

MUSCAT 技術によるビームイオン軌道解析

八田 真 兎*, 村 中 崇 信*, 細 田 聡 史*, 金 正 浩*, 趙 孟 佑*

Application of MUSCAT Technology for Trajectory Analysis of Ion Beam

By

Shinji HATTA*, Takanobu MURANAKA*, Satoshi HOSODA*,

Jongho KIM* and Mengu CHO*

Abstract: Multi -Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT) is a software under development by Kyushu Institute of Technology (KIT) jointly with JAXA. Its numerical engine is a plasma simulator based on particle method. It includes both Particle Tracking method (PT), which simulates flux of electric charge into surface of spacecraft, and Particle In Cell method (PIC) which simulates distribution of space plasma. In order to simulate erosion of on ion engine grid system, not only simulating spatial structure of electric potential but also simulating the flux of various particles into grid system is necessary. Therefore, techniques of MUSCAT are applicable for grid simulation by expanding simulation of charged particles to that of particles including neutral particles. As the initial phase, we conducted trajectory analysis of ion beam for mono-hole and the numerical result is reported.

Key words: MUSCAT, Charging Analysis, Particle In Cell, Particle Tracking

1. はじめに

プラズマあるいは荷電粒子の集団において、粒子としての振る舞いに着目する場合には粒子シミュレーションを用いることが自然である。粒子シミュレーション特有のノイズを低く抑えるためには、追跡する粒子数を増やさざるを得ず計算コストの増大を招いていたが、計算機能力の飛躍的な向上によって応用範囲が拡大しつつある。現在、九州工業大学と JAXA が共同で開発を進めている汎用宇宙機帯電解析ツール (MUSCAT) は粒子シミュレーション応用の典型的な例である。[1] [2]

粒子シミュレーションには Particle In Cell (PIC), Particle Tracking (PT), 等いくつかの技法がある。いずれの技法においても、1) 計算対象とする空間の電位構造の下での荷電粒子の運動の計算, 2) 与えられた境界条件と空間中の荷電粒子の分布の下で形成される電位構造の計算, の少なくとも 2つの部分を含む。MUSCAT では電位構造を求めるために、デバイ長の短いプラズマに対しては PIC 法を用い、デバイ長が十分長いプラズマを取り扱う場合にはラプラス方程式を解いている。さらに、電荷が衛星表面に流入することによって衛星表面の電位が変化する。これはプラズマシミュレーションの観点からは境界条件の変化に他ならない。この変化を再現するためには衛星表面への電荷流入を評価する必要がある、MUSCAT ではこの計算に PT を用いている。

一方、イオンエンジンのグリッドシステムの損耗シミュレーションにおいても解析対象となる空間の電位構造の再

* Kyushu Institute of Technology

現と、その電位構造の下での荷電粒子の運動の再現は必須である。いま一つ必須の要素として、荷電粒子および中性粒子のグリッド表面への衝突と、衝突による損耗と、損耗によって引き起こされる形状の変化の再現がある。さらに、粒子間衝突も考慮に入れる必要がある。[3][4]

ここで MUSCAT の技術要素とグリッド損耗解析に要求される技術要素を引き比べると、大いに相関関係があることは明らかである。イオンエンジン内部のプラズマのデバイ長（数 $10 \mu\text{m}$ ）はグリッドの代表長（ $0.1 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$ の程度）より十分短いため、MUSCAT で使用している PIC 法が有効である。また、PIC 法によって与えられた電位構造の下で荷電粒子の運動を計算し、グリッドシステムに衝突するまでを追跡するには PT 法が有効である。従って、MUSCAT に使用されている技術を中性粒子を含むプラズマに拡張することによってグリッド解析に適用することが可能である。

以上の内容に付け加え、MUSCAT の開発上の目標として「衛星エンジニアが容易に利用できる GUI の完備」があげられる。この GUI は衛星エンジニアが作成した衛星モデルを自動で数値解析用の等間隔直交格子に変換する機能を備えている（図 1）。数値解析においては現在でも適切な数値解析格子の作成のためにエンジニアによる職人技的な作業が求められる。解析結果が個人の格子作成技量に依存することは望ましくない。MUSCAT において開発した GUI と格子作成機能もまた、適切な変更を加えることによりグリッド損耗解析にも利用可能である（図 2）。[5]

本報告では MUSCAT 技術をグリッド損耗解析に適用するにあたっての第 1 段階としてイオンビームの軌道解析を実施し、その成果と課題を示す。

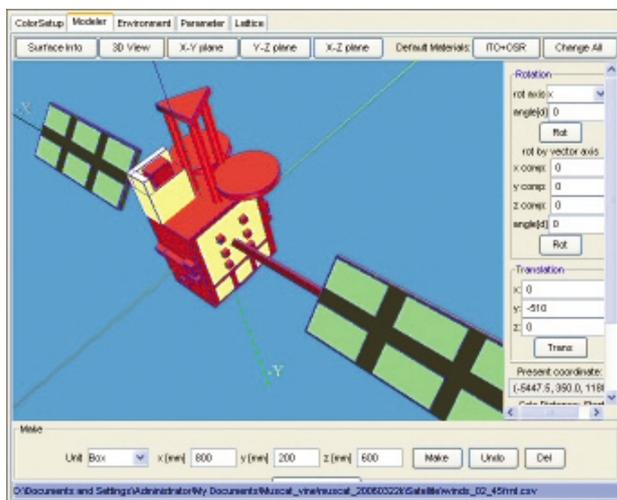


図 1 MUSCAT の GUI の概観

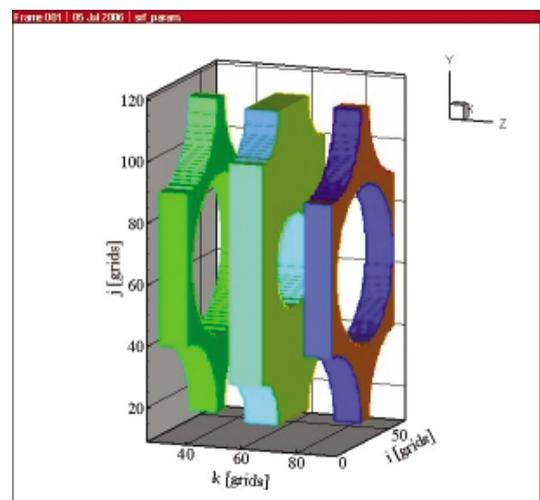


図 2 MUSCAT の GUI によって作成した 3 枚グリッドシステム用計算格子の例

2. 解析モデル並びに解析手法

2.1 解析モデルの概要

イオンエンジンでは多孔状の 2 重あるいは 3 重のグリッドからイオンビームを引き出す。現時点ではスーパーコンピュータをもってしても、その全システムの数値的な再現は計算時間とコストの両面から困難である。そこで計算モデルに含まれる物理現象と幾何形状を、本報告の目的に沿ったかたちで取捨選択する。

2.2 物理モデル

本報告では中性粒子に関する物理現象は一切考慮せず、荷電粒子の運動と空間電位構造の相互作用のみを再現する。中性粒子同士、中性粒子-荷電粒子間の衝突についてはともに平均自由行程がグリッドシステムの代表長より十分長いため、本報告の着目点の範囲内では無衝突と見なすことができるからである。[4][6]

空間電位構造の再現手法としてはイオン、電子の両方を追跡する PIC 法を用いている。非定常状態を厳密に再現す

るためには高速の電子が1グリッドを横切る時間以下を時間進行の進行幅として、定常状態にいたるまでを解き進めなければならないが、定常状態や準定常な状態のみを問題とする限りにおいてはイオンの人工質量比を限りなく小さくすることが可能となり、時間積分のコストを大幅に削減することが可能である。PICで用いられた粒子は物体表面に到達すると衝突反応などに利用すること無く、自動的に消失するよう取り扱っている。

PIC法を導入する際に考慮する必要がある、いまひとつの問題はポアソン方程式の解法である。これにはスペクトル法を用いている。スペクトル法は連立差分方程式を高速フーリエ変換 (FFT) を利用して代数方程式に置き換える方法であり、目下のところ最速の計算法である。複雑な境界条件への対応を整えればグリッド損耗解析においても非常に強力な解法である。[7]

荷電粒子の軌道を追跡し、外部境界への流出やグリッドシステムへの衝突の再現するために、PT法を用いた。この手法ではイオンに人工質量比を用いることはない。また、粒子の運動を逐次的に解き進め、物体表面との衝突量を表面流入電流量という形で評価する。

2.3 解析対象モデル

日本で開発が進められている3枚グリッドシステムを前提とする。また、計算機負荷の観点からビームの軸方向には128、軸に垂直な方向には32グリッドとすることとした。

解析対象の空間をモデル化するにはビームの軸方向と軸に垂直な方向のそれぞれに、どこまでを解析対象空間に含めるかを検討する必要がある。軸に垂直な方向については、本研究では解析対象として2つの幾何形状モデルを選んだ。1つは過去の研究例に倣い1/4孔を2つ含むモデルである。[3]これを「1/4孔モデル」と以下では呼ぶことにする。このモデルはコンパクトであり、計算格子の1グリッドの寸法をデバイ長 ($\approx 40 \mu\text{m}$) の程度に取ることができる。もう一つは単孔を1つと1/4孔を4つ含むモデルである。これを「全孔モデル」と呼ぶことにする。このモデルでは、「1/4孔モデル」の4倍の領域を含むため、1グリッドの寸法をデバイ長の2~3倍とした。次にビームの軸方向についてであるが、スクリーン・グリッドの上流側については「1/4孔モデル」、「全孔モデル」とともにスクリーン・グリッドの上流面から1.6 mm上流までを解析対象とした。下流については「1/4孔モデル」ではディセル・グリッドの下流1.28 mmまで、「全孔モデル」については3.78 mmまでが計算領域に含まれる。以上、要点のみを記述したので他のパラメータを図3に示す。図中右向きが下流であり、かつz方向、上方がy方向、紙面奥向きがx方向である。

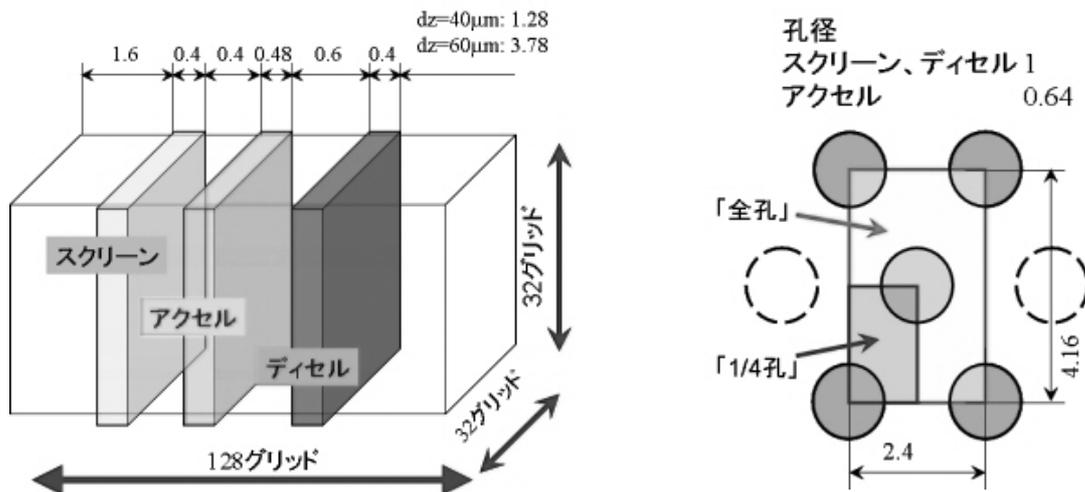


図3 計算領域の概略図 (単位は mm)

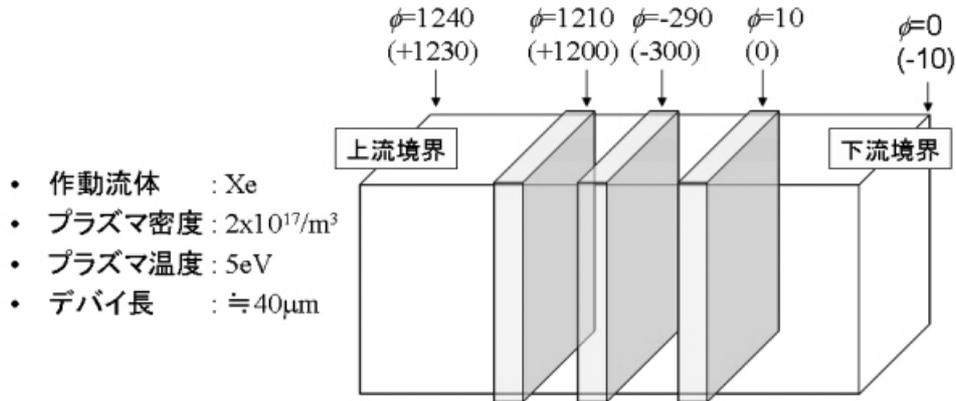


図4 計算パラメータとグリッド電位設定 (括弧内はディセル・グリッドを基準とした値)

次に、各グリッドと上流境界、下流境界の電位設定、他、主要パラメータを図4に示す。下流境界の電位についてはディセル・グリッドと等電位にすることも考えられるが、現実の運用において中和器の電位をディセル電位に比べて -50V 程度に設定することも考慮し、今回は -10V とした。図3並びに図4のその他のパラメータについては幾つかの文献を勘案し、標準的と考えられる値を採用した。[3] [4] [6] 中和電子については、グリッドシステムと上流境界から流出する電子とイオンの個数の差をとり、不足する電子の個数だけ、下流境界から中和電子として流入させた。

定常状態に至るまでのイタレーションの回数については、報告するいずれの計算ケースにおいても $50\sim 100$ ステップとした。これはイオンプラズマ周期の $25\sim 100$ 倍に相当する。計算時間は動作周波数 1.3GHz のIntel®のItanium-2®プロセッサで1ステップ当たり1分程度である。なお、解析に使用したワークステーションは8CPUでの並列計算が可能であるが、並列化作業が間に合わず並列化率 10% 程度に留まっているので、計算能力的には市販のPCと大差は無い。

3. 解析結果と考察

3.1 「1/4孔モデル」

「1/4孔モデル」においては計算領域側面について、擬似対称境界条件を設定した。対称境界条件の下でポアソン方程式をスペクトル法で解く場合にはFFTではなく、本来は高速コサイン変換(FCT)を用いる必要がある。[7] [8] 今回はFFTを用いたまま解けるよう、計算領域をビームの軸に垂直な方向にそれぞれ2倍に拡張してFFTを用いているため厳密には完全な対称境界条件とはならないが、初期の解析としては十分と考えられる。グリッドの空間解像度は $dx = 37.5\ \mu\text{m}$, $dy = 60\ \mu\text{m}$, $dz = 40\ \mu\text{m}$ である。

次に解析結果を示す。図5には等ポテンシャル線を示す。グリッドシステムが形成する電位構造をよく再現し、過去の研究による結果と定性的によく一致している。[3] [4] 一方、中心軸上に 100V 程度電位の高い部分が観察される。これについては十分定常に至っていないか、あるいは下流境界との距離が不十分なためであると考えられる。図6には無次元化した表面電流分布を示す。スクリーン表面のイオン電流に比較して、極めて少ないながらもアクセラ直撃イオンが観察される。これは密度にして3桁、総量としては5桁以上少ない値であるがアクセラ直撃イオンの危険性を考慮に入れば、極めて危険な値である。このイオン電流が生じた原因については「全孔モデル」の結果について記述した後に改めて考察する。

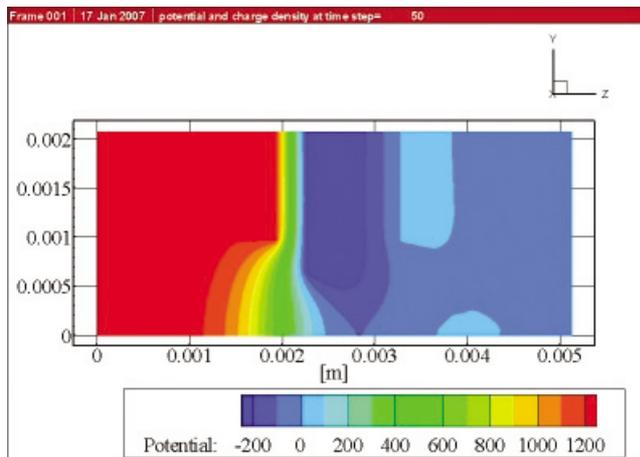


図5 「1/4孔モデル」の等ポテンシャル線

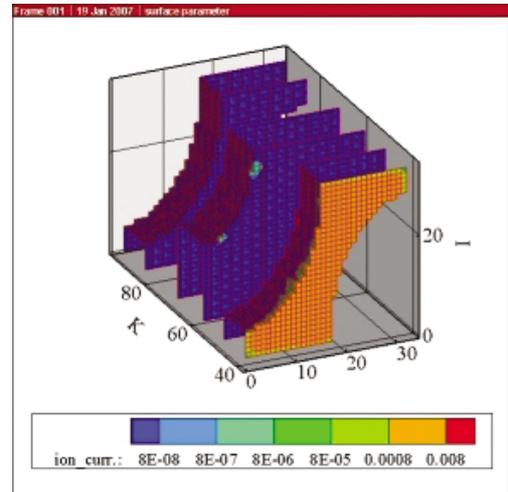
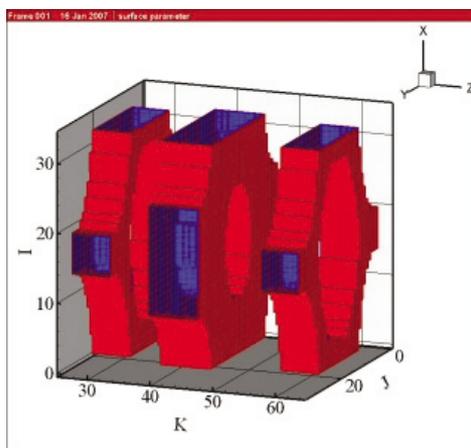


図6 「1/4孔モデル」表面のイオン電流分布
(手前から、スクリーン-アクセラ-ディセルの順。
電流値は $4.85 \times 10^{-5} \text{A}$ で無次元化)

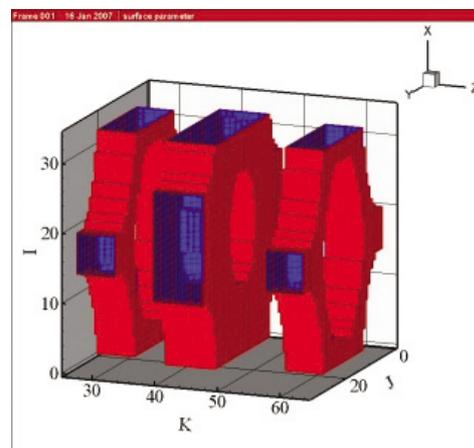
3.2 「全孔モデル」

「全孔モデル」では計算領域側面を周期境界条件とした。この条件設定は、3枚のグリッドの孔が中心軸を共有せず、ずれている場合を再現するのに有効である。そこでスクリーン・グリッドの孔とディセル・グリッドの孔が中心軸を計算領域の中心に設定し、アクセラ・グリッドに関しては a) 同一軸上にあるもの b) $75 \mu\text{m}$ ずれているもの c) $150 \mu\text{m}$ ずれているものの3種類を用意し、比較検討することとした。これらのうち、a, c, 2種類のグリッドの概観を図7に示す。空間解像度は「1/4孔モデル」よりは荒くなり、 $dx = 75 \mu\text{m}$, $dy = 130 \mu\text{m}$, $dz = 60 \mu\text{m}$ である。

次に計算結果を示す。a) ならびに c) の等ポテンシャル線図を3枚のスライスにして図8に示して比較する。図中の最もポテンシャルの低い部分がアクセラ・グリッドを示す。注目すべきは図の右端の等ポテンシャル線である。a) ではイオンビームの影響で孔の中心軸上で等ポテンシャル線が下流側に膨らんでいることが見て取れる。一方、c) では孔の中心軸より図中下方にずれた位置で等ポテンシャル線が下流側に膨らんでいる。これはイオン・オプティクス機能によってアクセラ・グリッドの中心軸が図中上方にずれると、イオンビームが下方に曲げられるためであると考えられる。[9] 同時に、イオンビームの非一様性はこの領域においても残っており、グリッド損耗解析に必要な電荷交換イオン (CEX) の追跡をおこなうに際しては、さらに下流領域を計算領域にふくめることも視野に入れる必要が

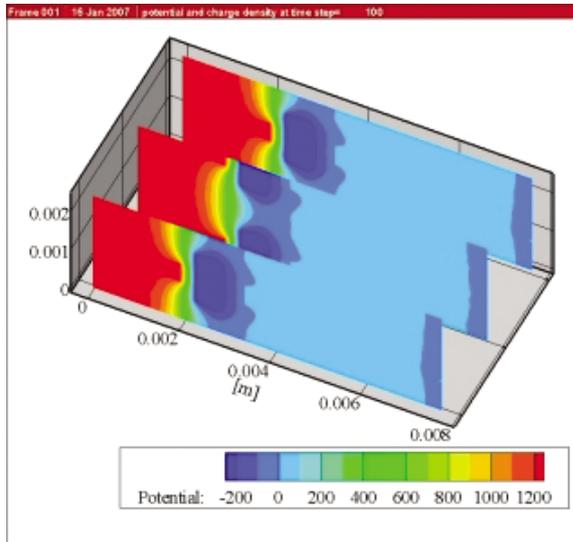


a) 中心軸が同一軸上にあるもの



c) アクセラ・グリッドの軸が図中上方に $150 \mu\text{m}$ ずれているもの

図7 グリッドの概観



a) 軸が一致しているもの

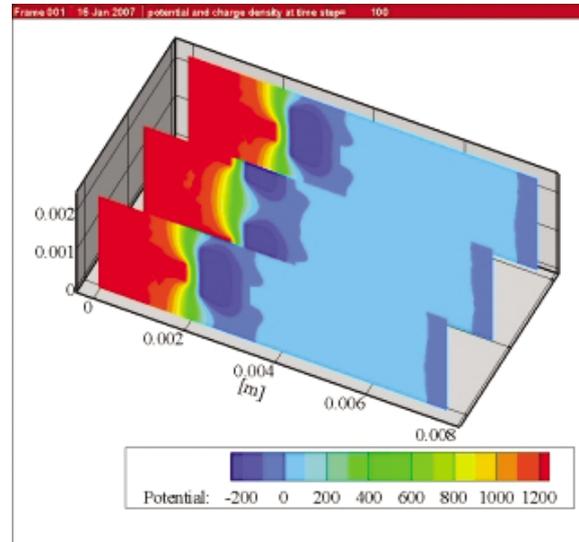
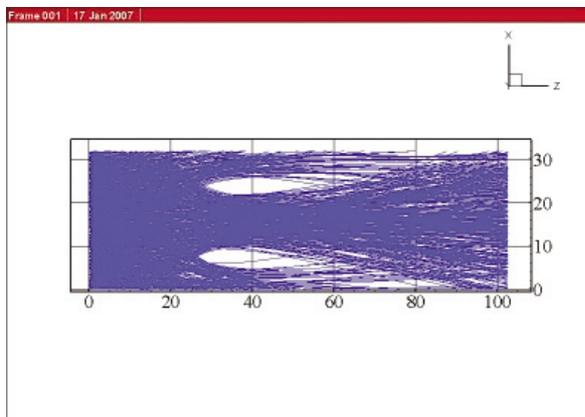
c) アクセル・グリッドの軸が図中上方に 150 μm ずれているもの

図 8 等ポテンシャル線図

あることを示唆している。

ビームイオンの軌道の追跡結果を図9に示す。図示したビームイオンは約1000個であり、これは全追跡イオンの1/1000に相当する。ここにおいてもイオン・オプティクスの効果によってビームが偏向していることが明確に見て取れる。また、c)において丸枠で囲んだ部分ではアクセル・グリッドを直撃する軌道が明確に観察される。これの最大の原因はアクセル・グリッドの中心軸を150 μm と大きくずらし過ぎたためと考えられる。

次に、a), b), c)の3ケースについてイオン電流分布と引き出し電流を図10に示す。図中でグリッド孔が楕円形に表示されているが、これは座標系を計算空間のI-J-K座標に取ったためであり、物理空間では円形である。また、図6と同様に、電流分布値は $4.85 \times 10^{-5} \text{ A}$ で規格化されている。a), b), c)のいずれにおいてもアクセル・グリッドを直撃するイオン電流が確認できる。スクリーン・グリッドに流入する電流値に対する、アクセル・グリッドに流入する電流値の比率は、「1/4孔モデル」の場合と比較すると「全孔モデル」のほうが1桁程度大きいことが見て取れる。この原因の1つは空間解像度の問題と考えられる。この問題には、空間解像度が低下することによってグリッドに衝突する粒子が単純に幾何学的に不正確に見積もられるという問題、デバイ長よりも大きな空間解像度を設定したこと



a) 軸が一致しているもの

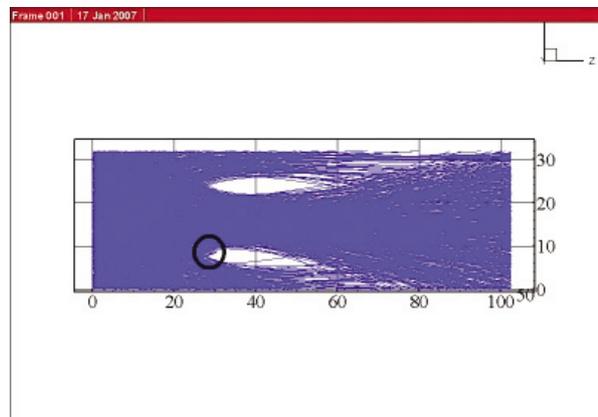
c) アクセル・グリッドの軸が図中上方に 150 μm ずれているもの

図 9 イオンビーム軌道の追跡結果

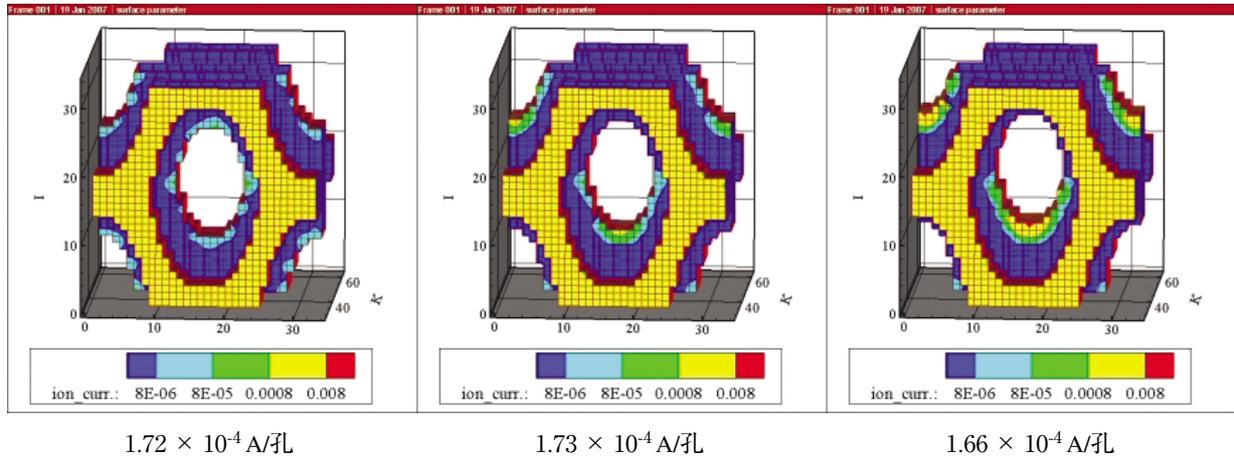


図 10 表面イオン電流分布 各図ともグリッドは紙面手前からスクリーン-アクセル-ディセルの順
 左から a) 中心軸が一致, b) アクセル・グリッド中心軸が上方に 75mm 移動, c) 同, 150mm 移動
 図の下の数字は 1 孔当たりのビーム引き出し電流

によって、空間電位構造が不正確に再現されるという問題、さらに CFL 値を固定しているために、空間解像度の低下がそのまま時間解像度の低下に結びつくという 3 つの問題が含まれる。この問題を解決するには、過去の研究例で採用されているように、空間解像度をデバイ長以下あるいはデバイ長の 1/2 程度まで向上させる必要がある。もう一つの可能性としては不適切なグリッド設計が原因として考えられる。しかしながら、引き出しビーム電流量と図 4 で示した計算パラメータから得られる規格化パービアンスは $\approx 1 \times 10^{-9} \text{ A/V}^{1.5}$ に過ぎず、アクセル上流面にイオンが直撃するパービアンス・リミットの状態ではない。[6] [9] [10]

ここで先に述べた「1/4 孔モデル」におけるアクセル直撃電流の原因について考察する。このモデルでは「全孔モデル」の a) と設定条件は全く同じであるにもかかわらず、スクリーン・グリッド上流面のイオン電流量に対するアクセル・グリッド上流面のイオン電流量の割合は小さかった。「1/4 孔モデル」と「全孔モデル」の a) の相違は解像度と下流境界までの距離である。アクセル・グリッドの大きな加速電位を考えると、下流境界からの情報がスクリーン付近の電位構造に影響を与えることは考えがたく、大きなアクセル直撃電流が生じた最大の原因は解像度の問題と考えられる。

最後に今回のパラメータ設定での 1 孔あたりの引き出し電流値は飽和電流値および空間電荷制限電流値から計算すると $2.3 \times 10^{-4} \text{ A}$ 程度と推定される。図 10 に示した引き出し電流値はこれよりも 25% ほど小さい。この原因については解像度の不足、十分定常に達していない、上流境界の影響などを検討しているが、結論は下せていない。

4. まとめ

JAXA からの受託研究として九州工業大学で開発中の汎用宇宙機帯電解析ツール (MUSCAT) のプラズマ解析技術を用いて、イオンエンジンのグリッドシステムから引き出されるイオンビームの軌道解析を実行した。空間電位構造の解析に PIC 法を用い、イオンビーム軌道の追跡には PT 法を用いた。また、ポアソン方程式の解くためにスペクトル法を用いた。

解析対象には日本で採用が進んでいる 3 重グリッドシステムを選んだ。また、空間解像度をデバイ長程度とした「1/4 孔モデル」と、1 孔を全て含む一方で空間解像度を犠牲にした「全孔モデル」の 2 種類を選定した。「全孔モデル」にはアクセル・グリッドの中心軸をずらしたモデルも作成した。

計算の結果、以下の項目が明らかになった。(1) 計算時間的には、今回用いた手法は大規模な計算にも十分適用可能である。(2) アクセル・グリッドの中心軸をずらした場合のイオン・オプティクス効果が明らかに再現された。(3) 引き出し電流値は理論解析的な予想値よりも 25% 程度低く見積もられた。(4) アクセル・グリッドを直撃するイオン電流の主な原因は低い空間解像度にある。(5) 上流境界条件、下流境界条件のさらなる検討が必要。(6) 定常状

態を自動で判断するアルゴリズムの追加は必須である。

上記の内容は、MUSCAT 技術を JIEDI ツールの開発に適用した場合に、初期に予想される問題点の多くを含んでおり、本報告の目標は達成できたものと考えている。

最後になるが、MUSCAT 開発プロジェクトにおいては JAXA/総合技術研究本部、JAXA/情報・計算工学センター、JAXA/宇宙科学研究本部、国立極地研究所（NIPR）、情報通信研究機構（NICT）から多大なるご助力を頂いている。ここに深甚の感謝を申し述べる。

参 考 文 献

- [1] Hatta, S., Muranaka, T., Hosoda, S., Kim, J., Cho, M., Ueda, H., Koga, K., Goka, T., “Development status of Multi-utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT),” Proc. 56th International Astronautical Congress, Fukuoka, Japan, 16-21 October 2005.
- [2] Muranaka, T., Hatta, S., Hosoda, S., Kim, J., Cho, M., Ueda, H., Koga, K., Goka, T., “Recent Progress of Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT),” AIAA-2006-0408, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA, 9-12 January 2006.
- [3] Wang, J., Polk, J., Brophy, J. and Katz, I., “Three-Dimensional Particle Simulations of Ion-Optics Plasma Flow and Grid Erosion,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No6, pp.1192-1199.
- [4] 中野正勝, 荒川義博, 「イオンエンジンのグリッド耐久性性能計算」, 日本航空宇宙学会論文集, 第 48 卷, 第 555 号, 2004 年 4 月, pp.111-117.
- [5] Kim, J., Hatta, S., Muranaka, T., Hosoda, S., Cho, M., Ueda, H.O., Koga, K. and Goka, T., “Development of MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool): Part of GUI Spacecraft Modeling,” ISTS 2006-r-2-20, Proceedings of 25th International Symposium on Space Technology and Science, June 4th-8th, 2006, Kanazawa, Japan.
- [6] 荒川義博 監修, 國中均, 中山宜典, 西山和孝 著, 「イオンエンジンによる動力航行」, コロナ社, 2006 年, pp.66-67.
- [7] 石岡圭一 著, 「スペクトル法による数値計算入門」, 東京大学出版会, 2004 年, pp.1-7.
- [8] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., and Flannery, B.P., 著, 丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠 訳, 「NUMERICAL RECIPES in C (日本語版)」, 技術評論社, 1998 年.
- [9] 石川順三 著, 「イオン源工学」, アイオニクス株式会社, 昭和 61 年, pp.177-189.
- [10] 栗木恭一, 荒川義博 編, 「電気推進ロケット入門」, 東京大学出版会, 2003 年, pp.103-109.