

粒子法によるイオンエンジングリッド損耗解析

宮坂 武志*, 安里 勝雄*, 小林 勉*, 柴田 悠基*

Analyses of Grid Erosion for an Ion Engine Using Particle Simulations

By

Takeshi MIYASAKA*, Katuo ASATO*, Tsutomu KOBAYASHI*, and Yuuki SHIBATA*

Abstract : PIC codes are suitable to evaluate numerical models for JIEDI tools. We have developed a hybrid-PIC code taking account of the charge exchange ions. In the present study, for the purpose of analyzing more realistic flows, the code was extended to allow elastic scattering ions and neutrals and to treat electrons as particles. Using the full-PIC code, we performed 3-dimensional analyses of the standard problem derived from the experiments using the uniform upstream and downstream conditions. As a result, the validity of the code was basically confirmed by the evaluation of energy flux distribution to the accelerator grid and the comparison between the results of ion-impingements current and the experiments.

Key words : Electric Propulsion, Ion Engine, Particle Simulation, Grid Erosion, JIEDI

1. はじめに

近年のイオンエンジンミッションの長期間化に伴い、実時間で耐試験に代わる数値解析による耐久評価の必要性が高まってきており、イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI(JAXA Ion Engine Development Initiatives)ツールの研究開発が開始された[1]。その実用性を考慮すれば、耐久認定用ツールに最も要求される点として評価精度に加えてその迅速性が挙げられる。イオンエンジンの解析において、これまでに様々なモデルを適用したコードが用いられてきたが[2-11]、グリッド損耗を迅速かつ十分な精度で捉えられてきたものとして、イオンビームに Flux-tube(FT)法を適用し電子分布を Boltzmann 分布から求める中野らによって開発された解析コードを挙げることができる[6, 7]。そこで、現在 JIEDI ツールはこの”中野コード”を基に開発が進められている。しかし、コードはイオン、電子ともに粒子としてではなく、流れ・分布をモデル化して扱うため、上流シース領域、下流中和領域において単純化された条件を適用することになる。特に、大川らの2次元解析[8]から示唆されるように完全に Maxwell 分布に従っていないことが予想される上流シース領域が解析結果へ与える影響は無視できない可能性が考えられ、粒子レベルの解析による境界条件、電子モデル評価が重要になってくる。したがって、Flux-tube, Boltzmann 分布の適用によるモデル化によって定量性が重視される損耗解析へ与える影響・信頼性の評価を実施することは、ツール開発過程で必要な要素であるといえる。

我々のグループでは、これらの評価についてモデル化の少ない粒子コードを用いて行うことを目的にコード開発・解析を進めている。イオン・電子ともに粒子として扱うコードとしては Full-PIC コードが挙げられる。しかし、これまでのイオンエンジン解析では、イオン-電子間の質量の大きな違いから、電子は Boltzmann 分布から求める Hybrid-PIC コードが主であり、Full-PIC 法を用いてイオンエンジン解析が行われた例は先に述べた大川らによる2次元解析を含め非常に少なく、3次元解析に到ってはほとんど行われていないのが現状である[3, 8, 9]。

*Gifu University

そこで、我々は、3次元 Full-PIC コードによる JIEDI ツールの最終的な精度検証及び上流シース、下流中和領域における境界条件等の提案を 2010 年までに行うことを目標に、Full-PIC コードの開発・解析を開始した。本年度ではまず 3次元 Full-PIC コード本体の開発を行い、早川によって行われた実験[10]の条件下で解析を行うことで、コードの妥当性の検証を試みた。参照する実験は推進剤利用効率が低くアクセラグリッド電流の挙動が明確に観察できることから、損耗評価コードの検証として適しているといえる。また、第一段階として計算負荷を低減する目的で電子質量をイオン質量と等しく設定し、基本的な妥当性評価を行っている。評価は、アクセラグリッド電流/ビーム電流比、アクセラグリッド下流面へのイオン衝突分布について行われた。また、これらの解析は異なる中和電子条件について行われ、中和電子条件の設定の影響についても調べられた。グリッド面衝突 2次元分布を捉えるためには 3次元コードが不可欠であるが、本解析の様に Full-PIC コードを用いて行った例はほとんど報告されておらず、後述するように実験と同様な分布が得られたことは、今年度の意義のある成果として挙げられる。

最後に本報告の概要を記す。本報告では、3次元 Full-PIC コードを作成し、その妥当性評価のために行った標準問題解析)の結果について報告する。本解析で用いた標準問題は、早川の実験結果[10]を基に設定されたものである。本コードでは、まず DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)法によって中性粒子分布を求め、得られた中性粒子分布に対して Full-PIC 法によるイオン・電子運動および中性粒子-イオン間の電荷交換・弾性衝突解析を行うことでアクセラグリッドに衝突するイオン・中性粒子を評価している。

2. 数値解析法

本解析コードは、中性粒子、イオンおよび電子をすべて粒子として扱っている。しかし、本解析条件である標準問題では推進剤利用効率が低いことから[10]、中性粒子密度がイオン・電子の密度に比べ 3桁程度高くなっている。したがって、イオンビーム解析と同時に中性粒子運動を扱うには非常に多くのテスト粒子が必要で計算時間が膨大になって現実的でない。そこで、本解析ではまず中性粒子運動のみを解析し、その結果から得られた中性粒子密度分布を用いてイオンビーム解析を行っている。これらの計算について収束解を求めるまでの流れを図 1 のフローチャートにまとめている。収束解が求められた後、引き続きグリッド衝突粒子のサンプル収集のための解析が行われる。以下に本解析法の詳細を述べる。

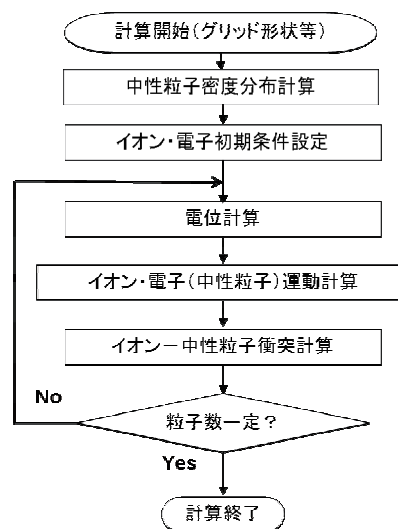


図 1 本解析の定常解取得までのフローチャート

2.1. 計算領域

本解析で用いた3次元計算領域及び解析条件の概略を図2に示す。本解析で扱う標準問題は、キセノンを推進剤とする2枚グリッドのイオンエンジンを想定している[10, 11]。本解析ではすべての計算を通じグリッド形状は初期のまま固定されているが、今後の損耗進行を考慮した解析時の複雑なグリッド形状に対応する目的で、直交格子を採用している。そこで、長方領域で対称境界条件が与えられる最も小さなx-y面の計算領域として図2(a)に示す実線の領域を用いている。ただし、電位解析についてはFEM法による解析のし易さを優先して破線で囲まれた2倍の大きさの領域で行っている。また、上流境界位置、下流境界位置の影響を減らすため、大きな領域を設定している。また、波線の領域の計算格子は、 $x \times y \times z = 22 \times 39 \times 160$ としている。x-y面の格子は等間隔に配置されているが、z方向には放電室および中和領域におけるデバイ長を基準に不等間隔に設定されている。上流部の格子間隔 $\Delta z = 0.13 \text{ mm}$ は本解析条件中の最小のデバイ長 $(\lambda_{D,p})_{\min} (= 0.10 \text{ mm})$ 程度であり、下流部は $\Delta z = 0.40 \text{ mm}$ と $(\lambda_{D,\text{exit}})_{\min} (= 0.75 \text{ mm})$ よりも短く設定されている(図3参照)。

2.2. 中性粒子解析

中性粒子運動解析はDSMC法を用いて行われた。本解析での計算条件下ではクヌーセン数がすべての領域で十分に大きいことから衝突は考慮していない。中性粒子密度は、以下の3つの解析から得られた密度を足し合わせるにより求められている：

- (1) 放電室からの中性粒子流入：放電室から計算領域へ流入する中性粒子に関する解析。本解析では、上流領域に数密度 1.6×10^{19} のMaxwell分布を設定し解析を行った。
- (2) スクリーニンググリッドからの中性粒子放出：スクリーングリッド上流面への衝突イオン流束に相当する中性粒子流束をグリッド表面から放出させ解析を行った。
- (3) 残留中性粒子の流入：下流面から流入するチャンバー内残留中性粒子に関する解析。実験[10]の真空槽内圧力に相当する中性粒子密度のMaxwell分布を下流領域に設定し解析を行った。

その他の境界条件としては、yの上方境界を除く対称面では鏡面反射条件を与え、グリッド面にはグリッド温度に対応した拡散反射条件を与えている。yの上方境界面では、対称線Cに対する対称条件を適用している。

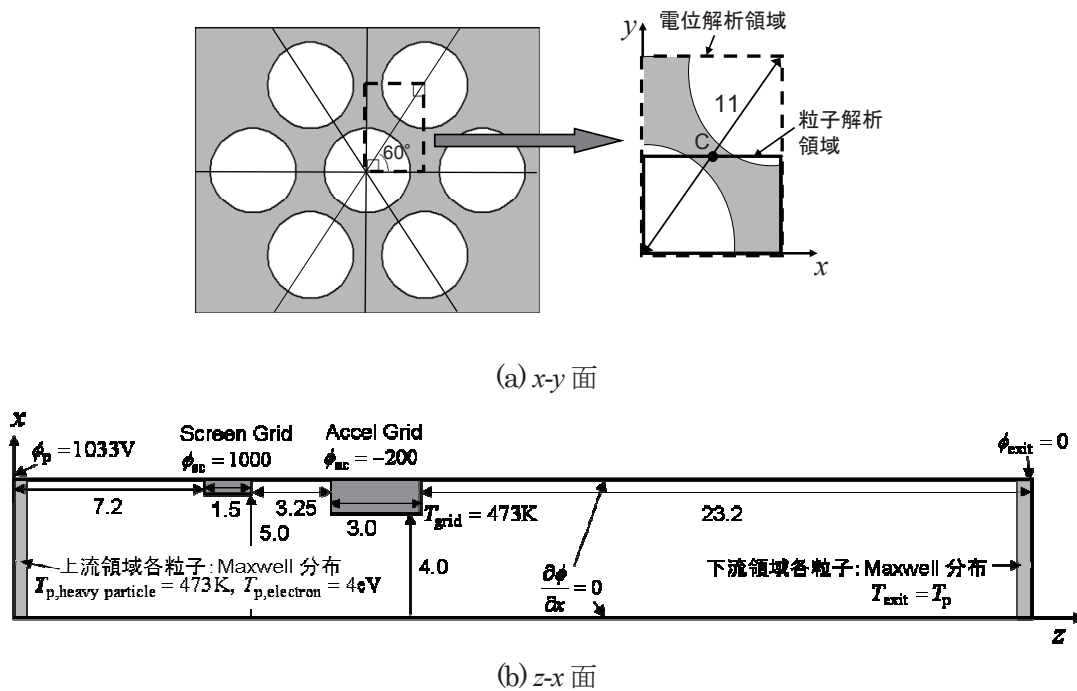


図2 計算領域と解析条件

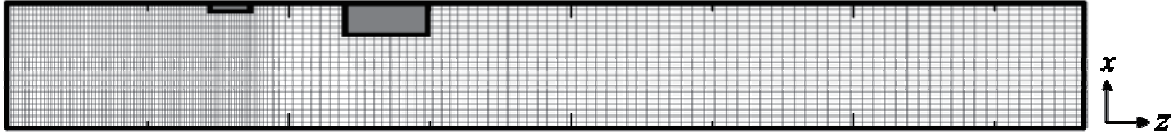


図3 計算格子 (z-x 面)

2.3. イオンビーム解析

2.3.1. PIC 法による解析

電子及びイオンの運動はPIC法を用いて解析されている[12]. 電子及びイオンのテスト粒子はそれぞれ運動方程式に従って運動させている. 本解析は3次元解析のため計算時間が膨大になることから, 上述したようにデバイ長を基準に可能な限り広い格子間隔を設定し, 時間間隔もその格子間隔を基に決定している. そのため計算時間強い負荷をかけない程度に時間精度を高める目的で時間積分は, 通常PIC法に用いられる leap-frog 法ではなく4次精度である Runge-Kutta-Gill 法を用いて行っている. ここで, 計算時間短縮のため電子質量はイオン質量と等しいとした. 本コードは固定されたグリッド形状に対して定常場を求めるものであることから質量比を1としているが[3], 今後質量比を変えた場合の検討が必要であると考えている.

上流領域において電子及びイオンを一樣に Maxwell 分布で与えている. ここで, 電子とイオンの数密度は等しく, 設定したイオンビーム電流が得られるように決定している. 下流領域での中和電子密度も上流領域と同様に一樣に Maxwell 分布で与えている. 後述するように本解析ではこの中和電子密度を3つの異なる評価法から設定し, その影響を評価している.

各格子点における電位 ϕ は次の Poisson 式を FEM 法によって解くことにより求めている:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e). \quad (1)$$

ここで, n_i , n_e はそれぞれ各格子点におけるイオン, 電子の数密度を表している. 要素は1次四面体要素を採用しており, 2次精度相当以上の空間精度が得られているが, 今後はより定量的な評価を行うために計算時間を考慮しながら更なる高次要素の導入の検討を行う必要があるものと考えている. 各グリッド上および流入面では図2に与える様に電位を固定して与えている. 下流境界では, 中和電子を一樣に与えるために電位を0と設定している.

また, 時間間隔 Δt はイオン速度と格子間隔から決定しているが, 本解析で用いられた $\Delta t = 1.3 \times 10^{-8}$ s は本解析条件におけるプラズマ周波数に関する制限条件 $\Delta t \cdot \omega_{p, \max} = 0.22 < 1$ を満たすことが確かめられている.

2.3.2. イオン-中性粒子衝突

中性粒子とイオンとの電荷交換による電荷交換計算は PIC 法で計算されるテストイオン粒子に対して行われる. 先に述べたように, 本解析では中性粒子は各セル上での密度の形で与えられているので, 完全な粒子衝突モデルではないが, 以下に示すようなモンテカルロ的に各イオン粒子に対する衝突判定を乱数を用いて行っている:

$$P_{\text{CEX}} = n_n v \sigma_{\text{CEX}} \Delta t, \quad P_{\text{ELS}} = n_n v \sigma_{\text{ELS}} \Delta t. \quad (2)$$

ここで, σ_{CEX} , σ_{ELS} はそれぞれ電荷交換衝突断面積, 弾性衝突断面積を, v は相対速度を表す. これらの式において, 簡単のため中性粒子速度は0とおいている.

セル内の各イオン粒子に関する乱数 R に対して、衝突は下記のように判断される：

$$\begin{aligned} 0 \leq R \leq P_{\text{CEX}} \text{ の場合} & : \text{電荷交換衝突} \\ P_{\text{CEX}} < R \leq P_{\text{CEX}} + P_{\text{ELS}} \text{ の場合} & : \text{弾性衝突} \\ P_{\text{CEX}} + P_{\text{ELS}} < R \leq 1 \text{ の場合} & : \text{衝突無し} \end{aligned}$$

ここで、衝突により生成された電荷交換イオンの初速は0としている。また、電荷交換、弾性衝突が行われた場合には、衝突イオン位置にテスト中性粒子を加えている。これらのテスト中性粒子は、背景の中性粒子と異なり、イオン・電子の場合と同様に粒子的に運動が追跡されている。図1のフローチャートで粒子運動にイオン、電子に加えて示されている「中性粒子」とはこの粒子のことを指している。この粒子の初速は衝突前のイオン速度と同じに与えられている。

3. 解析結果

3.1 中性粒子解析結果

まず、中性粒子解析の結果得られた $y = 0$ 面での中性粒子密度分布を図4に示す。本解析では当初、チャンバ一内残留中性粒子について、(i)残留中性粒子密度を計算領域に一律に加えた場合、(ii)本解析の様に下流領域の密度として与えた場合、(iii)考慮しない場合、の3ケースの密度分布の違いがグリッド衝突イオン分布へ与える影響を評価することを念頭において、前章で述べたような(1)から(3)から得られる3つの解析結果を足し合わせる方法を採用した。しかし、本解析で用いたグリッド形状は、例えば昨年度の報告[14]で扱った Muses-C タイプと比べてその開口比が大きいことから中性粒子密度分布へ及ぼす影響が小さく下流領域の密度は上流領域の1桁程度しか低下していないことに加え、上流領域の中性密度条件自体が大きく、下流境界における残留中性粒子による密度増加は4%程度に留まった。そこで、本報告のイオンビーム解析は(ii)の1ケースのみについて行われた。ただし、(ii)のように設定した場合、残留中性粒子のみによる分布は、放電室中性粒子による分布と同様にグリッド形状の影響を受けている結果が捉えられており、Muses-C のような開口比のグリッドの場合においては、より定量的なグリッド損耗評価のためには、残留中性粒子密度を一律に加えるのではなく、(ii)の様な扱いをすることでより実際の分布を得る必要があると考えている。

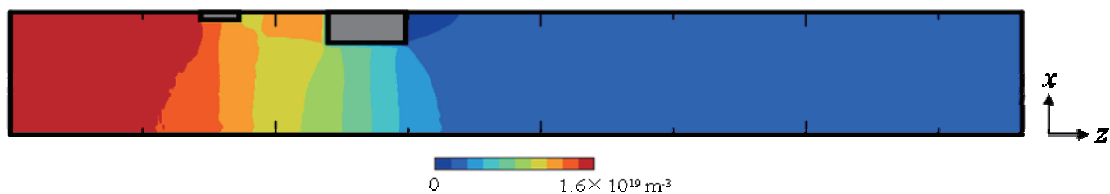


図4 中性粒子数密度分布 ($J_b=100\mu\text{A}$ 解析用)

3.2 イオンビーム解析結果

3.2.1 中和電子条件依存性 [$J_b=100\mu\text{A}$]

まず、上記の中性粒子密度分布を用いて行われたイオンビーム電流 J_b が $100\mu\text{A}$ の場合のビーム解析結果について検討する。下流領域で設定する中和電子密度は、流出面におけるイオン密度分布を平均して求められた。このイオン密度分布は流出面で一様ではないため、どのように平均を評価するかによって得られる値は異なってくる。本解析では、この中和電子密度が与える影響を評価するため表1に示すような3つの評価方法を用い、各評価法から得られた3つの異なる電子密度を用いて解析を行った。

表 1 下流領域電子数密度条件 ($J_b=100\mu\text{A}$)

Case	(a)	(b)	(c)
導出指針	下流面イオン密度最大値の半値までの領域で平均	下流面イオン密度最大値の1/10値までの領域で平均	下流面すべての領域で平均
流出領域電子密度	$8.9 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	$6.2 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	$3.3 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$

イオンビーム電流値により計算時間は異なるが、 $J_b=100 \mu\text{A}$ の場合には CPU Intel®Xeon®3.0GHz で 23000 step まで解析し約 53 時間を要した。ここで、定常解が得られるのは 3000 step 程度である。残りの step は、アクセラグリッドへのテスト粒子の衝突サンプル収集に用いられたものである。

まず、Case (a) の場合の解析結果を図 5 から図 7 に示す。図 4 には $y=0$ の面上の電位の z - x 面分布を、図 5、図 6 にはそれぞれイオンおよび電子分布を示す。図 4 においてアクセラグリッド下流領域で電位の高いところが確認できる。図 5 からは、黒で表されるイオンビームが本条件下ではアクセラグリッドに直接衝突していない様子が確認できる。また、電荷交換イオンは主にスクリーングリッド下流以降の領域で存在しているのに対し、弾性衝突したイオンは上流領域においても多く現れている。図 6 の電子分布図から、イオンビーム放出面がスクリーングリッド近傍に存在している様子が明確に確認できる。また、中和電子は電位分布に応じて分布している様子が捉えられている。これらの結果は、上・下流領域で Maxwell 分布を仮定する Hybrid コードにおいて、電子を Boltzmann 分布で与えていることの妥当性を示している。

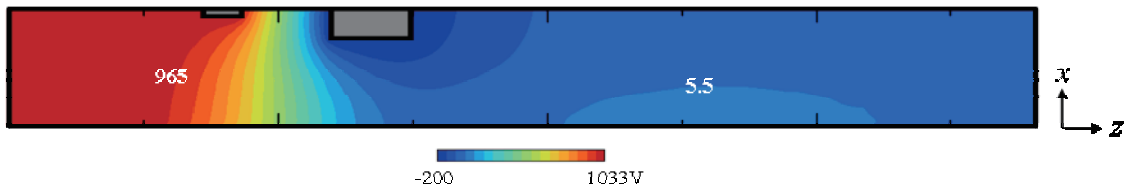


図 5 電位分布 ($J_b=100\mu\text{A}$, Case (a))

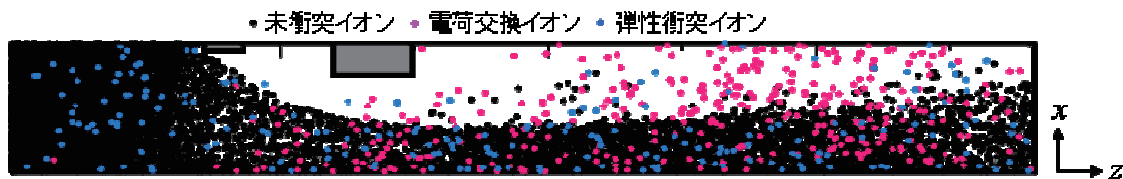


図 6 イオン分布 ($J_b=100\mu\text{A}$, Case (a))

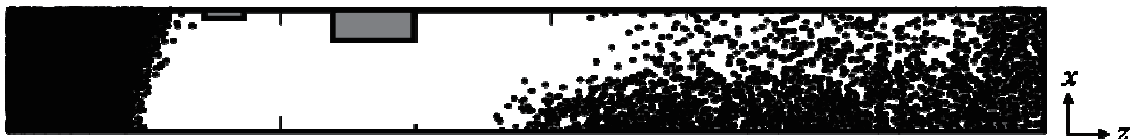


図 7 電子分布 ($J_b=100\mu\text{A}$, Case (a))

次に、アクセラグリッドに衝突するイオン流束へ与える下流中和電子密度の影響について評価を行った。図8から図10には、作成した本解析コードの3次元性についての妥当性の確認を主目的として、2枚グリッドの場合に最も3次元性が強く表れるグリッド下流面へのイオン流束分布を示した。この図には中和電子条件としてCase (a)とCase (c)の2つを用いた場合の結果が示されている。これら2つのケースでカラーバーは共通のものが用いられている。Case (a)の場合には、作動後のグリッド面に観察されるPits&Groovesの損耗パターンに似た分布が観察できた。しかし、中和電子密度の低いCase (c)の場合には緩やかな分布のみが確認できた。次にグリッド下流面の損耗について定性的な評価を行った。損耗の定量評価にはスパッタリング率、再付着率等が必要であるが、これらの詳細な評価式については百武らの研究[13]が現在進行中である。また、図9に示す下流面への衝突イオン粒子のエネルギー分布ではどのケースにおいても130eV程度以上の粒子がほとんどであることから、コードの基本的な妥当性評価を主目的としている本報告では、損耗率がエネルギー流束に比例するものとしてエ

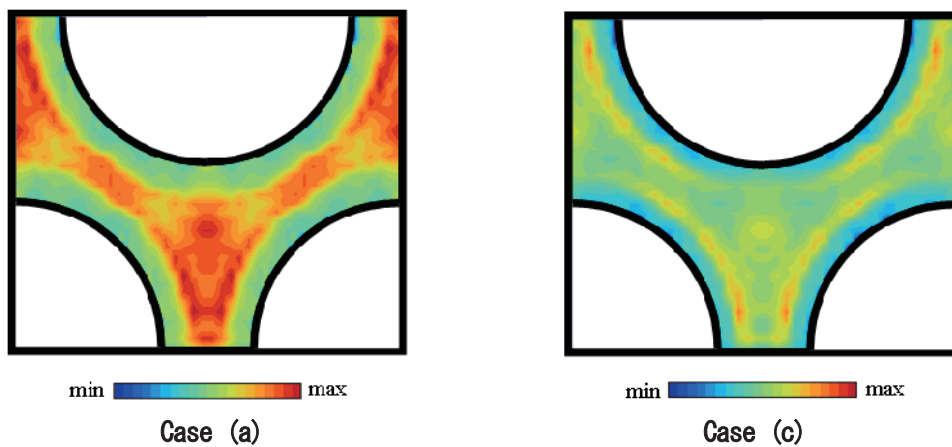


図8 アクセルグリッド下流面へ衝突するイオンの数流束密度分布 ($J_b=100\mu\text{A}$)

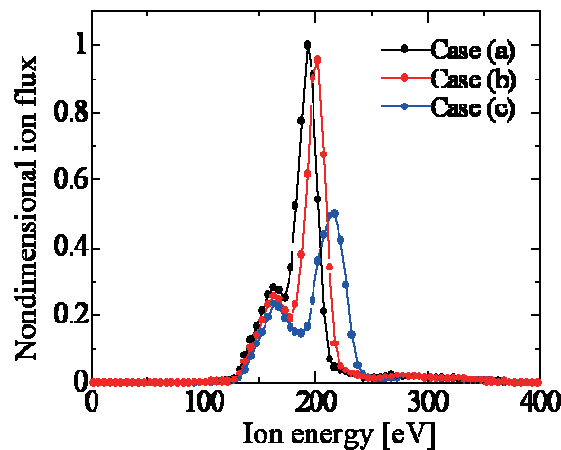


図9 アクセルグリッド下流面へ衝突する粒子のエネルギー分布 ($J_b=100\mu\text{A}$)

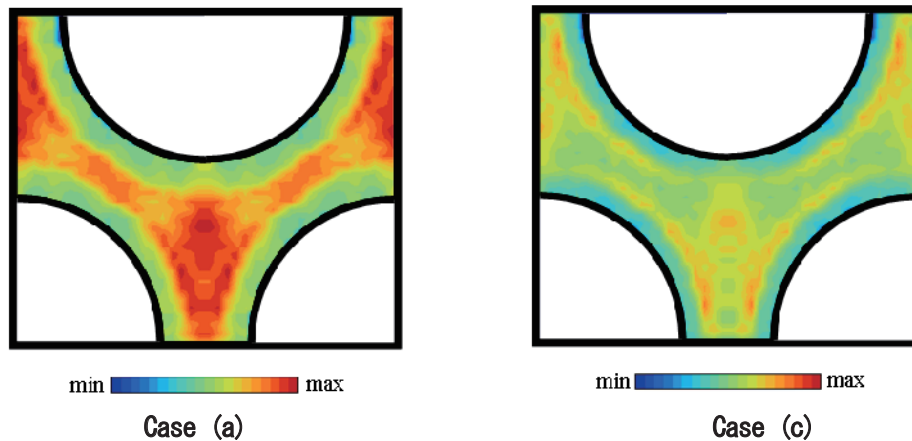


図10 アクセルグリッド下流面へ衝突するイオンのエネルギー流束密度分布 ($J_b=100\mu A$)

エネルギー流束結果から損耗についての簡易的な評価を行った。図9において、イオン粒子のエネルギーがすべてのケースで 200 eV 近傍に集中している様子が認められる。また、中和電子密度が低くなるにつれてそのピークが緩やかになり、その値も上流側に移動している。このエネルギー集中の理由により、図10のエネルギー流束分布は、図8に示される数流束の場合と同様な分布を示しているが、Case (a)においては数流束分布よりも”Pits”の部分により明確に現れている。図11にはアクセルグリッド内壁電流及び下流面電流のビーム電流比を起因別に示した。内壁電流比は、実験値[10]とほぼ同様な値を示し、下流面電流比は僅かに低い値となっている。また、内壁、下流面とも Total の電流比のほとんどが電荷交換イオンによるものであり中和電子密度とともに高くなっているが、下流領域の影響を受けやすい下流面電流比においてその傾向は強く現れている。また、イオンビーム領域を基にして中和電子条件を求めた Case (a)と Case (b)の間ではあまり違いが見られないが、流出面全体で平均をとった Case (c)とは大きく異なっている。本解析ではイオンビームが流出面全体まで拡がりきっていない領域を扱っているため、流出面の中和電子分布はイオンビーム領域であるイオンの高密度領域を基準にする方が妥当であると考えられることや、Case(a)と Case(b)の間の違いが僅かであることから次節では Case (a)の場合について評価を進めている。ただし、この中和電子分布条件は、本解析からも明らかのようにイオンのグリッド衝突過程へ与える影響が大きいため、下流面で電位を一定 (=0V) で与えることの妥当性も含め今後の検討が必要であると考えている。

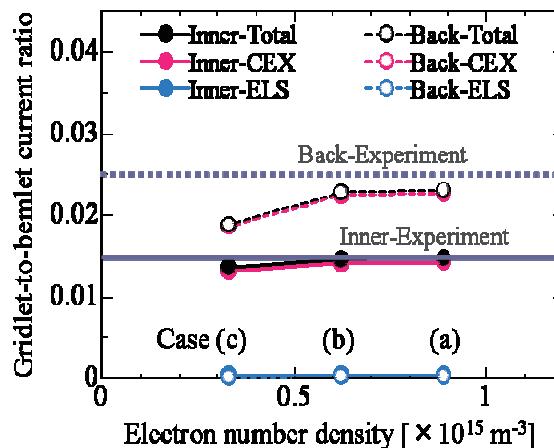


図11 アクセルグリッド内壁電流および下流面電流のビーム電流比の流出領域電子密度依存性 ($J_b=100\mu A$)

3.2.2 アクセルグリッド衝突におけるビーム電流依存性

最後に、中和電子条件を Case (a) で与えた場合のアクセルグリッド電流-ビーム電流比についてビーム電流を変化させた場合の結果を図 12 に示した。内壁電流比、下流面電流比ともに中電流領域 (100~200 μA) では、実験値[10] とほぼ同様な値を示している。しかし、特に内壁電流比は、低電流 (50 μA) および高電流 (197 μA ~) 時に実験に見られるような急激な上昇を捉えられなかった。また、下流電流比はその勾配のモードが中電流領域で 2 つに分かれているが、その不連続点は解析値の方がより高電流側に位置している。起因別でみるとどちらの電流とも電荷交換イオンによるものが主であるが、下流面電流においては弾性衝突イオンによる割合がすべて 2% 以下であるのに対して、内壁電流では 233 μA の場合に 12% となっておりその定量評価時には無視できない量となっている。また、高電流時にビーム電流の振動がみられたが、今後のコードの高精度化過程においてこの振動はその指針となるものであると考えている。

また、図 12 には中性粒子の衝突を評価する目的でその流束とビームイオンとの流束比について電流比と同様に示している。この結果から下流面では中性粒子の影響は殆ど無視できることがわかるが、内壁についてはイオンの約 40% 以上の流束が得られており定量評価において中性粒子衝突が無視できないことを示している。また、これらの衝突中性粒子のほとんどは弾性衝突粒子である。

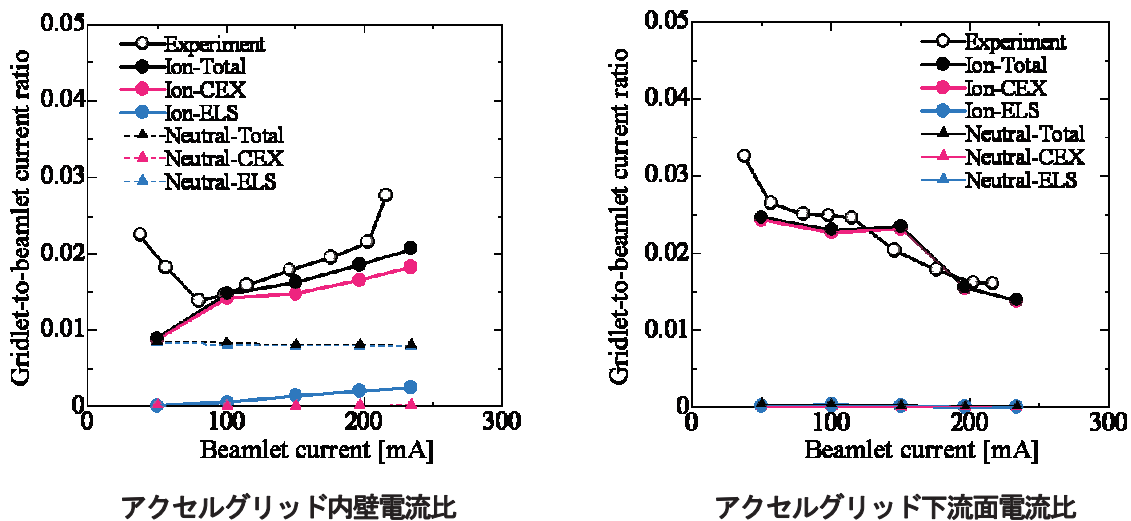


図 12 アクセルグリッド内壁電流および下流面電流のビーム電流比のビーム電流依存性 (Case (a))

4. まとめ及び今後の計画

3次元 Full-PIC コードによる JIEDI ツールの最終的な精度検証及び上流シース、下流中和領域における境界条件等の提案を 2010 年までに行うことを目標に、本年度ではまずコード本体の開発を行い、早川によって行われた実験[10] (標準問題) の条件下で解析を行うことで、コードの妥当性の検証を試みた。

本解析では、評価の第一段階として、計算負荷を低減する目的で電子質量をイオン質量と等しく設定し、粒子条件として上流、下流領域に Maxwell 分布を仮定するという単純化した条件を用いたにも関わらず、アクセルグリッド電流/ビーム電流比について実験値と近い値が得られ、また、アクセルグリッド下流面へのイオン衝突分布について 2 枚グリッドエンジンに特徴的な 2 次元分布が捉えられた。このように 3 実験値との定量的な良い一致だけでなく、3次元 Full-PIC コードによって特徴的な 2 次元分布が捉えられたことは、本コードの妥当性を示すだけでなく、今後のイオンエンジン解析において Full-PIC コードによる詳細な損耗評価への 3 次元 Full-PIC

コードの可能性を示すものとして重要な成果であると考えている。また、本解析では中和電子条件の影響を捉えることができた。これは、本コードが、今後の Flux-tube コードを用いた JIEDI ツールの評価等に有効であることを示している。

今後は、低ビーム電流および高電流側で観察される内壁電流比の急激な上昇等の現象を適切に捉えることができるような、より定量的な評価が可能なコード化を進める目的で、上・下流条件の検討、格子の高解像度化等を進めていく必要がある。そのために、次年度では、まず高解像度化に伴って予想される計算時間の増加に対応するために本解析コードの並列化を行うことで、格子の高解像度化、イオン—電子質量比の検討を進めていきたいと考えている。これらの検討により現実的な計算負荷下で十分な精度が得られるよう改良を進めた後、モデル化を極力配したコードである 3 次元 Full-PIC コードによる JIEDI ツールの電子モデル (Boltzmann 分布) 評価、イオンモデル (Flux-tube) 評価を 2010 年度までに行いたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたりご支援いただいた JAXA の各機関、および、ご助言をいただいた JIEDI 参加者の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 國中均, 船木一幸, 篠原育, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発, 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.5-9, 2007.
- [2] 船木一幸, 中野正勝, 中山宜典, 梶村好宏, JIEDI ツール開発上の課題と 2007 年度の活動方針, 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.75-81, 2007.
- [3] 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.
- [4] Nakayama, N. and Wilbur, P. J., Numerical Simulation of High Specific Impulse Ion Thruster Optics, IEPC-01-099, 1999.
- [5] Wang, J., Cao, Y., Kafafy, R., Martinez, R., and Williams, J., Ion Impingement Limits of Sub-Scale Ion Optics: Comparison of Simulation and Experiment, AIAA paper 2006-4999, 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] 中野正勝, イオンエンジンのグリッド寿命評価のための 3 次元シミュレーション, プラズマ応用科学, Vol. 15, pp.9-16, 2007.
- [8] 大川 恭志, 竹ヶ原 春貴, PIC 法によるイオンビーム抽出現象の解明, 宇宙輸送シンポジウム, 平成 10 年度, pp. 47-150, 1999.
- [9] 八田真児, 村中崇伸, 細田聡史, 金正浩, 趙孟佑, MUSCAT 技術によるビームイオン軌道解析, 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.64-71, 2007.
- [10] 早川幸男, 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, 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.20-27, 2007.
- [11] Hayakawa, Y., Measurements of Current Distribution on a Two-Grid-Ion-Extraction-System Gridlet

- [12] Birdsall, C. K. and Langdon, A. B., *Plasma Physics via Computer Simulation*, MacGraw-Hill, 1985.
- [13] 百武徹, 西田迪雄, 剣持貴弘, 村本哲也, イオン加速グリッドにおけるスパッタリング解析に向けて, 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.59-63, 2007.
- [14] 宮坂武志, 安里勝雄, 岡田宏太, 柴田悠基, イオンエンジングリッド損耗に関する 3 次元解析, 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.54-58, 2007.