

ホールスラスト下流のプラズマ特性

○江川 裕貴, 山本 直嗣(九州大学), 船木 一幸 (JAXA)

Plasma structure at downstream of a Hall thruster

Yuki Egawa, Naoji Yamamoto, (Kyushu University) and Ikkoh Funaki (JAXA)

Key Words : Hall Thruster, Neutralizer, downstream, neutralization

1. 背景及び目的

人工衛星の重量を半減させたオール電化衛星の成功により、宇宙の推進装置にも電気エネルギーを推進力に変換する電気推進を採用する流れが加速している。オール電化衛星の推進系には、推力電力比が大きいホールスラストが有力候補であり、JAXA の次期技術試験衛星への搭載が見込まれている。このように電気推進機は実用化フェーズにきており、月惑星探査への適用等、様々な発展が期待されている。

しかしながら電気推進機における中和現象¹⁾、特に中和電圧がどのように決まるのかは、電子とイオンの供給バランスで定まるが、その供給バランスが決まるのは、中和器の供給能力だけではなく、電子源からイオンビームまでの電子の輸送に依存するが、この輸送過程が、まだ未解明である。電子源として、また中和現象は工学的にも重要である。中和のために使われるエネルギーを削減できれば、それだけ推進系の消費電力が削減できるからであり、特に超小型衛星においては非常に有用である。

そこで、本研究課題の目的は、電気推進機における中和現象の物理機構を解明することである。本研究において、ホローカソード^{2,4)}とホールスラストを用いて、近傍の磁場強度と中和電圧の関係およびホールスラスト下流のプラズマパラメータを計測した。

2. 実験装置

実験は独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマチャンバ施設にて行った。真空容器は直径2.5 m、長さ5 mのステンレス容器に2台のクライオポンプと1台のターボ分子ポンプを備えており、到達圧力は 2.7×10^{-5} Paであった。真空度はスペースサイエンスチャンバ内に設置した電離真空計二つにより計測している。真空度は電離真空計におけるキセノンの感度を考慮して補正している。実験には九州大学で開発した600 W級マグネチックレイヤ型ホールスラスト⁵⁾を用いた。加速チャンネルの内径は 61mm、外径は 91mmであり、外側に配置した4つのソレノイドコイルと内側に一つ設置したソレノイドコイルにより磁場を形成している。ホローカソード (Veeco, HC252) はホールスラストにつけており、中心間の距離は120 mmとなっている(図1)

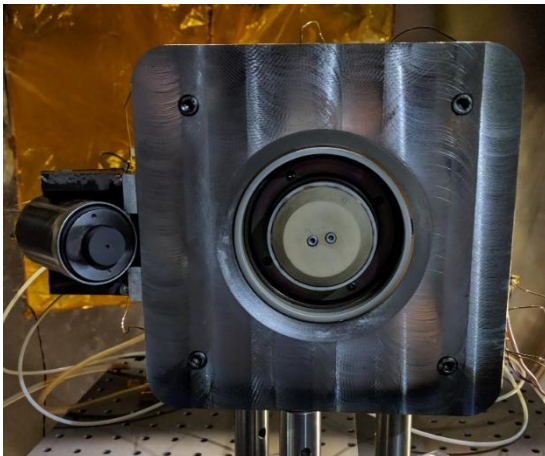


図1 電子源とイオン源の位置関係

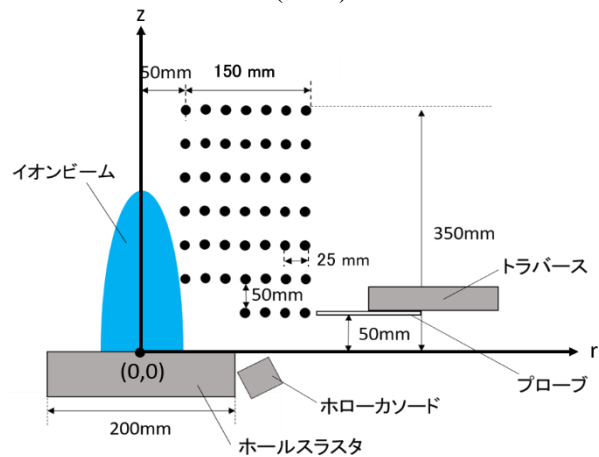


図2 計測セットアップ

ホールスラスト及びカソードを含めたスラストシステムはチャンバに対して電氣的に浮いている状態にして、カソードの電位とグラウンドの電位の差 (V_{cg}) に注目しながら計測を行った。この電位差が電子を駆動してイオンビームを中和するが、と同時に電荷交換イオンを加速させカソード部位を損耗させることから、寿命制限の要因にもなる。

プラズマの計測には直径9 mmの円盤プローブと直径2 mmのエミッシブプローブを用い、スラストの r - z 平面の計測した(図2参照)。ホローカソードもこの平面に入るように設置している。ISAS/JAXA のスペースサイエンスチャンバ内に設置している3次元移動装置を用いて半径方向には25 mm、スラスト軸方向には50 mm間隔で計測した。ただしスラスト前面のプラズマの濃い領域は擾乱を与えるため、計測していない。今回は放電電圧が200 V、推進剤流量はメインに2.0 mg/s、ホローカソードに0.3 mg/s、内側コイル電流が0.2 Aと0.4 Aの2条件で計測した。この時のカソードとグラウンド間の電位差 V_{cg} はそれぞれ-26.5 Vと-17.8 Vであった。

3. 結果及び考察

図3に、コイル電流を変化させたときのカソードとグラウンド間の電位差 (V_{cg}) の変化を示す。このようにコイル電流すなわち、ホールスラストの内外の磁場を変化させることで、 V_{cg} が変わることが分かる。しかも単調に変化するわけではなく、初めは磁場の変化に伴い、上昇し、その後は急激な沈み込み、および浮上したのち、単調に下がっていく。しかしながら、磁場 1.2 A で再び浮上し、以降は磁場の増加に伴い浮上していく。これはホールスラストのモード変化に合わせて変わっていく。この変化がなぜ起こるのかは今回の計測だけでは不十分であり、次年度のキャンペーンで明らかにしていきたい。

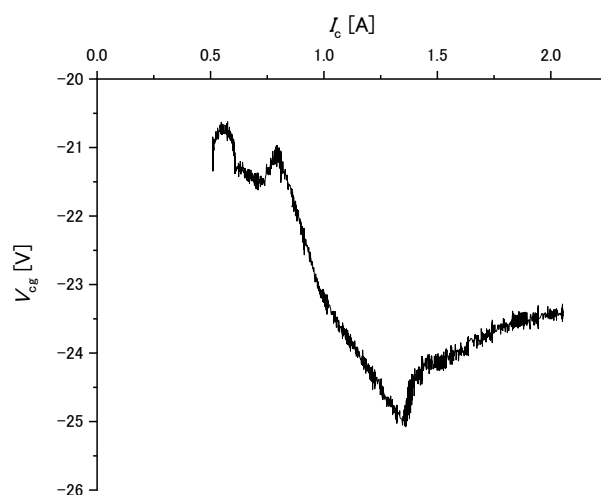


図3 V_{cg} とコイル電流の関係

図4に2条件のときのプラズマ電位、図5にプラズマ密度、図6に、古典拡散を仮定したときの実験値から計算した電子流束密度を示す。ボーム拡散とした場合と下流部で若干の差が出るため、今回は古典拡散のみをする。詳細は参考文献6を参考にしてほしい。電子流束はコイル電流を大きくすることで空間電位は全体的に低くなり、電位差なしでも電子が供給できていることを示唆している。

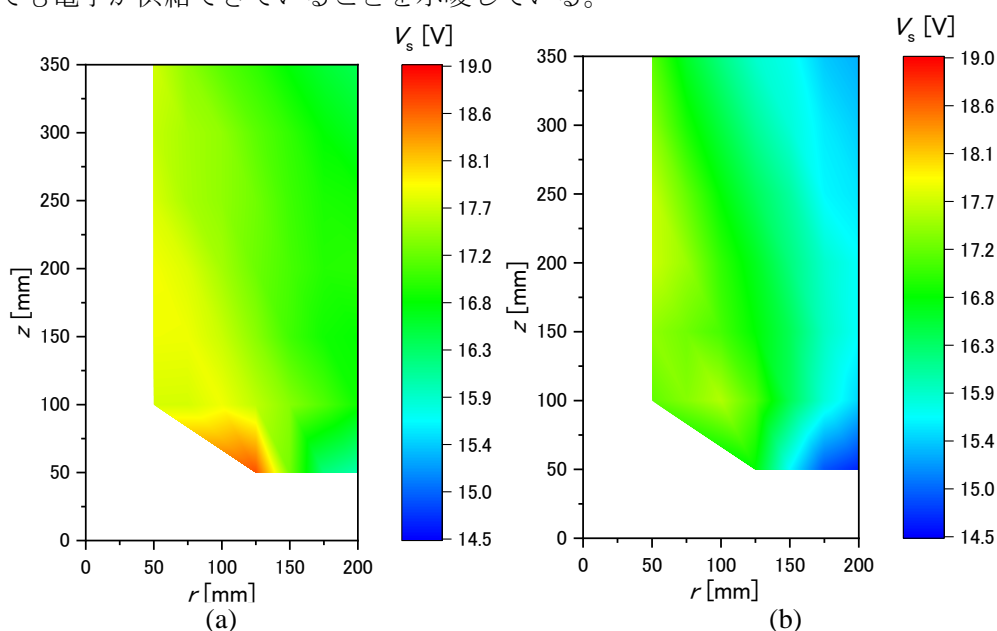


図4 磁場を変化させたときの空間電位構造(a) $I_c=0.2$ A, (b) $I_c=0.4$ A

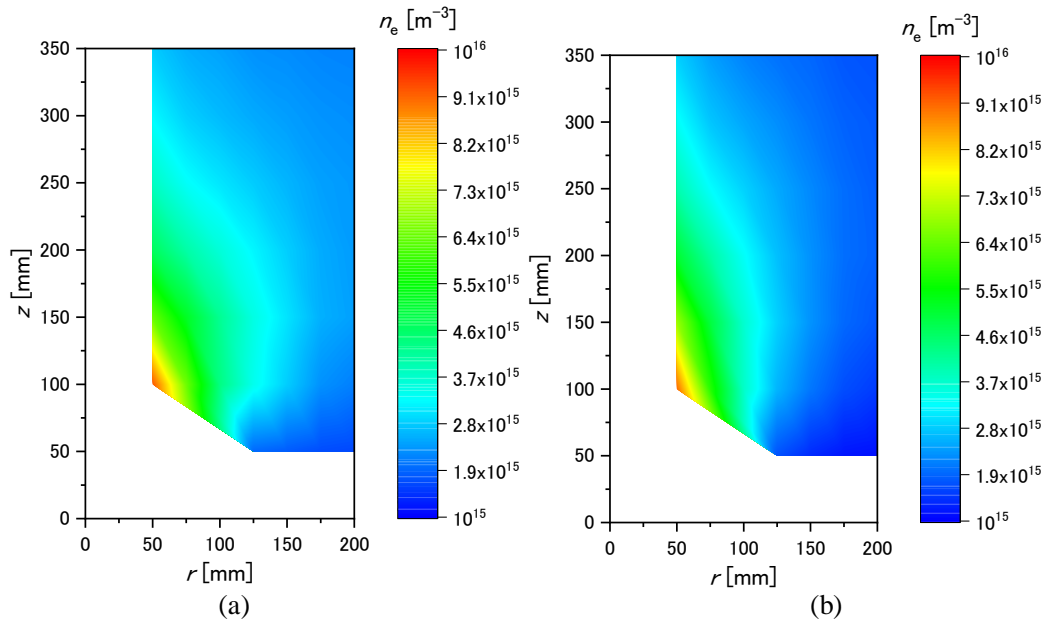


図5 磁場を変化させたときの空間電子密度構造(a) $I_c=0.2$ A, (b) $I_c=0.4$ A

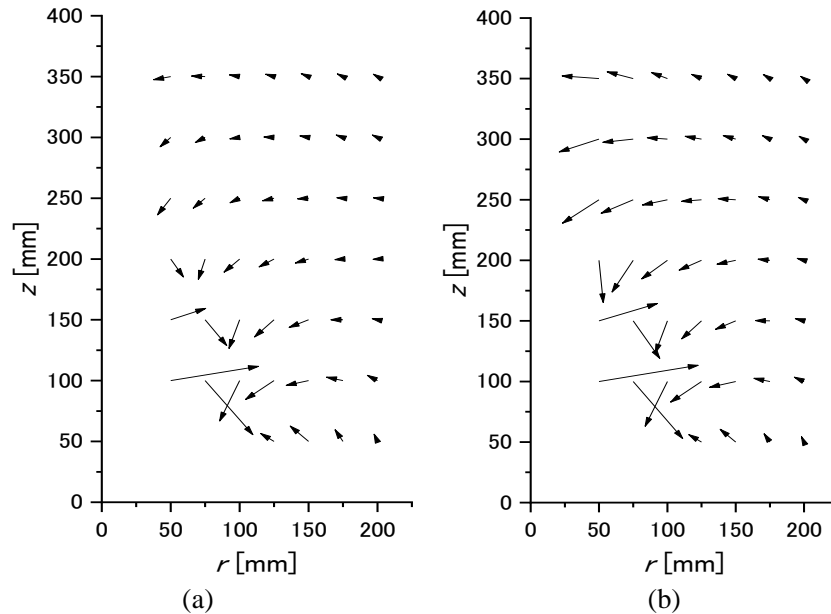


図6 磁場を変化させたときの電子流束分布(a) $I_c=0.2$ A, (b) $I_c=0.4$ A

閾値以下($I_c < 1.2$ A)において、放電電流は磁場の変化に伴い減少し、今回の二つの条件において、 I_c が 0.2 A から 0.4 A に上げるに依り放電電流そのものが 1.73 A から 1.57 A に抑えられている。そのため必要な電子流束が減ったことが一因ではあるがそれだけではなく、図5に示すように、イオンビーム（プルーム）の発散も抑えられているため、電子を送り出す領域はスラスタ中心軸付近に集中し、結果として電子を送り出す駆動力である V_{cg} が低くなったと考えられる。

どちらも、半径方向外側から内側に電子が供給されていることを示唆しているが、磁場強度が強い (b) においては、電子そのものが減っているにもかかわらず、電子流束密度は大きくなっている。また、興味深いことに、電子はイオンに向かって真っすぐ行くというよりは、磁場の弱い領域を通して、プルームに供給されていることが示唆される。すなわち、スラスタのプルーム周辺から一度スラスタ軸に送られ、そこから一度スラスタ側に戻ってきて、スラスタ直後の下流において、外側に供給してプルームを中和するような、流束密度分布を構成しており、あたかもスラスタ中心軸が電子の貯蔵庫として働いていることを示唆する結果である。これはセンターアノードが有利な理

由の一つとなり得る。

4. 結論

電気推進機の中和現象の理解のために、ホールスラストとホローカソードを用いた電気推進機の下流領域のプラズマ諸量を計測し、電子流束密度を算出した。電子はイオンビームに直接供給されるというよりは、移動度が大きい領域を通り供給されていることが示唆される結果となった。今後は磁場形状や放電電圧、ガス流量などを変更し、様々な条件下でのプラズマ諸量の計測をおこない、より詳細な計測を進めていく。また高速プローブシステムもしくは小型のプローブを用いてカソードおよびスラスト前面部での計測を行い、中和現象の解明を目指す。

謝辞

本研究は「宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同利用設備」を利用したものです。また、本研究はJSPS科研費JP26630444、18H03815およびJAXA共同研究、平成31年度戦略的開発研究費を受けたものです。本実験を遂行するにあたり、ISAS/JAXAの阿部先生、岩倉様には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ohkawa, Y. Izawa, A. Yamagiwa, Y. Kawamoto, S., Nishida S. and Kitamura S.: R&D of Carbon Nanotube Cathodes for Electric Propulsion, 27th ISTS, Tsukuba, ISTS-2009-b-7, 2009
- 2) Goebel, D. M., Chu, E., High-Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode for High-Power Hall Thrusters, Journal of Propulsion and Power, 2014, Vol.30: 35-40, doi: 10.2514/1.B34870.
- 3) Friedly, V. J., Wilbur, p. J., High current hollow cathode phenomena, Journal of Propulsion and Power, 1992, Vol.8: 635-643. doi:10.2514/3.23526
- 4) Becatti, G., Goebel, D. M., Polk J. E. and Guerrero, P., Life Evaluation of a Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode for High-Power Hall Thruster Journal of Propulsion and Power: 1-8, doi: 10.2514/1.B36659
- 5) 長野公勇, “200W級ホールスラストの推進性能向上に関する研究,” 九州大学, 修士論文, 2019.
- 6) 江川 裕貴, “ホールスラストにおける中和現象の解明,” 九州大学, 学士論文, 2020.