

電気推進機放出プラズマ環境中の宇宙機周辺電位構造解析

Analysis of Potential Structure near Spacecraft in Electric Propulsion Plasmas

研究代表者：村中 崇信 (中京大学工学部・大学院工学研究科)
muranaka@sist.chukyo-u.ac.jp

研究分担者：水谷 悠貴 (中京大学大学院工学研究科)
t22320m@m.chukyo-u.ac.jp

担当：3次元静電ハイブリッドPICコードによる計算機実験

研究目的 (Research Objective):

近年、電気推進は従来推進と比較して10倍程度の燃費性能を有するため、深宇宙探査機の主推進器から商用衛星の姿勢制御や軌道上昇まで、その用途は拡大の一途を辿っている。電気推進のひとつであるイオンスラスタは、イオン源と電子源から構成されるが、定常作動時にはイオンビームと熱的電子の放出電流値がほぼ等量となるよう放出される。このとき、スラスタ下流には、イオンビームと漏洩推進剤が電荷効果して生成される低速電荷交換イオン(CEXイオン)と、電子源を起源とする熱的電子が混在するプラズマプルームが形成される。ここで生成される低速CEXイオンはプルーム電位と宇宙機構体電位との電位差によって宇宙機構体側に静電加速を受け、その一部は宇宙機表面に衝突して表面材料をスパッタリング損耗する場合がある。スパッタリング収量は入射イオンエネルギーの関数であるが、100 eV程度のイオンエネルギーまでは急峻な増加関数となるため、予想される逆流イオンのエネルギー帯である数10 eV程度においては、軌道上における宇宙機-プルーム間の電位差は、表面損耗量を決定する重要なパラメータとなる。本研究では、3次元静電コードにより、これら電位形成構造の解析と逆流イオンエネルギーの評価を進めている。今年度は、計算コスト削減のため、開発したハイブリッドPICコードを使用して、対象イオンスラスタのプルーム電位計算を実施し、地上実験で計測した電位分布結果と比較を行った。

計算手法 (Computational Aspects) :

開発した3次元静電ハイブリッドPICコードの仕様を述べる。静電場中における荷電粒子の運動は、スラスタ放出ビームイオン、電荷交換イオンともにParticle-In-Cell(PIC)法を用いて時間積分した。イオン源から漏洩する中性粒子の運動もイオンと同様の手法で求めた。電子は単一温度の1流体とし、Maxwell-Boltzmann分布であると仮定した。静電場は非線形Poisson方程式を、SOR法を用いて解いた。本解析モデルでは、プラズマプルームは局所的イオン密度に対して電荷の準中性を仮定したものであり、電子源からの電子放出は再現されていない。また、電荷交換イオンの生成は局所的な生成率を確率的に算出し、この地点における数密度を定義した。本コードでは、計算速度向上のため、SMPスレッド並列を実装している。

次に、本研究における解析モデルを示す。今回の解析では計算結果の妥当性検証のた

め、別途地上実験で実施したスラスタ放出プラズマ諸量測定実験を再現する計算モデルとした。計算領域は $500\text{ cm} \times 250\text{ cm} \times 250\text{ cm}$ であり、計算領域中央に宇宙機を模した $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ の立方体導体を配置する。この立方体の一面の中央に直径 10 cm のスラスタモデルを設置する。空間格子幅は 5 cm の等幅直交格子とした。従って、計算領域の格子数は $100 \times 50 \times 50$ となる。電位の境界条件は、宇宙機電位は接地 (0 V 固定) とし、外部境界は勾配を 0 とした。イオンスラスタはマイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$ をモデル化したものであり、推進剤はキセノンとした。イオンビームの初期分布は直径 10 cm のスラスタ放出面内に一様とし、速度分布は多孔静電グリッドから加速放出されるビームレットを再現して、ある発散角内に一様となる角度分布とした。初期速度 v_B はイオン電荷 q_i 、質量 m_i 、ビーム加速電位を V_a として、 $v_B = (2q_i V_a / m_i)^{1/2}$ により算出し一意的に与えた。先行研究に基づき、ビームレット発散角は 15 度とした。一方、同放出口からは、未電離の中性ガスも放出しており、初期分布は放出面内に一様、速度分布は熱速度で定義した。Fig. 1 に計算体系の概要図を、Table 1 に使用したスラスタパラメータ、Table 2 に計算パラメータをそれぞれ示す。Table 1 において、Xe イオンは1価イオンのみとし、電子温度は、電子源単体作動における放出電子温度の実測結果と同等となるよう決定した。

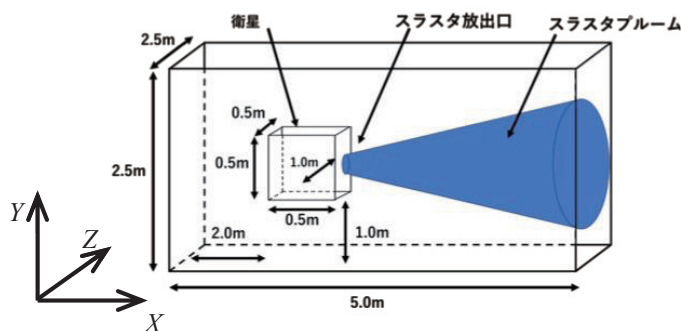


Fig. 1 計算体系概要

Table 1 スラスタパラメータ

イオン種	Xe+
スラスタ直径, cm	10
ビーム電流, mA	170
ビーム加速電圧, V	1500
ビームレット発散角, deg	15
中性ガス温度, K	1240
電子温度, eV	3.0

Table 2 計算パラメータ

計算領域, cm	$500 \times 250 \times 250$
衛星モデル, cm	$50 \times 50 \times 50$
格子長, cm	5
計算格子数	$100 \times 50 \times 50$
超粒子 1 個の実粒子数	1.0×10^8
衛星電位, V	0
時間幅, 10^{-5} s	0.0042 / 0.61 / 1.8
ビーム/CEX/中性粒子	

研究成果 (Accomplishments) :

Fig. 2 に数値計算で得られたスラスタプルーム諸量の空間分布を示す。図中の(a), (b), (c)は、(a) ビームイオン、(b) CEX イオン、(c)電位、をそれぞれ示す。各グラフはイオンビーム放出軸を含む XY 平面を抽出したものである。また、各軸は原点からのグリッド番号 (実スケールは $\times 5\text{ cm}$) であり、白色の矩形は衛星モデルの表面位置を示す。Fig. 2 (a)から、イオンビームの最大密度は 10^{17} m^{-3} 程度であり、発散角は実機と同

等の 25 度程度となった．一方，Fig. 2 (a)から，CEX イオンの最大密度はイオンビームより1桁小さい 10^{16} m^{-3} 程度であり，イオンビーム領域の拡散に加え，スラスタ出口近傍では半径方向につよい拡散が見て取れる．また，スラスタ取付面の反対側は CEX イオンの希薄領域が形成されている．電子はイオンビームと CEX イオンを重畳したイオン分布に対して，電荷準中性となるよう分布する．このときの電位分布を Fig.2(c)に示す．電位の最大値は 38V 程度であった．得られた電位分布結果の検証のため，数値計算における電子温度の感度調査と，別途取得した実験結果との比較を行った．電子温度に対する感度調査のため，電子温度を 1.5 eV として同様の数値解析を行った結果，Fig. 3 に示す電位分布を得た．Fig. 3 から，電位の最大値は 20 V 程度であり，Fig.2(c)に示される最大値の 1/2 程度となった．ここの 2 ケースでは，電位の最大値と電子温度の変化量は同程度であり，電位計算ソルバーの妥当性が示される結果となった．次に，Fig. 4 に地上実験で取得された同型スラスタのプルーム電位分布を示す．本結果はイオンビーム放出軸を含む下方領域の RZ 平面 (Fig. 1 の XY 平面に対応) で取得されたものである．Fig. 4 では，電位の最大値は 37 V であり，Fig. 2(c)に示す計算結果とほぼ同等であったが，最大電位となるスラスタ出口中央から，ビームの軸方向および半径方向における電位の低減傾向が Fig.2(c)のものと異なる結果となった．この主要因として，本計算では電子温度をひとつの固定値で定義したことが考えられる．今後は電子モデルの詳細化をすすめ，例えば局所的電子温度モデルの導入等を計画している．また，先述の地上実験でもプルーム領域における電子温度分布計測を進めており，得られた結果を数値計算の検証材料とする予定である．

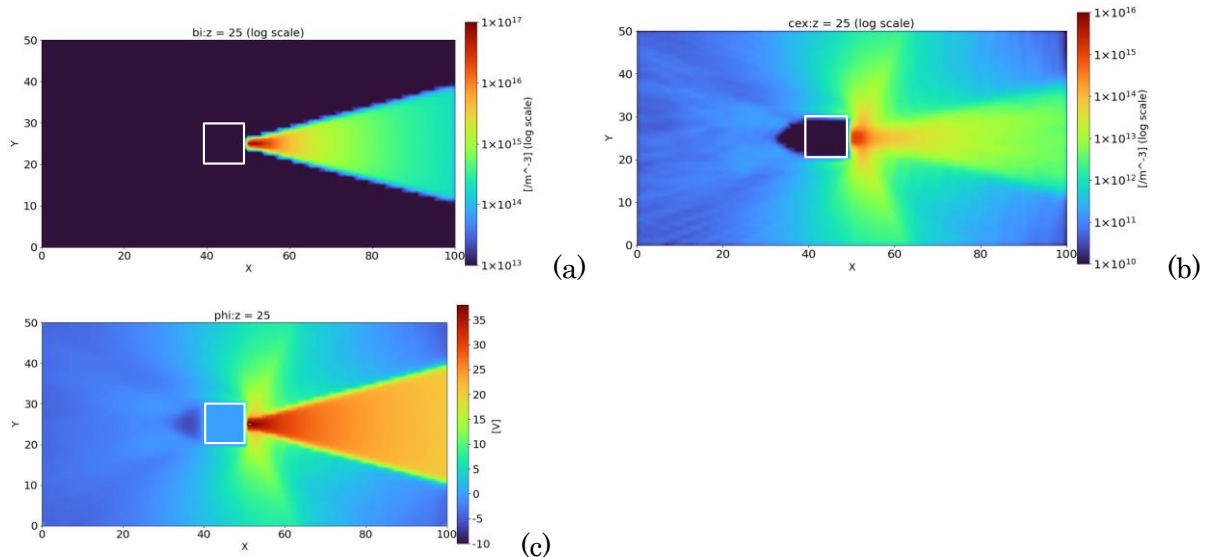


Fig. 2 イオンスラスタプルーム諸量分布計算結果. (a)ビームイオン, (b) CEX イオン, (c)電位.

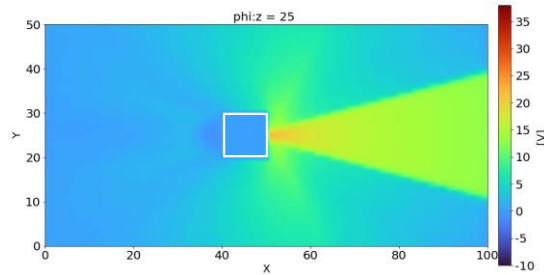


Fig. 3 電子温度 1.5 eV としたときの電位分布計算結果

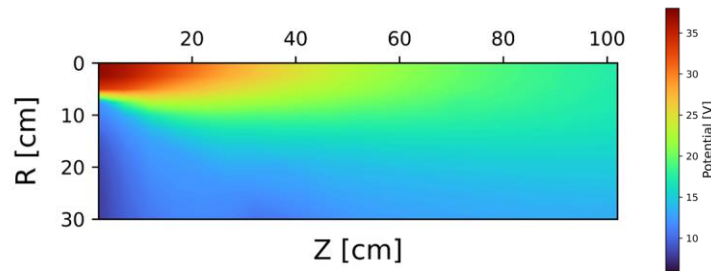


Fig. 4 地上実験で取得された同型スラスタの電位分布（ビーム軸下方領域の RZ 平面）

公表状況（Publications）：

（国際学会予稿）

1. Keisuke Nakata, Ayumu Nono, Mizuki Nagai, Yuuki Mizutani, Noboru Kamada, Ayumu Inoda, Musashi Ohori, Yasuhiro Nakajima, Takumi Iwagashira, Takuya Koiso, Soichiro Tsuji, Shogo Uozumi, Mamoru Kato, Kazuma Ueno, Yoshinori Nakayama, Kazutaka Nishiyama, Takanobu Muranaka, Measurement of Thruster Plume Potential Distribution for 10 cm-class Microwave Discharge Ion Thruster in Laboratory Experiments, Proc. 34th International Symposium on Space Technology and Science, 2023-b-77, Kurume, Japan, June 3-6, 2023.

（口頭発表）

2. 水谷悠貴, 村中 崇信, イオンスラスタの逆流イオンによる宇宙機表面損耗解析に向けた数値計算, 2023 年度宇宙輸送シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 2024 年 1 月 18-19 日. (STEP-2023-034)
3. 中田圭祐, 濃野歩, 加藤守, 水谷悠貴, 釜田昇, 岩頭拓海, 上野一磨, 中山 宣典, 西山和孝, 村中崇信, 地上実験による 10cm 級マイクロ波放電式イオンスラスタのプルームパラメータ計測, 2023 年度宇宙輸送シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 相模原市, 2024 年 1 月 18-19 日. (STEP-2023-011)