

イオンエンジングリッド損耗に関する 3次元解析

宮坂 武志*, 安里 勝雄*, 岡田 宏太*, 柴田 悠基*

Three-Dimensional Simulation of Grid Erosion for an Ion Thruster

By

Takeshi MIYASAKA*, Katuo ASATO*, Kouta OKADA*, and Yuuki SHIBATA*

Abstract: Lifetime of ion engines is limited by erosion of acceleration channel due to charge-exchange ions. The charge-exchange process is influenced by neutral density distribution. For the purpose of investigating effects of neutral conditions, three-dimensional particle simulations were performed. The results show that neutral boundary conditions affect ion flux distributions on the acceleration grid surface.

Key words: Electric Propulsion, Ion Thruster, Simulation, Grid Erosion

1. はじめに

これまでにイオンエンジンの性能評価を目的としたイオンビーム解析が盛んに進められてきた [1-6]。最近ではイオンエンジンの耐久性評価のためのコード開発の必要性が指摘されている [7]。イオンエンジン耐久性評価において最も重要なのはグリッド損耗評価であり、特にアクセルグリッド損耗が激しく、エンジンの耐久性を決める主要因になっていることがこれまでの研究から明らかになっている [7]。アクセルグリッド損耗を生じさせるグリッド衝突イオンのほとんどは電荷交換イオンであり、損耗評価のためにはイオンビーム軌道解析だけでなく、放電室から漏れ出てくる中性粒子の密度分布計算や電荷交換過程を含めた解析が必要になってくる。また、より詳細な損耗評価のためには多孔グリッドの効果やグリッド形状の変化を捉えなければならず、3次元の複雑形状に対応した格子の生成が重要になる。

本研究では、3次元粒子シミュレーションコードの開発を行い、中性粒子分布に着目した解析を行った。本コードでは、まず中性粒子分布を DSMC 法により求め、得られた中性粒子分布に対して PIC 法によるイオン運動および中性粒子-イオン間の電荷交換解析を行うことによってアクセルグリッドに衝突する電荷交換イオン分布を評価している。電荷交換イオンは中性粒子との衝突により生じるため中性粒子密度分布が重要になってくるが、中性粒子密度分布は流入条件だけでなく壁との反射条件に依存する。本研究では、電気推進機に関する DSMC 法を用いた解析において通常用いられる拡散反射条件を適用した場合に加えて鏡面反射条件を用いた場合についても同様な解析を行うことにより、中性粒子解析が損耗評価に与える影響について調べた。本報告では、開発したコードの有効性確認、中性粒子条件の影響評価を目的とし、まずグリッド形状を固定して行った解析結果について報告する。

2. 数値解析法

多孔状のグリッドでは、近接するグリッドからの影響を考慮する必要から図 1, 図 2 に示すような計算領域に対し

* Gifu University

て3次元解析を行っている。本解析はグリッド損耗評価を主な目的としているため電荷交換イオンを扱う必要があるが、その際イオンビーム解析だけでなく中性粒子運動の取り扱いが必要になってくる。そこで、まず DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)法による中性粒子解析を行い、得られた中性粒子密度分布を用いて PIC 法によるイオンビーム計算 [8] 及びイオン-中性粒子間の電荷交換反応計算を行った。電位は Poisson 式を有限要素法により毎ステップ解くことにより求められた。

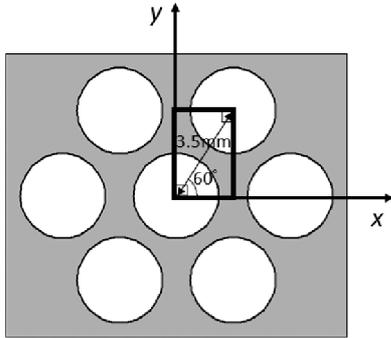


図1 計算領域 (x-y 断面)

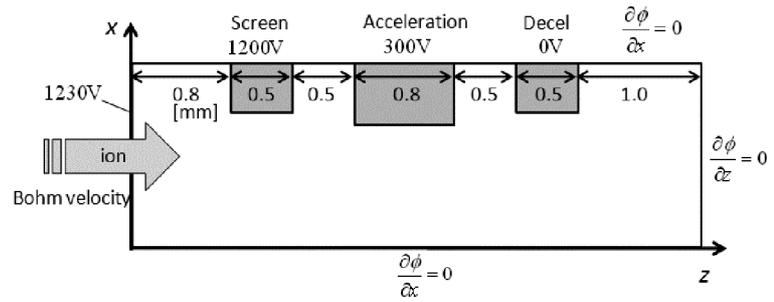


図2 計算領域と解析条件 (x-z 断面)

以下に本解析によって用いられた解析法を詳述する。解析のフローチャートは図3に与える。本解析はコード評価のための暫定的な解析手法を用いており今後の改良予定についても同時に示してある。

2.1. 計算領域

2.1.1. 3次元形状

本解析で扱うイオンエンジンは、キセノンを推進剤とする MUSES-C 用の3枚グリッドイオンエンジンを想定している。図1に示すような多孔グリッドを扱うには3次元形状の計算領域を用いる必要があることから、計算時間短縮のため境界条件として対称条件を適用できる太実線で囲まれた計算領域を採用している。対称面で囲まれる最も小さい領域は対角線で区切られた半分の領域であるが、後述するような計算格子の理由から、本報告では図1に示す長方領域を扱っている。図2に、 $y=0$ における $z-x$ 断面を示す。スクリーングリッド、アクセルグリッド、ディセルグリッドは図2に示すように配置されている。

2.1.2. 計算格子

通常、計算格子はグリッドの形状に合わせた適合格子が多いが、グリッド損耗を考慮する場合、グリッド形状は非常に複雑になることが予想され適合格子の精度により解析結果が影響を受けることが懸念される。加えて本研究ではより汎用性の高いコードの開発を目的としていることから、計算格子として直交格子を用いている。本報告では開発された解析コード評価を主目的としているため、格子数は20727と抑えている。

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。ここで、本解析での計算条件下ではクヌーゼン数は殆どの領域で $Kn \geq 100$ と大きいため衝突は考慮していない。中性粒子は推進材利用率に合わせて上流から一様に流入させている。また、実験環境下での解析を行うため、得られた中性粒子密度分布に残留中性粒子密度を足し合わせている。本解析では、残留中性粒子密度として、 $n_{n0} = 1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ を用いている。

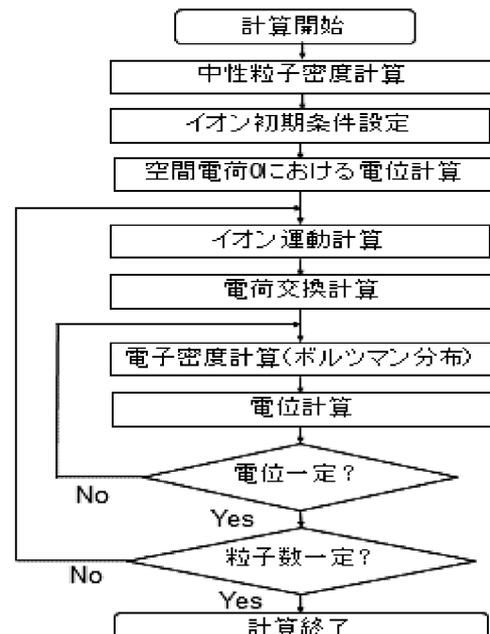


図3 フローチャート

境界条件として下流境界には無反射条件を与え対称面では鏡面反射条件を適用している。本解析では中性粒子解析条件がグリッド損耗に与える影響の評価を主目的としているため、グリッド面での条件としてグリッド温度に対応した「拡散反射条件」に加え、「鏡面反射条件」を与えた場合の2通りの解析を行った。

2.3. イオン解析

2.3.1. PIC 法による解析

イオン運動は PIC 法を用いて解析されている。イオンサンプル粒子を上流からボーム速度で流入させ、運動方程式に従って運動させている。下流境界では無反射条件を与え、グリッド面ではイオンが失われるものとし、対称面では鏡面反射条件を適用している。

電位 ϕ は Poisson 式 (1) を有限要素法によって解くことにより求めている：

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

要素は2次六面体要素を採用し、各グリッド上および流入面では電位を固定し、その他の境界では自然境界条件を適用している。(1)式において、イオン密度 n_i はイオン運動計算結果から、電子密度 n_e は上流のシース領域および中和領域においてボルツマン分布を仮定して求められている。

2.3.2. 電荷交換イオン解析

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。本解析で用いた電荷交換衝突断面積は $\sigma_{\text{cex}} [\text{m}^2]$ は (2) 式で与えられる。

$$\sqrt{\sigma_{\text{cex}}} = a - b \ln v_i \quad (2)$$

ここで、 v_i はイオン速度を表し、 a, b として $a = 1.65 \times 10^{-19}$, $b = 9.4 \times 10^{-11}$ を採用している [6]。

本解析条件下では、イオンと中性粒子との電荷交換によって生成される電荷交換イオンが占める割合は低く電荷交換イオンが電位分布へ与える影響は弱い。そのため、まずイオンビーム解析のみを行いイオンビーム収束まで計算を行い、次に収束結果からイオン密度分布を求め電荷交換衝突および電荷交換イオンの運動計算を行う、という2段階計算の方が計算時間に関しては効率的である。しかし、電荷交換反応に必要とされる計算時間が短く、また定常に落ちてから行うグリッド衝突イオン粒子サンプル収集に要する計算時間はポテンシャルが落ち着いていることもあり全体解析時間に比べ長い時間を必要としない、プログラム構造が簡潔にできる、等の理由から本解析ではイオンビーム解析中で電荷交換反応を扱っている。この部分については、計算を分離しない場合にも衝突過程をどう取り扱うかも含め、計算時間等の観点から検討を行っていく予定である。

2.4. 解析条件

解析条件として、参照した解析 [1] と同様に、規格化パービアンズ $2.1 \times 10^{-9} \text{A/V}^{2/3}$ 、進剤利用率 0.8 を与えた。各グリッドおよび流入境界における電位は図 2 に示すように設定されている。

3. 結果

グリッド表面で2通りの境界条件を与えた場合の $y = 0$ の断面 ($z - x$ 面) における中性粒子密度分布結果を図 4 に示す。どちらの場合もスクリーングリッドより上流の流入部領域における中性粒子密度は $n_n = 9.0 \times 10^{18} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と同様な値を持つが、密度が低下していくスクリーングリッドからアクセルグリッドに至る領域で明らかに異なる様子が観察される。アクセルグリッドへ衝突する電荷交換イオンが多く発生すると予想されるこの領域では、拡散反射条件を適用した場合にはほぼ一様に密度が低下するのに対して、鏡面反射条件を用いた場合では y 方向にも明らかな分布が存在し拡散反射の場合に比べて高い値を示している。このように本解析では、他の電気推進機における中性粒子解析と異なり境界条件の違いによる中性粒子密度分布への影響がはっきりと確認できる。これはクヌーセン数が大きく衝突を考慮していないことによるものと考えられる。



図4 中性粒子密度分布

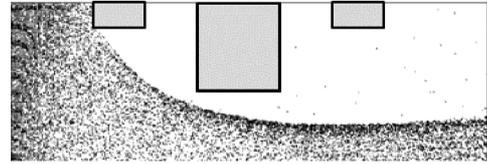


図5 イオン粒子分布 (中性粒子：拡散反射)



図6 電位分布 (中性粒子：拡散反射)

次に、これら2つの中性粒子密度分布結果を用いてイオン解析を行った結果について検討する。図5にイオン粒子分布を、図6には電位分布を示す。本解析条件下ではイオンビーム中の電荷交換イオンの割合が低く、イオンビーム解析結果は中性粒子分布結果にほとんど依存しない。そこで、図5および図6には拡散反射条件を適用した場合のみを示している。図5からはイオンビーム本体がアクセルグリッドには直接接していないことや僅かにビーム本体から離れた電荷交換イオンの存在が確認できる。

次に、アクセルグリッドへ衝突する電荷交換イオンの評価を図7に示すようなアクセルグリッド内壁に衝突するイオンについて行った。その結果を図8～図10に示す。図8にはイオン流束の軸方向 (z 方向) 分布を、図9には θ 方向分布を与えている。図8、図9はそれぞれ θ 方向および軸方向に平均化され、拡散反射条件の場合の最大値で無次元化されている。図8、図9ともに、イオン流束分布形状は中性粒子の異なるグリッド反射条件に対して大きな違いがみられないが、鏡面反射の場合の方が常に高い値を示していることが分かる。実際に解析結果から2通りの中性粒子条件下におけるアクセル電流割合を計算した結果、拡散条件の場合で3.6%、鏡面反射条件の場合では5.3%となり、

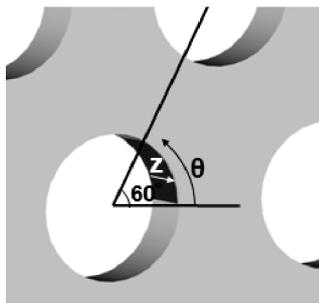


図7 アクセルグリッド

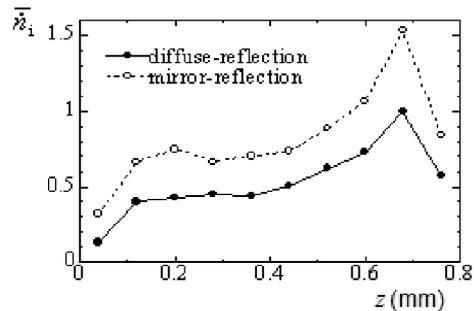


図8 アクセルグリッド衝突イオン軸方向分布

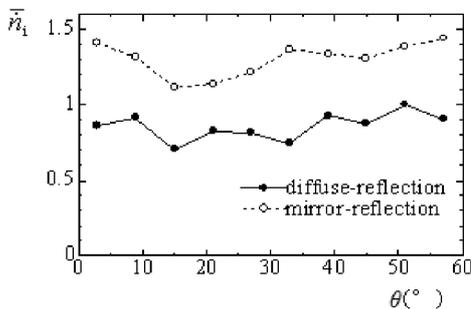


図9 アクセルグリッド衝突イオン周方向分布

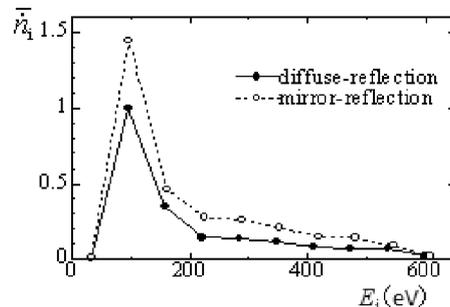


図10 アクセルグリッド衝突イオンエネルギー分布

鏡面反射の場合に高い値を示した。これは図4の中性粒子密度分布の違いから生じている。図10はアクセラグリッドへ衝突するイオンのエネルギー分布を示したものであるが、どちらの条件の場合も100 eV付近の低エネルギー粒子の割合が多く、エネルギーが高くなるにつれ減っていく。この結果は定量的な損耗評価のためには低いエネルギー領域でのエロージョンレートが重要となることを示している。

4. まとめ

本解析では、グリッド損耗解析における中性粒子の境界条件の重要性を調べる目的で、2通りのグリッド面反射条件を適用して求め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い、アクセラグリッド衝突する電荷交換イオンの評価を行った。その結果、反射条件の違いにより衝突イオン流束分布、アクセラ電流割合が定量的に異なることが示された。一般に固体表面温度が低い場合には中性粒子反射条件として拡散反射条件が適しておりイオンビーム解析において用いられるのは拡散反射がほとんどで、拡散反射と鏡面反射の2者択一という観点からは拡散反射を用いることが妥当であると考えられる。ただし、本解析で明らかのように無衝突とみなせる条件下では中性粒子分布は境界条件に強く依存されることから、損耗解析において中性粒子流入条件が大きく影響してくるものと予想され、一様流入条件の妥当性についても検討が必要になってくると考えられる。イオンビーム解析では、ビーム放出面等の上流境界条件、等が注目されるが、グリッド損耗の定量評価では、スパッタ率、再付着率等に加えて中性粒子の境界条件の与え方についても検討する必要がある。

本報告では、直交格子を用いた3次元グリッド損耗解析ツールの立ち上げ、ワークステーションを用いた中性粒子密度に着目した解析を行ったため、ビーム解析における上流シースを十分な精度で捉えるだけの格子解像度は得られていない。今後は、計算配列の最適化、並列化等により格子解像度を高めるとともに本来の目的である、グリッド損耗によるグリッド形状変化を考慮した解析を進めていく予定である。

参 考 文 献

- [1] 白石卓也, 國中均, 佐鳥新, 栗木恭一, “イオンエンジンにおけるグリッド浸食のシミュレーション”, 平成6年度宇宙輸送シンポジウム, pp.177-180, 1995.
- [2] 中野正勝, “イオンエンジンのグリッド耐久性能試験”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.48, pp111-117, 2000.
- [3] Nakayama, N. and Wilbur, P. J., "Numerical Simulation of High Specific Impulse Ion Thruster Optics," IEPC-01-099, 1999.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Tartz, M., Hartmann, E., Deltschew, R., and Neumann, H., "Validation of a Grid-Erosion Simulation by Short-Time Erosion Measurements," IEPC-990-147, pp.813-818, 1999.
- [7] 荒川 義博編, 國中 均, 中山 宣典, 西山和孝著, “イオンエンジンによる動力航行”, コロナ社, 2006.
- [8] Birdsall, C. K. and Langdon, A. B., "Plasma Physics via Computer Simulation," MacGraw-Hill, 1985.