

ホールスラスタにおける中和現象の解明に向けたプラズマ計測

Plasma measurement for elucidation of neutralization in Hall thruster

○江川裕貴（九大・院）・山本直嗣（九大）・河津誠人（九大・院）

○Yuki Egawa(Kyushu University)・Naoji Yamamoto(Kyushu University)・Masato Kawazu(Kyushu University)

Abstract

Cathode potential (V_{cg}) of the Hall thruster affects the energy efficiency and life time of the Hall thruster, but it is unclear how the potential determined. So, in this research, we measured the relationship between the magnetic field and cathode potential (V_{cg}) to clarify the cathode potential in the Hall thruster. Furthermore, we measured plasma parameters downstream of the Hall thruster using double probe and emissive probe. From the measurement results, cathode potential sank negatively as the coil current increased. Moreover, electrons are moving along lines of magnetic force. That is, electrons emitted from the cathode do not go straight to the plume and acceleration channel, but gather on the thruster axis while wrapping around along lines of magnetic force, and are supplied to the plume and acceleration channel from there. It is suggested that the degree of electron wraparound by the magnetic field is involved in determination of cathode potential.

記号の説明

V_{cg} :	カソード電位
I_{ic} :	インナーコイル電流
I_{oc} :	アウターコイル電流
V_d :	放電電圧
\dot{m} :	推進剤流量
I_d :	放電電流
ϕ :	空間電位
n_e :	電子密度
$\Gamma_{e\parallel}$:	電子流束密度（磁力線方向）
$u_{e\parallel}$:	流速
$\mu_{e\parallel}$:	移動度
$D_{e\parallel}$:	拡散係数
E :	電場
e :	電気素量
m_e :	電子質量
k_B :	ボルツマン定数
T_e :	電子温度
ν :	衝突周波数
B :	磁場

1. 緒言

近年の宇宙産業の発展に伴い、人工衛星の打ち上げ数は年々増加している。このような人工衛星には主推進や軌道制御、姿勢制御のために推進機の搭載が必要であり、燃費

を表す比推力が化学推進に比べ高い電気推進機は長期間のミッションにおいて必要不可欠である⁽¹⁾。また、推進系を電気推進機のみで実現することで衛星の軽量化やペイロード比の向上を図る全電化衛星の開発も進み、JAXAの技術試験衛星9号機への搭載も見込まれている⁽²⁾。全電化衛星の推進系には推進効率や比推力の高いホールスラスタの搭載が予定され、今後様々な場面で活躍が期待される⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

このようにホールスラスタをはじめとする電気推進機は次世代の推進機として注目されているが、解決すべき課題も抱えている。課題の1つが中和現象におけるカソード電位(V_{cg})の決定要因の解明である。カソード電位は衛星と電子源の電位差に相当し、スラスタから放出されたイオンと同量の電子を電子源から放出する駆動力に相当する。それと同時に、電位差によりイオンが電子源へ流入し帯電や故障の原因となるため、中和においてカソード電位の沈み込みを抑えることが重要となる。しかしカソード電位の値は電子源の設置位置や角度、推進剤流量等によって変化することが報告されており⁽⁶⁾⁽⁷⁾、どのように決まるのかは未解明である。そのため、カソード電位の負への沈み込みを抑えるためには、電子源からイオンビームまでの電子の輸送過程を明らかにする必要がある。本研究では、中和現象の物理機構の解明を目的とし、磁場強度とカソード電位の関係性及びプローブを用いたスラスタ下流におけるプラズ

マパラメータの計測を行った。コイル電流を増加させた際のカソード電位の変化及びカソードからブルームに供給されるまでの電子の輸送とカソード電位の関係性について報告する。

2. カソード電位及びプラズマ計測実験

2.1 ホールスラスト

本実験で使用したホールスラストの外観を図1に示す。今回使用したホールスラストは、九州大学所有の200 W 級マグネチックレイヤ型ホールスラストであり、加速チャネルの内径は40 mm、外形は56 mmである。外側の4つのソレノイドコイルと内側の1つのソレノイドコイルにより磁場を形成しており、インナーコイル電流(I_{ic})とアウターコイル電流(I_{oc})の比は常に1:2になるように制御している。

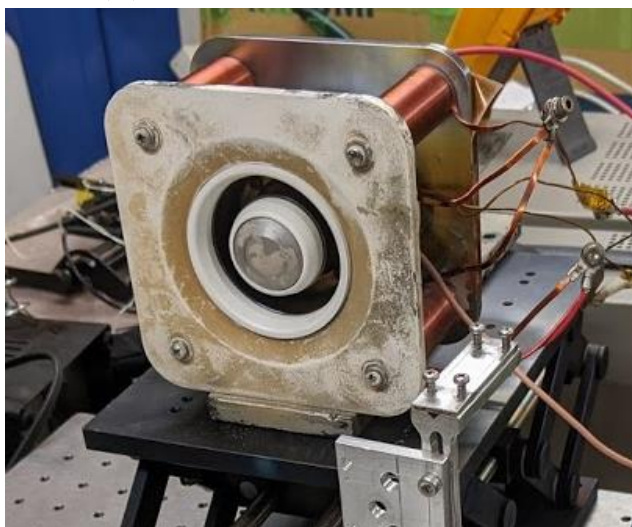


図1 200 W 級ホールスラスト

2.2 ホローカソード

図2に本実験で使用したホローカソードの外観を示す。仕事関数の低いバリウム等を含有する物質がインサートに用いられており、ヒーターによって熱することで熱電子を放出する。作動ガスとしてキセノンをを用い、流量は0.27 mg/s で作動させた。本実験では、カソードを200 W 級ホールスラストの上に45° 傾けて設置した。

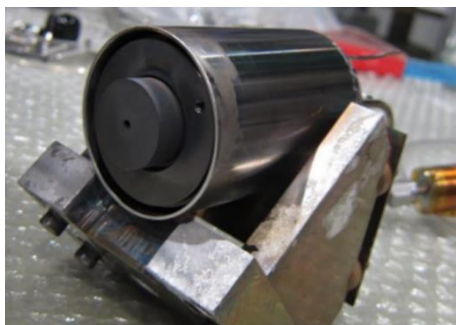


図2 ホローカソード

2.3 エミッシブプローブ

図3に本実験で空間電位の測定に使用したエミッシブプローブの外観を示す。エミッシブプローブは直径0.125 mm の1%トリエーテッドタングステン線を使用しておりチャンバ内に設置された3次元トラバース装置に固定することで実験中もチャンバ外から動かせるようにしている。



図3 エミッシブプローブ

2.4 ダブルプローブ

図4に本実験で電子密度・電子温度の測定に使用したダブルプローブの外観を示す。電極として直径1 mm、長さ25 mm のタングステン線を2本使用し、2本の電極間の間隔は3 mm とした。ダブルプローブもエミッシブプローブと同様にチャンバ内に設置された3次元トラバース装置に固定して動かせるようにしている。

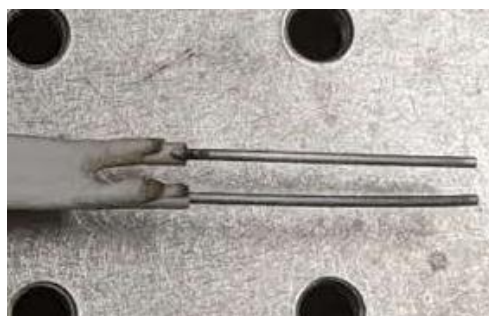


図4 ダブルプローブ

2.5 実験体系

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が所有するスペースサイエンスチャンバにて行った。チャンバは直径2.5 m、長さ5 m のステンレス製で、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、実験中の真空到達度は 1.5×10^{-3} Paであった

図5に実験体系の外観を、図6にプローブによるプラズマ計測の計測範囲を示す。図5に示すように、ホールスラストの上にホローカソードを45° 傾けて設置しインナーコイル電流を変化させた際のカソード電位の測定及び、プローブによるプラズマ計測を行った。本実験ではホールスラストの径方向をX方向、ホールスラストからイオンビームが排出される方向をY方向、チャンバ高さ方向をZ方向とする。

プラズマ計測は図6に示すように、Y-Z平面で行った。ホールスラスト中心を(Y,Z) = (0,0)とし、(Y,Z) = (50,-125), (50,150), (275,-125), (275,150) の4点で囲まれる領域（図7の斜線領域）でプローブを動かし計測を行った。計測点の間隔はY方向、Z方向共に25 mmとした。

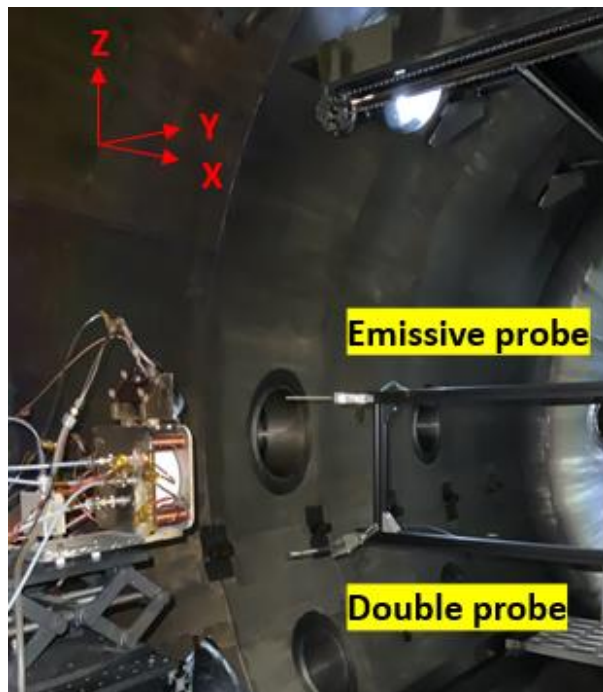


図5 実験体系

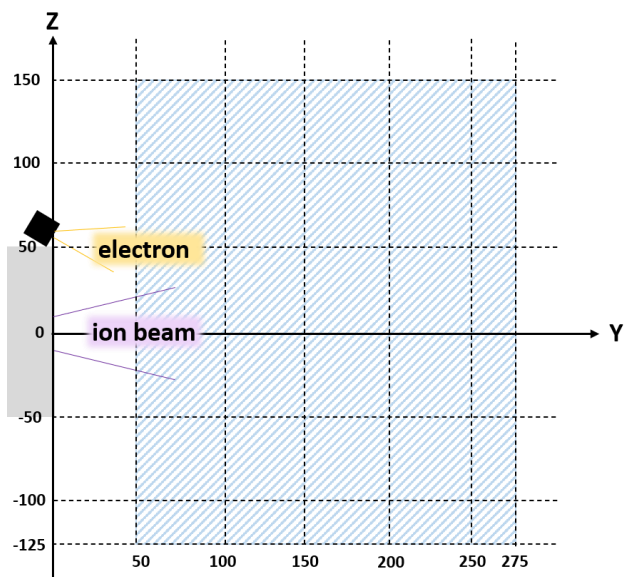


図6 プラズマ計測領域

3. 実験結果

3.1 カソード電位依存性計測

図7に推進剤流量を固定 ($\dot{m} = 1.36 \text{ mg/s}$) した際のコイル電流とカソード電位の関係性を、図8に放電電圧を固定 ($V_d = 300 \text{ V}$) した際のコイル電流とカソード電位の関係

性を示す。図7では、流量一定で放電電圧を200 Vから300 Vまで50 V間隔で計測している。各放電電圧においてインナーコイル電流を1.0 Aから3.0 Aまで連続的に変化させ、その際のカソード電位の変化を測定した。図8では放電電圧一定下で流量を3条件とし、各条件で図7同様インナーコイル電流を1.0 Aから3.0 Aまで連続的に変化させ、その際のカソード電位の変化を測定した。図7,8より推進剤流量を一定にした場合、放電電圧を固定した場合のいずれの条件においても、コイル電流の増加に伴いカソード電位は負に沈み込む結果となった。コイル電流を上げるに伴い放電電流自体が抑えられるため中和に必要な電子放出量そのものは減少する。そのため、電子を放出する駆動力であるカソード電位は、コイル電流の増加に伴い負への沈み込みが抑えられると予想されたが、実際にはコイル電流を上げるに伴いカソード電位の負への沈み込みが深くなっている。このことからカソード電位はカソードから放出される電子の量だけでなく、カソードからイオンビームまでの電子の輸送過程も影響していると考えられる。

また、図7から同じ磁場強度においては放電電圧が大きくなるにつれてカソード電位は低くなっている。これはホールスラストの放電電流そのものが増加したことにより、カソードからの中和のための電子放出量が増加したことによるものとする。一方で放電電圧一定とした図8においては、同じ磁場強度におけるカソード電位は高い方から順に $\dot{m} = 1.70 \text{ mg/s}$, $\dot{m} = 1.03 \text{ mg/s}$, $\dot{m} = 1.34 \text{ mg/s}$ となっており、カソード電位は推進剤流量と比例しない結果となった。放電電流は推進剤流量の増加に伴い増加しており、カソードから放出される電子量は推進剤流量の増加に伴い増加するはずであり、それに伴いカソード電位は負に沈み込むと考えられる。しかし、実際には推進剤流量が最も多い $\dot{m} = 1.70 \text{ mg/s}$ でのカソード電位が最も浅くなっている。ある一定の流量までは流量の増加に伴いカソード電位が沈み込んでいくが、ある一定量を超えるとカソード電位が浅くなっていく可能性も考えられるが、今回は流量3条件のみでの計測となっており、連続的な流量変化とカソード電位の関係性は今回の実験だけでは不十分であり今後流量に着目して詳細に調査する必要がある。

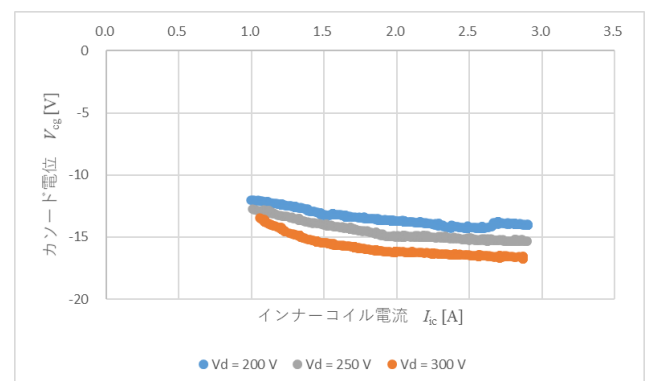


図7 カソード電位依存性（推進剤流量固定）

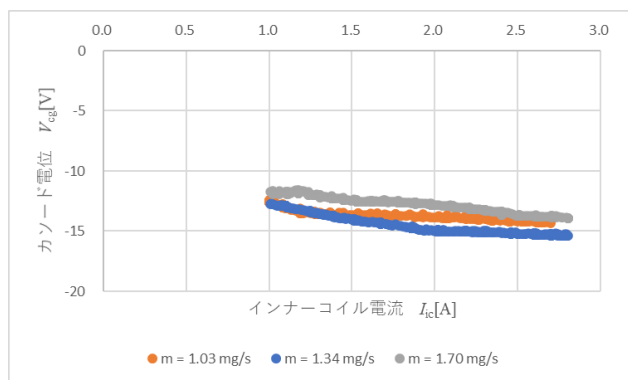


図8 カソード電位依存性(放電電圧固定)

3.2 プローブによるプラズマ計測結果

カソード電位計測結果から、コイル電流の変化により電子の輸送過程がカソード電位に影響を及ぼしていることが示された。そこで、プローブによるプラズマパラメータの取得を行い、電子流束を算出した。今回、3条件においてプラズマパラメータの取得を行った。表1にホールスラストの条件、表2にホールスラスト作動時において計測された放電電流、カソード電位を示す。

表1 ホールスラスト作動条件

	(a)	(b)	(c)
V_d [V]	300		
I_{ic} [A]	1.0	1.4	3.0
\dot{m} [mg/s]	1.36		

表2 放電電流及びカソード電位結果

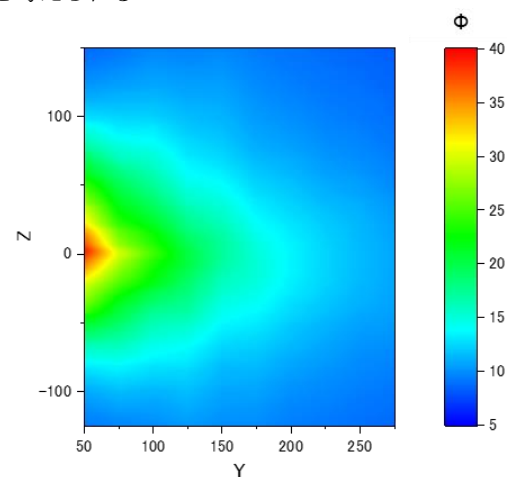
	(a)	(b)	(c)
I_d [A]	1.57	1.10	0.99
V_{cg} [V]	-13.8	-14.3	-17.3

表1に示すように放電電圧、推進剤流量は一定とし、コイル電流のみを変化させた。図7と同様にコイル電流の増加に伴いカソード電位の沈み込み及び放電電流の増加が確認された。

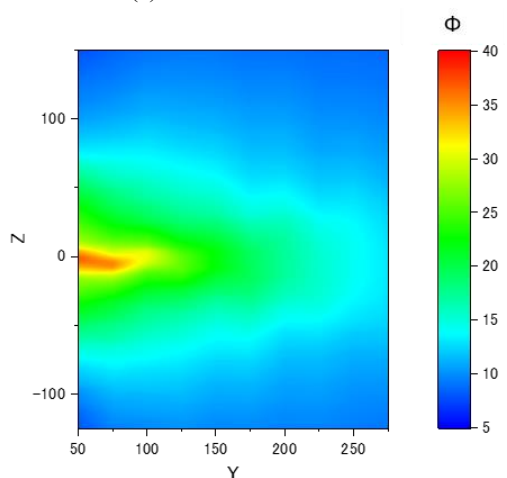
3.2.1 空間電位分布

各条件におけるホールスラスト下流の空間電位をエミッシブプローブで測定した。図9に空間電位分布を示す。図9(a)は $I_{ic}=1.0$ A, (b)は $I_{ic}=1.4$ A, (c)は $I_{ic}=3.0$ A の空間電位分布であり、ホローカソードは3条件とも $Z=50$ mm の位置に設置している。図9から、コイル電流の増加に伴いホールスラスト近傍の空間電位が下がっている。これは放電電流の減少によるものと考えられる。一方で、スラストから離れた下流においてはコイル電流の増加に伴い、空間電位の増加が見られ、特に(c)では下流全体に空間電位の増加が見られる結果となった。コイル電流を上げることでブルームは絞られることから、スラスト下流の空間電位の増加はブルームによるものではなく、カソードから出た電子に

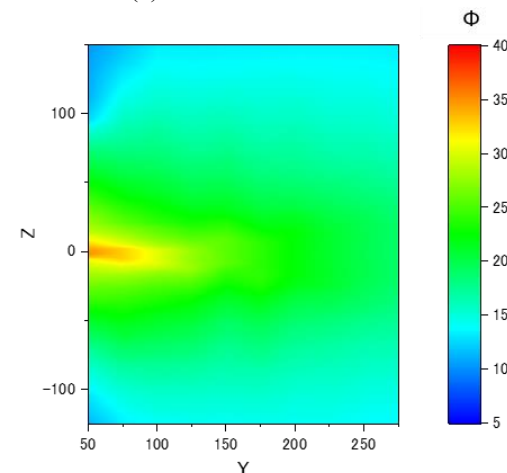
よるものと考えられる。



(a) $I_{ic}=1.0$ A



(b) $I_{ic}=1.4$ A



(c) $I_{ic}=3.0$ A

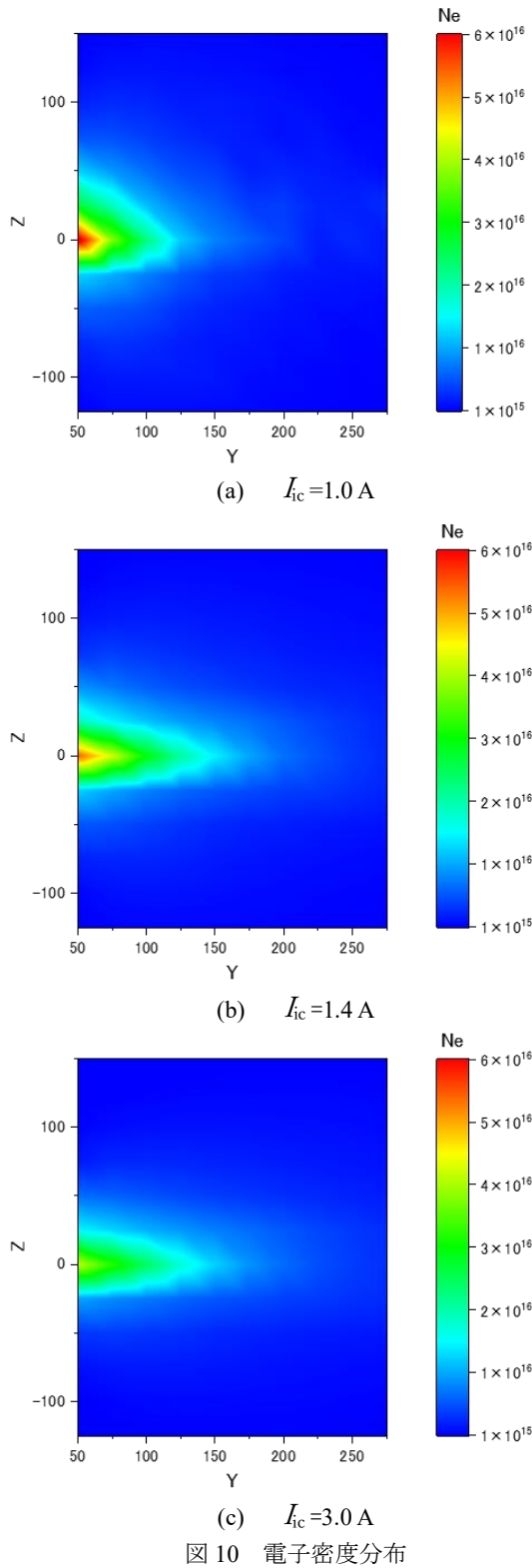
図9 空間電位分布

3.2.2 電子密度分布

各条件におけるホールスラスト下流の電子密度をダブルプローブで測定した。図10に電子密度分布を示す。

(a),(b),(c)は先述の通りである。得られた分布図から空間電

位分布と同様に、コイル電流を上げるに伴いスラスタ近傍の電子密度の低下が見られた。また、プルームの発散が抑えられていることやプルームの Y 軸方向への伸び等、空間電位分布との一致が確認できる。



3.2.3 電子流束分布

今回エミッシブプローブとダブルプローブによって計測された電子密度、電子温度、電場、磁場を用いて電子の流束密度を古典拡散論に基づいて算出した。古典拡散による流束密度は磁力線方向と磁力線を横切る方向をそれぞれ以下の式から算出した。

・磁力線方向

$$\Gamma_{e\parallel} = n_e \mathbf{u}_{e\parallel} = -\mu_{e\parallel} n_e \mathbf{E} - D_{e\parallel} \nabla n_e$$

ここで $\mu_{e\parallel}$, $D_{e\parallel}$ は磁力線方向の電子移動度、電子拡散係数であり、以下のように表される。

$$\mu_{e\parallel} = \frac{e}{m_e \nu}$$

$$D_{e\parallel} = \frac{k_B T_e}{m_e \nu}$$

・磁力線を横切る方向

$$\Gamma_{e\perp} = \mu_{e\perp} (n_e \mathbf{E} + \Gamma_{e\perp} \times \mathbf{B}) - D_{e\perp} \nabla n_e$$

ここで $\mu_{e\perp}$, $D_{e\perp}$ は以下のように表される。

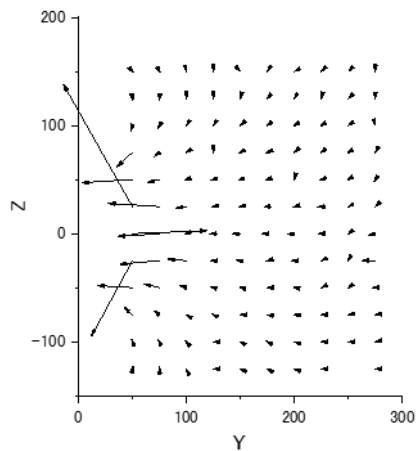
$$\mu_{e\perp} = \frac{\mu_{e\parallel}}{1 + (\omega_e \tau_e)^2}$$

$$D_{e\perp} = \frac{D_{e\parallel}}{1 + (\omega_e \tau_e)^2}$$

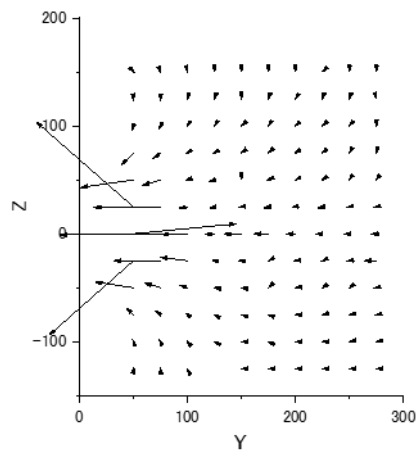
図 11 に各条件において算出した電子流束分布を示す。

カソードから放出された電子はイオンビームに向かって真っすぐ輸送されるのではなく、磁力線に沿うような形で輸送されイオンビームに供給される形となっている。また、 $Y = 50 \text{ mm}$, $Z = 0 \text{ mm}$ 地点の流束は他の流束と異なり Y 軸正方向を向いている。このことから、電子は磁力線に沿いつつ回り込みながら一度イオンビームを通り過ぎホールスラスタに向かっていき、その後スラスタ前面で U ターンするような形でイオンビーム方向に輸送され、中和に用いられる電子とそのままホールスラスタの加速チャンネルに入り、チャンネル内でのプラズマ生成に用いられる電子に分かれていると考えられる。これは、センターカソード型のホールスラスタが中和におけるエネルギー損失の低減に有利である理由の 1 つになると考えられる。今回の実験では、プラズマの擾乱を防ぐためプラズマの濃いスラスタ近傍を避けスラスタから 50 mm 離れた地点から計測を行った。しかし、流束分布から電子がスラスタ近くまで送られたのちイオンビームに向かって戻りながら中和している可能性が示唆されるため、今後はさらにスラスタに近い領域の計測を行う必要がある。また、各条件を比較するとスラスタ中心軸 ($Y = 0$ 上) での流束分布に変化がみられる。スラスタ中心に向かって供給される電子は(a)では $Y = 75 \text{ mm}$ 付近から流束の増加が見られるが(b),(c)ではそれぞれ $Y = 100 \text{ mm}$, $Y = 150 \text{ mm}$ 付近から流束の増加が見られる。このことから、コイル電流を上げたことで、電子がより Y 軸正方向

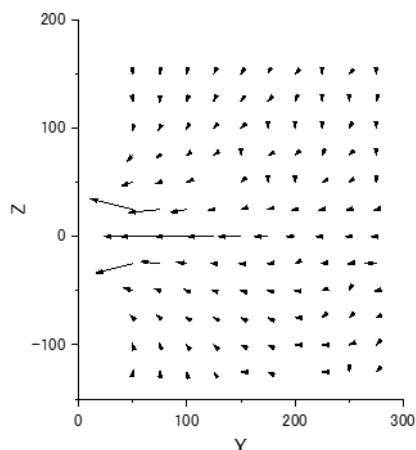
遠くまで回り込む形で輸送されており、結果としてより遠くまで電子を運ぶ必要があったことで電子を放出する駆動力となるカソード電位がコイル電流の増加に伴い負に沈み込む結果となったと考えられる。



(a) $I_c = 1.0 \text{ A}$



(b) $I_c = 1.4 \text{ A}$



(c) $I_c = 3.0 \text{ A}$

図 11 電子流束分布

4. 結言

本研究では電気推進機の中和現象におけるカソード電位

の決定要因の解明を目的に、200 W 級ホールスラストとローカソードを用いて磁場強度とカソード電位の関係性の計測及びプラズマ諸量の測定を行い、以下の結論が得られた。

- ・コイル電流 I_c を大きくすると、カソード電位 V_{cg} が負に沈み込む。
- ・放電電流 I_d を大きくすると、カソード電位 V_{cg} は負に沈み込む。
- ・推進剤流量 \dot{m} を大きくすると、ある一定の流量までは流量の増加に伴いカソード電位 V_{cg} は負に沈み込むが、その後浅くなる可能性がある。
- ・カソードから放出された電子は磁力線に沿う形で回り込みながらイオンビームに供給されており、どの程度回り込むかがカソード電位を決定づける要因の 1 つとなっている。
- ・電子は回り込みながら輸送されたのち、1 度スラスト表面近くまで輸送され、その後 U ターンするような形でイオンビームに向かい中和を行っている。

3 つ目の結論に関しては、今後流量を連続的に変化させることによるカソード電位の変化を測定することにより流量とカソード電位の依存性を明らかにしていく。また 5 つ目の結論に関しては、今後スラスト近傍を計測することでより詳細に調査する必要がある。今回はコイル電流による変化のみを調査したが、放電電圧や推進剤流量、電子源位置など様々な要因を変化させた際の計測を行うことで電気推進機におけるカソード電位及び中和現象の解明を目指していく。

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。本研究は JAXA 共同研究令和元年度戦略的開発研究費を受けたものです。ここに謝意を表します。本実験を遂行するにあたり、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) 栗木恭一, 荒川義博, “電気推進ロケット入門,” 東京大学出版会, pp. 12 (2003).
- (2) 西山和孝, 杵淵紀世志, “電気推進ロケットエンジンを用いたミッションの現状と今後,” プラズマ核融合学会, Vol94, 2017
- (3) Hamada, Y., Bak, J., Kawashima, R., Koizumi, H., Komurasaki, K., Yamamoto, N., Egawa, Y., Funaki, I., Iihara, S., Cho, S., Kubota, K., Watanabe, H., Fuchigami, K., Tashiro, Y., Takahata, Y., Kakuma, T., Furukubo, Y. and Tahara, H., “Hall Thruster Development for Japanese Space Propulsion Programs,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 60, Issue 5, pp. 320-326, 2017

- (4) 濱田悠嗣, 朴俊輝, 小紫公也, 江川雄亮, 山本直嗣, 高畑侑弥, 角間徹生, 古久保裕介, 田原弘一, “5kW 級ホールスラスト RAIJIN の性能解析,” 日本航空宇宙学会, Vol65, pp.82-86,2017
- (5) Jean-Pierre Boeuf, “Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters,” Journal of Applied Physics, Volume 121, Issue 1,2017
- (6) Dan M. Goebel, Kristina K. Jameson and Richard R. Hofer, “Hall Thruster Cathode Flow Impact on Coupling Voltage and Cathode Life,” Journal of Propulsion and Power, Vol.28, No.2, pp.355-363, 2012.
- (7) Kunning G. Xu and Mitchell L. R. Walker, “Effect of External Cathode Azimuthal Position on Hall-Effect Thruster Plume and Diagnostics,” Journal of Propulsion and Power, Vol.30, No2, pp.506-513, 2014.