

多孔電極イオン抽出系グリッドレット上の電流分布測定

早川 幸男*

Current Distribution on a Two-Grid-Ion-Extraction-System Gridlet

By

Yukio HAYAKAWA *

Abstract: This paper provides measurements which may be used to test numerical models of ion extraction using two multiple-hole grids. A grid set, in which an isolated gridlet was embedded in an accelerator grid, was built to measure ion-impingement current distribution. The gridlet comprised both a barrel and downstream electrodes, electrically isolated from each other and the rest of the accelerator grid. The obtained measurements of ion-impingement currents on the electrodes can be directly compared with numerical predictions and they suggest an idea of possible ion flow. The results are shown as functions of screen and discharge voltages, and a hypothesis was proposed to explain a phenomenon on ion extraction.

Key words: Ion Engine, Ion Thruster, Ion Extraction System, Ion Acceleration System, Multiple-hole, Electrode, Grid, Beamlet, Numerical Simulation, Experiment, Comparison, verification

1. はじめに

イオンスラストで一般に用いられる多孔電極を用いたイオン抽出については、数値シミュレーションによる研究がこれまでに多数実施されてきた [1]。計算機の性能向上と共により精密な結果が得られるようになってはきたが、使用される数値モデルの検証のためには実験との比較が不可欠である。特に電極の磨耗について解析しようとする場合には、最終的には磨耗形状との比較が必要となるが、最初からこれを行なうことは得策ではない。何故ならば、この場合の数値計算はイオン軌道解析（電場解析、電荷交換等を含む）と磨耗・堆積解析の二つの部分を含むが、前者の計算精度が十分高まってから後者に取り組むのが常道と考えられるからである。こうすれば取り敢えずは後者のコードを一行たりとも書くこと無しに前者のコード開発に集中できるし、後者のコード開発をするにしても前者の精度が十分という前提が無ければコードの評価も困難であることが容易に予想できる。

最も基本的な3次元数値シミュレーションでは、計算量を抑えるために多孔イオン抽出電極の中の一組の孔を含む六角柱領域のみを対象とし、周辺は周期境界条件とする（但し、さらに計算量を減らすために領域の対象性を利用したり、あるいは矩形要素のみで計算領域を構成するために六角柱領域を部分的に切り貼りして直方体領域としたりする場合もある。）。実験でこれとほぼ同等な状態を作り出すために7孔電極を使用した。中心孔の周りに6個の孔を配置することにより、中心孔は多孔電極の最外周部を除く殆どの孔とほぼ同等な状態に置かれる。尚、もし最外周孔を含めた解析が可能であれば、より本実験との比較が妥当なものとなる。本実験は加速電極の中心孔を含む六角柱部分「素電極 (gridlet)」に流入するイオン電流を測定するものであり、計算結果との比較は容易である。またカスプ磁場型

* IAT/JAXA

イオンスラストを使用しているため、上流側のプラズマについての情報は比較的容易に推測できる。文献 [2] は同型カスプ磁場型イオンスラスト放電室内のプラズマ電位の測定結果を示している。プラズマ電位は陽極電圧からほぼ 0 V (位置 29)、つまり「スクリーン電位 + 放電電圧」として良い。電子温度については文献 [3] の類型カスプ磁場型イオンスラストの放電室内の測定結果が参考になる。文献 [2] のスラストはバッフルが無いので主陰極からの一次電子の影響が強く、Maxwell 分布とは言いがたいので参考とするのは適当でない。文献 [3] での放電電圧がかなり高いことと、磁場形状が最適化されていないこと (グリッド近傍で磁場が強すぎる) を勘案すれば、本実験時の電子温度は中心軸上でも 4 eV 未満であったと推定するのが妥当と考えられる。プラズマ密度は原理的にはイオン飽和電流から計算できるが、Langmuir プローブの表面積が正確には求まらないので、正確には決まらない。実験値を利用するのは諦めてビームレット電流と合うような密度を数値計算で求める以外に方法は無いであろう。

2. 実験方法

2.1. 実験装置

2.1.1. スラスト

図 1 に実験に使用した 7 孔加速電極の詳細を示す。孔径、電極厚、間隔は、工作の都合上実際のスラストのその約 5 倍とした (表 1)。加速電極の中心孔を含む「素電極」は円筒部と上流面に相当する「円筒電極 (Barrel)」と下流面に相当する「下流側電極」で構成され、互いに及び加速電極の他の部分から電氣的に絶縁されている (隙間にはセラミック系接着剤を充填)。これらへ流入する電流を測定するための電線が加速電極内を貫通している。中心孔を通過するビームレット電流を直接測定する際には、加速電極の下流側に先端に孔の空いた円錐殻状のビーム分離器を設置し、さらに下流にこのビームレットを受けるビームレットターゲットを設置する。イオン抽出電極以外の部分は 14 cm カスプ磁場型イオンスラストを若干改造して使用している。主な改造点はバッフルの追加で、これにより極めて小さい放電電流での動作を可能にしている。尚、文献 [4] とは加速電極の厚みが異なっている。

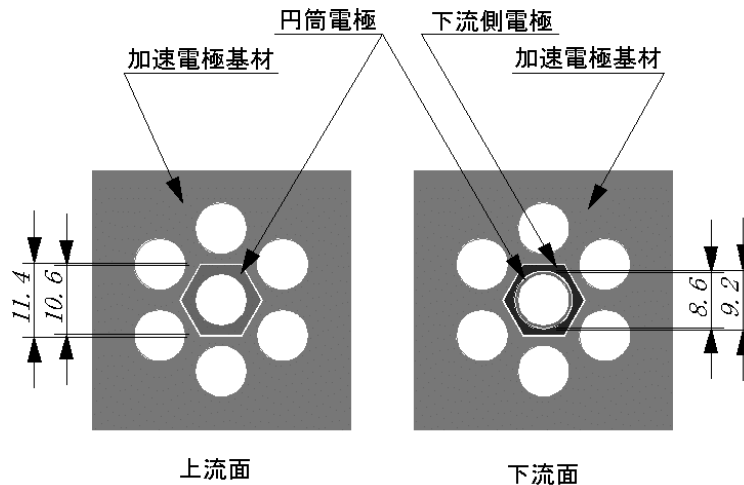


図 1 加速電極詳細図

表 1 電極寸法

スクリーン電極孔径	10 mm
加速電極孔径	8 mm
孔中心間距離	11 mm
スクリーン電極板厚	1.5 mm
加速電極板厚	3.0 mm
電極間距離	3.25 mm

2.1.2. 測定系

測定系を図2に示す。加速電極に埋め込まれた二つの電極はそれぞれDMMを通して加速電極に接続されている。ビーム分離器とビームレットターゲットはDMMを通して接地されている。

2.2. 実験手順

固定した動作条件を表2に示す。測定はスクリーン電位と放電電圧をパラメータとし、真空槽内圧を一定にする条件下で行なった。このため、ビーム電流を変化させるために放電電流を変化させる傍ら、放電電圧を一定にするために、推進剤の主陰極と分配器への配分とヒータ電流を調節した。通常の運転では放電電流が十分大きい(1 A以上)ので、ヒータ通電は起動時以外には不要であるが、この実験では最小で0.1 Aまで絞ったので必要とした。中和器についても同様で、槽内圧をできるだけ下げるために流量を通常より下げ、ヒータに通電した。推進剤にはXeを使用した。流量調整に用いたマスフローコントローラは最大流量10 SCCMのもので、精度は最大流量の2%である。測定を実施したスクリーン電圧と放電電圧の組み合わせを表3に示す。

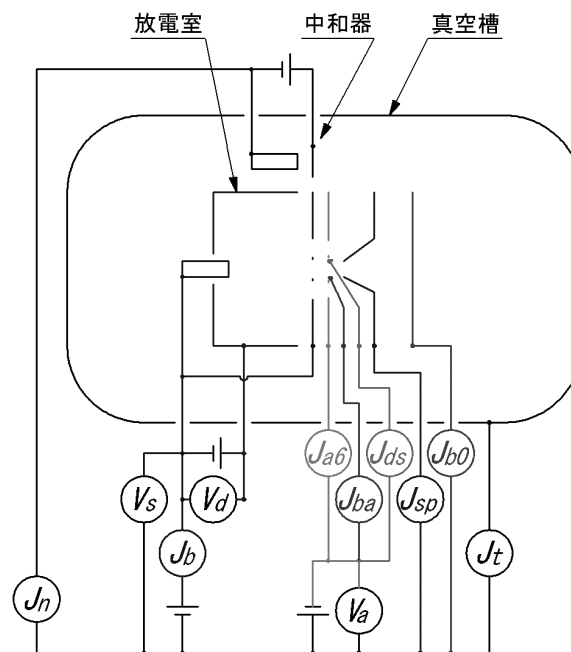


図2 測定系

表2 固定動作条件

推進剤	Xe
加速電極電位 V_a	- 200 V
主陰極キーパ電流	0.5 A
中和器キーパ電流	0.8 A
放電室流量	38 ± 13 mAeq.
中和器流量	21 ± 13 mAeq.

表3 測定実施動作点 (○のついたところ)

スクリーン電位 V_s (V) / 放電電圧 V_d (V)	30	31	32	33
1000	○	○	○	○
1100	○	×	×	○
1200	○	○	○	○

3. 実験結果

紙数の都合でここにすべてのデータを掲載するわけには行かないので、詳細については文献 [5] を参照されたい。

ビーム分離器とビームレットターゲットを使用した測定の結果、中心孔を通るビームレット電流は、7孔すべての合計のほぼ $1/7$ であることが確認できた [5]。これにより、以降の実験ではビーム電流の $1/7$ としてビームレット電流を求めている。

図3は素電極（円筒電極+下流側電極）に流入するイオン電流とビームレット電流の比を示したものである。どの曲線も基本的に中央部がほぼ水平な直線で、両端が上昇する形状を成している。この直線部については、電流を構成するイオンの殆どが電荷交換により生じたものであると仮定すると、何故水平な直線なのかがよく説明できる。即ち、発生する電荷交換イオンの数はおよそ中性原子密度とビームレット電流の積に比例し、この場合中性原子密度はほぼビームレット電流に依らない定数（空間的に均一という意味ではない）なので、電荷交換イオンの発生率とビームレット電流は比例する。左端の上昇はビーム状イオンが発散角の増大により電極に衝突したものであり、右端の上昇はビームレットの径が大きくなったために電極に衝突したものである。

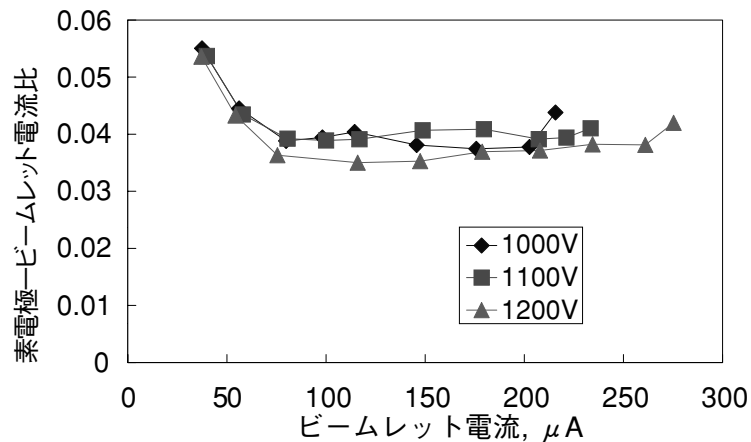


図3 素電極（円筒電極+下流側電極）－ビームレット電流比（放電電圧 = 33 V）

この電流比の内訳を示したものが図4と5である。図3では水平な直線だった部分が図4と5ではそれぞれ右上がりや右下がりの曲線となっていることが判る。この現象は文献 [4] で既に明らかになっていたが、同文献では下流側電極電流は推算値であったのに対し、本実験では実測値である点が異なる。

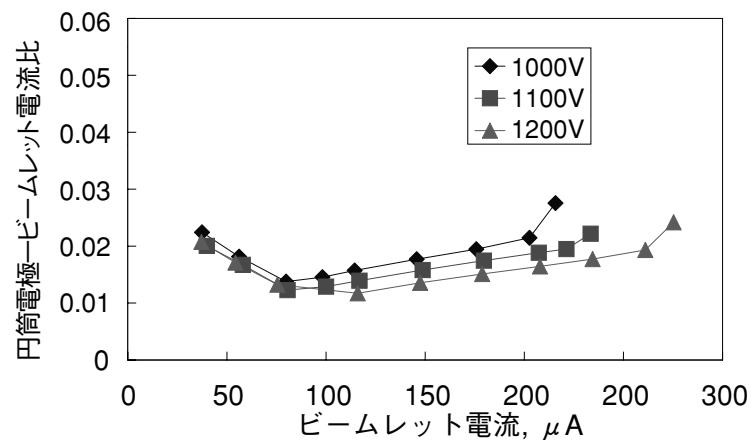


図4 円筒電極－ビームレット電流比（放電電圧 = 33 V）

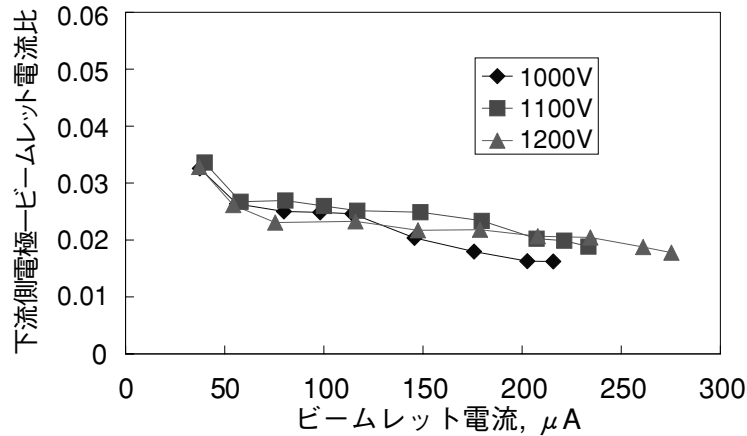


図5 下流側電極-ビームレット電流比 (放電電圧 = 33 V)

イオン電流を評価するのに、図3から5のように縦軸に電流比を採用するのがこの分野での一般的な流儀であるが、ここでは特に数値計算結果との比較をし易くするために、縦軸は電流そのものとする。図4と5を描き直したものが図6と7である。

以上の他にスクリーン電位が1000 Vで放電電圧が30 Vの場合に現れた特異な曲線の例を図8に示す。曲線の一部が不自然に盛り上がっているが、電極を分解再組み立てしても再現性があったので、測定上の問題とは考えにくい。スクリーン電位が1100 Vの場合にも近い形状の曲線が得られたことはあるが、他の放電電圧ではまったく得られなかった。

実験中の真空槽内圧力は 5.3×10^{-4} Pa で、無負荷時の圧力は約 3×10^{-5} Pa であった。いずれも電離真空計の表示値でXeに対する補正は行っていない。

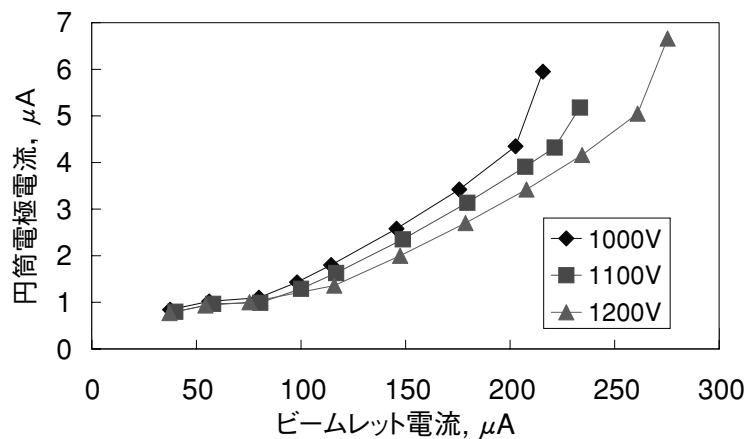


図6 円筒電極電流 (放電電圧 = 33 V)

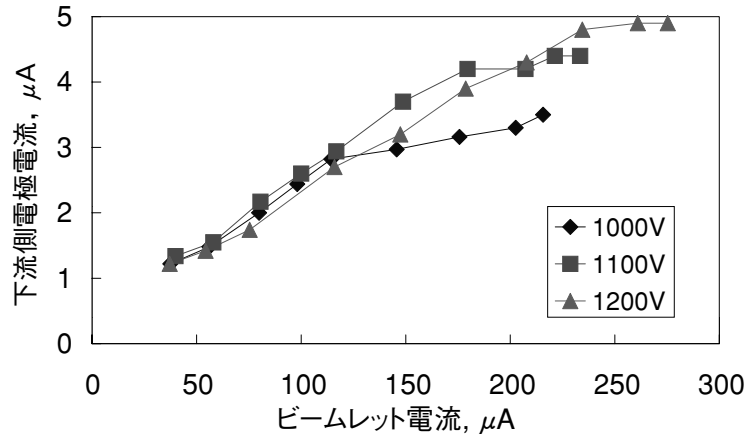


図7 下流側電極電流 (放電電圧 = 33 V)

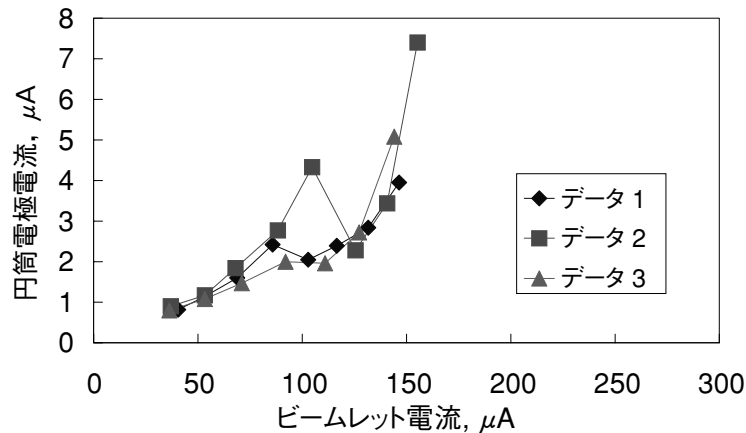


図8 特異な円筒電極電流の例 (スクリーン電圧 = 1000 V, 放電電圧 = 30 V)

4. 考察

図3の曲線の水平部が図4と5では水平になっていないということは、イオン間の衝突を考慮しないモデルでは説明困難であるが、電荷交換イオンにより発生した低速のイオンとビーム状イオンの衝突を考慮することで少なくとも定性的には以下のように説明できる。

仮説：「ビームレット電流がある値以下ではビームレットが収束してその断面径が極小になる部分が現れる。この部分ではビームレットが収束していない部分よりも高い密度で電荷交換イオンが生成される。これによりこの部分で低速イオンとビーム状イオンの衝突周波数が高まり、一部の低速イオンは下流方向への運動量を獲得する。このため運動量を獲得しなかった場合には円筒電極に流入していた筈のイオンが、運動量を獲得したために下流に回り込んで下流側電極に流入する (文献 [5] に説明図あり).」

一部の数値モデルはこの実験と同様の結果を示している [6].

図6は円筒電極電流についての二つの明確な特徴を示している。一つは、スクリーン電圧が高い程電流が少なくなっている点である。これは、スクリーン電圧が高い程ビーム状イオンの速度が上がり、その結果対中性原子との電荷交換衝突断面積が減少するという事実と符合する [7]。もう一つは、スクリーン電圧が高い程ビームレットの径が小さくなっている点である。曲線の右端の傾きが急に変化している近傍でビームレット外周が電極に接している状態にな

っていると考えられるが、スクリーン電位が 1000 V の場合にはビームレット電流が $200 \mu\text{A}$ 前後でこの状態なのに対し、1200 V の場合には $260 \mu\text{A}$ 程度までこの状態になっていない。この領域ではビームレット電流が大きくなる程径が大きくなるので[4]、 $200 \mu\text{A}$ 前後では 1200 V の場合の方が 1000 V の場合より径が小さいと言える。さらにここでは示していないが、放電電圧が高い程ビームレット径が小さくなることも確認できている [5]。放電電圧の僅かな違いによるビーム状イオンの速度の違いは微々たるものであるので、この現象が衝突断面積の違いに因るものとは考えにくい。今のところ、上流側のプラズマ境界面の形状が変化しているものと推定される。

図 7 は下流側電極電流について、スクリーン電位による明確な差異が見られないことを示している。円筒電極電流の場合の様に、イオン速度の違いによる変化が見られてもよさそうであるが、今回の実験では見られなかったと言う外無い。尚、放電電圧も同様に結果に影響しなかった [5]。

図 8 に示した特異な現象の原因については今のところ原因が推定すらできない。

5. 結論

数値計算結果との直接かつ簡便な比較を可能とする実験結果について述べ、以下の事実を示した。

1. ビームレット電流値によって、円筒電極と下流側電極への電流配分比が変わる。
2. あるビームレット電流値に対する円筒電極電流値、およびビームレットが円筒電極に接する場合のビームレット電流値はスクリーン電位と放電電圧の両方に依存する。
3. 下流側電極電流はスクリーン電位にも放電電圧にも特に依存しない。

6. おわりに

実験誤差は不可避であり、仮にある計算結果が実験結果と部分的に良く一致したとしても、それだけで元となる数値モデルがその部分で正しいと言い切ることはできない。こう断言する理由の一つとして、「コード開発者が恣意的な調整や選択によって計算結果を実験結果に合わせてしまう」可能性が挙げられる。この場合、条件が変わればより精度の低い計算結果が得られるかも知れないということは容易に予想でき、長期的に見ればより良い数値モデルの開発に不利益を及ぼす。定量的な比較は勿論重要であるが、実験結果に現れる明確な特徴が計算結果において再現されているかという定性的な比較も劣らず重要である。定量的な比較における差異は実験誤差や衝突断面積等の入力情報の誤差に因る可能性も高いが、定性的な比較における齟齬は数値モデルの欠陥に因る可能性のみが一段と高いと考えられる。

従来の数値モデルは、ビーム状イオンの他に精々電荷交換イオンを取り入れるだけで、これらの相互作用までは考慮していなかった。今回の実験結果はこれでは説明のできない現象があることを示している。今回の実験は、放電室流量に対する推進剤利用効率が最高でも約 5% と極めて低い、実際のスラストとは異なる状態で実施されたので、現実にはこの現象はこれ程には目立たないかも知れない。しかし数値モデルを検証するためには、極端な状態が返って好都合であったとも考えられる。今回の結果を再現できる数値モデルを実際のスラストに適用して、初めてこの現象の重要性が評価できる。

上記の現象はイオン間の衝突を取り込むことで解決できるかもしれないが、磨耗・堆積解析に有効な数値モデルを構築するためにはこれでもまだ不十分と考えられる。今回の実験の範疇だけでも、「スクリーン電位と放電電圧が円筒電極電流の挙動に大きく影響していること」を説明するという要求が数値モデルに課されることになった。従来のモデルでは、放電電圧の僅かな差が大きな違いを生むとは考えにくく、何か新しい機構を取り入れる必要があるように思える。他に眼を向ければ、加速電極孔が非円形に磨耗する現象は、早くとも 2004 年の時点以前には数値モデルによりうまく説明されていない [8] (注：減速電極が非円形に磨耗する現象は容易に説明できる)。これを説明するためには弾性散乱を考慮する必要があるのではないかと考えられている。さらに、放電電圧の変動は一般にある程度は不可避であり、これによるプラズマパラメータの変動が計算結果にどの程度影響するのかも調べる必要があると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 趙孟佑, “イオンスラスタグリッドシミュレーションに関するレビュー”, JAXA-SP-06-019 “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,” pp., 35-46 2007
- [2] Hayakawa, Y., Miyazaki, K., and Kitamura, S., “Measurements of Electron Energy Distributions in an Ion Thruster,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 8, No. 1, pp. 118-126, 1992.
- [3] Hayakawa, Y., Nakamura, Y., Kitamura, S., and Miyazaki, K., “The experimental Investigation on 12cm Ring Cusp Ion Thruster,” *ISTS*, Vol. 1, pp. 97-102, 1986.
- [4] 早川幸男, 大川恭志, 北村正治, “多孔イオン抽出電極がもたらすイオンビームレットの構造について”, 平成 17 年度宇宙輸送シンポジウム, pp.353-356, 2006.
- [5] Hayakawa, Y., “Measurements of Current Distribution on a Two-Grid-Ion-Extraction-System Gridlet,” 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Paper 2006-5003, 2006
- [6] 中野正勝, “イオンエンジンのグリッド損耗評価コードの改良”, JAXA-SP-06-019 “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,” pp., 47-53 2007.
- [7] Rapp, D. and Francis, W. E., “Charge Exchange between Gaseous Ions and Atoms,” *Journal of Chemical Physics*, Vol. 37, No. 11, pp. 2631-2645, 1962.
- [8] Okawa, Y., Hayakawa, Y., and Kitamura, S., “Three-Dimensional Divergence Characteristics of Ion Beamlets in an Ion Thruster,” 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Paper 2004-3785, 2004.