

JIEDI ツールによるイオンエンジン加速グリッド損耗の感度解析

STEP-2012-050

○渡邊裕樹 (JAXA/JEDI), 梶村好宏 (国立明石工業高等専門学校),
中野正勝 (東京都立産業技術高等専門学校), 船木一幸 (JAXA/ISAS),

1. はじめに

イオンエンジンはキセノンなどの推進剤をプラズマ化し、電極(グリッド)間に印加した電圧で推進剤イオンを静電的に加速、排気することにより推力を得る宇宙用推進機である。化学燃焼を使用する推進機と比較して比推力が3,000秒程度と1桁高いことから、イオンエンジンは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。一方で、イオンのみをグリッド間に流すため、空間電荷制限により単位面積あたりに得られる推力に上限が存在し、その推力幅は数から数百 mN となっている。このため、所定の総力積を達成するため、数千から数万時間に及ぶ長時間の作動が要求される^{1),2)}。

各国、各機関が開発したイオンエンジンは現在までに多くの宇宙機に搭載されているが、これらのイオンエンジンは機種ごとに数千から数万時間の実作動による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」に搭載された $\mu 10$ イオンエンジンにおいても、18,000 時間に亘る寿命評価試験が2回実施されている³⁾。このように、イオンエンジンの開発において、その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の推進を阻害している。この多大な時間と労力を費やすイオンエンジンの寿命試験を数値解析によって支援することができれば、イオンエンジンの新機種開発の敷居を下げ、適当な時期に適切なイオンエンジンをミッションに投入することが可能になる。

以上の背景から、宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency) では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行っている⁴⁾。

過去の研究から、イオンエンジンの寿命は 1)イオンを加速するグリッドの損耗、2)主陰極および中和器に用いられる電子源の劣化、に起因する故障により制限されることが判明している⁵⁾。前者のイオン加速グリッドの損耗を解析し、イオン加速グリッドシス

テムの寿命を評価、認定することが JIEDI ツールの目的である。これまでの研究開発により、JIEDI ツールによる $\mu 10$ イオンエンジン (EM: Engineering Model) のアクセルグリッド損耗量の解析値は寿命評価試験での実測値と良い一致が得られており⁴⁾、低エネルギー領域でのスパッタ収量や中性粒子密度の半径方向分布の算出に課題が残っているが、JIEDI ツールは設計支援ツールとして実用レベルに達している。一方、後者の電子源の劣化に関しても、電子源の寿命評価を目的として、宇宙航空研究開発機構において数値解析ツールの研究開発が進められている⁶⁾。

JIEDI ツールによりグリッド損耗を解析するには、グリッドの寸法およびスラストの作動条件を与える必要がある。これらの解析条件はグリッドの設計値や性能評価試験における計測値から設定されるが、グリッドの工作精度や位置設定精度、熱膨張によるグリッド間の相対位置の変化、また、プラズマの物性やスラスト温度などの計測精度による不確実性が存在し、解析により得られた損耗量や寿命の予測値には、これらの不確実性に起因するばらつきが発生する。このため、JIEDI ツールによる寿命認定では、各解析条件の不確実性が損耗に与える影響度を把握する必要があり、また、ばらつきを抑えるために、強く影響を与える変数を同定し、実験側にフィードバックする必要がある。

これまでに、2 価イオンの存在比の不確実性がグリッド損耗に与える感度に関しては中野により評価がなされている⁷⁾。これを踏まえ、本研究では、2 価イオン比に加え、プラズマ物性やスラスト温度などの各作動パラメータがグリッド損耗に与える影響の度合いを把握するために、 $\mu 10$ イオンエンジン (PM: Prototype Model) の2万時間後のグリッド損耗量に対する各作動パラメータの感度解析を実施する。

2. 解析手法

2.1 加速グリッド損耗メカニズム

図 1 にイオンエンジンの加速グリッド損耗メカニズムの概略を示す。加速グリッドシステムはスクリ

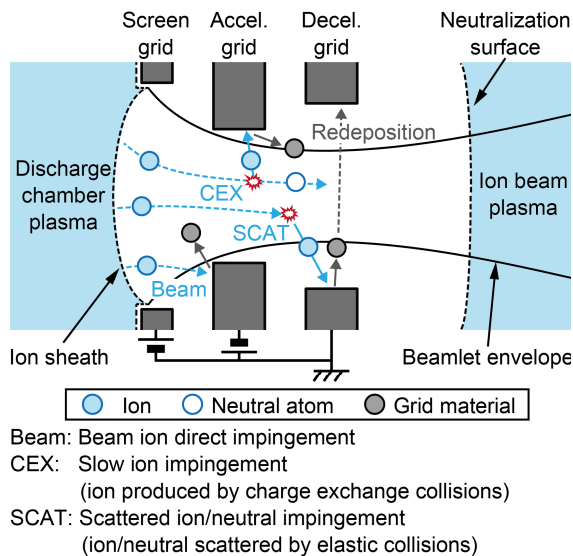


図1 加速グリッド損耗のメカニズム。

ーン、アクセラ、ディセルグリッドの3枚の多孔電極、もしくは、ディセルグリッドを用いない2枚の多孔電極から構成されている。図1は1孔の拡大図となっており、1台のイオンエンジンで数百から数万個の孔が開いている。加速グリッドシステムでは、各電極によって形成された電位差により、上流のプラズマからイオンが引き出され、加速される。グリッド設計時には、電位分布とイオン軌道を計算し、加速されたイオンがアクセラやディセルグリッドに直撃しないように設計される。しかし、グリッド間には推進剤イオン以外に、推進剤中性粒子も流れるため、イオンと中性粒子の間で電荷交換衝突や弾性散乱衝突が発生する。この電荷交換衝突によって発生した低速のイオンや高速の中性粒子、弾性散乱衝突によって軌道や運動量が変化したイオンや中性粒子が各グリッドに衝突し、グリッドをスパッタする。また、スパッタされたグリッド材はある確率によってグリッドに再付着する。

このような衝突や再付着により、作動時間の経過とともにグリッドは徐々に損耗し、形状が変化する。この結果、各グリッドの構造破壊や中和電子逆流が発生することにより、イオン加速性能が著しく劣化し、イオンエンジンは寿命に至る。ここで、中和電子逆流とは、宇宙機が負に帯電するのを防ぐために中和器からグリッド下流に放出される電子が、アクセラグリッドの形成する負の電位勾配を乗り越えて、グリッド上流に逆流することを指す。

2.2 JIEDI ツール概要

JIEDI ツールはグリッドの損耗率を計算する OPTJ と得られた損耗率から計算格子を再構築するプログ

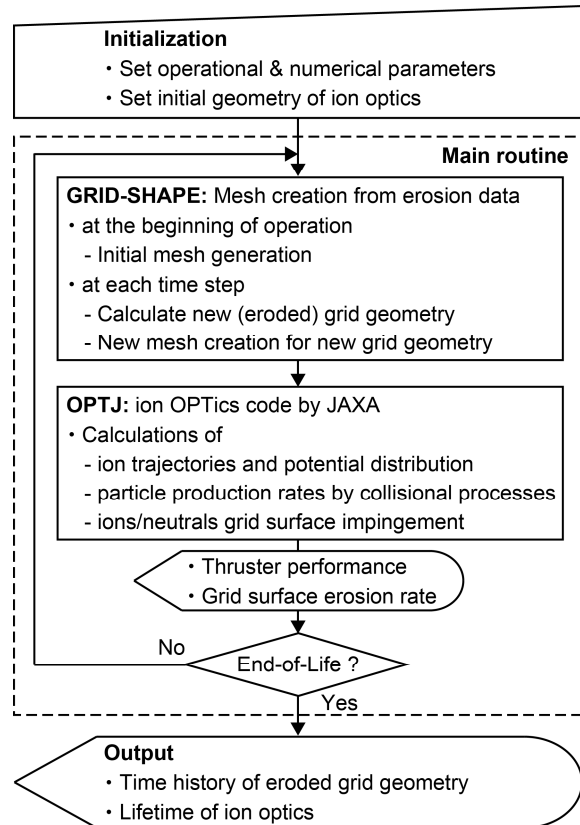


図2 JIEDI ツールによる損耗評価フローチャート。

ラム群から構成されている。図2に JIEDI ツールによる損耗評価のフローチャートを示す。まず、計算に必要なグリッドの寸法および作動条件を設定し、初期の計算格子を構築する。この計算格子の下、OPTJにより各要素における単位時間あたりの損耗量を計算する。この損耗量に任意の時間間隔を乗じ、任意時間後のグリッド形状を反映した計算格子を再構築する。その後、再構築された計算格子の下、再度 OPTJによる損耗量計算を実施する。この反復計算を寿命末期 (EOL: End Of Life) もしくは指定の累計作動時間まで実施し、損耗を評価する。

OPTJ ではイオンは粒子として扱い、その軌道を Flux-tube 法により追跡する。電子については流体として扱い、その分布をボルツマンの関係式から求める。また、中性粒子は事前にモンテカルロ直接法により各要素における密度および速度を求め、背景として与える。以上の扱いにより、計算負荷を低減し、高速な損耗量計算が可能になっている。OPTJで考慮される衝突はイオンと中性粒子間の電荷交換衝突および弾性散乱衝突である。衝突した粒子が再度衝突を起こす多重衝突が考えられるが、Full-PICによる計算結果⁸⁾よりその影響は小さいため、OPTJでは無視している。スパッタ取量に関しては、Williams らに

よって取得された実験データ⁹⁾および百武らの分子動力学計算によるモデル¹⁰⁾を使用することができる。また、スパッタリングにより飛散した損耗原子の再付着は損耗原子の流束に再付着率 (Sticking factor) を乗じて、再付着量を計算する。

JIEDI ツールでは、グリッド孔間の対称性を活用することにより、計算領域を図3に示すように1孔の1/12の領域に最小化することができ、基本的な損耗解析はこの1/12孔モデルを使用する。JIEDI ツールでは計算格子の生成に2種類の手法が用意されている。1つは解適合格子法を用いた格子生成であり、もう1つは要素の節点座標を維持したまま、要素境界情報を損耗に応じて固体要素から流体要素に更新する方法である。

前者の解適合格子法による格子構築には、株式会社 IDAJ が汎用熱流体解析ソフトウェア「STAR-CD」のプリ/ポストプロセッサとして販売している「pro-STAR」を使用し、マクロによって格子の初期構築および損耗を反映した格子を再構築することができる。格子を再構築する際には、節点数および要素数を変更せずに、要素の損耗量から損耗後の節点座標を計算し、節点位置を移動することにより、損耗後の各グリッド形状を表現する。一方、後者の要素境界情報を変更する方法は、急激なグリッド損耗により、損耗後の形状を事前に予想することが困難になり、解適合格子法が適用できない場合に使用する¹¹⁾。本研究では、すべて前者の解適合格子法を用いた格子生成方法を使用した。

なお、OPTJ をはじめとした JIEDI ツールに関する詳細は文献4)を参照されたい。

2.3 感度解析条件

表1に感度解析を実施した $\mu 10\text{PM}$ イオンエンジンのグリッド寸法および解析条件を示す。 $\mu 10\text{PM}$ は過去に耐久試験が行われ、2万時間後の各グリッドの損耗質量が得られているスラストである¹²⁾。表1に示したグリッド寸法および各グリッド電圧は耐久試験時の値を使用している。 $\mu 10$ イオンエンジンでは放電室内部で不均一なプラズマ生成が行われているため、イオンビームは半径方向に分布を持っており、各孔から引き出されるイオン電流に差異が存在する¹³⁾。本研究では、表1に示す代表的な3つのイオン電流(低/中/高)の孔について、2万時間までの損耗解析を実施した。ここで、解析によって得られる結果は1孔あたりの値になるため、得られた結果をイオン電流に対して3次関数で補間し、イオン電流分布に沿って半径方向に積分することでグリッド1枚あ

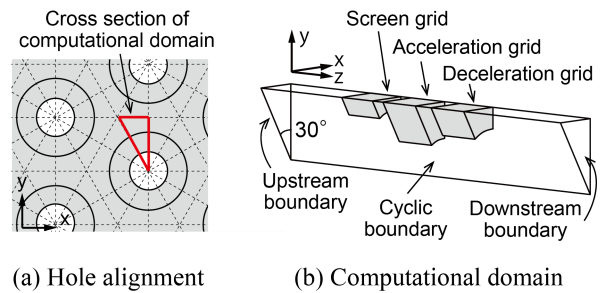


図3 計算領域 (1/12孔モデル)。

表1 グリッド寸法および解析条件。

Parameter	Value
Grid hole diameter	
- Screen	3.05 mm
- Accelerator	1.80 mm
- Decelerator	2.50 mm
Grid thickness	
- Screen	0.95 mm
- Accelerator	1.00 mm
- Decelerator	1.00 mm
Grid gap	
- Screen to Accelerator	0.32 mm
- Accelerator to Decelerator	0.50 mm
Propellant	Xenon
Grid voltage	
- Screen	1,500 V
- Accelerator	-350 V
- Decelerator	0 V
Ion beam current per hole	
- High	0.189 mA/hole
- Medium	0.147 mA/hole
- Low	0.0525 mA/hole
- Average	0.156 mA/hole
Sticking factor	0.78

たりの損耗質量および電流値に換算した。一方、1孔から流出する中性粒子流量は、イオン電流密度の平均値、推進剤利用効率、2価イオン比から計算し、すべての孔から一様に流出するものとして計算した。また、再付着率は、百武らの分子動力学計算¹⁰⁾およびMarkerらによる実験データ¹⁴⁾から0.78とした。

図3(b)で示した解析領域は6面体8節点要素により分割され、節点数26,482、要素数22,670の計算格子を用いて解析された。上流の放電室と下流の中和領域については電子を含んだプラズマ領域であるため、イオンの流れ方向(z方向)の要素幅がデバイ長以下になるように設定した。また、損耗量を計算し、計算格子を更新する時間間隔は、累計作動時間が3,000時間までは500時間、以降は1,000時間とした。

表2に感度を評価する各作動パラメータおよびその範囲を示す。本解析では、5つのパラメータを選択し、 $\mu 10$ イオンエンジンの開発時に得られた実験結果¹⁵⁾⁻¹⁷⁾から、表1に示す下限値(1)/中間値(2)/上限値(3)の3つの値を選択した。作動パラメータ

表 2 感度解析における変数とその範囲.

Parameter	Range		
	1(Min.)	2(Mid.)	3(Max.)
γ : Doubly charged ion fraction	0	0.1	0.2
η_u : Propellant util. efficiency	0.80	0.85	0.90
V_d : Discharge voltage	10 V	20 V	30 V
T_e : Electron temperature	3 eV	5 eV	7 eV
T_g : Grid surface temperature	353 K	373 K	393 K

の 1 つを変化させ、その感度を評価する際には、残りの作動パラメータを中間値に設定した。このため、感度を評価するために、計 11 パターンの作動パラメータの組み合わせについて 2 万時間までの損耗解析を実施した。

3. 解析結果および考察

3.1 実験値との比較

図 4 に 2 万時間後のグリッド 1 枚あたりのアクセラ電流（アクセラグリッドに流れ込むイオン電流）の分布、図 5 にアクセラグリッドの質量減少量の分布を示す。ここで、下流の中和電子に対して電位の障壁となるアクセラグリッドの損耗は、グリッドシステムの寿命を評価する上で重要なため、評価の指針として、アクセラ電流およびアクセラグリッドの質量変化を選択した。

図 4 は横軸にアクセラ電流値をとり、縦軸に作動パラメータの組み合わせの数をプロットしている。組み合わせの数を数えるためのアクセラ電流値の刻みは 0.02 mA である。つまり、図 4 において、2 万時間後のアクセラ電流が 0.35~0.37 mA となる作動パラメータの組み合わせは 11 組中 5 組であることを示す。同様に、図 5 は横軸にアクセラグリッド質量の減少量をとり、縦軸に組み合わせの数をプロットしている。組み合わせの数を数えるためのアクセラグリッド質量の減少量の刻みは 0.02 g である。2 万時間の耐久試験により得られたアクセラ電流およびアクセラグリッドの質量減少量の実験値は、それぞれ 0.5 mA, 0.49 g であり、図 4 および図 5 では青棒で示されている。ただし、実験値の計測誤差に関しては十分な考慮はされていない。

図 4 より、解析時に与える作動パラメータの不確実性により、アクセラ電流の計算値は、0.25 mA から 0.49 mA の範囲でばらつき、0.36 mA 付近でピークを持つことが確認できる。同様に図 5 より、アクセラグリッド質量の減少量は 0.01 g から 0.27 g の範囲でばらつき、0.20 g 付近でピークを持つことが確認できる。また、実験値との比較において、アクセラ電流は、ばらつきの上限が実験値と良く一致しているが、

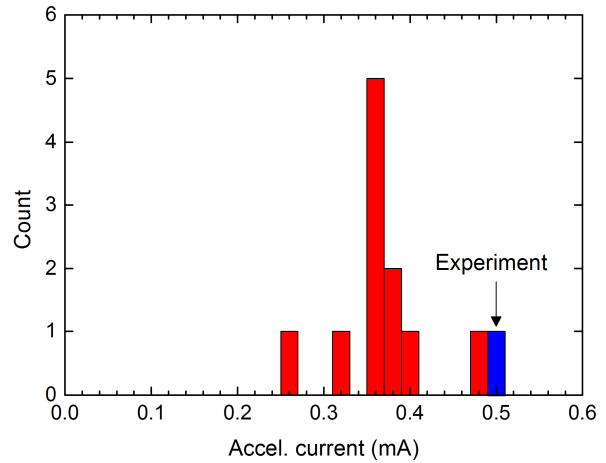


図 4 2 万時間後のアクセラ電流の分布.

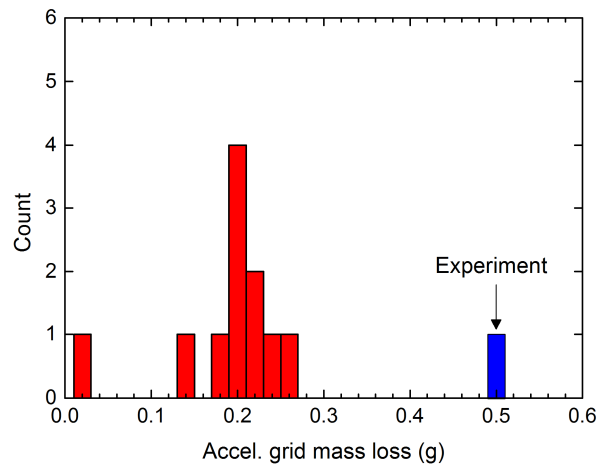


図 5 2 万時間後のアクセラグリッド質量減少の分布.

ピーク値では 30%程度過少に見積もっている。アクセラ質量に関しては、ばらつきを考慮しても実験値と大きな差があり、ピーク値では 60%程度過少に見積もっている。

以上の実験値と計算値の差は、耐久試験時のスラスト単体での推進剤利用効率が今回の解析の中間値の 0.85 ではなく、0.80 であったことが原因の一つと考えられる。推進剤利用効率が高く設定された場合、グリッド孔を流れる中性粒子流量は小さく見積もられ、電荷交換衝突によって発生する低速イオンの総量は低下する。アクセラ電流を担う電流の大半は、この低速イオンであり、実験条件に対して高めに設定した推進剤利用効率がアクセラ電流の過少評価の原因と考えられる。実際に、図 4 で実験値に近いアクセラ電流 0.47~0.49 mA の値をとる作動パラメータの組み合わせは、推進剤利用効率を 0.80 に設定した場合であり、中間値を 0.80 に修正し、解析を再実施

すれば, 0.48 mA 付近にピークを持った分布が得られると予想される。

一方, 図 5 において, アクセル質量 0.25~0.27 g の値をとる作動パラメータの組み合わせは, 推進剤利用効率を 0.80 に設定した場合であるが, この場合でも, 実験値に対して 50%程度過少に見積もっており, アクセル質量における実験値と計算値の差は, 推進剤利用効率の差異だけでは説明できない。図 6 はグリッド単位面積あたりのイオン電流に対するアクセル電流およびアクセルグリッド質量減少量を示す。3つのイオン電流領域のグリッド孔について解析を実施しているため, 図 6 では3つの点がプロットされている。また, 図 6 の赤い実線は, 1孔から引き出されるイオン電流密度が 0 mA/cm^2 の場合に, アクセル電流が 0 mA/cm^2 , 質量変化が 0 g/cm^2 として得られた3次多項式近似曲線である。図 6(b)の低イオン電流領

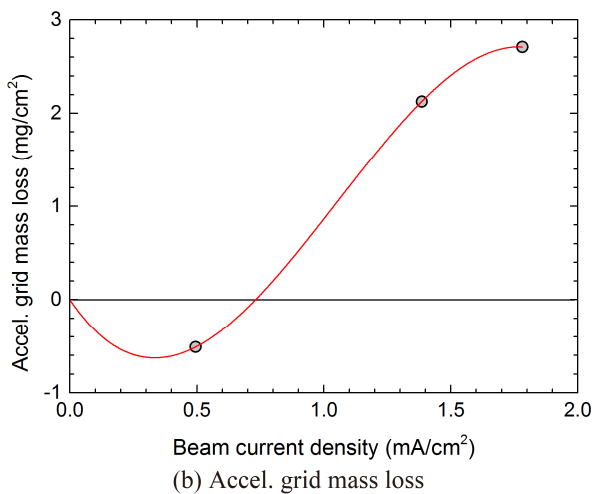
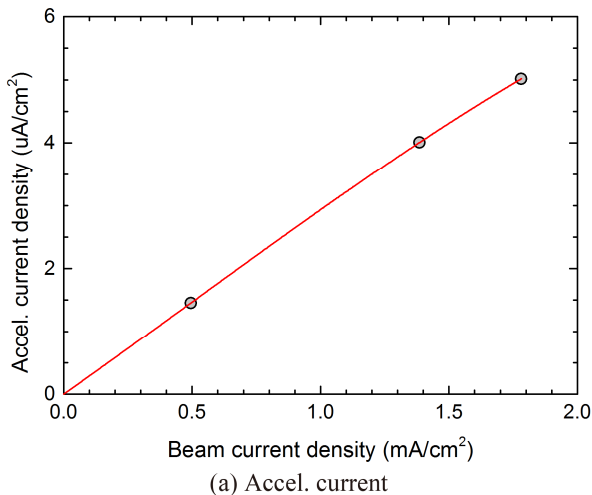


図 6 単位グリッド面積あたりのイオン電流に対するアクセル電流およびアクセルグリッド質量減少量。作動パラメータはすべて中間値に設定。

域において, 負の減少量を取るのは, 損耗量に対して再付着量が大きく, 質量が増加していることを示している。図 6(a)に示される通り, アクセル電流がイオン電流に対して線形に近い関係を持つものに対して, アクセルグリッドの質量減少量は, 図 6(b)に示される通り, イオン電流に対して非線形な関係を持つ。このため, 多項式近似が正確にイオン電流に対するアクセル電流の関係を補間しているとは言えず, 近似による誤差が実験値と計算値の差を生じさせた原因と考えられる。このため, 今後は解析するイオン電流領域のグリッド孔数を増やし, より正確なイオン電流に対するアクセル質量減少量の関係を得る必要がある。

以上の2点に加えて, 今回の解析では考慮されていない孔から流出する中性粒子流量のグリッド半径方向の不均一性, 複数孔から引き出されたイオンビーム間に働く斥力によるイオンビーム軌道の変化, の2点に起因するグリッド半径方向の不均一な損耗を今後考慮する必要がある。また, 実験値に関して, その計測誤差を検討する必要がある。

3.2 各作動パラメータの感度

3.1節で示した通り, グリッド1枚あたりの計算値と実験値には差が存在し, 代表する3孔の計算値を用いて, アクセルグリッド1枚あたりの質量減少量を計算することは十分な精度を持った方法ではない。このため, 本研究ではグリッド1枚あたりの解析結果に対する各作動パラメータの感度を評価するのではなく, 高/中/低の3つのイオン電流領域の孔について, 各作動パラメータの感度を評価する。

図 7 に各イオン電流領域での各作動パラメータに対する1孔あたりのアクセルグリッド質量減少量を示す。図 7 の横軸は表 2 に示した作動パラメータを示し, シンボルが変化させた作動パラメータの種類, 数字がその値を示す。つまり, 図 7 において「 γ の 1」上のプロットは, 2価イオン比を下限値の 0 に設定し, それ以外のパラメータを中間値に設定した場合のアクセルグリッド質量減少量を示している。縦軸の質量減少量が負値を取る場合は, 先の図 6(b)と同様に損耗量に対して再付着量が多いため, 質量が増加していることを示している。また, 1つのイオン電流領域に対して, $3 \times 5 = 15$ 個のプロットが図 7 には存在しているが, 各作動パラメータで中間値 (2) のプロットは同じ計算結果を示している。

図 7 において, 作動パラメータを中間値 (2) から下限値 (1), 上限値 (3) に変化させた場合の質量減少の傾きが大きいほど, 損耗に与える感度が強いと

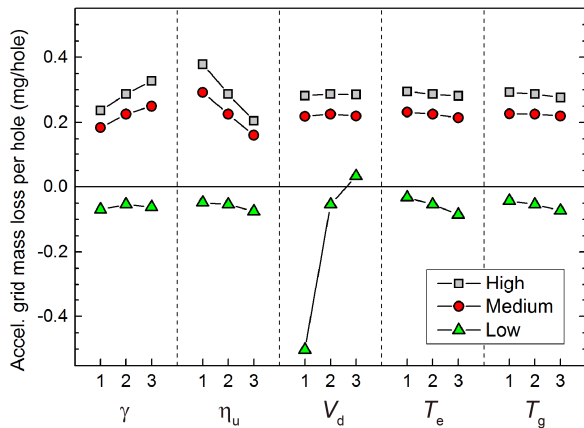


図7 各作動パラメータの1孔あたりの2万時間後のアクセラグリッド質量減少量。

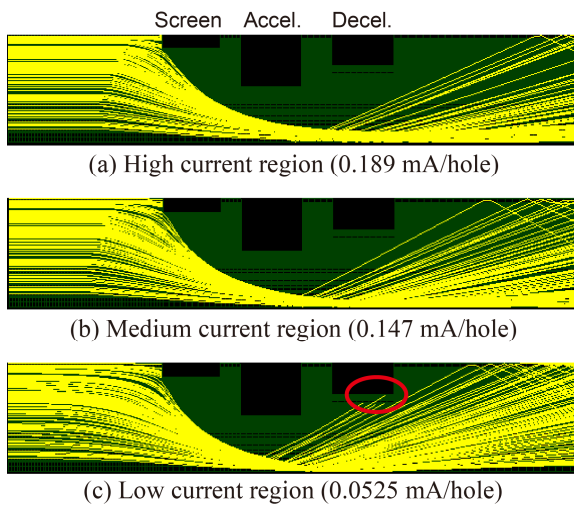


図8 各イオン電流領域のグリッド孔での作動初期におけるイオンビーム軌道（黄色線）。作動パラメータはすべて中間値に設定。

言える。図7で示される通り、高/中イオン電流領域のグリッド孔では、2万時間後のアクセラグリッド質量は減少しており、2価イオン比 (γ) および推進剤利用効率 (η_u) が強い感度を持っていることが分かる。一方、低イオン電流領域のグリッド孔では、ほぼすべての作動パラメータの組み合わせでアクセラグリッド質量は増加し、放電電圧 (V_d) が強い感度を持っていることが分かる。

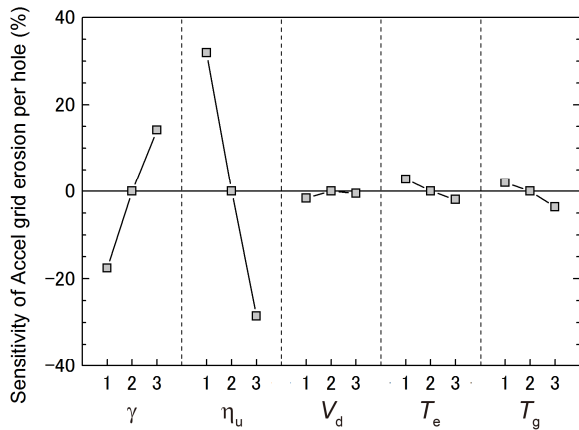
図8に作動パラメータをすべて中間値に設定した場合の各イオン電流領域のグリッド孔での作動初期におけるイオンビーム軌道を示す。図8より、低イオン電流領域の孔では、イオンビームが発散する傾向があり、加速されたイオンが直接ディセルグリッドに衝突している（図8(c)の赤丸）。このイオンの直撃により、低イオン電流領域のグリッド孔では、デ

ィセルグリッドが強く損耗し、損耗したディセルグリッド材が上流のアクセラグリッドに再付着する。また、アクセラグリッド損耗の主原因である電荷交換衝突によって発生する低速イオンの総量は、電荷交換衝突を引き起こす孔を通過するイオンの総量に影響されるため、低イオン電流領域の孔では、他の電流領域の孔に比べて、アクセラグリッドの損耗量は相対的に減少する。以上の再付着量の増加と損耗量の減少から、低イオン電流領域の孔では、アクセラグリッドの質量が増加する傾向を持つ。

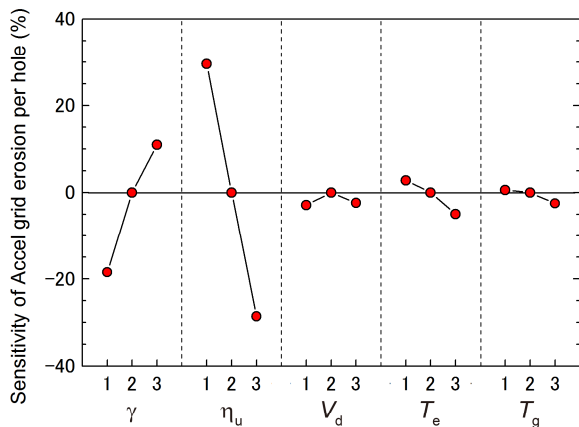
各電流領域での各作動パラメータの感度を評価するために、中間値における質量減少量を基準にとり、下限値、上限値に変更した場合の比率をプロットしたものを図9に示す。図9(a)および図9(b)から、高/中電流領域においては、各作動パラメータのアクセラグリッド損耗に対する感度は同程度であることがわかる。強い感度を持つ2価イオン比では、0.1から0に減少させた場合で19%の損耗量減少、0.1から0.2に増加させた場合で16%程度の損耗量増加となる。また、推進剤利用効率においては、0.85から0.80に減少させた場合で30%の損耗量増加、0.85から0.90に増加させた場合で30%の損耗量減少となる。一方、図9(c)から、低イオン電流領域において強い感度を持つ放電電圧では、20Vから10Vに減少させた場合で、830%の損耗量減少、20Vから30Vに増加させた場合で、160%の損耗量増加となる。

今回感度を評価した作動パラメータのうち、2価イオン比、推進剤利用効率、グリッド温度は解析領域内の中性粒子の速度および密度分布に影響を与える。一方、放電電圧および電子温度は解析領域内の電位分布に影響を与え、これによりイオンビーム軌道を変化させる。

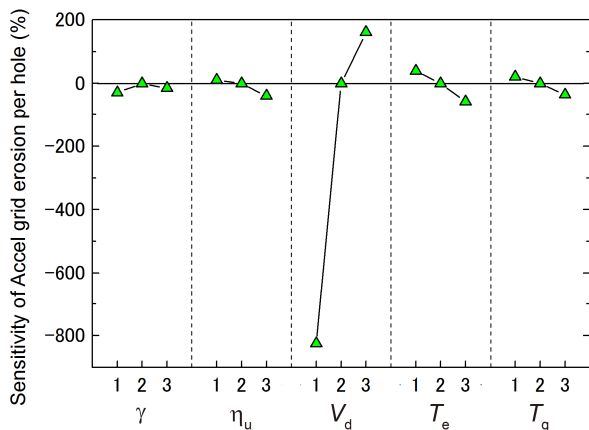
高/中イオン電流領域では、図8(a)および図8(b)で示される通り、イオンビームが比較的収束しており、放電電圧や電子温度の変化によるイオンビーム軌道の影響は小さく、損耗に対する感度も小さい。一方、電荷交換衝突や弾性散乱衝突の頻度に関係する中性粒子の速度および密度分布に影響を及ぼす2価イオン比や推進剤利用効率の感度は大きく、2価イオン比を0.1から0に減少させた場合で孔を流れる中性粒子流量は20%減少し、0.1から0.2に増加させた場合で17%増加する。また、推進剤利用効率を0.85から0.80に減少させた場合で中性粒子流量は42%増加し、0.85から0.90に増加させた場合で37%減少する。以上より、アクセラグリッド損耗に対する2価イオン比および推進剤利用効率の感度は、中性粒子



(a) High current region (0.189 mA/hole)



(b) Medium current region (0.147 mA/hole)



(c) Low current region (0.0525 mA/hole)

図 9 各イオン電流のグリッド孔における各作動パラメータのアクセラグリッド損耗に対する感度。

流量に対するそれらの感度と同程度であることがわかる。一方、グリッド温度の変化は、上流境界で与えられる中性粒子の熱速度分布に影響を及ぼすが、孔を流れる中性粒子流量は変化しないため、グリッド温度の損耗に対する感度は小さくなる。

低イオン電流領域では、先に議論した通り、アクセラグリッド質量変化に対するディセルグリッド損

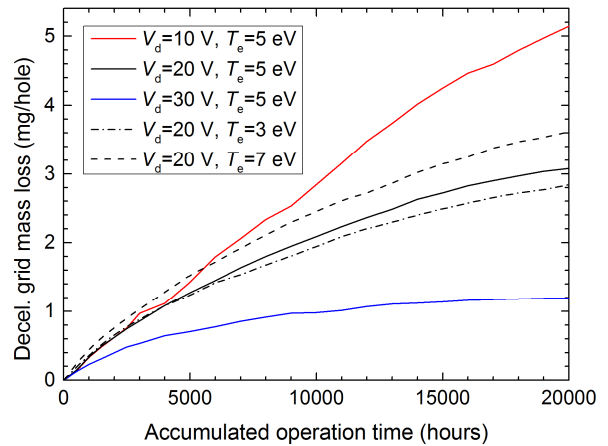


図 10 低イオン電流領域のグリッド孔におけるディセルグリッド質量減少に対する電子温度および放電電圧の影響。

耗の影響が強い。図 10 に低イオン電流領域のグリッド孔における電子温度および放電電圧をパラメータとしたディセルグリッド質量減少量の履歴を示す。電子温度および放電電圧が変化することにより、イオンビーム軌道がわずかに変化し、ディセルグリッドに直接衝突するイオンの総量が大きく変化するため、電子温度および放電電圧に対してディセルグリッドの質量減少量は強く影響を受ける。図 10 で示される通り、ディセルグリッドの質量減少に対する電子温度の影響に比べ、放電電圧の影響は強く、その結果、アクセラグリッドへの再付着量が大きく変化し、図 9(c)で示されたように放電電圧はアクセラグリッド損耗に対して強い感度を持つ。

以上の感度解析の結果より、ディセルグリッドへのイオン直撃が起こらない、高イオン電流領域から中イオン電流領域にかけてのグリッド孔においては、孔を流れる中性粒子流量に対する不確定性を抑制することが、高い精度で加速グリッド損耗を予測するために必要である。一方、ディセルグリッドへのイオン直撃が起こる低イオン電流領域のグリッド孔では、イオンビーム軌道に影響を及ぼす放電電圧や電子温度といった放電室プラズマの物性に対する不確定性を抑制することが、高い精度で加速グリッド損耗を予測するために必要である。

4. まとめ

$\mu 10$ PM イオンエンジンの 2 万時間後のグリッド損耗に対する各作動パラメータの感度解析を実施した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- $\mu 10$ イオンエンジン開発時に得られた作動パラメータの範囲で、2 万時間後のアクセラ電流の計算

値は0.25 mAから0.49 mAの範囲でばらつき、0.36 mA付近でピークを持ち、アクセル質量の減少量は、0.01 gから0.27 gの範囲でばらつき、0.20 g付近でピークを持つことを確認した。耐久試験により得られた2万時間後の実験値と今回の計算のピーク値との比較により、計算値が実験値に比べて、電流で30%過少に見積もり、質量減少量で60%過少に見積もっていることを確認した。その原因は、解析時の推進剤利用効率の範囲が実験時に対して0.05高めに設定されていたことに加え、3つの電流領域での解析結果から、グリッド1枚当たりの質量減少量を計算する際の誤差によるものと考えられる。

- 各イオン電流領域のグリッド孔に対して、作動パラメータの感度を評価した結果、ディセルグリッドへのイオン直撃が発生しない高/中イオン電流領域のグリッド孔では、グリッド孔を流れる中性粒子流量に影響を及ぼす2価イオン比および推進剤利用効率が、アクセルグリッドの損耗に対して高い感度を持つことを確認した。一方、ディセルグリッドへのイオン直撃が発生する低イオン電流領域では、イオンビーム軌道に強く影響を与える放電電圧がアクセルグリッドの損耗に対して高い感度を持つことを確認した。
- 高/中イオン電流領域のグリッド孔では、2価イオン比を0.1から0に減少させた場合で19%アクセルグリッド損耗量が減少し、0.1から0.2に増加させた場合で16%程度損耗量が増加する。また、推進剤利用効率を0.85から0.80に減少させた場合で30%損耗量が増加し、0.85から0.90に増加させた場合で30%損耗量が減少することを確認した。これらの感度は、グリッド孔を流れる中性粒子流量に対する2価イオン比と推進剤利用効率の感度と同程度であることが判明した。
- 低イオン電流領域のグリッド孔では、放電電圧を20 Vから10 Vに減少させた場合で、830%アクセルグリッド損耗量が減少し、20Vから30Vに増加させた場合で、160%損耗量が増加することを確認した。
- 感度解析の結果から、高い精度で加速グリッド損耗を予測するためには、ディセルグリッドへのイオン直撃が起こらない、高イオン電流領域から中イオン電流領域にかけてのグリッド孔においては、孔を流れる中性粒子流量に対する不確定性を抑制する必要がある、ディセルグリッドへのイオンの直撃が起こる低イオン電流領域のグリッド

孔では、イオンビーム軌道に影響を及ぼす放電電圧や電子温度といった放電室プラズマの物性に対する不確定性を抑制することが重要であることが判明した。

参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒川義博: 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003.
- 2) 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.
- 3) 國中均, 堀内泰男, 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型イオンエンジン, 日本航空宇宙学会誌, 第53巻, 第618号, pp. 203-210, 2005.
- 4) 船木一幸, 篠原育, 中野正勝, 梶村好宏, 宮坂武志, 中山宜典, 百武徹, 和田元, 剣持貴弘, 村本哲也, 國中均: イオンエンジングリッド損耗解析ツール JIEDI, JAXA-RM-11-023, 2012.
- 5) John R. Brophy, James E. Polk, and Vincent K. Rawlin: Ion Engine Service Life Validation by Analysis and Testing, AIAA96-2715, 1996.
- 6) 窪田健一, 渡邊裕樹, 船木一幸, 山本直嗣, 中島秀紀, 宮坂武志: マイクロ波放電式中和器解析に向けた3次元Hybrid-PICコード開発, 平成24年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2012-083, 2013.
- 7) 中野正勝: イオン加速グリッド損耗における2価イオンの感度解析, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 59, No. 695, pp. 344-351, 2011.
- 8) Takeshi Miyasaka, Tsutomu Kobayashi, Katsuo Asato: Characteristics of ions impacting grid surfaces in an ion engine, Vacuum, Vol. 85, pp. 585-590, 2010.
- 9) 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, 2004.
- 10) 百武徹, 剣持貴弘, 村本哲也: スパッタリングシミュレーション, 日本航空宇宙学会誌, 第59巻, 第693号, pp. 309-315, 2011.
- 11) Masakatsu Nakano: Numerical Analysis of Highly Eroded Grid Surfaces of $\mu 20$ Ion Engine, ISTS 2011-b-29, 2011.
- 12) M. Usui and H. Kuninaka: Measurements of Hole Shape on Carbon-Carbon Composite Grid after 20,000-hour Endurance Test, IEPC-2007-090, 2007.
- 13) 豊田康裕, 西山和孝, 國中均: イメージスキャナを用いた平板C/Cグリッド孔径の統計的分析, JAXA-RR-09-004, pp. 47-52, 2009.
- 14) Marker, C.L., Clemons, L.A., Banks, B. A., Miller, S., Snyder, A., Hung, C., Karniotis, A. and Waters, D. L.: Transport of Sputtered Carbon During ground-Based Life Testing on Ion Thrusters, NASA/TM-2005-213798, 2005.
- 15) 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, 2002.
- 16) 佐鳥新, 國中均, 大滝基之: マイクロ波放電型イオンエンジンのビーム計測, 日本航空宇宙学会誌, 第46巻, 第534号, pp. 406-412, 1998.
- 17) I. Funaki, H. Kuninaka, K. Toki, "Plasma Characterization of a 10-cm Diameter Microwave Discharge Ion Thruster," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, No. 4, pp. 718-727, 2004.