

グリッド損耗評価試験技術の現状

大川 恭志*, 早川 幸男*, 北村 正治*

Trend of Measurement Technologies on Ion-Engine-Grid Erosion

By

Yasushi OHKAWA*, Yukio HAYAKAWA*, and Shoji KITAMURA*

Abstract: Experimental support is necessary to develop a grid-life simulation tool with moderate effectiveness and reliability. Roles of the experiments are to obtain important physical properties, which are required in the simulation code as input parameters, and to verify the accuracy of the simulation model. In this report, trend of measurement technologies on sputtering phenomena, which are especially important to calculate the progress of grid erosion, is illustrated.

Key words: Ion engine, Ion optics, Sputtering, Grid life, JIEDI

1. はじめに

イオンエンジンの特徴である高比推力を活かすためには、長期間ミッションでの利用が望ましく、すでに多くの静止衛星や探査機において1万時間以上の動作が実証されている。イオンエンジンの寿命を決定する最も重要な要素はイオンを加速する電極部分（グリッド）であり、その長寿命化を目指して様々な努力が為され、上記のような長時間動作が可能となってきた。しかし一方で、研究開発過程における寿命試験も必然的に長期化し、開発期間の長期化および高コスト化の一因となっている。このような状況の中で、寿命試験をサポートできる数値解析ツールを求める声が高まり、日本においても、「イオン加速グリッド耐久認定用数値解析ツール」の研究開発を行うプロジェクト（JIEDIプロジェクト）が具体化し始めた。

このようなグリッド耐久性評価用数値解析ツールの開発では、適正な物理モデルおよびアルゴリズムの使用や計算の高速化など、コード開発上の様々な課題を克服する必要があるのに加え、各種実験によるデータ取得も重要となる。グリッド損耗評価における実験の役割としては主に以下の3点が考えられる。1) 数値解析に必要な入力値（各種物性値）の取得、2) 現象確認実験による数値解析モデルの妥当性評価、3) 寿命試験による数値解析結果の妥当性評価。本報告では、これらの3点のうち、主に1) について概略を示すとともに関連する文献を紹介し、数値解析ツールの開発に必要なグリッド損耗評価試験技術について考察する。ここで紹介する文献は、主にスパッタリング特性に関連する研究報告である。

2. グリッド損耗評価に必要な物性値

グリッド損耗を評価するための数値解析ツールは、電場および粒子間衝突を考慮してイオン（場合によっては電子や

* IAT/JAXA

中性粒子も含む)の軌道を計算する段階「軌道計算」と、グリッドへの粒子衝突による損耗を計算する段階「損耗計算」との2段階に大きく分けられる。それぞれの段階で入力値として必要となる物性値をまとめたものを表1に示す。また、イオンエンジンのビーム抽出およびグリッド損耗の概念を図1に示す。

「軌道計算」段階では、上流プラズマ物性→イオンビーム軌道、衝突周波数→電荷交換イオンや弾性衝突イオン等の発生量、下流プラズマ物性→電荷交換イオン等の挙動、という形で各物性値が計算結果に影響する。また「損耗計算」段階では、スパッタリング特性がグリッド損耗の進行を決定する。したがって、これらの物性値をある程度の確からしさで得ることが、数値解析ツールの開発にとって必須の条件となる。ただし、表1に示した物性値の細目に関しては、解析結果への影響が小さいものもあるため、パラメータの重要度を予め把握して重点化項目を決める必要がある。また、数値解析ツールにおいてグリッド1孔ではなく複数孔(例えばグリッド全体)を計算対象とする場合には、上下流プラズマ物性の空間分布情報が必要となる点にも注意が必要である。さらに、加速電圧印加時や動作不安定時の過渡的な現象について扱う場合には、それらの物性変化に関する情報も必要となる。

本報告では、これらの物性値のうち「損耗計算」で最も重要となるスパッタリング特性に関する項目を中心に取り上げ、文献紹介を交えながら詳述する。

表1 グリッド耐久性評価用数値解析に必要な物性値

計算段階	物性値項目	細目
軌道計算	上流プラズマ物性	プラズマ数密度, 電子温度, イオン温度, プラズマ電位, 中性粒子数密度, 中性粒子温度
	下流プラズマ物性	プラズマ数密度, 電子温度, イオン温度, プラズマ電位, 中性粒子数密度, 中性粒子温度
	粒子間衝突断面積	電荷交換衝突断面積, 弾性散乱衝突断面積
損耗計算	スパッタリング特性	スパッタ率, スパッタ物質放出方向 (Differential sputtering yield), 再付着率

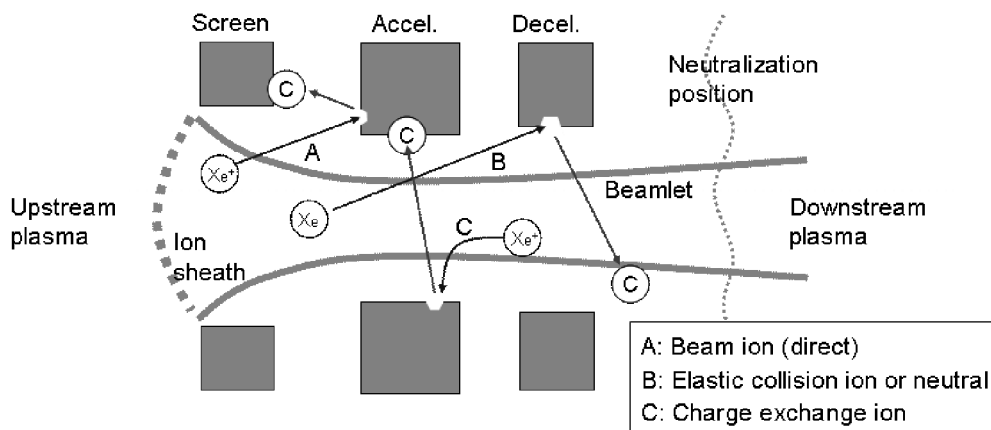


図1 イオンエンジングリッド損耗の概要

3. スパッタリング特性

スパッタリングとは、高速の粒子(イオン, 原子等)が材料表面に衝突することで、その材料を構成する粒子(原子, 分子)が叩き出される現象であり、1衝突粒子に対する放出粒子の数(=スパッタ率)は、衝突条件によって大きく変化する。イオンエンジンの場合には、イオンビーム起源の高速粒子がグリッドに衝突することで損耗が生じ、その衝突の形態(衝突粒子)はいくつかの種類に分けることができる(図1)。グリッド損耗の原因として考えられる衝突粒子の種類を表2にまとめる。ビームレットの直接衝突が無視できる場合のグリッド損耗の要因としては、従来は電荷交換イオンのみを考慮すればよいと考えられてきたが、最近の中野らによる研究^[1]から、弾性衝突により生じ

たイオンや中性粒子の影響も無視できないことが分かってきている。

表 2 グリッド損耗の原因になりうる衝突粒子^[1]

直接衝突イオン	ビームレットそのものの発散またはクロスオーバーによる衝突イオン。
電荷交換イオン	ビームイオンと中性粒子との電荷交換衝突により生じる低速イオン。負の電界に引き寄せられて加速電極に衝突する。グリッド表面に対して垂直に近い角度で衝突する割合が高い。
電荷交換中性粒子	ビームイオンと中性粒子との電荷交換衝突により生じる高速中性粒子。上流側で生成された場合には、加速電極および減速電極に衝突する可能性あり。
弾性散乱イオン	ビームイオンと中性粒子との弾性衝突により速度が変化した高速イオン。上流側で比較的多く生成され、下流方向への速度を有しているため、加速および減速電極の内壁に浅い角度で衝突する割合が高い。
弾性散乱中性粒子	ビームイオンと中性粒子との弾性衝突により速度が変化した高速中性粒子。上流側で比較的多く生成され、下流方向への速度を有しているため、加速および減速電極の内壁に浅い角度で衝突する割合が高い。

3.1. スパッタリング特性取得の必要性

表 3 に示すように、スパッタ率を左右するパラメータには、被衝突材料、衝突粒子種、入射エネルギー、入射角、表面粗さ、グリッド温度など種々の項目がある。これまでの多くの数値解析ツールでは、山村モデル^[2,3]に代表される半経験式を用いてスパッタ率を求め、損耗量を計算する場合が多かった。山村モデルは、様々な被衝突材料と衝突粒子種の組み合わせに対して、入射エネルギーおよび入射角をパラメータとしてスパッタ率を算出できる半経験式を提供しており、多くの研究者がこのモデルを基準としている。

山村モデルは大変有効な半経験式であるが、これをそのままイオンエンジンのグリッド損耗解析に適用する場合にはいくつか問題があり、1) グリッド損耗に寄与の大きい低入射エネルギー領域での実験結果が少ないため、この領域でのモデルの信頼性が低い、2) グリッド材料として最近注目されるカーボンカーボン複合材等の各種カーボン材料に対するモデルがない、などの点が挙げられる。これらの問題に対応するためには、イオンエンジングリッド損耗評価用に、特定の条件下でのスパッタリング特性を取得する必要がある。

表 3 スパッタリング特性を決定するパラメータ

被衝突材料	グリッド材料として、モリブデン、チタン、カーボンカーボン複合材、高密度カーボンなど。炭化チタン等の被覆材についての考慮も必要。
衝突粒子	主にキセノンイオンおよびキセノン原子。
入射エネルギー	通常のイオンエンジン動作で考慮すべき範囲は、20 ~ 1500 eV 程度。高比推力動作を想定する場合はさらに高いエネルギー範囲が必要。
入射角	垂直から平行に近い角度まで広範囲のデータが欲しいが、平行に近い入射角の場合の測定は困難。
表面粗さ	グリッド材料の表面状態。
被衝突材料温度	グリッド材料の表面温度。通常のイオンエンジン動作の温度領域ではスパッタ率への影響は小さい。

また、グリッド寿命計算の精度を高めるためには、単にグリッドが削られる量を求めるだけでなく、スパッタリングによって放出されたグリッド材料原子がどの方向に飛んで行きどこに付着するかという再付着現象も考慮する必要がある (図 1)。このスパッタ粒子の放出方向分布を定義するために、1 衝突粒子に対する単位立体角あたりのスパッタ率 “Differential sputtering yield” という値が用いられ (図 2)、単位には [atoms/ion/steradian] が使用される。この

Differential sputtering yield は 3 次元的な分布を持つ。

さらに、この再付着現象に関しては、再付着率 (Sticking coefficient)、すなわち、グリッド表面に到達したスパッタ粒子がどれだけの確率で再付着するか、という物性値も必要となる。

このような背景から、1990 年代から米国を中心にイオンエンジンのグリッド損耗評価に特化したスパッタリング特性取得の試みが為されるようになってきた。以下では、これらの研究内容を紹介し、数値解析ツールを開発する上で必要となる試験技術を考える材料としたい。

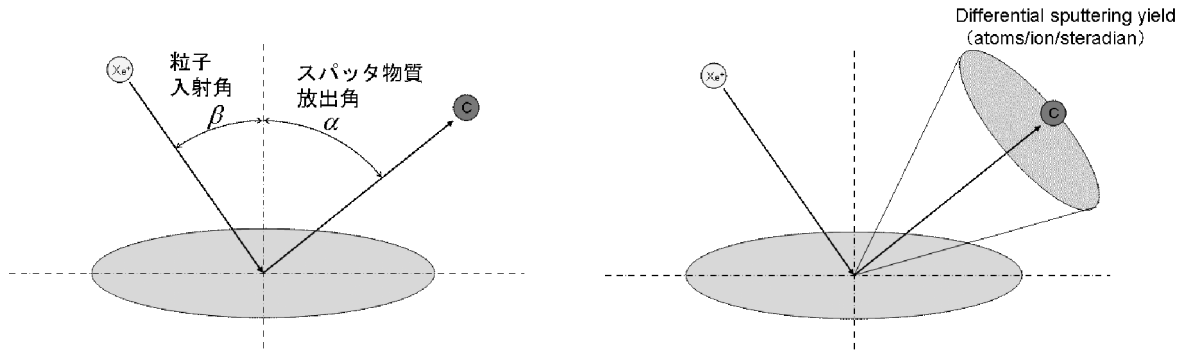


図 2 粒子入射角およびスパッタ物質放出角と Differential sputtering yield

3.2. 研究紹介

スパッタ率測定実験の手法は、表 4 に示すように大きく 2 種に分類できる。一方はプラズマ中に設置した被衝突材料に負のバイアス電圧を印加して正イオンを引きつける方法で、もう一方は実際にイオンビームを被衝突材料に照射する方法である。これらのうち、前者では入射角の制御等の設定が困難なため、近年の実験では後者のイオンビーム照射型の実験が主流となっている。また、この後者の中でも、リアルタイムでスパッタ率を測定する場合とそうでない場合とに分類することができ、さらに、そのスパッタ率測定手段によっても分類される。これらのうち、研究報告例の中で最も多く用いられているのが、水晶振動子微小天秤 (QCM) を使用してスパッタ率を測定する方式である。

以下は、AIAA 系を中心に調査したスパッタリング関連論文の紹介である。各論文に共通して言えることは、実験条件の妥当性に大きな注意を払っている点であり、背景圧力および残留ガス成分の影響 (被衝突材料がカーボン系の場合には、窒素分圧が高いとスパッタ率が小さくなり、酸素分圧が高いとスパッタ率が高くなる傾向がある) [4]や、ビーム発散角、ビームエネルギー分布、多価イオン割合に関して十分な考慮が必要とのコメントが見られる。また各文献では、上述の山村モデル等のスパッタリングモデルと実験結果との比較が多く示されている。

表 4 スパッタ率測定実験の分類

バイアス電圧印加方式	負にバイアスした供試体をプラズマ中に置き、正イオンを衝突させる。入射角は垂直に近くなる。	
イオンビーム照射方式	イオン源を利用してイオンビームを供試体に照射する。入射角の設定が可能。	
	リアルタイム測定	水晶振動子微小天秤 (QCM)
		分光器
		質量分析計 (QMS 等)
	照射後測定	質量変化
形状変化		
表面分析		

3.2.1. コロラド州立大^[5-10]

イオンエンジン向けのスパッタ率測定に関して最も精力的な活動をしているのが、John Williams らを中心とするコロラド州立大学のグループである。特に、スパッタ物質の放出方向 (Differential sputtering yield) を詳細に測定した研究報告[5-7]が多く、文献 [7] では、粒子入射面外も含めた3次元空間でのスパッタ物質放出方向を測定している。実験結果としては、スパッタ物質の放出方向が単純な \cos 則には従わないことが述べられており、イオンビームを垂直入射した場合 ($\beta = 0^\circ$)、スパッタ物質の放出が最大となる角度 (α) は、 $45 \sim 60^\circ$ 程度だとしている (角度は図2を参照)。各実験でのイオン入射角範囲はおおよそ $0 \sim 60^\circ$ 、イオン入射エネルギー範囲は $150 \sim 1500$ eV である。キセノンイオンをモリブデンやカーボンカーボン複合材等に照射し、スパッタ率の測定には QCM を使用している。

また文献 [8] では、被衝突材料の質量変化によるスパッタ率見積りやレーザ吸収分光による Differential sputtering yield 測定を試みており、文献 [9] では、高比推力イオンエンジンを想定した高入射エネルギー領域でのスパッタリング特性を取得している。スパッタリング特性とは直接関係しないが、文献 [10] ではグリッド材料の高電圧絶縁破壊耐性に関する実験結果を報告している。

3.2.2. ライプニッツ材料研究所 (ドイツ IOM)^[11-13]

モリブデン、チタン、カーボンカーボン複合材、高密度カーボン等の各種材料に対してキセノンイオンビームを照射してスパッタ率を取得^[11,12]している。スパッタ率は、被衝突材料の質量変化から算出しており、イオン入射角範囲はおおよそ $0 \sim 70^\circ$ 、イオン入射エネルギー範囲は $200 \sim 1400$ eV である。上記文献では、電子顕微鏡等によるイオン照射前後の表面観察結果が示されており、金属系材料とカーボン系材料とでイオン照射前後の表面状態の変化が異なるとしている。また、カーボン系材料間でスパッタ率に大きな違いはないこと、およびカーボン系材料の表面を鏡面状態にしてもスパッタ率には大きく影響しないことが報告されている。

一方、文献 [13] では、QCM のスイープによる Differential sputtering yield の測定結果も報告されており、これは、AIAA 論文を対象にイオンエンジン関連の文献を調査した中では、スパッタ物質放出方向の測定に言及した最も古い文献である (2000 年)。

3.2.3. カリフォルニア工科大 & NASA JPL^[14]

イオン入射角 $0 \sim 80^\circ$ 、イオン入射エネルギー $150 \sim 1000$ eV の範囲で、QCM によるスパッタ率測定をしている。被衝突材料がモリブデンの場合とカーボンの場合とでのスパッタリング特性の違いに注目しており、モリブデンに比べカーボンの方が入射角の影響が大きいことが示されている。広い入射エネルギー範囲において、モリブデンのスパッタ率が最大となる入射角 β は 55° で、そのスパッタ率は $\beta = 0^\circ$ のときの約 1.6 倍であるのに対し、カーボンの場合では、スパッタ率が最大となる入射角 β は 70° で、 $\beta = 0^\circ$ のときの約 4.8 倍のスパッタ率となる。また同文献では、表面粗さの影響によるローカルな入射角の分布についても言及している。

3.2.4. バージニア工科大 & NASA GRC^[15,16]

コロラド州立大学やドイツ IOM とは異なる手法を用いてスパッタ物質の放出方向を測定しており、被衝突材料であるモリブデンの周囲に複数のアルミ箔の帯を立体的に配置し、イオンビーム照射後にこれらのアルミ箔の表面分析をすることで、Differential sputtering yield を算出している。イオン入射角は 0° 固定で、イオン入射エネルギー範囲は $60 \sim 100$ eV とかなり低い。低エネルギー領域でのスパッタ率測定データは少ないため、貴重な実験結果と言える。

3.2.5. NASA GRC^[17]

スパッタ物質の再付着率に関する実験結果の報告である。スパッタリングにより放出されたカーボンが、初めに到達した面には 100% 付着せず、そこからさらに飛散する現象について述べている。例えば、スパッタ物質であるカーボンがイリジウム材の表面に付着する確率 (Sticking coefficient) は 0.72 としている。本報告は真空槽内のイオンビームターゲット材からのスパッタ物質の飛散について検討したものであり、グリッド損耗に直接利用できる数値 (例えばカーボン表面へのカーボンの再付着率) は残念ながら無い。

4. グリッド耐久性評価ツールと試験技術

グリッド耐久性評価ツールの開発に必要な実験の役割としては、冒頭に示したように、1) 計算入力値としての各種

物性値の取得, 2) 数値解析モデルの妥当性評価, 3) 数値解析結果の妥当性評価, の3点がある。

本報告で紹介したスパッタリング特性に関する研究はこれらのうちの1) に含まれ, 表1に示した各物性値についても, 同様にその取得が重要となる。解析ツールを構築するためにこれらの実験をすべて独自に実施することは困難であるため, 上述の各文献のような情報源から得られるデータを整理し, ツール開発者がそれらを有効に使える状態にすることがまず重要であろう。ただし, すべての必要な物性値を既存の実験結果から得ることはできないため, 不足分は独自の実験により取得しなければならない。今回示したスパッタリング特性を例にとると, 入射角が大きな領域でのスパッタ率や, グリッド損耗現象に特化した再付着特性などがそれに当たる。ただし, これらの実験の困難さは容易に想像できる。また物性データの取得に関しては, 数値解析結果への感度を考慮し, 影響の低いものについては簡易モデル等を用いて省力化するという判断も重要となる。

本報告で紹介した各文献に示される結果を見ると, スパッタ率のばらつき(同条件下での測定結果の違い)はかなり大きい。このため, 数値解析の入力値としての物性値の扱いには注意が必要であり, 例えばスパッタ率の最悪値と最良値それぞれを使って寿命計算を行い, その結果から, 期待される寿命範囲を見積もる等の方法が必要と考えられる。

このような状況から, 実験の役割の2) および3) として示した「数値解析の妥当性評価」の重要性はかなり高いものと考えられる。文献[18]のようなビーム抽出に関する基礎実験や, スパッタ率の大きい材料を使ったグリッド損耗加速実験など, 解析モデルの妥当性を検証できる実験を複数実施することで, グリッド耐久性評価ツールの信頼性を上げていかなければならない。

5. おわりに

数値解析によるグリッド耐久性評価ツールを有効なものとするためには, 実験によるサポートが不可欠である。まず, 計算の入力値となる様々な物性値を実験により取得する必要がある。本報告で紹介したスパッタリング特性はその中でも最も重要な物性値のひとつである。スパッタリング特性に関しては, 低エネルギー領域でのスパッタ率やスパッタ物質放出方向など, グリッド耐久性評価ツールに有用な測定結果が多く報告されており, これらを有効に利用することが大切である。不足する項目に関しては, 独自の工夫により実験または解析を行い, データを取得しなければならない。スパッタリング特性以外の各物性値についても同様であり, 特に上下流のプラズマ物性を的確に把握することが重要である。また, 実験の役割としては, 解析モデルおよび解析結果の妥当性を評価することも重要であり, 実験と解析との比較によりコードの改良を重ね, グリッド耐久性評価ツールの信頼性を高めていく必要がある。

参 考 文 献

- [1] 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 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, 2007.
- [2] Matsunami, N, et al., “Energy Dependence of Sputtering Yields of Monatomic Solids,” Inst. Plasma Physics, Nagoya Univ., IPPJ-AM-14, 1980.
- [3] Yamamura, Y, Itikawa, Y., and Itoh, N., “Angular Dependence of Sputtering Yields of Monatomic Solids,” Inst. Plasma Physics, Nagoya Univ., IPPJ-AM-26, 1983.
- [4] Blandino, J., Goodwin, G., and Garner, C., “Evaluation of Diamond Grids for Ion Thruster Optics - Low Energy Sputter Yield Measurements,” 32nd AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-1996-3203, 1996.
- [5] Williams, J., Johnson, M., and Williams, D., “Differential Sputtering Behavior of Pyrolytic Graphite and Carbon-Carbon Composite Under Xenon Bombardment,” 40th AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2004-3788, 2004.
- [6] Zoerb, K., et al., “Differential Sputtering Yields of Refractory Metals by Xenon, Krypton, and Argon Ion Bombardment at Normal and Oblique Incidences,” 29th Int'l Electric Propulsion Conf., IEPC-2005-293, 2005.
- [7] Yalin, A., et al., “Azimuthal Differential Sputter Yields of Molybdenum by Low Energy Xe+ Bombardment,” 42nd AIAA

- Joint Propulsion Conf., AIAA-2006-4336, 2006.
- [8] Yalin, A., et al., "Sputtering Studies of Multi-Component Materials by Weight Loss and Cavity Ring-Down Spectroscopy," 42nd AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2006-4338, 2006.
 - [9] Williams, J., et al., "Xenon Sputter Yield Measurements for Ion Thruster Materials," 28th Int'l Electric Propulsion Conf., IEPC-2003-130, 2003.
 - [10] Martinez, R., Williams, J., and Goebel, D., "Electric Field Breakdown Properties of Materials Used in Ion Optics Systems," 42nd AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2006-5004, 2006.
 - [11] Tartz, M., et al., "Investigation of Sputter Behavior of Ion Thruster Grid Materials," 40th AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2004-4114, 2004.
 - [12] Tartz, M., et al., "Sputter Investigation of Ion Thrusters Grid Materials," 41st AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2005-4414, 2005.
 - [13] Deltchev, R., et al., "Redeposition of sputtered material on ion thruster grids," 36th AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2000-3666, 2000.
 - [14] Kolasinski, R., et al., "Carbon Sputtering Yield Measurements at Grazing Incidence," 42nd AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2006-4337, 2006.
 - [15] Nakles, M., et al., "Experimental and Modeling Studies of Low Energy Ion Sputtering in Ion Thrusters," 39th AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2003-5160, 2003.
 - [16] Nakles, M., et al., "Further Investigation of Low-Energy Ion Sputtering in Ion Thrusters," 40th AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2004-3789, 2004.
 - [17] Marker, C., et al., "Transport of Sputtered Carbon During Ground-Based Life Testing of Ion Thrusters," 41st AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2005-4413, 2005.
 - [18] Hayakawa, Y., "Measurements of Current Distribution on a Two-Grid-Ion-Extraction-System Gridlet," 42nd AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2006-5003, 2006.