

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 around Spacecraft in Plasmas Exhausted from
Electric Propulsion

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

研究目的 (Research Objective):

近年、イオンスラスタなどの電気推進機はその高比推力性能から、深宇宙探査機の主推進器から大型商用衛星の姿勢制御や軌道上昇等にも使用され、その用途は拡大しつつある。イオンスラスタの定常作動時には、イオン源から高速イオンビームを、電子源から熱的電子を、各々の電流値がほぼ同量となるよう放出するが、スラスタ下流には、高速イオンビームと漏洩推進剤が電離した低速イオン、および熱的電子によるプラズマプルームが形成される。プルーム電位はイオンと電子の移動度の差によって正電位となるため、これより低電位となる宇宙機構体との間に電位差が生じる。プルーム中の低速イオンはこの電位差によって宇宙機構体側に静電加速を受け、宇宙機表面に衝突したイオンは宇宙機表面をスパッタリング損耗する可能性がある。スパッタリング損耗（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、数 10eV 程度のエネルギー領域では極めて高感度となるため、この程度の電位差と予測される軌道上における宇宙機—プルーム間の電位評価はこの表面損耗評価を決定する重要なパラメータとなる。本研究では、3次元完全粒子静電コードにより、これら電位形成原理の解明を進めている。現在では、計算資源の問題から「はやぶさ2」実機スケールでの解析は困難であるため、計算コスト削減のため、スラスタ実機のスケールダウンモデルに対し、イオン源と電子源の静電的相互作用を明らかにすることを目指す。

計算手法 (Computational Aspects) :

本研究では、独自開発した3次元完全粒子静電コードを使用した。静電場中における荷電粒子の運動は、電子およびイオンともに超粒子による Particle-In-Cell (PIC)法を使用し、空間電位と自己無撞着に解く。空間電位は、ポアソン方程式をFFT (Fast Fourier Transform)により直接解く。計算速度向上のため、領域分割型 MPI プロセス並列化と SMP スレッド並列化の両者による、ハイブリッド並列化を実装している。スラスタ放出荷電粒子は、イオンビームと中和器放出電子のみから構成される、無衝突プラズマとした。すなわち、今回は、イオンスラスタのプラズマプルーム中で生成される、低速電荷交換イオンは考慮していない。

本研究における解析モデルを示す。典型的な計算領域サイズは 128 cm×128 cm×128 cm である。計算領域中央に小型宇宙機を模した 15 cm×15 cm×15 cm の立方体導体を配置する。宇宙機電位は浮動とし、宇宙機モデルに対する正味電流により決定される。計算格子は等幅直交格子を採用しており、後述する計算精度保証のため、計算格子幅は 0.5 cm とした。よって、計算領域格子数は 256×256×256 となり、これを 8×8×4 の 256 ノードに領域分割し並列計算を実行している。イオンビームは x 軸方向をビーム方向とし、宇宙機

モデル下流側中央面に直径 5cm 円の放出口を設定した。イオンビーム放出モデルは放出角内にビームが等方分布となる点源モデルを採用した。初期空間分布はスラスタ出口面に一様とし、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。一方、中和電子の放出口は直径 1.48 cm 円とし、空間分布は放出口に一様とし、速度分布は Maxwell 分布で与えた。今回、イオン源に対する中和器の配置はイオン源と同心円状に配置し、イオンビームと中和電子の挙動とプルーム電位について解析した。

研究成果 (Accomplishments) :

はじめに、イオンビーム放出モデルの検証のため、イオン加速用多孔グリッドの単孔から放出されるイオンビームであるビームレットの発散角をパラメータとして、 $\mu 10$ イオンスラスタ放出プルームの発散角を調査し、イオンビーム放出の再現性を検証した。イオンビーム角度分布の解析結果を Fig. 1 示す。このグラフは、各ビームレットの発散角に対する、スラスタ放出イオンビームの角度分布の計算結果を示している。また、グレーの網掛け領域は、本研究グループが別途実施した、 $\mu 10$ のイオン電流の角度分布を示している。本データは、スラスタ出口から下流 1m においてファラデープローブにて取得されたものである。計算結果の電流値は計測器の捕集電極面積に換算している。これらの比較から、ビームレットの発散角 15 度のとき、実験結果の主ビーム電流をよく再現することがわかった。

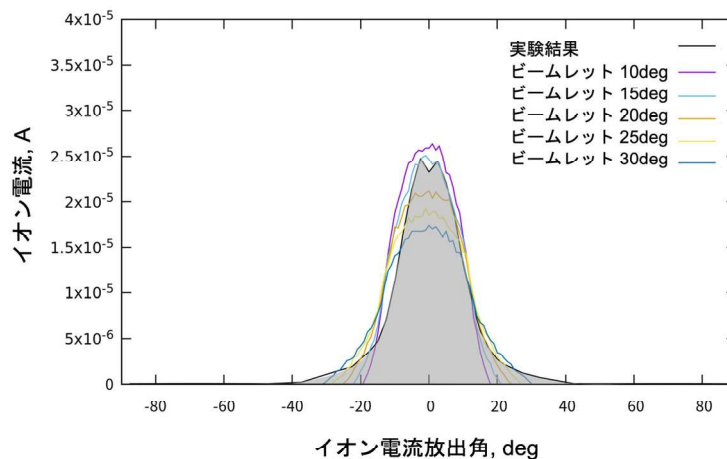


Fig. 1 イオンビーム角度分布の比較

つぎに、イオンスラスタの定常作動時における、スラスタプルーム形成を再現した。スラスタの定常作動時は、イオン源から高速イオンビーム電流が、電子源から熱的電子電流が、それぞれ同量放出される。静電コードでは、空間に対する次の数値安定条件、 $dx < \lambda_D / 0.3$ を満たす必要があるため、所定の計算格子サイズに対して荷電粒子密度の上限が決定される。ここで、 dx は計算格子幅、 λ_D はデバイ長である。この条件を満たすべく、デバイ長定義式から、設定温度に対する中和電子密度、熱速度、および、両者の積から電流密度を決定し、さらに電流密度に放出口面積を乗じて電子電流

量を決定する。イオンビーム電流は算出された電子電流値と等量に決定する。今回の解析では、これらの電流値は 0.1 mA となった。その他のパラメータは、イオン種は一価のキセノンイオン、ビーム発散角は 20 度、ビーム加速電位は 1000 V とそれぞれ設定した。Table 1 に計算パラメータを示す。

Fig. 2 にイオン源と中和器配置条件を示す。イオン源と中和器は同心円状に配置した。Fig. 3 にイオンビーム、中和電子、宇宙機周辺領域の空間電位をそれぞれ示す。これらのグラフから、イオンビームと中和電子がスラスタ下流領域にほぼ対称に分布し、宇宙機電位とプルーム電位の最大値はそれぞれおよそ 2V, 32V となった。プルーム電位の最大値は、一般的なイオンスラスタのプルーム電位とおおよそよい一致を示している。今後は、低速電荷交換イオンの生成を考慮し、同様の解析を進め、宇宙機電位およびプルーム電位におよぼす影響を検証していく。

Table 1 計算パラメータ

イオンビーム	
イオン種	Xe ⁺
スラスタ半径 [cm]	2.5
加速電位 [V]	1000
放出電流量 [mA]	0.1
放出角 [deg]	20
中和器	
電子温度 [eV]	1
放出半径 [cm]	0.74
放出電流量 [mA]	0.1
計算条件	
時間幅 [ns]	1
グリッド幅 [cm]	0.5
グリッド数 (X*Y*Z)	256×256×256
宇宙機サイズ (X*Y*Z)	30×30×30

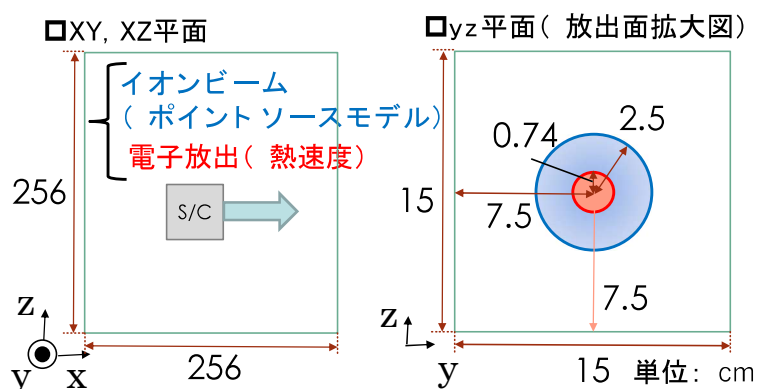


Fig. 1. 計算体系 (左) とイオンビーム・熱的電子の放出口拡大図 (右)

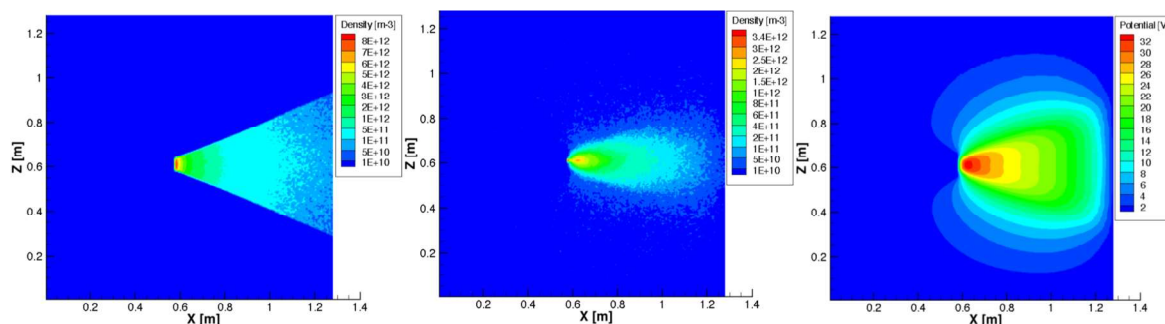


Fig. 2. イオンスラスタ作動における、(左)イオンビーム空間分布、(中)電子空間分布、(右)空間電位。イオンビーム放出後 50 μ s 経過時のスナップショット。

公表状況 (Publications) :

該当なし