the root cause of electron turbulence, which is thought to be the dominant factor of energy loss and wear, has not yet been determined. This is a major obstacle to the further improvement of thruster performance. In this study, in order to explore the possibility of controlling instability, we have introduced C60 fullerene to Hall thruster discharge. As a result, the introduction of C60 resulted in a clear change in the discharge mode and, depending on the operation conditions, a significant increase in discharge oscillation amplitude was observed. PIC simulation showed that the negative ion ratio above a certain amount causes rapid destabilization of the discharge. Therefore, it is suggested that the control of the negative ion ratio is important for the utilization of C60 in Hall thruster discharge.

研究分野：宇宙用電気推進

キーワード：電気推進 ホールスラスト プラズマ乱流 数値シミュレーション C60フラレーン

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電気推進ロケットのひとつであるホールスラスタは、そのロバスト性ならびに近年の性能・耐久性向上から、衛星の主推進系を担うようになってきており、宇宙運用が本格化している。大型静止衛星の軌道変換用の大電力化や、小型衛星に向けた省電力化の研究が各国で加速する中、残る課題は、高電力密度作動が実現できない、ということである。その原因は、高電力密度化すると、原理的に強磁場による電流障害が生じ、電子乱流が激化し、結果エネルギー損失やスラスタ損耗が急増するからである。これは従来ホールスラスタの設計最適化では解決困難と考えられ、これまでと角度を変えたアプローチが必要である。

2. 研究の目的

ホールスラスタの作動においては、軸方向電場と径方向印加磁場による $J \times B$ 力でプラズマ加速を行うが、この際印加磁場強度がある一定以上となる強磁場領域においては、電子乱流が発生し、エネルギー損失およびスラスタ損耗が発生すると考えられる。電子乱流の発生要因については未だ結論が出ていないが、本質的には電流の担い手である電子の流れが障害されることが重要な要因と考えられる。そこで、磁場に影響されない電流媒体として、C60 負イオンを導入することにより、不安定性制御の糸口とすることを考案した。前例がない、C60 を導入したホールスラスタ放電を行い、放電特性を取得すること、数値シミュレーションにより物理現象を分析すること、が本研究の目的である。

3. 研究の方法

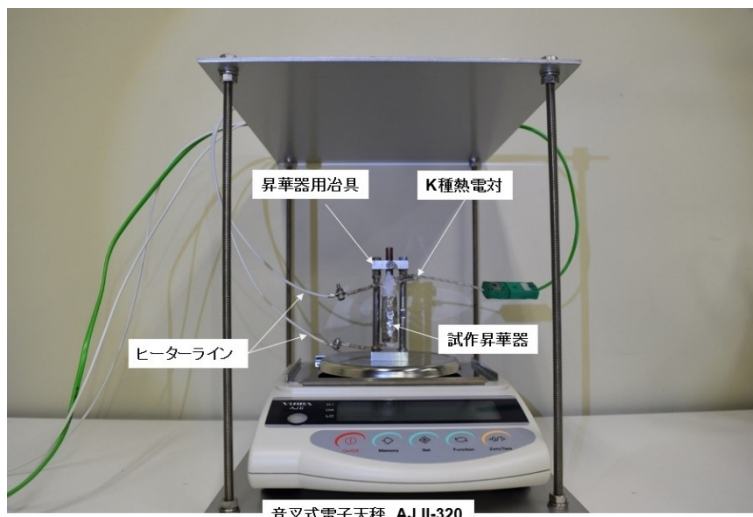


図 1. 試作 C60 昇華器試験セットアップ

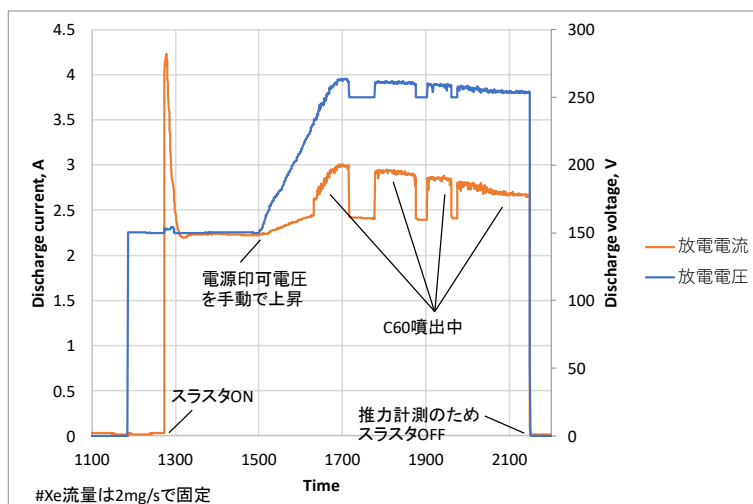


図 2. C60 を導入したホールスラスタ作動の放電電流履歴

ホールスラスタに C60 負イオンを導入するために、まず昇華器の試作を行った。固体（粉末）である C60 をプラズマ化するためには、まず 600°C 程度に昇温して、気体に昇華させる必要がある。ホールスラスタに気体の C60 を導入するための昇華供給器を試作し、高真空環境中での作動を確認した。図 1 に試作 C60 昇華器の試験セットアップを示す。天秤ごと真空装置に入れ、ヒータ入熱に対する温度上昇と C60 昇華量（質量減少レート）を計測した。これにより、温度上昇により、突沸など生じることなく、安定に C60 を昇華しガスとして供給できることを確認した。

実際のホールスラスタ放電試験においては、供給系の配管継手での温度低下・再凝固が懸念されたことから、既存のスラスタに外部供給ではなく、スラスタ内部に C60 格納庫を埋め込んだ。なお、本研究の Scope から外れるものの、スラスタの設計全体を見直す



図 3. 放電前（左）後（右）の放電室写真

ことで、外部供給を行うことも可能になると考えられる。

従来の Xe 推進剤で放電させることでスラスタを昇温し、C60 を昇華させることで Xe/C60 混合推進剤による放電を実施した。図 2 に放電電流の作動履歴をします。C60 導入により、放電モードが明確に変化していることがわかった。また、作動条件によっては放電が不安定化し、電流振動が増大する現象がみられた。

図 3 に放電前後のスラスタ放電室の比較写真を示す。供給された C60 の一部が放電室壁面に付着することで、明確な外観変化が生じていることがわかる。

C60 導入によるホールスラスタ放電のモード変化や不安定化の原因分析として、PIC 粒子法を用いた非定常数値シミュレーションにより、ホールスラスタ放電における負イオン生成の影響を調べた。図 4 に、負イオン生成率を変化させた各ケースの放電電流履歴を示す。シミュレーションコードには、JAXA で開発しホールスラスタ開発に用いられてきた 2D3V 全粒子コード [1] を用いた。解析結果から、プラズマ中の負イオン比率が一定割合以上になると、電子が不足することでプラズマ生成が減少し、プラズマ生成と散逸のバランスが崩れることで、プラズマ密度を安定に維持できなくなり、放電が不安定化することがわかった。よって、C60 負イオンをホールスラスタ放電において有効活用するためには、負イオン比率を一定以下に抑えるべく、高電力密度作動が必要であることがわかった。具体的な閾値の調査については、論文執筆中である。

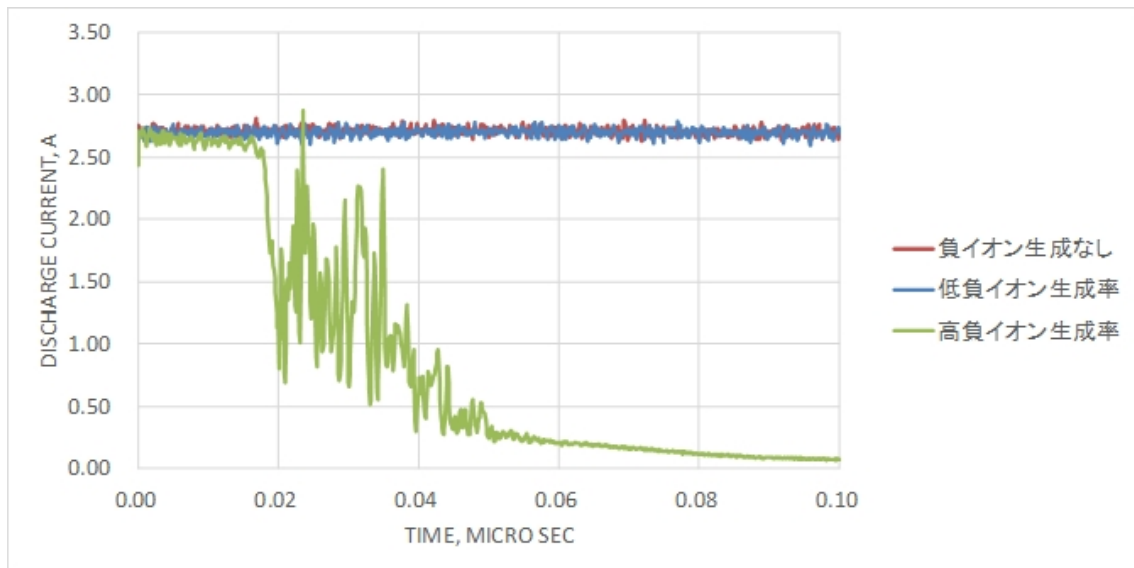


図 4. PIC 非定常放電シミュレーションにおいて、負イオン生成率を変化させた各ケースでの放電電流履歴。

4. 研究成果

- 前例がない、C60 推進剤を導入したホールスラスタの放電実験を行った
- C60 をホールスラスタ放電に導入すると、放電モードが明確に変化し、作動条件によっては放電が大きく不安定化することがわかった
- PIC シミュレーションにより、ホールスラスタ放電において、負イオン比率が一定量以上になると、急速に放電が不安定化することが、わかった。そのため、C60 を有効活用するためには、負イオン比率の制御が重要であることがわかった

参考文献

[1] S. Cho, et.al., Phys. Plasmas, 22, 103523 (2015); DOI: 10.1063/1.493504920.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 張科寅
2. 発表標題 100W級小型ホールスラストの2D全粒子シミュレーション
3. 学会等名 平成30年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----