

# イオンエンジンにおけるビーム中和電子の粒子解析

臼井英之\*, 鐘ヶ江将詩†

Particle-In-Cell simulations on beam neutralizing electrons for ion engine

By

Hideyuki USUI\* and Masashi KANEGAE

**Abstract :** In order to examine the density and temperature distribution of electrons which neutralize ion beam emitted from an ion engine, we performed three-dimensional Particle-In-Cell simulations and investigated the electron behavior inside or outside the ion beam flows in the downstream region with respect to the accel grid. We calculated the charge density distribution of ions in three-dimensional spatial grid space covering the downstream region of the ion engine by using the ion beamlet data provided by Dr. Nakano. By solving Poisson's equation with the charge density data the potential distribution is calculated. Then we start emitting electrons from the down stream edge of the simulation region. At each time step, the charge density at each grid point is updated by the emitted electrons and the corresponding electric potential is renewed. By using the new potential values, we update the electrons dynamics by solving equation of motion for each electron. Since we focus on the short time scale of electron motion, we assume that ions which are about 100 thousand times heavier than electrons are immobile. We keep solving the above-mentioned PIC simulation until the steady state in terms of electron distribution is achieved. By using the electron data obtained in the simulations, we analyze the electron local temperature by calculating the local electron velocity distributions. From the data, we found that temperature is not uniform in space. The electron temperature at the ion beam edges become approximately 1.6 times higher than that of originally injected electrons.

**Key words :** Ion Engine, Grid Erosion Analysis, Ion Beam Neutralization, Particle-In-Cell simulation, Electron temperature

## 1. はじめに

JAXA を中心にイオンエンジン耐久評価のためのグリッド損耗数値解析ツール(JIEDI)開発が進行中である。イオンエンジンから噴射されるイオンビームの軌道は、エンジン近傍での中性粒子との衝突やエンジン出口でのイオンビーム中和の状況に影響を受ける。特に、ビームの中和状態の詳細は実験観測データの不足もあり、定量的な把握は困難である。そこで JIEDI ではアクセルグリッドより下流でのビーム中和電子分布モデルを空間的に温度が一樣なボルツマン分布で近似している。しかし、この近似の妥当性についての検証は行われていない。そこで、今回、京大生存圏研究所スペースグループで長年用いられている電磁粒子コード KEMPO (Kyoto-university ElectroMagnetic Particle cOde)を静電粒子コードとして用い、イオンエンジンのイオン放出

---

\* RISH/Kyoto University (Currently, Kobe University)

† Kyoto University

口付近において熱速度で放出された電子がイオンビーム中和プロセスを経て定常状態でどのような密度、温度分布になるかを解析することにした。

## 2. ビーム中和電子解析手法

イオンエンジンで使われる推進剤はキセノンがよく使用される。これは電子に比べ、きわめて重いので、電子ダイナミクスに着目した今回の粒子シミュレーションではイオンは動かないと近似できる。すなわち、本シミュレーションではイオンは空間に固定されており、その状況における中和電子の振る舞いを調べた。

イオンビームデータは、首都大学東京の中野氏より提供していただいたアクセルグリッド下流面の1孔におけるイオンビームレット44417本のデータを用いた。このイオンビームレット

データの領域はアクセルグリッドの孔の中心を原点とした30度の直角三角形の部分であり、対称性を利用して拡張すると実際の蜂の巣状のグリッド孔におけるイオンビームを再現することができる。本研究では直交座標を用いるため、その最小単位として図1のようなモデルを用いて解析を行った。x軸方向は実パラメータでは5.5mmでシミュレーション内では50グリッドに分割している。y軸方向は9.46mmで86グリッドに分割している。ビーム進行方向であるz軸方向は11mmの領域を設定し、100グリッドに分割するようなシミュレーション領域を考えた。なお、本研究でのイオンエンジンのパラメータはアクセルグリッド孔の中心間距離が11mm、イオンビーム電流値は0.2mA、アクセルグリッド電圧は-200Vである。

まず、イオンビームレットの速度と電流値から、今回粒子シミュレーションで用いる3次元直交座標の空間格子点にイオン電荷密度の値を抽出し割り当て、背景的なイオン分布として用いた。ただし、イオンビームは一定速度で直進するものと仮定してシミュレーションモデルの全空間でのイオン電荷密度を求めた。電荷密度を $\rho$ 、イオンビームレット電流を $i$ 、イオンビームレットが1グリッドを横切るのに要する時間を $t$ 、1グリッドの体積

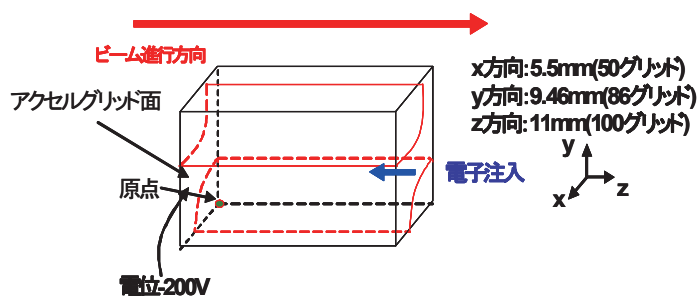


図1：シミュレーションモデル図

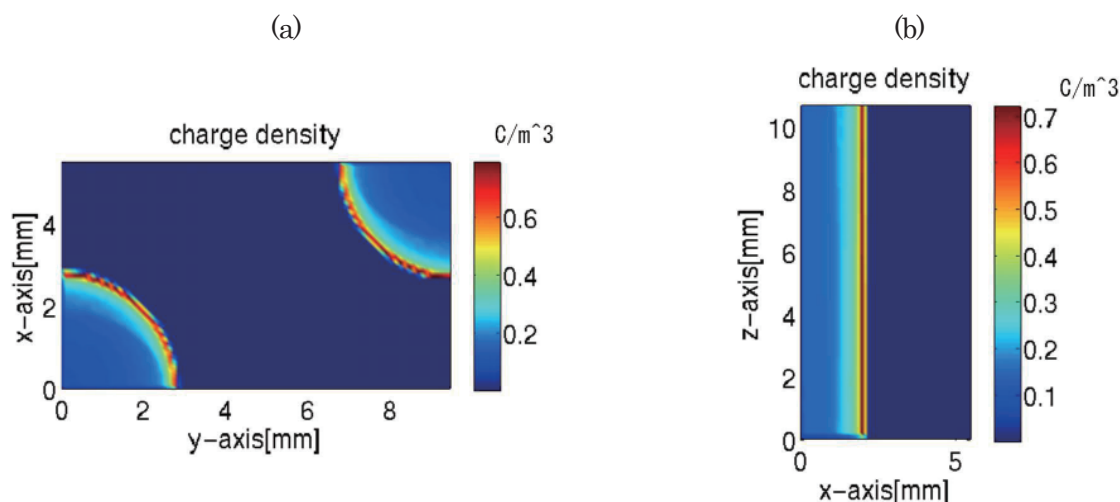


図2：イオンの空間電荷密度. (a)  $z=5.5\text{mm}$  での  $x$ - $y$  断面, (b)  $y=2.2\text{mm}$  での  $x$ - $z$  断面)

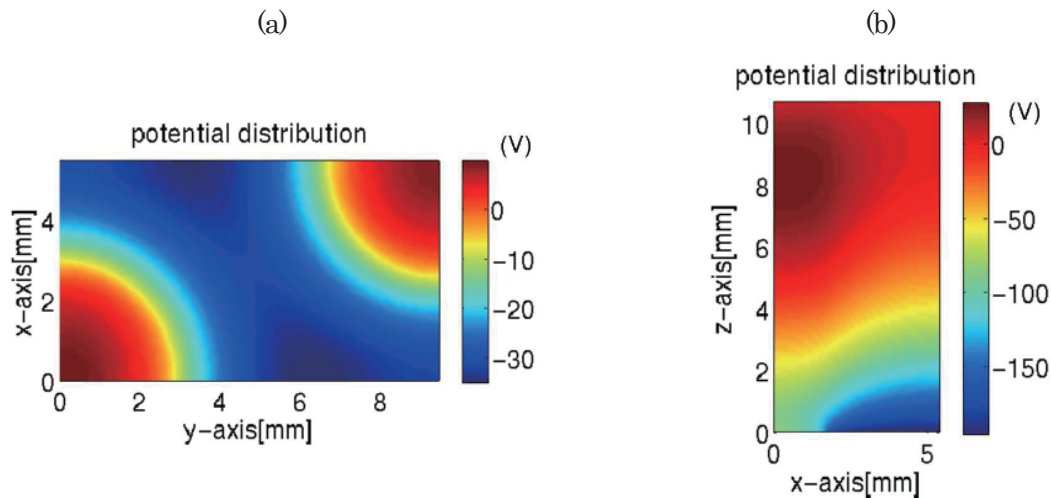


図 3： 空間電位分布. (a)  $z=5.5\text{mm}$  での x-y 断面, (b)  $y=2.2\text{mm}$  での x-z 断面

を  $V$  とすると、 $\rho = it/V$  で 1 グリッドにおける電荷密度が求まる。 $t$  を得るには、ビームレットの直線式を求め、グリッドに入るときと出て行くときの交点を調べ、その距離を速度で割ればよい。それをビームレット毎およびグリッド毎について調べ、最終的に重ねあわせれば各グリッドでの空間電荷が得られる。図 2(a),(b) はそれぞれ  $z=5.5\text{mm}$  での x-y 断面、 $y=2.2\text{mm}$  での x-z 断面におけるイオンの空間電荷密度コンター図である。図から明らかなようにイオンビーム外側部分の電荷密度が高くなっている様子がわかる。

次に、得られた電荷密度を用いてポアソン式により空間電位を計算する。ポアソン方程式では、次のような境界条件を用いた。 $z=0\text{mm}$  のアクセルグリッド面において、孔部分の電位データは中野氏から与えられている。他のアクセルグリッド面の電圧は  $-200\text{V}$  に設定した。一方、イオンビーム下流境界である  $z=11\text{mm}$  面の電位は  $0\text{V}$  とした。実際はもっと離れたイオンビーム下流で電位が  $0$  になるような条件に設定するべきであるが、今回は計算資源の問題のために、アクセルグリッドの孔間距離分つまり  $11\text{mm}$  ビーム下流で境界条件を設定した。x,y 方向の境界条件については対称性を利用してモデルを拡張していくので、電位勾配つまり電界が  $0$  という境界条件を設定した。これらの境界条件の下、ポアソン式を解き電位の空間分布を求めた。図 3(a) は、 $z=5.5\text{mm}$  での電位の断面をコンター図で示す。また図 3(b) は  $y=2.2\text{mm}$ 、つまりビームをビーム進行方向に含んだ平面での電位分布である。図 3(a) からわかるように、イオンビームが存在する領域では正の電位となる。また図 3(b) に示すように  $z=6\text{mm}$  より離れると正の電位領域となることがわかる。図 3 は初期電位分布としてイオンのみが存在する場合であることを注意したい。

その後、イオンビーム進行方向とは逆向きに、 $z=11\text{mm}$  面全体から連続的に  $5\text{eV}$  の電子をある密度で注入した。各時間ステップでイオンと電子の電荷密度の総和を用いてポアソン方程式を解く。それによって各グリッドで電位を更新するとともに、新しい場を用いて電子の挙動を解く。この繰り返しを定常状態になるまで行った。そして、定常状態における電子の速度分布、温度分布を抽出した。なお、電子の境界条件は、ビーム進行方向とは垂直な方向については反射境界を用いた。図 3(b) の電位分布からも見てわかるように、ビーム進行方向と逆向きに大きな電界が存在するので  $5\text{eV}$  で注入された電子は  $-200\text{V}$  のアクセルグリッド面へは到達しないと考えられる。注入電子のプラズマ周期を  $T$  とすると、電子注入後から  $114T$  経過した時間においては電子分布、電位分布ともにほとんど変化しなかったため、この時間以後を定常状態とみなしビーム中和電子分布解析を行った。図 4 (a) に電子注入後のビーム中心付近軸方向の空間電位分布を示す。時間  $114T$  では  $z=6\text{mm}$  より下流の領域では初期のイオンによる正の電位が中和されほぼ  $0$  電位になっていることがわかる。図 4(b) には  $y=0.33\text{mm}$  で切った x-z

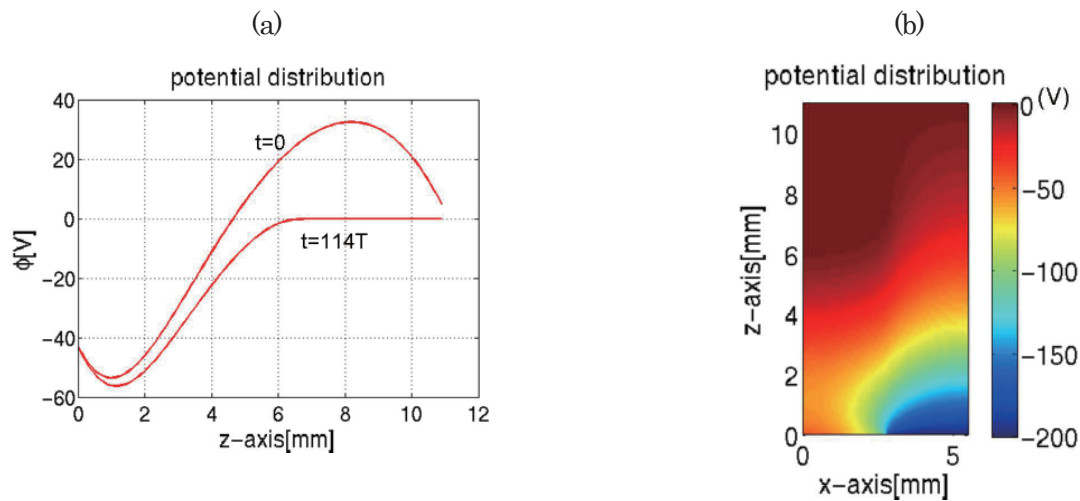


図4：電子注入後の空間電位分布

(a) ビーム中心付近軸 ( $x=y=0.33$  mm) 上における空間電位, (b)  $y=0.33$  mm での  $x$ - $z$  断面

平面での電位分布図を示す。図 4(a)に示されたように、 $x=0$  軸近傍では  $z=6$  mm より下流の領域において電位はほぼゼロになっている。

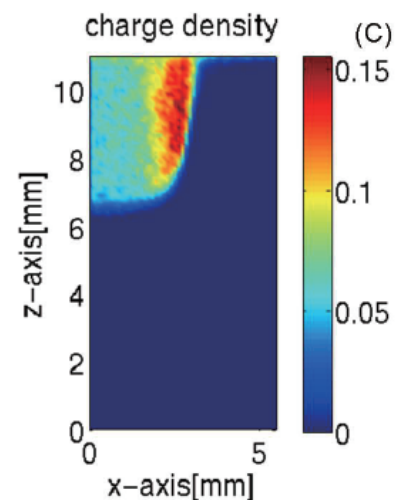
### 3. 定常状態におけるビーム中和電子解析

#### 3.1. 電子密度分布

イオンビームの中心付近領域 ( $y=0.33$  mm を通る断面) における中和電子の密度分布について調べた。 $y=0.33$  mm 断面における電子のみの空間電荷密度を図 5 に示す。図からわかるように、ビーム方向には電子は  $z=7$  mm あたりまでしか達しておらず、 $x=0$  のビーム中心軸よりはむしろイオンビームの外周領域部分 ( $x=3$  mm 付近) に電子が集中している様子がわかる。図 2 で示したようにビーム内のイオンはイオンビーム外周に集中しており、これを中和するために、電子がイオンビーム外周に集中する。ただ、電子は熱運動をするため、電子分布は空間的に広がる。図 4(b)の電位分布図を見ると、ビーム外周領域 ( $x=3$  mm 付近) において  $x$  方向に電位の空間勾配が存在することが分かる。すなわち、ビーム方向に垂直に電位勾配が生じ、そこでの電界によりビーム軸に垂直方向に電子速度変化が予想される。このことを踏まえて、以下に電子速度分布を示す。

#### 3.2. 電子温度分布

図 6(a), (b)にビーム中心下流領域 ( $z$  座標で約 7.4 mm 近傍) における電子のビーム進行方向速度とビーム垂直方向速度の速度分布関数をそれぞれ示した。いずれの場合も速度分布関数は非常にマクスウェル分布に近い形をしている。これらの分布関数から温度を抽出するとビーム方向に対して平行および垂直方向における温度はそれぞれ

図5：中和電子密度図。 $y=0.33$  mm を通る  $x$ - $z$  断面図

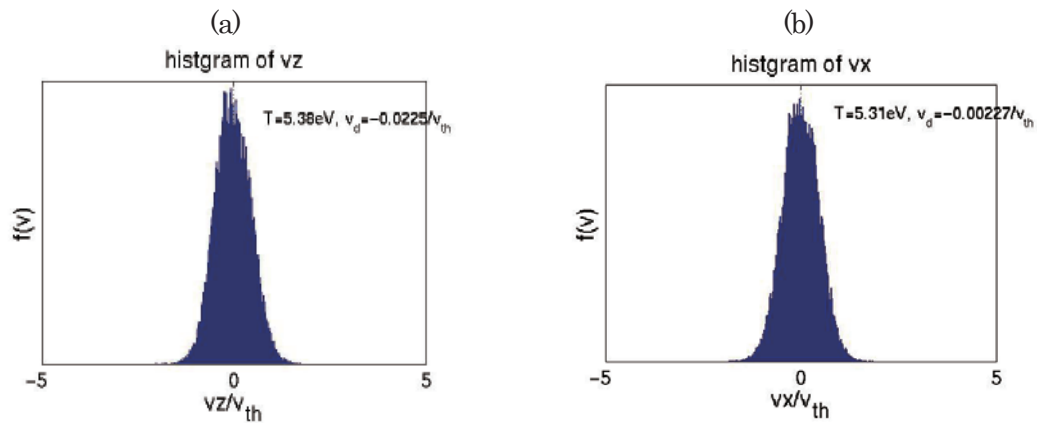


図 6 : ビームレット中心( $z=7.7\text{mm}$ ) (a)ビーム平行方向分布, (b)ビーム垂直方向分布

れ、 $5.38\text{eV}$ 、 $5.31\text{eV}$  となった。より電子注入境界に近い領域についても同じく温度評価をしたが、ビーム方向に対して平行および垂直方向ともに、ほぼ注入時の  $5\text{eV}$  に近い値となっている。これは、図 6 に示したように、ビーム中心付近では電位はほぼ  $0\text{V}$  で一様であり場からの電子への影響はほとんどなく、初期の速度分布を維持しているためである。

次にビーム外周部分についての速度、温度分布の考察を行う。 $z$  座標で約  $8.5\text{mm}$  近傍および  $7.4\text{mm}$  近傍でのビーム垂直方向の速度分布関数をそれぞれ図 7(a), (b) に示す。速度分布から得られた温度評価は、(a) $8.93\text{eV}$ 、(b) $5.25\text{eV}$  となった。速度分布について注目してみると、パネル(b)では、速度分布関数はほぼマクスウェル分布である。しかしもう少しグリッドから離れると (a) に示すように速度分布の広がりが大きくなり、その結果、温度も  $8.83\text{eV}$  と注入時の  $5\text{eV}$  に比べ非常に大きくなっている。図 4(b) に示したようにビーム外周領域では、定常状態において空間的な電位勾配が生じており、電子はこの電位勾配により加減速されることによって速度分布が広がりを持つようになると考えられる。

これまでの温度分布結果から、空間的な電位変化が顕著な領域、今回の場合ではイオンビーム下流のイオンビーム外周部において電子温度が注入時より若干高くなることがわかった。イオンビームが中和され、電位がほとんど  $0$  となっている領域については注入時の中和電子のエネルギー  $5\text{eV}$  とほぼ等しくなることがわかった。すなわち、イオンビーム中和過程において特にビーム垂直方向に電子温度上昇の可能性が明らかとなった。

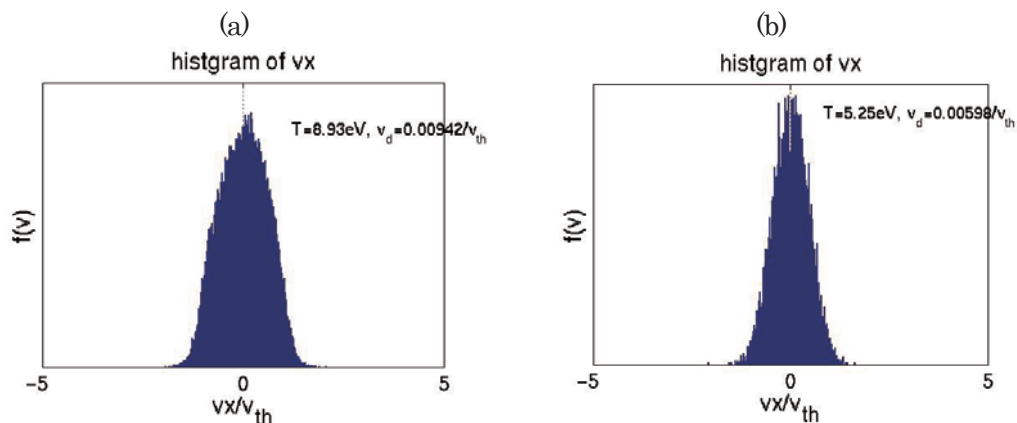


図 7 : ビームレット外周領域でのビーム垂直方向の電子速度分布  
(a) $z=8.5\text{mm}$ , (b) $z=7.4\text{mm}$



#### 4. 議論

今回の数値実験では、イオンビームレットのデータ数が膨大であるため、電荷密度を計算する際には提供いただいた 44417 本のビームレットデータから 10000 本に間引き、得られた電荷密度に 4.4417 を乗算した。このため、図 2 に示すように、イオン電荷密度は外周部の高密度領域でばらつきが見られる。しかし、これを元に得られた電位分布では空間的に滑らかな解が得られており、それによる電子運動や温度分布への影響は少ないと考える。

また、本研究では、ビーム進行方向にはグリッド孔直径の約 2 倍の領域をとり、ポアソンの方程式の境界条件としてイオンビーム下流の端における面の電位を 0 と設定した。本来ならば下流端の境界面をグリッドからもっと離れた位置にとるべきかもしれない。ただ、今回の結果で示されたように、少なくともビーム中心軸に沿っては注入電子によるイオンビーム中和が達成されているので、境界の影響がそれ程大きいとはいえない。今回の実験では、ビーム外周領域におい電子温度の上昇が見られたが、これをより正確に評価するためにはビーム方向により長いシミュレーションシステムを採用することが必要である。

実際にはイオンエンジンには無数のグリッド孔が存在するが、本研究では中心角 90 度の扇形領域 2 つについてしか解析していない。今回のモデルは、周期条件を用いているので多数孔モデルを模擬していることと等価ではあるが、エンジン外枠であるグリッドそのものの境界が電子ダイナミクスにどのような影響があるかについては、考慮されていない。さらに、今回は下流境界から上流にむけて一様に電子を 1 方向に注入したが、実際は、イオンエンジンから少し離れた場所に設置された中和器から電子がローカルに放出されるため、イオンビーム中和プロセスにおいては空間的な電子のミキシングについても考える必要がある。このように、イオンビームの中和過程を定量的に解析するには、より現実的なモデルを用いる必要があるが、今後の課題である。

#### 5. まとめ

本研究では、グリッド損耗解析ツールの精度に影響を与えると考えられる中和電子の分布について、3 次元粒子計算機実験を用いてセルフコンシステントな解析を行った。現状の JIEDI 解析ツールでは、アクセルグリッドより下流でのビーム中和電子分布モデルを空間的に温度が一樣なボルツマン分布で近似している。今回、この妥当性を検証するために、イオンビームレットからボルツマン電子を差し引き、イオンだけの分布を背景として与え、それに粒子モデルの中和電子を連側的に注入していくことにより、イオンビーム中和状態で電子温度分布がどのようになるかを調べた。本シミュレーション結果により、電子の集中するイオンビームの外周、特にイオンビーム下流領域で電子の温度が若干高くなることが明らかになった。もし粒子モデルを用いた電子温度が空間的に一樣であることが確認できれば、空間的に温度一定のボルツマン分布の仮定の妥当性を与えることになるが、今回の結果のように電子温度に領域依存性がある場合、電子温度一定のボルツマン電子分布の仮定が必ずしも正しいとは言えなくなる。この電子温度非一樣の影響がイオンビーム軌道に対してどの程度影響を及ぼすかについては、今回のモデルでは検証できない。これを行うためには、イオンビームそのものも粒子として扱い、電子中和プロセスも含めた定常解を求めるのが妥当と思われる。この解析は別途 JIEDI プロジェクトで行われているので、その結果に期待したい。

#### 謝辞

イオンビームレットデータを提供いただき有益なコメントをいただきました首都大学東京の中野正勝先生、本研究の取り組みに際していろいろご助言頂きました JAXA 大川恭志氏、防衛大学校の中山宜典先生には感謝いたします。京都大学生存圏研究所の大学院生である三宅洋平君、今里康二郎君には、シミュレーション実行や可視

化解析、結果の議論にわたり大変助けていただきました。ここに感謝の意を表します。なお、本研究の数値シミュレーションの一部は京都大学生存圏研究所の共同利用研究プロジェクトとして電波科学計算機実験装置（KDK）を用いて行われました。本研究は科学研究費補助金（課題番号 18360405）の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] 國中均、中山宜典、西山和孝、「イオンエンジンによる動力航行」、宇宙工学シリーズ8、コロナ社、3章、2006.
- [2] 石原和臣、「高出力イオンスラスターのビーム軌道計算」、学士論文、東京大学航空宇宙工学、1990.
- [3] 「イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI ツールの研究開発ワークショップ2006 年度報告書」、宇宙航空研究開発機構特別資料、JAXA-SP-06-019、宇宙航空研究開発機構、2007.