

JIEDI-1 ツールの開発 (イオンエンジングリッド損耗評価コードの改良)

中野正勝¹, 梶村好宏², 船木一幸³

Development of the JIEDI-1 tool : improvements to the grid erosion
evaluation code developed in 2007

By

Masakatsu NAKANO¹, Yoshihiro KAJIMURA² and Ikkoh FUNAKI³

Abstract : Improvements have been made to the grid erosion evaluation code (JIEDI-1) to achieve robust convergence and to enhance the accuracies of grid life estimations. The major improved features of the code are 1) the use of Newton-Raphson method and the ICCG solver, 2) modifications of the inlet boundary conditions, 3) incorporation of the differential sputtering yield and redeposition effect of the grid material, and 4) solution-adaptive mesh generation. The last feature is realized by the commercial mesh generation software “pro-STAR”. Numerical code prediction of grid mass loss showed good agreement with that of $\mu 10$ ion engine life test, with robust convergence and improved simulation time by a factor of 3~4 in comparison with the previous code.

Key words : Ion engine , Grid erosion, $\mu 10$, JIEDI-1, JIEDI tool, Life test

1. はじめに

イオンエンジンは推進剤をプラズマ化させ、イオンを静電加速することで推進力を得る宇宙用のロケットエンジンである^{1,2)}。他のロケットエンジンよりも推進剤消費量が少ない点を特徴とし、深宇宙探査機の主推進や地球周回衛星の軌道・姿勢制御に用いられるが、推力が極めて低いために数千から数万時間にも及ぶ長時間の作動が要求される。イオンエンジンは海外を中心に既に 100 台を超える搭載実績があるが、機種ごとに実時間寿命評価試験を経て搭載に至っている。小惑星探査機はやぶさ搭載の $\mu 10$ イオンエンジンでは 18,000 時間に亘る寿命評価試験を行った³⁾。このように、イオンエンジンでは開発期間の多くを寿命評価試験に費やさねばならず、改良を含めた新機種開発が進みにくい。更なる長時間作動が達成できれば、より広範囲に亘る深宇宙探査や衛星の長寿命化が期待できるが、作動時間の長期化に伴い必要な寿命評価試験も長期化することから各種ミッションへのタイムリーなイオンエンジンの投入が妨げられていると言えよう。

この寿命評価試験を数値解析によって代替する試みが近年国内外で精力的に進められており、宇宙航空研究開発機構によるイオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiative) ツールの研究開発もその一つである^{4,5)}。本稿で述べる JIEDI-1 ツールは JIEDI ツール開発の第一段階のものであり、多孔からなるイオンエンジン加速部の一孔に着目し、そこで引き起こされるグリッド損耗を解析することでイオン加速系の寿命を評価することを目的として開発が行われている。

¹ Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

² Kyushu University (Presently, Kyoto University)

³ ISAS/JAXA

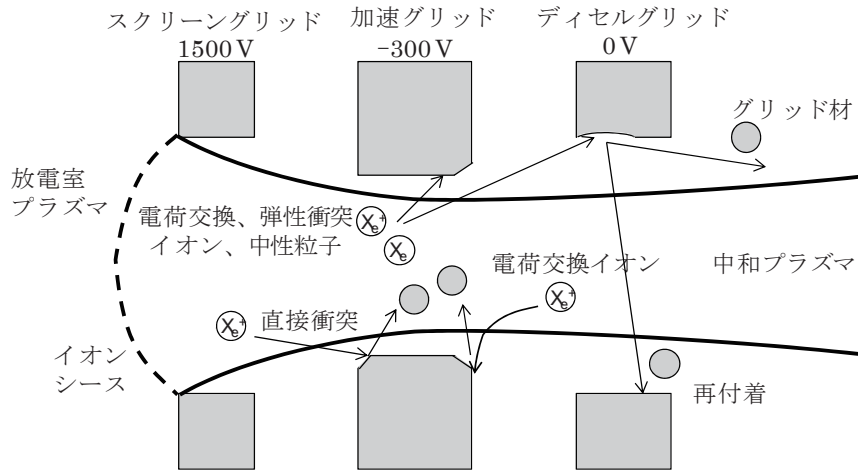


図1 イオンエンジングリッドの損耗メカニズム

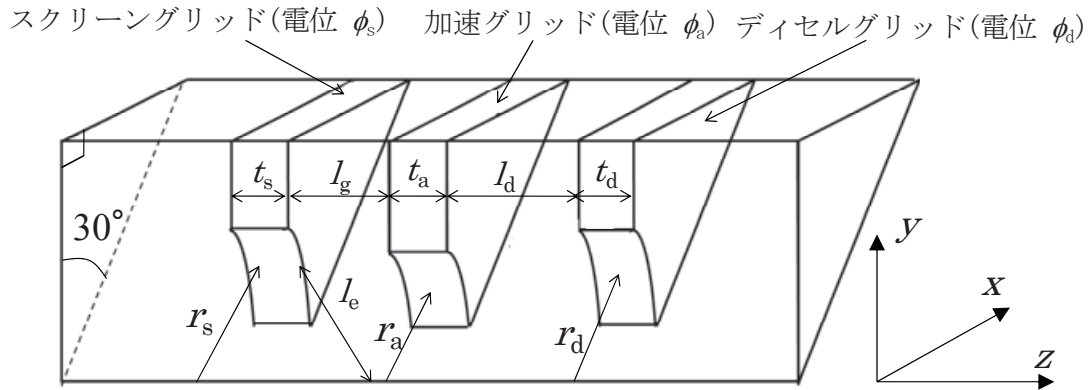


図2 JIEDI-1 コードにおける解析領域と記号の説明

イオンエンジンの構成要素の中で、イオン加速系は、印加した電圧差によりイオンを加速するもので、プラズマ生成部とともにイオンエンジンを構成する重要な要素である。この加速系の中で電位が低い加速グリッドや減速グリッドには、加速途中のイオンと中性粒子との間の衝突で生成したイオンや中性粒子が衝突し、スパッタ損耗が起こることが知られている(図1)。これは直流放電方式やマイクロ波放電方式などのプラズマ生成法を問わず起こる現象であり、イオンエンジンにおける寿命制限要因の一つである。

イオンエンジンの加速系を評価するコードは2次元軸対称のものから3次元のものまで多くが開発されている⁶⁻¹²⁾。解析手法としては、加速系の電位分布とイオン軌道を反復計算により自己無頓着に求めるもので、イオンを粒子として扱うか(PIC法)、流れを持つビームとして扱うか(flux-tube法, streamline-PIC法)に大別されるものの、解析手法としては確立した段階にある。一方で、イオンエンジングリッドの損耗評価を対象とした解析は限られており、損耗原因となる粒子としても電荷交換イオンのみを扱ったものが多い。2007年度に開発されたコードでは、電荷交換衝突に加え、衝突の際に生成する中性粒子や弾性衝突などの影響を含んだ本格的な解析が初めて行われたが⁵⁾、中和電子逆流やグリッドの構造破壊などの加速グリッド系の寿命制限要因を評価するには、計算のロバスト化や精度の向上が課題であった。

本研究では、2007年度に構築したコードに改良を行うことでツールの完成度を高めた。具体的な改良点としては、1) ポアソン方程式の求解におけるNewton-Raphson法とICCG法の導入による収束性の向上と高速化の

実現, 2) 主流イオンビーム流入境界条件の確立, 3) 微分スパッタ率 (グリッド表面への入射角とスパッタ率の関係) と損耗して放出されたグリッド材の再付着計算への対応, 4) 高精度解適合解析メッシュの利用 (pro-STAR の使用) である. 本稿では, $\mu 10$ イオンエンジンの耐久性能試験結果と比較することでコード検証を行うとともに, 収束性や計算時間などの評価を併せて行ったので, それらについて記すものとする.

2. 計算モデルの改良

2.1. 計算の概要

グリッド損耗計算の詳細については 2007 年度の報告書¹³⁾に記されているため, ここでは概要を簡潔に記すと共に改良点を下線で示すものとする.

- 1) 入力パラメータに対応して, 初期メッシュを構築する (pro-STAR の使用).
- 2) 自由分子流計算によりグリッド間の中性粒子分布を求める.
- 3) 電位分布と主流イオンビーム分布を繰り返し計算により自己無頓着に求める. (Poisson 方程式求解の改良).
- 4) 中性粒子と主流イオンビーム間の衝突を評価し, グリッド損耗をもたらすイオンと中性粒子を追跡する.
- 5) グリッドに衝突する粒子流束, エネルギー及び衝突角から微分スパッタ率を用いて損耗粒子の飛散方向を決定すると同時にスパッタ率を評価する.
- 6) 損耗粒子の軌道を追跡し, 再付着率からグリッドへの堆積率を求める.
- 7) 損耗率と堆積率の差から一定時間後のグリッド形状を pro-STAR により求め, 必要時間になるまで 2) に戻ること繰り返す.

2007 年度モデルから変更された箇所について以下に説明を加える. 解析領域は 2007 年度モデルと同じ図 2 に示される 30° - 60° - 90° 度の直角三角柱領域である. 図 2 には本稿で使用される記号の幾何形状の定義も示す.

2.2. ポアソン方程式の求解

電位 ϕ は, イオンと電子の電荷密度を ρ_i, ρ_e として, ポアソン方程式

$$\nabla^2 \phi = -(\rho_i - \rho_e) / \epsilon$$

から決定される. スクリーングリッドから加速グリッドに亘る空間電荷制限領域において電子密度は 0 と考えてよいが, 放電室や加速グリッド下流では電子が存在するため, 右側の電子密度を評価しなくてはならない. そこで, 電子密度は電子温度 T_e [eV] のボルツマンの関係式で与えられるものとして, 局所電位 ϕ と下流プラズマ電位 ϕ_0 との電位差から次のように計算する.

$$\rho_e = \rho_{e0} \exp((\phi - \phi_0) / T_e)$$

イオンの密度は主流のイオンビームの軌道を解く際に合わせて求められる.

このポアソン方程式は有限要素法により, \mathbf{K} を拡大係数行列, \mathbf{F} をボルツマンの関係式に起因する \exp 項を含む非線形ベクトル関数として

$$\mathbf{K}\phi = \mathbf{F}(\phi)$$

と書くことができる. Newton-Raphson 法を用い, 右辺を 1 次まで展開することにより

$$\mathbf{K}(\phi + \Delta\phi) = \mathbf{F}(\phi + \Delta\phi) \doteq \mathbf{F}\phi + \mathbf{G}\Delta\phi$$

$$\Delta\phi = -(\mathbf{K} - \mathbf{G})^{-1}(\mathbf{K}\phi - \mathbf{F})$$

から電位を修正していく. 行列解法には不完全コレスキー分解前処理付き共役勾配法 (ICCG 法) を用いた.

2.3. イオンビーム軌道計算と流入条件

イオンビームの軌道は運動方程式

$$M\mathbf{v}\nabla\mathbf{v} = -q\nabla\phi$$

を解くことにより決定した。ここで、 M はイオンの質量、 \mathbf{v} はイオンの速度ベクトル、 q はイオンの電荷である。中性原子 (Xe 原子やグリッド材)を追跡する際には右边を0として計算する。

主流イオンビームは上流境界から流入させるが、流入速度 u_{inlet} ならびに上流境界におけるプラズマ密度 n_x はスクリーングリッド付近にシースが形成されていることから次のように決定した(図3参照)。

すなわち、シースが形成されるには、ボーム条件から放電室プラズマ電位からシース端までに $\phi = T_e/2$ [eV]以上の電位降下が必要なので、ボーム速度を $u_B = (eT_e/m_i)^{0.5}$ として、プラズマ密度を n_x 、シース端の電位密度を n_e とすれば

$$n_e = n_x \exp(-\phi/T_e) = n_x \exp(-0.5)$$

が成り立つ。上流境界から流入するイオンの電流密度 J はシース端でも同一であり、プラズマの準中性から

$$J/e = n_x \times u_{\text{inlet}} (\text{上流境界}) = n_i \times u_B (\text{シース端}) = n_e \times u_B (\text{シース端})$$

でなければならない。この式を解くことで、

$$u_{\text{inlet}} = \exp(-0.5) \times u_B$$

$$n_x = J \times \exp(0.5) / e / u_B$$

となる。

2007年度のコードではイオンの流入速度を熱速度で与えていたが、熱速度がボーム速度よりも小さいため、上流境界におけるプラズマ密度が大きくなっていた。その結果、デバイ長が小さくなり、必要なメッシュ数が多くなっていた。今回の境界条件の改良により必要な接点数を20%程度削減することが可能である。なお、境界条件を変えたことによるビーム軌道やグリッド損耗に与える影響は見られていない。

2.4. 微分スパッタ率と再付着モデル

グリッド表面における損耗量は、グリッドへの入射粒子の流束を Γ 、スパッタ率を Y 、グリッドへの入射エネルギーを E 、入射角度を θ として、

$$\Gamma_g = \Gamma \times Y(E, \theta)$$

の総和を取ることによって与えられる。入射原子の数に対してどれだけのグリッド原子が飛び出すかを示すスパッタ率は文献値^{14,16)}などから与えることができる。

一方で、スパッタされたグリッド材料は様々な方向へ放出され、他のグリッド表面に達するものもある。グリッド表面に達した原子の多くは(C/Cでは78%との報告¹⁷⁾あり)付着(再付着)することから、スパッタ損耗の評価の際には単純なスパッタ量だけではなく、この再付着量を減じた値で評価しなくてはならない。そのためには、損耗された原子の飛散方向を求め、どこに再付着するのかを追跡する必要がある。

流束 Γ を持つ入射粒子によって、グリッドから見て (θ_p, ϕ_p) 方向へ飛散される量は、微分スパッタ率 dY を用いて

$$d\Gamma_{g\theta_p\phi_p} = \Gamma \times dY(E, \theta, \theta_p, \phi_p)$$

と書ける。グリッドへ入射するイオンと中性粒子の全てについて和を取ることによって、グリッドから見て (θ_p, ϕ_p) 方向に飛散する流束は

$$\Gamma_{g\theta_p\phi_p} = \sum d\Gamma_{g\theta_p\phi_p}$$

と求めることができる。

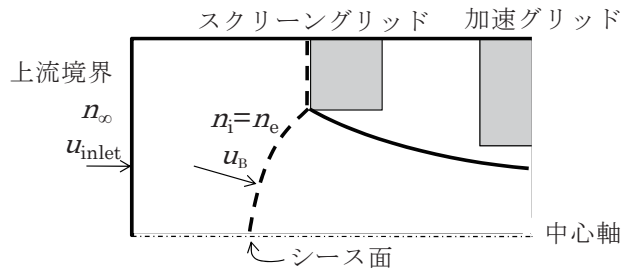


図3 上流境界条件

コードにおいては、グリッド表面に対応する要素面について、それを覆うような仮想的な半球を想定し、半球表面を等立体角のパネルに分割してパネル毎に飛散量を記憶する。主流イオン、電荷交換イオン、弾性散乱イオン、それらと同時に生成する中性粒子のグリッドへの衝突による飛散量をそれぞれ求めて和を取ることで、グリッド上の特定の場所から各方向に飛散するグリッド材の流束が計算できる。

その後、分割された立体角の中心方向に向けて流束 $\Gamma_{g\theta p\phi p}$ を持つグリッド材ビームを放出する。軌道の追跡方法は中性粒子軌道計算と同じである。ビームが他のグリッドに衝突した場合には、再付着率 ϕ_s を掛けることで付着量 $\phi_s \times \Gamma_{g\theta p\phi p}$ が求まる。

以上により、グリッド表面における損耗率と再付着率が求まったので、損耗率から再付着率を引いた正味の損耗率に適切な時間幅をかけることでグリッド表面の質量変化から体積変化、接点の位置変化の順で、損耗によるグリッド形状の変化が計算できる。

2.5. 高精度解適合メッシュソフトへの対応

昨年までのコードでは筆者が作成したメッシュ生成ソフトを用いて解析メッシュを構築していたが、市販ソフトウェアに対応すれば精度ならびに使い勝手が向上する。そこで(株)シーディ・アダプコ・ジャパン (CDAJ)が販売する汎用熱流体解析ソフトウェア「STAR-CD」の標準プリポストプロセッサ「pro-STAR」を用いて解適合メッシュ構築を行うこととした。メッシュ構築においては、グリッドの孔径、厚さ、間隔、グリッド分割数を指定することにより、自動的に初期解析メッシュを構築するマクロを開発した。現在、グリッド解析コードから出力されたグリッド表面の接点移動データを基にして、損耗を反映したメッシュを再構築できるようマクロの開発作業を進めている。なお、今年度は pro-STAR を使用したが、他のソフトウェアでも出力と入力データのコンバータを作成することで対応が可能な仕様となっている。

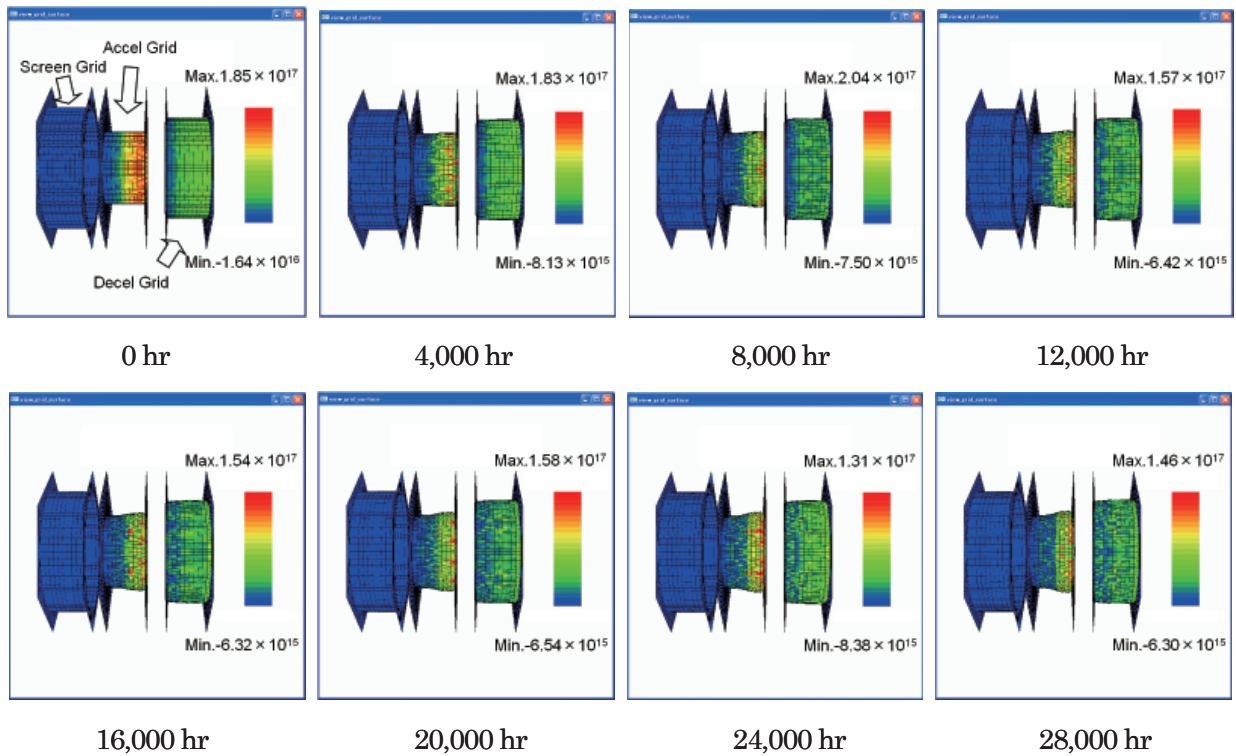


図4 $\mu 10$ グリッドの形状変化と損耗強度予測(放出原子数/ $\text{m}^2\cdot\text{s}$)

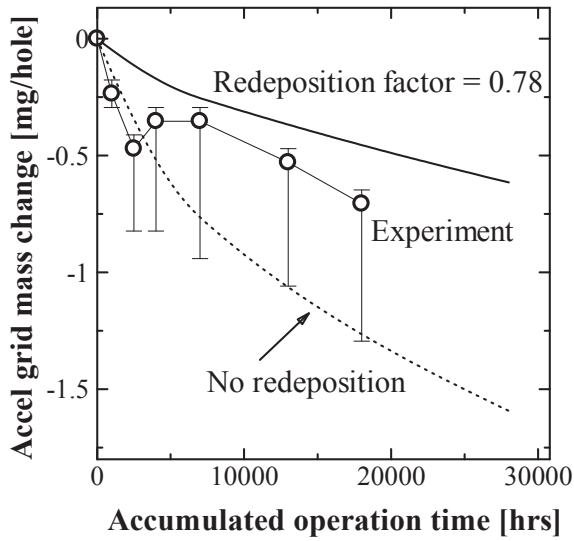


図5 マイクロ波イオンエンジン μ 10グリッド1孔あたりの質量変化

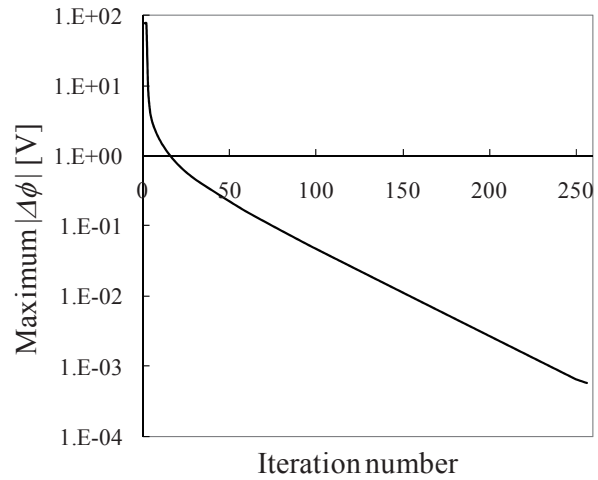


図6 電位計算における残差の変化例

3. 計算例

μ 10 EM2 の C/C グリッド加速系^{18,19)}について損耗を計算し、実験結果と比較することでコードの妥当性を評価した。スクリーングリッド、加速グリッド、減速グリッドの孔径は 3.0 mm, 1.8 mm, 2.5 mm, 各グリッドの幅を 1.0 mm, 1.0 mm, 1.0 mm, 間隔を 0.35 mm, 0.5 mm とし、スクリーングリッドの開口比を 0.67 とし、接点数 23,107, 要素数 20,025 のメッシュを用いて計算した。メッシュ構築においては、要素の軸方向間隔を放電室及び中和領域でデバイ長以下になるようにした。

イオンビーム及び中性粒子流束を決定するための作動条件として規格化パービانس (NP/H) の値を $0.62 \times 10^{-9} \text{ A/V}^{1.5}$ ($I_e = (I_e^2 + r_s^2)^{1/2}$ を用いた) とし、推進剤利用効率を 83% とした。スクリーングリッド電圧は 1,500 V, 加速グリッド電圧は -300V, 放電室のプラズマ電位は 30 V だけスクリーングリッド電圧よりも高い 1,530 V とした。放電室および下流の中和領域の電子温度は 6 eV とし、中性粒子、イオン、グリッドの各温度は 373 K とした。放電室に入射するイオンの密度と速度は 2.3 節に従って与え、中性粒子の速度は熱速度で与えるとともに、NP/H と推進剤利用効率から求めた中性粒子流束より中性粒子密度を決定した。また、下流における中和プラズマの密度は、上流境界におけるイオン流束にスクリーングリッド開口比を掛けたものを無限遠のイオンビームの速度 $(2e\phi_s/M)^{0.5}$ で除することで求めている。

推進剤である $\text{Xe}^+ - \text{Xe}$ 間の電荷交換衝突断面積は $\sigma_{ce} = (17.35 - 2.34 \times \log(v)) \times 10^{-20} \text{ m}^2$ を与え、弾性散乱は Hard Sphere モデル ($\sigma_{els} = 21.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$) を用いた。上流境界より入射させる主流イオンビームの本数は一様な間隔で 56,651 本 (1 要素あたり 276 本が通過) を与え、スパッタ計算のために各要素から流出させる電荷交換イオンと中性粒子、弾性衝突イオンと衝突を受けた中性粒子の数は要素あたりそれぞれ 32 ペア (合計 128 個) とした。これら粒子の出発位置はランダムに決定し、乱数の生成にはメルセンヌツイスタ (MT19937) を用いた。なお、2 価イオンの割合は無視できるものとして計算には含んでいない。

現在のところ C/C の微分スパッタ率として利用可能なデータベースが存在しないため²⁰⁾、スパッタ率を文献^{14,16)}の Williams らのデータを用いて計算した後、グリッド表面から法線方向に見る空間を 64 個の等立体角に分割して均等な重み (1/64) を与えてグリッド表面材の飛散率とした。また、再付着率は文献¹⁷⁾から 0.78 と与える

ものとし、付着場所によらないものとした。グリッド形状の更新にあたり、時間刻みは昨年度の結果も踏まえ $\Delta t = 2,000$ hrs とした。各時間ステップ毎のグリッド質量損耗量から C/C の比重を 1.7 としてグリッドの体積変化を求め、接点を移動させて損耗後のメッシュを再構築した。

図 4 にグリッド表面形状と損耗強度分布を示す。左からスクリーングリッド、加速グリッド、減速グリッドの順である。作動開始から 28,000 時間後まで 4,000 時間ごとに示しており、損耗強度は単位時間に単位面積から放出される原子数で色分けされている。各グリッドの中で最も損耗率が高いのは加速グリッド下流内壁部であり、経過時間と共に加速グリッド内径が増加していることが分かる。加速グリッド内壁下流側が激しく損耗を受けるという結果は実験結果と一致している。

計算によって得られた加速グリッド電流は作動直後で $0.65 \mu\text{A}$ であった。その内訳は電荷交換衝突によるイオンが $0.52 \mu\text{A}$ であり、弾性散乱イオンによるものが $0.13 \mu\text{A}$ であった。電荷交換イオンの割合が高いものの弾性散乱によるイオンも全体の 20% を占めることから、この結果は、電荷交換衝突に加えて弾性衝突をモデル化する必要があることを示している。また、この電流値に孔数 800 個をかけることでグリッド電流を評価すると 0.52 mA であった。船木らの実験³⁾では加速グリッド電流値は $0.5 \pm 0.05 \text{ mA}$ と報告されており、定量的にもよい一致を示している。

図 5 に加速グリッドの質量変化を実線（再付着率 0.78）で示すとともに、再付着なしを想定して計算した結果（no redeposition）を破線で示す。再付着の影響を含んで計算したものの方が、実験データ（文献 18 の Fig.7）とよい一致を示している。なお、本計算ではスパッタされたグリッド材料が全ての方向に均一に飛散するという簡易化されたモデルで計算しているが、現在百武らにより開発されている微分スパッタ率モデルの導入により今後更なる計算精度の向上が図られるであろう²¹⁾。

図 6 はポアソン方程式求解におけるイタレーションごとの残差（電位修正量の最大値）の変化の 1 例である。残差はイタレーションごとに単調に減少しており、250 回前後で $10^{-3} [\text{V}]$ 以下にまで減少する。この安定した電位の収束は Newton-Raphson 法の採用によりもたらされたと考えられる。また、計算時間は 2007 年度作成のコードと比べて 3~5 倍程向上した。これは Newton-Raphson 法による収束性の向上と共に、上流境界条件の改良によるメッシュ数の削減（2007 年コード比で 20% 程度）ならびに ICCG の採用による行列計算の高速化が総合的に寄与したものと考えられる。

4. まとめ

2007 年度に開発したグリッド損耗解析コードの性能向上を目指し改良を施した。具体的には 1) Newton-Raphson 法と ICCG 法の導入によるポアソン方程式求解の収束性の向上と高速化、2) イオンビーム流入境界の改良によるメッシュ数削減、3) 微分スパッタ率と再付着計算の取り込み、4) 高精度解適合メッシュの構築（pro-STAR の使用）である。 $\mu 10$ イオンエンジンの実験データを用いたコード検証の結果、電位計算の高い収束性と高速化の実現を確認するとともに、微分スパッタ率と再付着モデルの導入によって実験値をよりよく再現する結果を得た。また、pro-STAR を用いることで高精度解適合メッシュ構築作業がスムーズになった。詳細な微分スパッタ率データベースの構築やメッシュ再構築マクロの改良作業など今後の課題はあるものの、イオンエンジンの開発に十分使用可能な耐久性能認定用シミュレーションコードの開発に成功した。

謝辞

イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発を支援して下さった JAXA 情報システム部、JAXA 情報・計算工学(JEDI)センター、および、長岡科学技術大学・菅井光信氏、スタッフサービス・牧野浩司氏、関連の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 荒川義博, 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”, コロナ社, 2006, 第1章.
- [2] 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.
- [3] 國中 均, 堀内康男, 西山和孝, 船木一幸, 清水幸夫, 山田哲哉, “はやぶさ搭載マイクロ波放電式イオンエンジン”, 日本航空宇宙学会誌, 53 (2005), pp. 203-210.
- [4] 國中 均, “イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA's Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発”, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA's Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, JAXA-SP-06-019, 2007, pp. 5-9.
- [5] 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”, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, JAXA-SP-06-019, pp.75-81.
- [6] Emhoff, J., W. and Boyd, I. D., “NEXT Ion Optics Modeling of Total Thruster Performance,” 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, July 2005.
- [7] Farnell, C. C., Williams, J. D., and Wilbur, P. J., “NEXT Ion Optics Simulation Via ffx,” AIAA 2003-4869, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Huntsville, AL, July 2003.
- [8] Nakayama, Y. and Wilbur, P. J., “Numerical Simulation of Ion Beam Optics for Many-grid Systems,” AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 4, 2001, pp. 607.613.
- [9] Okawa, Y. and Takegahara, H., “Particle Simulation on Ion Beam Extraction Phenomena in an Ion Thruster,” 26th International Electric Propulsion Conference, IEPC 99-162, Oct. 1999.
- [10] 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, No. 6, pp.1192-1199.
- [11] Wang, J., Caoy, Y., Kafafyy, R., Martinezz, R. and Williams, J., “Ion Impingement Limits of Sub-Scale Ion Optics: Comparison of Simulation and Experiment,” AIAA 2006-4999, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California.
- [12] 中野正勝, 荒川義博, “イオンエンジンのグリッド耐久性能計算”, 日本航空宇宙学会論文集 48(2000), pp.111-117.
- [13] 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”, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, JAXA-SP-06-019, pp.47-53.
- [14] Williams, J. D., Johnson M. L. and Williams, D. D., “Differential Sputtering Behavior of Pyrolytic Graphite and Carbon-Carbon Composite Under Xenon Bombardment,” AIAA 2004-3788, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 11-14 July 2004, Fort Lauderdale, Florida.
- [15] Yamamura, Y. and Tahara, H., “Energy Dependence of Ion-Induced Sputtering Yields from Monatomic Solids at Normal Incidence,” Atomic Data and Nuclear Tables, Vol.62, No.2, 1996, pp.149-253.
- [16] Zoerb, K. A., Williams, J. D., Williams D. D. and Yalin, A. P., “Differential Sputtering Yields of Refractory Metals by Xenon, Krypton, and Argon Ion Bombardment at Normal and Oblique Incidences,” IEPC-2005-293, 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31-November 4, 2005.
- [17] Marker, C. L., Clemons, L. A., Banks, B. A., Miller, S., Snyder, A., Hung, C., Karniotis C. A. and Waters, D. L., “Transport of Sputtered Carbon During Ground-Based Life Testing of Ion Thrusters,”

NASA/TM-2005-213798, June 2005.

- [18] Funaki, I., Kuninaka, H., Toki, K., Shimizu, Y., Nishiyama K. and Horiuchi, Y., “Verification Tests of Carbon-Carbon Composite Grids for Microwave Discharge Ion Thruster,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol.18. No.1, pp.169-175.
- [19] Funaki, I., Kuninaka H. and Toki, K., “Plasma Characterization of a 10-cm Diameter Microwave Discharge Ion Thruster,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, No. 4, pp.718-727.
- [20] 大川恭志, 早川幸男, 北村正治, “グリッド損耗評価試験技術の現状”, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives)ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, JAXA-SP-06-019, pp.13-19.
- [21] 百武徹, 西田迪雄, 剣持貴弘, 村本哲也, “イオンエンジン加速グリッドにおけるスパッタリング解析に向けて”, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives)ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, JAXA-SP-06-019, pp.59-63.