

小特集 イオンエンジン耐久性評価のためのイオンビームおよびスパッタリングのシミュレーション

5. イオンエンジン加速グリッド寿命評価ツールの解析方法, 解析例, 実験との比較および評価

5. Validation and Application of a Numerical Tool for Lifetime Evaluation of Ion Thruster's Ion Optics

渡邊 裕樹, 中野 正勝¹⁾

WATANABE Hiroki and NAKANO Masakatsu

宇宙航空研究開発機構, ¹⁾ 東京都立産業技術高等専門学校

(原稿受付: 2013年11月25日)

多大な時間とコストを必要とするイオンエンジンの実時間寿命評価試験を数値解析により支援するため, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency) では, 国内の大学と協力し, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA's Ion Engine Development Initiative) ツールの研究開発を実施してきた。本章では, 小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された $\mu 10$ イオンエンジンの地上における実時間の耐久試験結果と JIEDI ツールによる損耗計算結果の比較評価について説明し, JIEDI ツールが各グリッドの損耗形状の傾向を良く再現し, 損耗質量に関しても, 実験の計測誤差の範囲で実験結果を再現できることを示した。また, JIEDI ツールによる設計支援の実例として, JAXA において新規開発が行われている $\mu 20$ イオンエンジンにおける, パラメトリックな損耗解析による寿命を考慮した加速グリッド電圧の設計結果について説明し, $\mu 20$ イオンエンジンにおいてスクリーングリッド電圧を 2300 V に設定した場合, 電子逆流およびグリッドの構造破壊に陥ることなく, 2 万時間の要求作動時間を達成するには, 加速グリッド電圧を -350 V に設定する必要があることを示した。

Keywords:

plasma propulsion, ion thruster, grid erosion, ion sputtering, lifetime qualification, aerospace engineering

5.1 はじめに

本章では, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency) が国内の大学と協力して研究開発を進めてきた JIEDI (JAXA's Ion Engine Development Initiative) ツールの検証結果として, 小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された $\mu 10$ イオンエンジンの地上における耐久試験結果と JIEDI ツールによる損耗計算結果の比較評価について述べる。また, JIEDI ツールによる設計支援の実例として, JAXA において新規開発が行われている $\mu 20$ イオンエンジンにおける, パラメトリックな損耗解析による寿命を考慮した加速グリッド電圧の設計結果について述べる。

5.2 JIEDI ツールの検証

本節では, 地上におけるイオンエンジンの実時間耐久試験の実験結果を用いた JIEDI ツールの検証結果を示す。 $\mu 10$ イオンエンジンの Prototype Model (PM) は, 2 万時間後の各グリッドの質量変化量およびデジタルマイクロスコープによる各グリッド形状の 3 次元計測値が存在するため [1, 2], 実験と同条件を与えて, JIEDI ツールにより 2 万時間のグリッド損耗計算を行い, 計算結果と計測値を比較する。

5.2.1 計算方法および条件

図 1 に $\mu 10$ PM イオンエンジングリッドシステムの寸法およびグリッド損耗計算のための解析領域を示す。 $\mu 10$ PM イオンエンジンでは, スクリーン (Screen), 加速 (Accel.), 減速 (Decel.) グリッドの孔半径が各々 1.525 mm, 0.9 mm, 1.25 mm, スクリーン, 加速, 減速グリッドの厚みが各々 0.95 mm, 1.0 mm, 1.0 mm, スクリーン-加速グリッド間距離が 0.32 mm, 加速-減速グリッド間距離が 0.5 mm である。2 章で説明したとおり, グリッド孔の配列の対称性から, 解析領域は 1 孔を 1/12 の領域に縮小した図 1 に示す三角柱形状とする。解析領域は 6 面体 8 節点要素により分割し, 節点数 26500, 要素数約 22700 のメッシュを用いて計算する。スクリーングリッドより上流の放電室領域, また, 減速グリッドより下流の中和領域については電子を含んだ

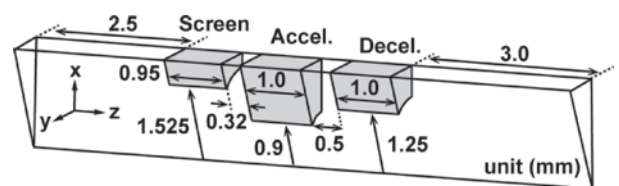


図 1 $\mu 10$ PM イオンエンジングリッドシステムの寸法およびグリッド損耗解析領域。

プラズマ領域であるので、イオンの流れ方向の要素幅がデバイ長以下になるように設定した。その他の領域の分割数は計算結果に与える影響がないように決定した。

表1に $\mu 10$ PMのグリッド損耗計算条件を示す。 $\mu 10$ PMでは、キセノンを推進剤として使用し、イオン加速グリッドは3枚とも耐スパッタ材のカーボン・カーボン複合材で製作されている。ここで、イオンビーム放出面の直径は10.5 cmである。また、イオンを加速するための電界を形成するために、スクリーングリッドを1500 V、加速グリッドを-350 V、減速グリッドを0 Vに維持している。

JIEDI ツールでグリッド損耗計算を実施する際に必要なパラメータは、先に示したグリッド材料、推進剤の種類、各グリッドの電位に加え、グリッド1孔から引き出されるイオン電流、スクリーングリッド電位に対する放電室プラズマの電位（放電電圧）、2価イオン比、グリッド表面温度、放電室および下流プラズマの電子温度、グリッド1孔から流出する中性粒子の質量流量である。また、スパッタ収量モデルおよびスパッタ粒子の再付着率についても設定する必要がある。ここで、放電電圧は解析領域上流境界における電位の境界条件として用いられ、スクリーングリッド上流の電位分布に影響を与え、結果として、イオンビームの軌道に影響を与える。また、グリッド表面温度は、中性粒子密度分布を計算する際の中性粒子の初期速度、中性粒子がグリッド表面で拡散反射された後の速度、グリッド表面からはじき出されたスパッタ粒子の初期速度を計算する際に使用する。

図2に $\mu 10$ イオンエンジンのグリッド孔分布およびイオンビーム電流分布を示す。図2(a)の左図のイオンエンジンの概念図では、グリッド孔を大きめに大きく描いているが、実際の $\mu 10$ イオンエンジンでは、グリッド1枚あたりイオンビーム放出面の直径10.5 cmの範囲で855個の孔が開いており、図2(a)の右図の白丸のように分布している。な

お、孔配置の対称性から図2(a)はグリッド1枚（全周360度）ではなく、1/4（90度）の範囲を示している。一方、グリッド孔は規則正しく配列されているが、一般的にイオンエンジンから引き出されるイオンは、イオンビーム放出面の径方向に分布をもつ。開発時に減速グリッドから下流1.5 cmで計測された $\mu 10$ イオンエンジンの径方向のイオンビーム電流密度分布[3]を図2(b)に灰丸（第1軸）で示す。ここで、径方向の原点はイオンビーム放出面の中心に設定している。排気されたイオンビームはイオンビーム放出面の直径10.5 cmに対して、下流1.5 cmの計測位置で12 cm程度に広がっている。この実験値を4次の多項式で近似し、直径が10.5 cmになるように線形に補正をかけ、1孔から引き出されるイオン電流量に推算したものが図2(b)の実線（第2軸）である。図2(b)で示されるように、 $\mu 10$ イオンエンジンから引き出されるイオンビームは径方向に不均一であるため、本解析では表1に示すように超高、高、中、低、超低電流に相当する5つのグリッド孔について計算を実施する。なお、図2(a), (b)に示す「Hole 1」および「Hole 2」は、グリッド損耗形状の実験結

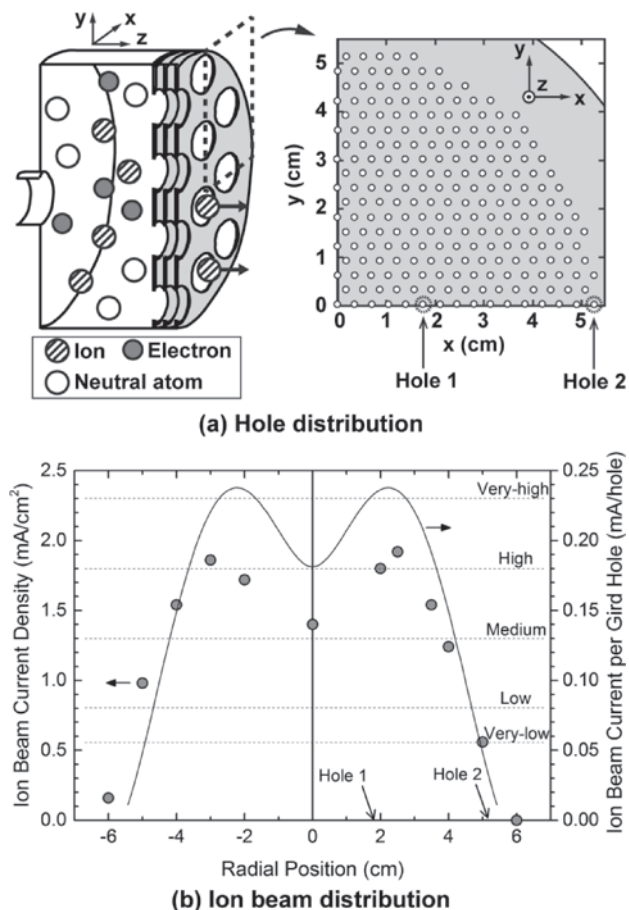


図2 $\mu 10$ イオンエンジンのグリッド孔分布およびイオンビーム電流分布：(a)左図：イオンエンジン概略、右図：グリッド孔の径方向分布（対称性からグリッド1枚の1/4を描画）、(b)イオンビーム電流密度の径方向分布（実験値、灰丸、第1軸）および1孔あたりのイオンビーム電流の径方向分布（推算値、実線、第2軸）。「Hole 1」および「Hole 2」は、グリッド損耗形状の実験結果と比較する際に着目したグリッド孔の位置を示す。

表1 $\mu 10$ PM イオンエンジンのグリッド損耗計算条件。

Parameter	Value
Propellant	Xenon
Grid material	Carbon-carbon composite
Beam diameter	10.5 cm
Grid voltage (Sc, Ac, De)*	1,500 V, -350 V, 0V
Ion beam current per hole	
- Very high	0.23 mA/hole
- High	0.18 mA/hole
- Medium	0.13 mA/hole
- Low	0.08 mA/hole
- Very low	0.055 mA/hole
Discharge voltage	25 V
Doubly charged ion fraction	0.15
Grid surface temperature	373 K
Electron temperature	5 eV
Propellant utilization efficiency	0.80
Average ion beam current per hole	0.156 mA/hole
Sticking factor	0.78
Sputtering model	CSU or MD

*Sc: Screen grid, Ac: Accel. grid, De: Decel. grid.

果と計算結果を比較する際に着目したグリッド孔の位置を示す。

一方、グリッド1孔から引き出されるイオン電流以外のパラメータである放電電圧、2価イオン比、グリッド表面温度、電子温度は、表1に示す $\mu 10$ イオンエンジンの開発時に計測された値[4-6]を使用する。これらのパラメータもイオンビーム放出面の径方向に分布をもつが、十分な計測が行えていないため、本計算では、径方向に一樣として設定している。また、グリッド1孔から流出する中性粒子の質量流量も、計測が困難であるため、径方向に一樣に中性粒子が流出するものとし、実験から容易に計測可能な推進剤利用効率（推進機に投入した推進剤流量に対するイオンビームとして抽出された推進剤流量の比率）、グリッド1孔から引き出されるイオン電流の平均値（推進機から抽出される全イオン電流をグリッド孔の総数で平均した電流値）を用いて計算する。ただし、2章で詳述したとおり、推進剤利用効率と平均イオン電流から求めた中性粒子の質量流量は、2価イオンの影響を考慮できないため、2価イオン比を用いて質量流量を補正する。なお、表1に示す推進剤利用効率、平均イオン電流とも、他のパラメータと同様に $\mu 10$ イオンエンジンの開発時に計測された値[1]を使用する。

JIEDI ツールでは、スパッタリングにより飛散した損耗原子の再付着は、グリッド壁面への損耗原子の流束に再付着率を一律に乗じてその量を評価する。本計算では、実験値[7]および計算値[8]から再付着率を0.78と設定した。また、本計算では、スパッタ収量モデルの影響を比較するために、JIEDI ツールに実装されているCSUモデルおよびMDモデルをそれぞれ用いた。前者のCSUモデルは、Colorado State UniversityのWilliamsらが計測した微分スパッタ収量の実験データベース[9]を利用したものである。一方、後者のMDモデルは、4章で説明した分子動力学シミュレーション（Molecular Dynamics (MD) Simulation）による微分スパッタ収量のデータベースを利用したものである。どちらのモデルもイオン入射エネルギーが200~1000 eV (CSU)、100~500 eV (MD)の範囲の微分スパッタ収量のデータベースであり、範囲外の微分スパッタ収量に関しては、線形近似による外挿を行っている。

JIEDI ツールでは、グリッド損耗を模擬するために、OPTJによる損耗率計算と計算格子の更新を繰り返す。本解析では、損耗の激しい3000時間までは500時間刻みで計算格子を更新し、3000時間から2万時間までは1000時間刻みとした。この時間刻みは損耗結果に影響がないように決定した。また、計算格子の更新方法は、2章で説明した解適合格子による更新方法を用いた。

JIEDI ツールによる損耗計算において、Intel社のcore i7を使った一般的なPCで、OPTJによる損耗率計算が25分程度、計算格子の更新が3分程度の計算時間である。2万時間の実時間耐久試験の損耗を計算するためには、先に示した時間刻みで、OPTJによる計算と計算格子の更新を1孔あたり25回程度実施する。これに要する計算時間は12時間程度であり、2章で説明した高速化によりJIEDI ツールは

非常に短時間で損耗評価を行うことができる。

5.2.2 損耗解析結果

(a) 1孔から抽出されるイオン電流の影響

図3に、2万時間後の1孔あたりの各グリッド質量変化量に対する1孔から抽出されるイオン電流の影響を、図4に2万時間後のグリッド孔の軸上最小電位に対する1孔から抽出されるイオン電流の影響を示す。また、図5に作動開始時における $\mu 10$ PMイオンエンジンの超高電流孔の軸上電位分布を示す。図5の上図は、解析領域における電位分布を示しており、負電位に印加された加速グリッドが周辺に負電位の領域を形成しているのがわかる。イオンエンジンにおいて、加速グリッドの損耗により、加速グリッドが形成する負電位が高くなる。するとグリッドシステム下流に存在する中和電子がその負電位を乗り越えて逆流するようになる。その結果、正常なイオン加速ができなくなり、グリッドシステムは寿命を迎える。図5の上図からわかるとおり、この負電位の領域の中では加速グリッドから最も遠い軸上の電位が最も高くなる（0Vに近づく）ことがわかる。図5の下図はその軸上電位を軸に沿って示したもの

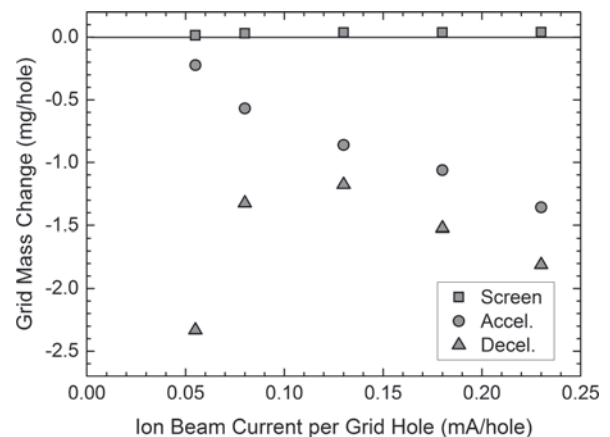


図3 $\mu 10$ PMイオンエンジンにおける2万時間作動後の1孔あたりの各グリッド質量変化量に対する1孔から抽出されるイオン電流の影響。スパッタ収量モデルはMDモデルを使用。

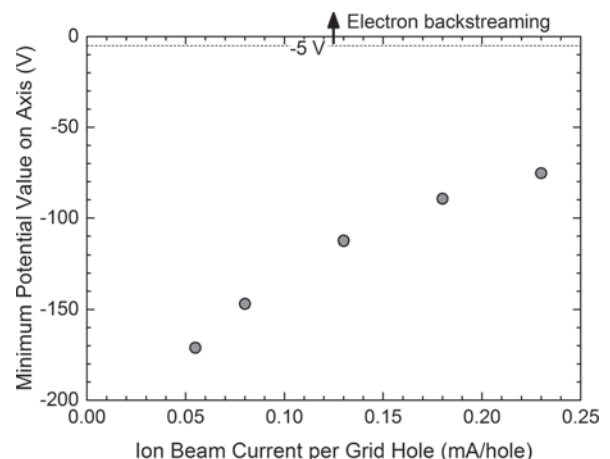


図4 $\mu 10$ PMイオンエンジンにおける2万時間作動後の軸上最小電位に対する1孔から抽出されるイオン電流の影響。スパッタ収量モデルはMDモデルを使用。

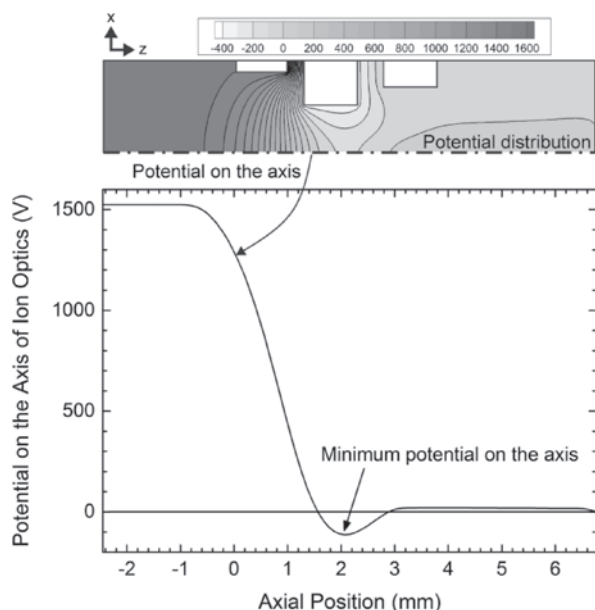


図5 作動開始時（0時間）における $\mu 10\text{PM}$ イオンエンジンの超高電流孔の軸上電位分布。

である。ここで、軸方向の原点はスクリーングリッドの上流端面である。図5の下図において軸上電位で最も低い値（軸上最小電位）が0 Vにどの程度近づいているかが、電子逆流を判断する上で重要であるため、図4では2万時間作動後の各電流孔の軸上最小電位を示している。なお、本稿では、軸上最小電位や加速グリッド電圧の比較を行う際に、 -100 V と -200 V の電位の比較では、 -200 V に比べ -100 V の方が電位は高いと表現する、これは感覚的に間違いやすいので注意されたい。また、イオンエンジンでは、電位の基準（0 V）は宇宙機の電位となる。

図3において、質量変化量が負値であることは質量の減少、つまりグリッドが損耗していることを示していることから、スクリーングリッドは他の加速・減速グリッドに比べてほとんど損耗しないことがわかる。一方、加速グリッドは1孔から抽出されるイオン電流の増加とともに激しく損耗することが分かる。減速グリッドは、中電流（ 0.13 mA/hole ）より高い電流が抽出されているグリッド孔では、加速グリッドと同様にイオン電流の増加とともに損耗が激しくなるが、低・超低電流孔とイオン電流が低下する場合でも、損耗量は増加し、加速グリッドの損耗とは傾向が異なる。特に、超低電流孔（ 0.055 mA/hole ）の減速グリッドは最も激しく損耗する。また、図4よりグリッド孔の軸上最小電位に関しては、超高電流孔（ 0.23 mA/hole ）の値が最も高いことがわかる。ここで、図3および図4はスパッタ収量モデルにMDモデルを使用した場合の結果であるが、CSUモデルの場合でも質量変化量および軸上最小電位について同様の傾向が得られる。

加速グリッドの損耗は、主に電荷交換衝突・弾性散乱衝突によって発生したイオン・中性粒子の衝突によって引き起こされる。これらのイオン・中性粒子の発生量は、孔内の中性粒子密度とイオン電流により左右されるため、最も高いイオン電流が抽出されるグリッド孔が最も激しく損耗

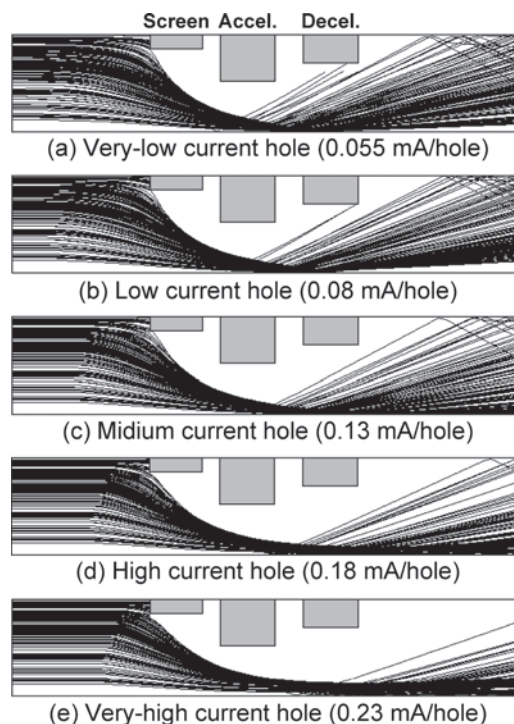


図6 作動開始時（0時間）における $\mu 10\text{PM}$ イオンエンジンの主流イオン軌道（黒線）に対する1孔から抽出されるイオン電流の影響：(a)超低、(b)低、(c)中、(d)高、(e)超高、の各電流孔での主流イオン軌道を示す。

する。図6に作動開始時（0時間）における主流イオンの軌道に対する1孔から抽出されるイオン電流の影響を示す。黒線が主流イオンの軌道を示しており、1孔から抽出されるイオン電流が小さくなるほど、グリッド下流で主流イオンが発散することが確認できる。特に、低・超低電流のグリッド孔においては、主流イオンが減速グリッドに直撃している（図6(a), (b)）。この主流イオンの直撃が減速グリッドを激しく削るため、図3で示したイオン電流の低下とともに損耗量が増加するという減速グリッドの特徴的な損耗が発生する。一方、中電流（ 0.13 mA/hole ）を越える場合においても減速グリッドの損耗量が増加する。これは、イオン電流の上昇とともに、主流イオンの直撃に代わり、荷電交換衝突・弾性散乱衝突によるイオン・中性粒子が増加するためである。

図4の結果より、電子逆流に起因するグリッドシステムの寿命を評価する場合には、軸上最小電位が最も高くなるような、最も高いイオン電流が抽出されるグリッド孔に着目する必要がある。ここで、 $\mu 10\text{PM}$ イオンエンジンは、2万時間の作動後であっても、超高電流のグリッド孔の軸上最小電位は -70 V を維持しており、下流の 5 eV の中和電子を排斥するのに十分な電位を維持できているため、電子逆流は発生しないと計算結果から判断できる。また、損耗によりグリッドの孔形状が構造的に維持できなくなった場合にも同様に寿命を迎えるため、図3の結果より、加速グリッドの構造破壊を判断するためには、電子逆流と同様に最も高いイオン電流が抽出されるグリッド孔に着目する必要がある。一方、減速グリッドの構造破壊を判断するためには、イオンビームの直撃による損耗が激しい、最も低い

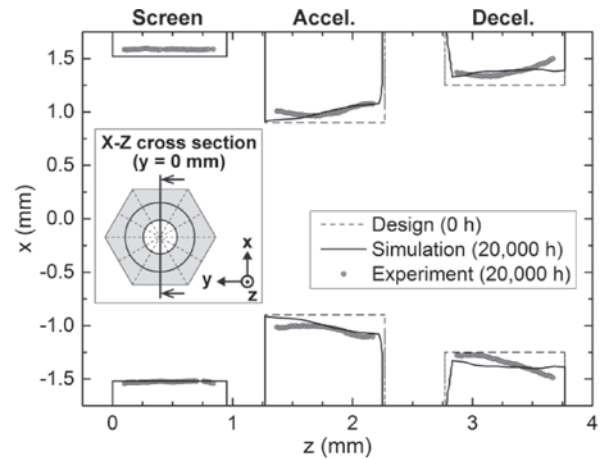
イオン電流が抽出されるグリッド孔に着目する必要がある。

(b) 損耗形状の実験との比較

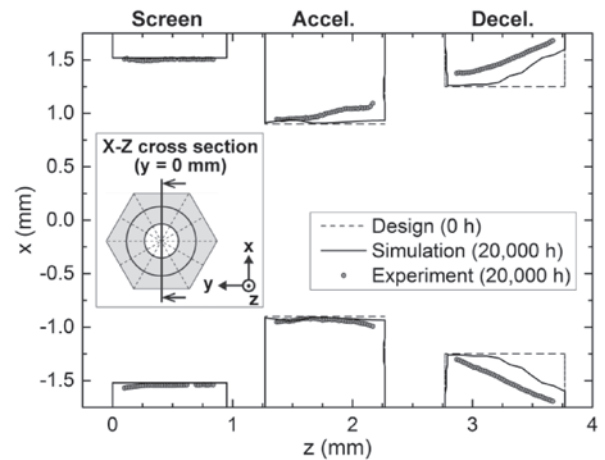
先に説明したグリッドシステムの寿命に対する1孔から抽出されるイオン電流の影響から、寿命を評価する上で重要なグリッド孔は、加速グリッドの構造破壊および電子逆流に関しては、最も高いイオン電流が抽出されるグリッド孔であり、減速グリッドの構造破壊に関しては、最も低いイオン電流が抽出されるグリッド孔である。これを踏まえ、図7に2万時間作動後の $\mu 10\text{PM}$ イオンエンジンの超高電流 (0.23 mA/hole) および超低電流 (0.055 mA/hole) のグリッド孔の損耗形状のMDモデルを使用した場合の計算結果と地上耐久試験における実験結果の比較を示す。なお、図7では x 方向および y 方向の原点を局所的にグリッド孔の中心に設定し、スクリーングリッドの上流端面を z 方向の原点に設定している。また、損耗を計測した超高電流のグリッド孔は、ビーム放出面中心から径方向に1.75 cm離れた位置 (図2 (a), (b)における「Hole 1」)、超低電流のグリッド孔は、ビーム放出面中心から径方向に5.25 cm離れた位置 (図2 (a), (b)における「Hole 2」)にある。特に超低電流のグリッド孔 (Hole 2) は、ビーム放出面において最外部のグリッド孔である。ここで、図7 (a), (b)で示したグリッド孔の断面は、図1で示した解析領域である直角三角形の隣辺に沿った断面である。また、地上耐久試験において、長時間作動前のグリッド形状の計測は行っていないため、設計値を初期形状として破線で描画している。また、2万時間後のグリッド形状の計測において、各グリッド上下流の両端面近傍の形状に関しては、計測ノイズが大きいため、計測できていない。例えば、加速グリッドの厚みは1.0 mmであるが、損耗形状の計測値が存在するのは厚みが0.1 から0.9 mmの範囲である。また、図7 (c)は低電流孔における減速グリッドを下流から覗きこんだ xy 平面の実験結果と計算結果の比較である。ただし、図7 (c)において、実験結果は減速グリッドの上流から厚み0.9 mmでの計測値、計算結果は減速グリッドの下流端面 (上流から厚み1.0 mm)での値を描画している。

図7 (a), (b)における計算結果と実験結果の比較から、スクリーングリッドはほとんど損耗しないことがわかり、先の図3で議論したスクリーングリッドの計算結果の妥当性を示している。また、図7 (a)に示す超高電流のグリッド孔では、加速グリッドの下流側に強い損耗が確認されており、実験結果と計算結果はよく一致している。一方、図7 (b)に示す超低電流のグリッド孔においても、減速グリッドが下流に向かって末広がりになっており、実験結果と計算結果は定性的によく一致している。これは、図6で示した主流イオンの直撃による損耗をJIEDIツールが模擬できていることを示している。また、図7 (c)に示すように、超低電流孔の減速グリッドでは、六角形の損耗が顕著に確認されており、計算結果でも同様の損耗形状が得られている。このことは、JIEDIツールによる3次元での損耗計算が六角形の損耗形状も再現できることを示している。

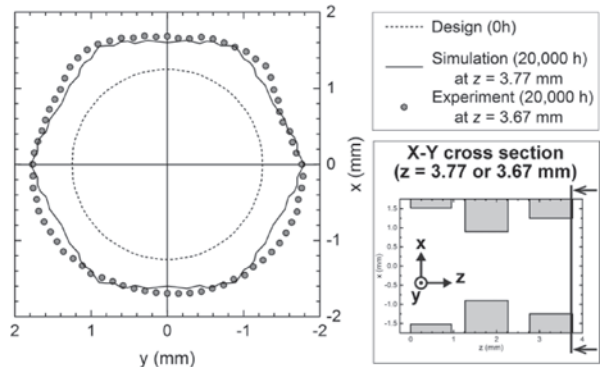
しかし、図7 (b)から確認できるように、定量的には減



(a) Side view of grid erosion profile in very-high current hole (0.23 mA/hole, Hole 1 in Fig. 2).



(b) Side view of grid erosion profile in very-low current hole (0.055 mA/hole, Hole 2 in Fig. 2).



(c) Downstream view of decel. grid erosion profile in very-low current hole (0.055 mA/hole, Hole 2 in Fig. 2).

図7 2万時間作動後の $\mu 10\text{PM}$ イオンエンジングリッド形状の計算値と実験値の比較: (a) 超高電流孔でのX-Z断面, (b) 超低電流孔でのX-Z断面, (c) 超低電流孔でのX-Y断面。スパッタ収量モデルはMDモデルを使用。なお、作動初期 (0時間) のグリッド形状として設計値を破線で示す。

速グリッドの末広がり損耗が始まる z 方向の位置は、計算結果に比べて実験結果の方が上流側に位置しており、実験結果と計算結果には差異が存在する。これは、上流放電室のプラズマ状態の径方向分布や熱変形によるグリッド間の相対位置の不確定性により、イオン軌道が若干変化し、直撃する位置が変化するためであると考えられる。このため、より高精度の損耗計算を行うためには、JIEDIツール

に入力する実験値の空間分布などの計測精度の向上, また, グリッド間の軸ずれや傾きなどの相対位置の差異を JIEDI ツールが考慮できるように機能を拡張する必要がある。

また, 図 7 (b) に示す超低電流孔の加速グリッドの損耗では, $-x$ 側の損耗は実験結果と計算結果はよく一致しているが, $+x$ 側の損耗は実験では下流部分が強く損耗しているのに対して, 計算ではこれを再現できていない。超低電流孔は先の図 2 (a), (b) で説明したとおり, ビーム放出面の最外部に位置しており, $-x$ 側には隣接する孔は存在するが, $+x$ 側には隣接する孔は存在しない。このため, 隣接孔から抽出されるイオンによる斥力が不均一になることで, イオンの軌道は $+x$ 側に曲がる。その結果, 図 7 (b) の計測結果のような加速グリッドの損耗が発生すると予想される。しかし, 今回の計算では, $-x, +x$ どちらの方向にも孔が存在するという対称性を仮定して計算しているため, このような複数孔間での影響を正確に再現するためには, これまでの 1 孔の 1/12 領域だけでなく, 複数孔領域に解析領域を拡張する必要がある。

(c) 損耗質量の実験との比較

図 7 は 1 孔に着目した損耗形状の比較であったが, $\mu 10$ PM イオンエンジンの地上耐久試験では, 855 個の孔の開いたグリッド 1 枚あたりの質量変化量も得られている。図 8 に MD モデルを使用した場合, CSU モデルを使用した場合の加速グリッドおよび減速グリッドの 1 枚あたりの質量変化量の時間履歴と 2 万時間後の質量変化量の計測値との比較について示す。ここで, 損耗計算ではイオン電流の異なる 5 個の孔しか計算を行っていないため, 図 3 に示す損耗計算によって得られたイオン電流に対する各グリッドの質量変化量の関係を, 図 2 (b) に示す径方向のイオン電流分布に沿って径方向に積分し, それを周方向に 1 周積分することによってグリッド 1 枚あたりの質量変化量を求めた。ただし, イオン電流に対する質量変化量の関係を求める際には, 5 つのイオン電流孔に対して区分線形補間を行い, 半径方向のイオン電流分布については図 2 (b) で説明したとおり 4 次の多項式で近似した。

図 8 (a) より, 加速グリッドは作動時間に対して単調に損耗が進行していくことがわかる。また, 実験値と比較して, CSU モデルを使用した場合は, 損耗量を過少に評価し, MD モデルを使用した場合は, 損耗量を過大に評価している。ここで, 地上における耐久試験では, 排気されたイオンビームが真空槽壁面をスパッタし, スパッタされた壁面材料がグリッドに飛来し, 再付着することによりグリッド質量が増加するため, 質量変化量の実験値は大きな不確実性をもつ。 $\mu 10$ PM の地上耐久試験では, その不確実性の評価を行っていないが, 1 つ前の $\mu 10$ イオンエンジンの Engineering Model (EM) の地上耐久試験では, 18000 時間後の質量変化量のエラーバーは $+0.11$ g, -0.53 g であった[4]。このため, $\mu 10$ PM の地上耐久試験でも同程度の不確実性が存在すると考えられ, これを考慮すると, JIEDI ツールによる加速グリッドの損耗量見積もりは, 実験の計測誤差の範囲でよく一致しているといえる。

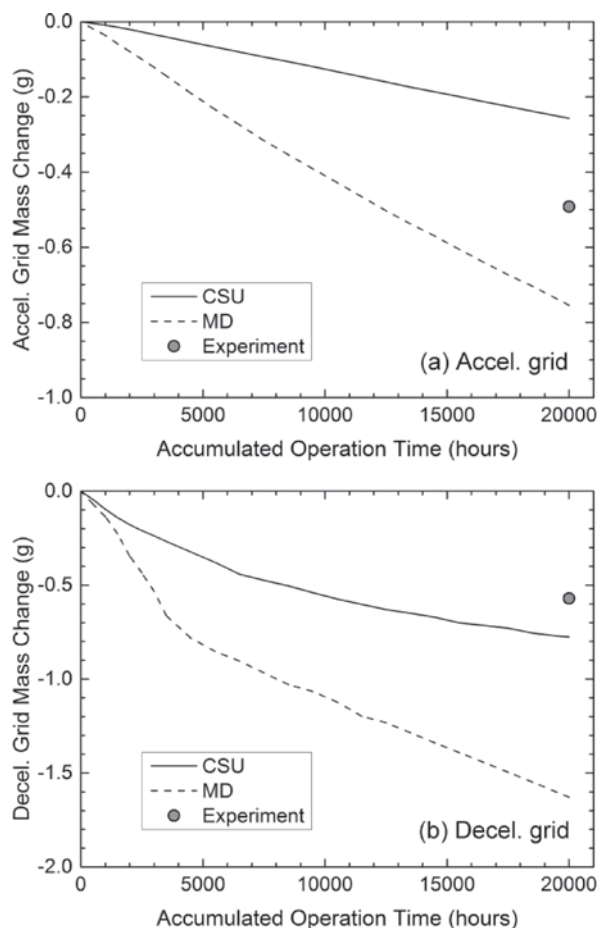


図 8 作動時間に対する $\mu 10$ PM イオンエンジンの (a) 加速グリッド, および, (b) 減速グリッドの質量変化量. 各グリッドの質量変化量はグリッド 1 枚あたりの値であり, 計算した 5 つの電流孔の 1 孔あたりの質量変化量と径方向のイオンビーム電流分布から計算した。

図 8 (b) より, 減速グリッドは作動開始から 5000 時間程度までに主流イオンの直撃により急激に損耗が進行した後, 加速グリッドと同様に作動時間に対して比較的単調に損耗が進行することがわかる。また, 実験結果に対して, 計算結果は MD モデル, CSU モデルとも過大に損耗量を見積もっているといえる。しかし, 減速グリッドの実験値も, 加速グリッドと同様にスパッタされた真空槽壁面材の再付着の影響により大きな不確実性をもつ。特に減速グリッドは最も下流に設置されたグリッドであるので, その不確実性は大きく, $\mu 10$ EM の地上耐久試験では, 18000 時間後の質量変化量のエラーバーは -2.9 g であった[4]。このように不確実性が大きいため, 単純に実験結果と計算結果を比較することは難しいが, 減速グリッドの損耗量の実験値に対して, 損耗計算による損耗量の計算値が過大に評価されることは, 真空槽から飛来するスパッタされた壁面材料の再付着による減速グリッド質量の増加を考慮すれば, 妥当な結果といえる。

また, 図 8 より, MD モデルと CSU モデルを比較すると, 加速グリッドの損耗において, CSU モデルを用いた場合に対して, MD モデルを用いた場合は 3 倍程度損耗量を多めに見積もり, 減速グリッドの損耗において, CSU モデルを用いた場合に対して, MD モデルを用いた場合は 2 倍程度

損耗量を多くに見積もることがわかる。

図9にJIEDIツールに実装されているスパッタ収量モデルの入射エネルギー毎のグリッド壁面へのイオン入射角に対するスパッタ収量の依存性を示す。どちらのモデルも入射エネルギーに関係なく、CSUモデルは入射角依存性が弱く、MDモデルは入射角60度付近にピークをもつような入射角依存性をもつ。これは、4章で議論したように、CSUモデルは実験値のデータベースであり、グリッド表面の粗さにより、入射角度がランダム化された結果を計測したものと見えるため、入射角に対する依存性が弱くなる。一方、MDモデルは、そのような表面粗さを考慮しない、表面がÅスケールで平坦とみなした結果であるので、入射角度に強い依存性をもつと考えられる。現実のスパッタ収量は、MDモデルとCSUモデルの間に存在すると考えられるため、図8(a)において、加速グリッドの質量変化量の実験結果が両モデルによる計算結果の間に存在していることは、妥当な結果といえる。

ここで、図10に $\mu 10$ PM イオンエンジンの作動開始時における、超高電流孔での入射エネルギーに対する加速グリッドおよび減速グリッドへの平均イオン入射角を示す。

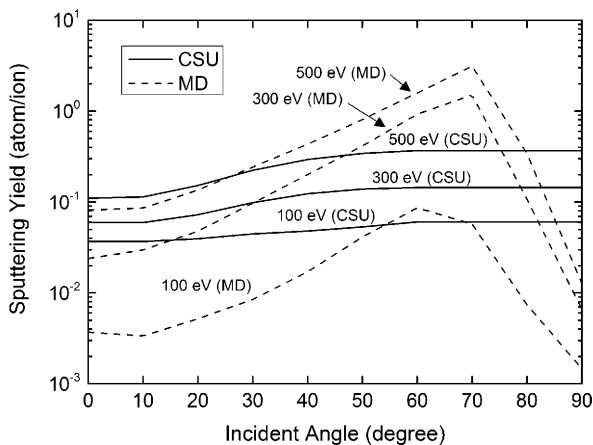


図9 入射エネルギー毎のグリッド壁面へのイオン入射角に対するスパッタ収量の依存性。

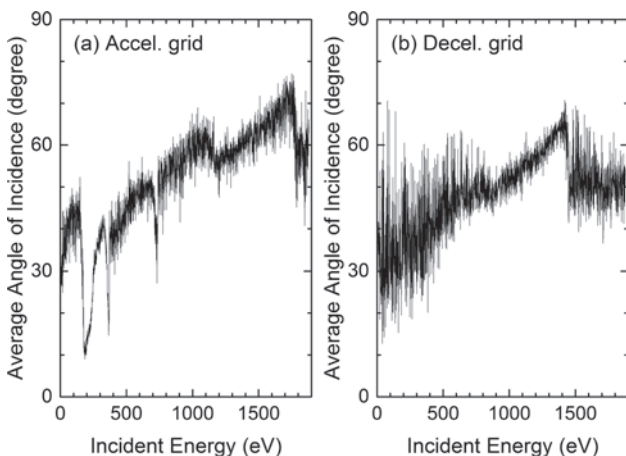


図10 $\mu 10$ PM イオンエンジンの作動開始時（0時間）における、超高電流孔（0.23 mA/hole）での入射エネルギーに対する(a)加速グリッド、および、(b)減速グリッドへの平均イオン入射角。

図10から、どちらのグリッドも全エネルギー領域に亘って30~60度程度で平均的にイオンが入射してくることがわかる。この入射角度領域は、図9で見られるようにCSUモデルとMDモデルの差が最も強く表れる領域であり、この結果、先に示したような損耗量見積りの大きな差を生む原因となっている。このため、今後は、より高精度なスパッタ収量モデルの構築が重要な課題といえる。また、本計算で使用したスパッタ収量モデルは、グリッド損耗を引き起こすすべてのエネルギー領域を網羅できていないため、100 eV以下のより低入射エネルギーのスパッタリング現象に関しても今後整備を進めていく必要がある。

5.3 JIEDI ツールの設計への適用

$\mu 20$ イオンエンジンは、 $\mu 10$ イオンエンジンの4倍の推力をもつイオンエンジンであり、現在、JAXAにおいて開発が進められている[10]。本節では、 $\mu 20$ イオンエンジンに対するJIEDIツールによる設計支援の実例について示す。

$\mu 20$ イオンエンジンは、従来のイオンエンジンと比較して、イオンの排気速度を高めるために、スクリーングリッド電圧を2,300 Vに変更している。このため、イオンの引き出しおよび寿命の観点から適切な加速グリッド電圧を設定する必要がある。ここで、加速グリッドは、印加する負電圧を低く設定するほど、グリッド孔中に形成される中和電子に対する障壁は大きくなるが、電荷交換などによって発生した低速イオンのグリッド壁面への入射エネルギーも大きくなるため、激しい損耗が発生する。このため、加速グリッド電圧は要求寿命に対して適当な値を設定する必要がある。

本計算では、スクリーングリッド電圧を2,300 Vに固定し、加速グリッド電圧を変化させたパラメトリックな損耗解析を実施し、任意の加速グリッド電圧で2万時間を要求寿命として、中和電子逆流とグリッドの構造破壊が発生するかどうかを評価する。

5.3.1 計算方法および条件

図11に本計算で使用した $\mu 20$ イオンエンジングリッドシステムの寸法と解析領域を、表2に $\mu 20$ イオンエンジンのグリッド損耗計算条件を示す。 $\mu 20$ イオンエンジンでは、図1で示した $\mu 10$ PM イオンエンジンに比べ、推力増強のため、スクリーングリッドを薄く設定している。また、設計のためにスクリーングリッドと加速グリッドの間の距離 l_g を可変としている。過去の研究から加速グリッド電圧が-150 Vでは寿命の観点から高すぎるとの結果が得られているため、本計算では、変化させる加速グリッド電圧をよ

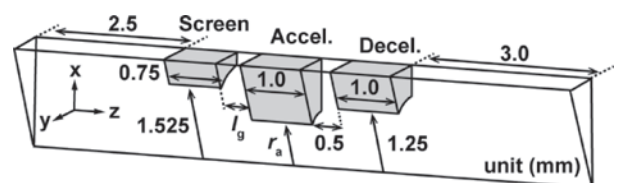


図11 $\mu 20$ イオンエンジングリッドシステムの寸法およびグリッド損耗解析領域。

表2 $\mu 20$ イオンエンジンのグリッド損耗計算条件.

Parameter	Value
Propellant	Xenon
Grid material	Carbon-carbon composite
Accel. grid hole radius, r_a	
- High	0.75 mm
- Low	0.45 mm
Screen to Accel. grid gap, l_g	$0.25 / 1450 \times (2300 - \phi_a)$ mm
Grid voltage	
- Screen	2,300 V
- Accel. ϕ_a	-300 V or -350 V or -400 V
- Decel.	-30 V
Ion beam current per hole	
- High	0.315 mA/hole
- Low	0.0525 mA/hole
Discharge voltage	10 V
Doubly charged ion fraction	0
Grid surface temperature	403.15 K
Electron temperature	5 eV
Propellant utilization efficiency	0.74
Average ion beam current per hole	0.175 mA/hole
Sticking factor	0.78
Sputtering model	CSU

り低電圧の-300, -350, -400 V と3つの電圧値に対して評価を行った。スクリーングリッドと加速グリッドの間の距離 l_g は、スクリーングリッドと加速グリッド間で絶縁破壊が生じないように、加速グリッド電圧 ϕ_a が変化しても、グリッド間に生じる電界強度が変化しないように、以下に示す関係式から設定した。

$$l_g = 0.25/1450 \times 2300 - \phi_a. \quad (1)$$

ここで、式(1)における参照とする電界強度 1450/0.25 V/mm は、過去のイオンエンジンの作動実績である、スクリーングリッド電圧 1,300 V、加速グリッド電圧 -150 V、スクリーン-加速グリッド間距離 0.25 mm から求めた値である。

本計算では、寿命を評価するという観点から、最も高いイオン電流が抽出されるグリッド孔 (High, 0.315 mA/hole) と最も低いイオン電流が抽出されるグリッド孔 (Low, 0.0525 mA/hole) の2つの孔に関して損耗計算を実施する。また、 $\mu 20$ イオンエンジンでは推力を増強するため、加速グリッドの孔半径 r_a を抽出されるイオン電流に対して最適となるように設定しているため、高電流のグリッド孔では 0.75 mm に、低電流のグリッド孔では 0.45 mm に加速グリッド孔半径を設定している。また、実験値が存在しないため、2価イオン比は0として、引き出されるイオンはすべて1価と仮定した。

解析領域は6面体8節点要素により分割し、節点数約23700、要素数約20500のメッシュと前節で説明した $\mu 10$ PM イオンエンジンと同程度の計算規模である。一方、計算格子の更新には、短時間で急激な損耗が見込まれたので、解適合格子法ではなく、節点座標を固定し、要素の属性を更新する手法を用いて計算を行った。この手法に関し

ても、解適合格子法と同様に2章を参照されたい。

5.3.2 パラメトリック解析結果

図12に各加速グリッド電圧に対する高電流のグリッド孔における軸上最小電位の時間履歴を示す。加速グリッド電圧が低いほど、作動開始時の軸上最小電位は低く、作動時間の増加とともに、すべての加速グリッド電圧で損耗による軸上最小電位の上昇が確認できる。図12の結果より、加速グリッド電圧が-300 V の場合には、2万時間の作動時間付近で、軸上最小電位が下流中和プラズマの電子温度から求まる-5 V を上回るため、中和電子の逆流が発生すると予想される。一方、加速グリッド電圧が-350 V と-400 V の場合には、-5 V を上回るのは35000時間以降であることがわかる。本計算はCSUモデルを用いて計算を実施しており、MDモデルの場合には前節で示したとおり、CSUモデルに比べ、より速く損耗が進行すると予想され、その不確定性を考慮する必要がある。この他、計算条件として与えている実験における計測値から設定したパラメータの不確定性を考慮すると、2万時間の要求作動時間を保証するには、加速グリッド電圧は-350 V もしくは-400 V を選択する必要がある。

宇宙機用の機器であるイオンエンジンにおいて、大きい電位差の要求は、電源の重量増や絶縁のための配線の重量増を招き、他の機器の搭載量が減少するため好ましくない。このため、加速グリッド電圧は高い(宇宙機電位(0 V)と加速グリッド電位の差が小さい)方が望ましく、-350 V と-400 V では、-350 V に加速グリッド電圧を設定することが望ましい。このため、電子逆流に対する評価は先に述べた通りであるが、加速グリッド電圧を-350 V に設定した場合のグリッド構造破壊に対する評価を実施する必要がある。図13は2万時間後の低電流と高電流のグリッド孔における各グリッドの損耗形状を示している。図13(a), (b)の左図は、スクリーン・加速・減速グリッドを側面から見たものであり、孔の壁面形状がわかるように可視化している。コンターは単位時間あたりの損耗体積(損耗率)を示しており、濃いほどその部分が強く損耗することを示している。また、損耗率が負値となっている部分に関しては、スパッタによる損耗以上にスパッタされたグリッド材の再

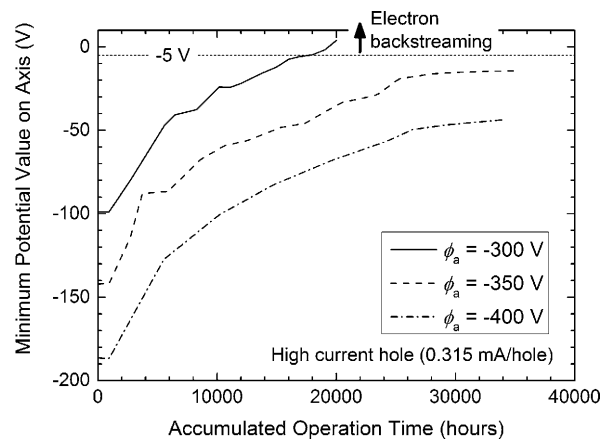


図12 $\mu 20$ イオンエンジンの各加速グリッド電圧に対する高電流孔における軸上最小電位の時間履歴。

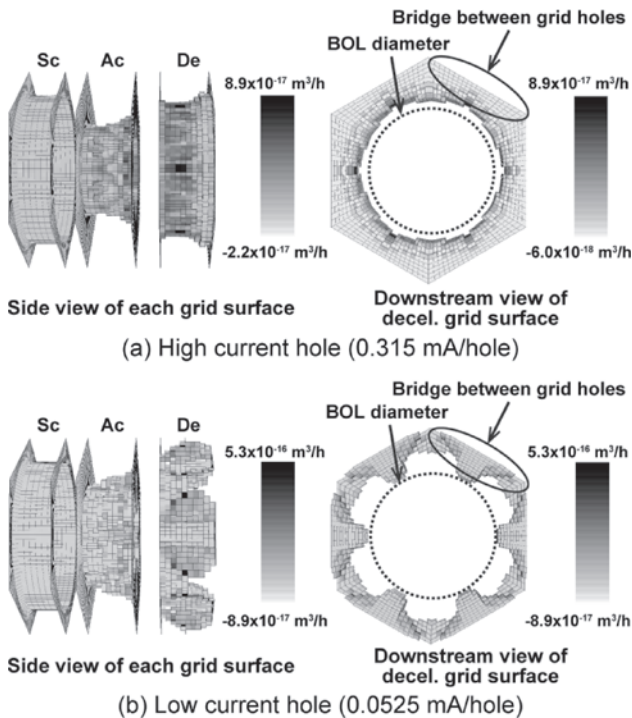


図13 $\mu 20$ イオンエンジンの加速グリッド電圧-350 V における20,000時間作動後の(a)高電流孔, および, (b)低電流孔の各グリッド形状. (a), (b)とも左図はスクリーン・加速・減速グリッドを側面から見たものであり, 孔の壁面形状がわかるように可視化している. また, 右図は減速グリッドを下流側から覗き込んだ可視化結果である.

付着が多いことを示している. 一方, 図13(a), (b)の右図は, 減速グリッドを下流側から覗き込んだ可視化結果となっており, コンターは左図と同様である, また, 点線の円は作動開始時 (Beginning-of-life: BOL) における孔径を参考として描画している.

図13は1孔の可視化結果であるが, 実際にはこの孔の隣には同様のグリッド孔が存在している. このため, 隣孔との間に存在する橋 (解析領域である直角三角形の底辺部分に相当) が完全に損耗した場合には, 孔形状を維持できず, グリッドは構造破壊に達したと判断できる. 図13(a), (b)の左図から, 加速グリッドは低電流, 高電流のグリッド孔とも, 2万時間の作動によって下流側で損耗が発生し, 末広形状に損耗が進行するが, 隣接するグリッド孔との間には十分な幅の橋を維持できているため, 加速グリッドが2万時間の作動時間で構造的に破壊することはない. 一方, 図13(b)の右図から, 著しい減速グリッドの損耗が低電流のグリッド孔で発生することが確認できるが, 2万時間の作動では減速グリッドの隣接孔との橋は十分に保持されており, 構造破壊に至ることはない.

以上の JIEDI ツールによる損耗計算結果から, スクリーニンググリッド電圧を2300 V に設定した $\mu 20$ イオンエンジンにおいて, 電子逆流およびグリッドの構造破壊に陥ることなく, 2万時間の要求作動時間を達成するには, 加速グリッド電圧を-350 V に設定する必要がある, との設計指針が

得られる.

5.4 まとめ

本章では, 小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された $\mu 10$ イオンエンジンの地上における実時間耐久試験結果と JIEDI ツールによる損耗計算結果の比較を通じて, JIEDI ツールが各グリッドの損耗形状の傾向をよく再現し, 損耗質量に関しても, 実験の計測誤差の範囲で実験結果を再現できることを示した. また, JIEDI ツールによる設計支援の実例として, JAXA において新規開発が行われている $\mu 20$ イオンエンジンに対して, パラメトリックな損耗解析による寿命を考慮した加速グリッド電圧の設計結果を示した.

以上の検証結果, 設計支援の実例から, JIEDI ツールはイオンエンジンの開発に適用可能なシミュレーションツールとして十分な機能を達成しているといえる. しかし, 本章で示した通り, 寿命を評価する場合には, 入力パラメータの不確実性やスパッタ収量モデルの不確実性に十分に注意する必要がある. また, 解析精度の向上のためには, 軸ずれや熱変形, 隣接孔の存在しないグリッド孔などを取り扱えるように, これまでの1孔の1/12の解析領域を1孔全体, 複数孔へと解析領域を拡張する必要がある. また, スパッタ収量モデルは損耗結果に大きな影響を与えるため, より高精度なスパッタ収量モデルの構築および低エネルギー領域におけるスパッタ収量モデルの整備が必要である.

なお, 本章で紹介した JIEDI ツールは, 宇宙工学分野のコミュニティに加え, 多くの分野で広く使用できるように, 非営利な使用に限り, 国内の大学, 公的な研究機関に対して, GUI 機能を備えたパッケージを JAXA において無償で公開している. ツールの使用についての詳細は以下の URL の Web サイトを確認されたい.

(JIEDI ツール Web サイト “<http://gd.isas.jaxa.jp/JIEDI-WEB/>”)

参考文献

- [1] M. Usui and H. Kuninaka, IEPC-2007-090 (2007).
- [2] 豊田康裕: 東京大学大学院修士学位論文 (2009).
- [3] 西山和孝他: 平成18年度宇宙輸送シンポジウム講演集, 298 (2006).
- [4] I. Funaki *et al.*, J. Propul. Power 18, 169 (2002).
- [5] I. Funaki *et al.*, J. Propul. Power 20, 718 (2004).
- [6] 佐鳥新他: 日本航空宇宙学会誌 46, 406 (1998).
- [7] C.L. Marker *et al.*, AIAA 2005-4413 (2005).
- [8] T. Muramoto *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 269, 1752 (2009).
- [9] J.D. Williams, AIAA 2004-3788 (2004).
- [10] K. Nishiyama *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES 8, 1590 (2009).