

CRDS 法を用いたグリッド損耗強度分布取得のための 数値解析ツールの開発

Development of Numerical Analysis Tool for Grid Erosion Intensity Measurement by CRDS Method

中野 正勝 (東京都立産業技術高等専門学校)・山本 直嗣 (九州大学)

○Masakatsu NAKANO(Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology)・Naoji YAMAMOTO (Kyushu University)

Abstract

Numerical experiments were carried out to determine whether the erosion intensity distribution can be reproduced from the line integrations of the sputtered atom density in the plume of an ion engine taken by the Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS) method. In the simulations, a number of line integrations downstream of the grid surface along different directions were computationally generated and reconstruction was carried out using the ML-EM method. Although the number of line integrations is large (several hundreds), the pits and grooves pattern erosion was well reproduced even if the line integrations contain 10% random noises, which proposes the possibility of non-contact erosion measurements in a relatively short period of time. In addition, numerical experiments for measuring the differential sputtering yield by the ML-EM method were carried out; in the normal incidence case, several tens of line integrations provide good reproduction of differential sputtering yields. In the oblique incidence case, the required number of data increased by tenfold, however, the differential sputtering yields were successfully obtained.

1. はじめに

イオンエンジンのグリッドはイオンを加速噴射して高い比推力を獲得する一方で、数千から数万時間をかけて損耗を受ける寿命制限要因パーツである。耐久性能認定のための実時間試験の時間は非常に長くコストは膨大である²⁾。 $\mu 10$ イオンエンジンでは 18000 時間と 20000 時間の耐久試験を行った。数値解析による耐久性能認定支援が必須であることから、イオン加速グリッド系の寿命認定支援のために JAXA Ion Engine Development Initiatives (JIEDI) ツール開発が行われた³⁻⁵⁾。

JIEDI ツールによるイオン加速グリッドの寿命評価の精度を向上させるためには、実験的に得られたグリッドの損耗強度分布が必要であるが、データ取得のための時間が膨大であることから、その数は限られている。また、スパッタ率に代表される物性値の詳細なデータベースも必要であるが、QCM を用いて入射エネルギーと入射角をパラメータとしてデータを取得するには非常に多くの時間がかかる。

山本らは Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS) 法を用いて、スパッタされて飛散した微量なグリッド原子の吸収量の測定に成功した⁶⁾。レーザー上のグリッド原子密度の線積分はスパッタ原子の飛散箇所とその飛散量から決定さ

れるため、逆問題を解くことにより、CRDS 法で計測された線積分値からグリッドの損耗強度分布の取得が可能と考えられる。グリッド損耗量は微小であるため、グリッド部を何らかの形で直接計測するのではなく、グリッドから飛散した微量な損耗原子を高感度な CRDS 法により測定し、逆問題を解くことで、本来求めたい損耗強度分布を得るわけである。

逆問題を解く手法として Computed Tomography (CT) を用いる。CT アルゴリズムは、医療用の X 線 CT ばかりではなく火炎の温度計測や音響計測用の光学 CT マイクロフォンの等の計測技術に用いられている^{7,8)}。

CT において分布量を求めるには、位置を移動し角度を変えて線積分値を得ることが重要である。しかしながら、位置や角度を任意に移動することは CRDS 法などの光学計測では現実的ではないため、現実的な光学系の設置範囲で測定可能かどうか実測定に先立って決定する必要がある。また、透過部の断面情報を求めるのではなく、離れた箇所のブルームを計測してグリッド表面の情報を取得することが目的であるので、その距離等の測定上の制約も明らかにする必要はある。

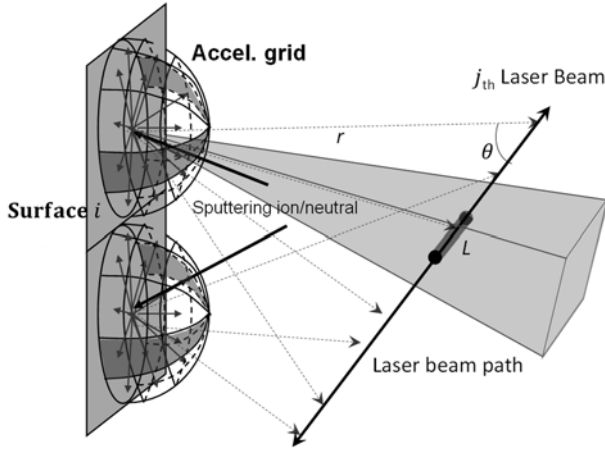


図1 グリッド損耗強度分布と密度の線積分値との関係

本稿ではCRDS法による計測結果からグリッド損耗強度分布を取得することを目指し、そのために必要となる数値解析ツールの開発を行い、この手法の適用可能性と計測に必要な条件について明らかにするために数値実験を行ったので報告を行なう。

2. モデル化

図1にグリッド表面とレーザー光の関係を示す。JIEDIツールなどの計算ツールにおいては、計算領域は有限要素メッシュで分割されているため、グリッド表面も近接する有限要素メッシュ面に対応した分割がされている。この放出面は仮想的な半球で覆われており、パネルで分割されているものとする。

グリッドのある放出面*i*から放出される損耗原子の流束を Γ_i とし、その中でレーザー光路*j*上を通過するものについて、その方向を*k*として流束密度を γ_k とすると、レーザー光路上の損耗原子密度の線積分値は

$$I_j = \sum_i \sum_k \gamma_k C_{ikj} \quad (1)$$

で与えられる。ここで C_{ikj} は、損耗原子の平均速度を \bar{v} とし、要素面からレーザーとの交点までの距離 r_{ijk} と、レーザーの光路上で占める長さを L_{ijk} として

$$C_{ikj} = \begin{cases} \frac{L_{ijk}}{r_{ijk}\bar{v}} & \text{通過する} \\ 0 & \text{通過しない} \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる。

ただし、式(1)に含まれるのはグリッド要素の特定のパネルを通過する損耗原子流束であるので、何らかの形でグリッド要素全体の損耗原子流束に関連付ける必要がある。ここでは、コサイン則にしたがって各方向に飛散するものとして、

$$\gamma_{ik} = \Gamma_i \frac{\cos \theta_{ik}}{\pi} \quad (3)$$

に関連付けるものとする (JIEDI ツールなどで飛散方向の情報が得られているのであればそれを利用する)。式(3)を用いることで、式(1)は重み w_{ikj} を用いて、グリッド要素の損耗原子流束を用いて

$$I_j = \sum_i \Gamma_i \sum_k w_{ikj} \quad (4)$$

の形で書き直すことができる。

CRDS計測により、線積分のデータが十分与えられてい

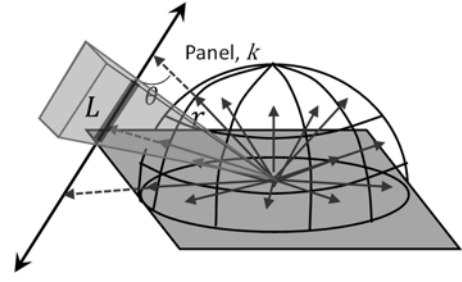


図2 微分スパッタ収量と密度の線積分値との関係

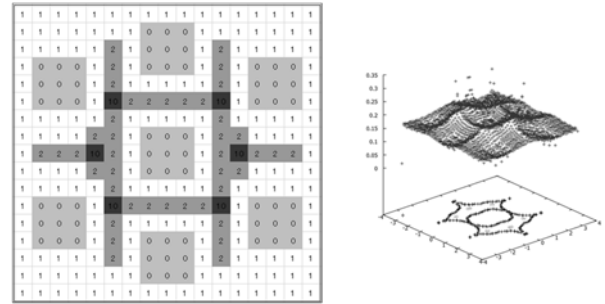


図3 模擬損耗強度分布データ

る場合($m \geq n$),

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_k w_{1k1} & \cdots & \sum_k w_{nk1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_k w_{1km} & \cdots & \sum_k w_{nkm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \vdots \\ \Gamma_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

であるから、損耗原子の流束を計算することが可能である。すなわち、計測値をベクトル \mathbf{I} 、右辺の行列を \mathbf{C} として

$$\mathbf{I} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{I} \quad (6)$$

である。一方で、繰り返し計算により求める手法もあり、最尤推定・期待値最大化法では

$$\Gamma_j^{k+1} = \frac{\Gamma_j^k}{\sum_i c_{ij}} \sum_i \frac{I_i c_{ij}}{\sum_j c_{ij} \Gamma_j^k} \quad (7)$$

により計算することもできる。

同様に、図2のように、微分スパッタ収量についても、レーザー*j*における線積分値は、平板ターゲットに仮想的な半球を置いてパネル分割することで、パネル*k*を通過する微分スパッタ収量を y_k とすれば

$$I_j = \sum_k y_k C_{kj} \quad (8)$$

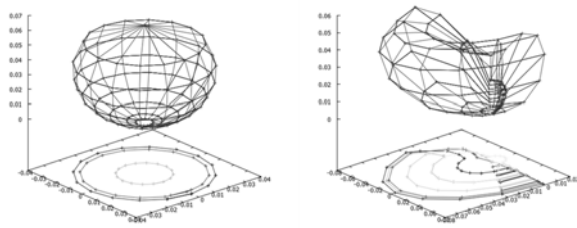
で与えられる。線積分のデータ数が十分与えられている場合、

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & \cdots & C_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1m} & \cdots & C_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (9)$$

であるから、微分スパッタ収量を決定することができる。

3. 数値実験

3.1 損耗強度分布 本研究の位置づけは、CRDS法による線積分値から損耗強度分布が再現できるかどうかを明らかにすることであり、測定は今後行うこととして、現時点



(a) 垂直入射 (b) 30°入射
図4 微分スパッタ収量模擬データ

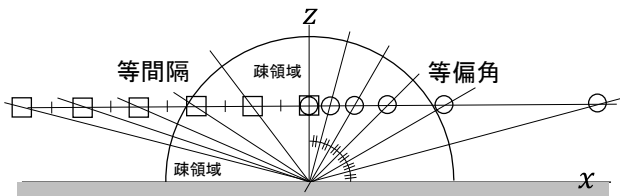


図5 直線上のスキャン間隔とスキャン角度の関係

で十分な数の測定値は取得していない。そこで、模擬的なグリッド損耗強度を与えた上で擬似的な CRDS 信号を作成し、その信号のみを用いて損耗強度分布が再現できるのか数値実験を行う。再現性を評価する基準として、あらかじめ与えるグリッド損耗強度を Γ とし、再現されたグリッド損耗強度分布を $\bar{\Gamma}$ とし、平均的な誤差 $\bar{\epsilon}$ を次のように定義する。

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{\sum_j (\Gamma_j' - \Gamma_j)^2}{n}} / n \quad (12)$$

擬似的な損耗パターンとしては、山本の実験で用いた 7 孔のアルミ加速電極を想定し、図 3 のように 2 枚グリッドに典型的に見られる Pits & Grooves パターンの損耗を与えた。損耗パターンは 17×17 のメッシュで表しており、図中の数字は損耗強度を示している。

なお、スキャンの方法として、レーザーをグリッド表面に対して並行に配置する方法を取った。スキャンの角度については、図 3 の中央孔を中心に回転するものとし、等角度とした。なお、CRDS 法ではレーザー光路上で光が往復するために、180°反対側からレーザーを入射させても同じ線積分値が得られる。線対称性が加わる場合には、レーザーの入射範囲を 0°~90°とすることができ、イオンエンジンのグリッド孔のような正六角形上の配置であれば 0°~60°のスキャンですむ。擬似的に得られた CRDS 信号には 10% のランダムなノイズを乗せて実験環境を模擬した。

3.2 微分スパッタ収量

CRDS 法による線積分値から微分スパッタ収量を求めることが可能かどうかを判定するために、損耗強度分布と同様の数値実験を行った。模擬的なスパッタ収量としては、Xe の PG に対する 500 eV におけるスパッタの実測データを用い⁹⁾、微分スパッタ収量をコサイン則に従う垂直入射のものと、30°入射の場合の実験値の Fitting 関数で与えた。スパッタ原子の放出方向は 8×16 の等立体角に分割した。与えた微分スパッタ収量を、それぞれの方向が長さを表すものとして図 4 に示す。

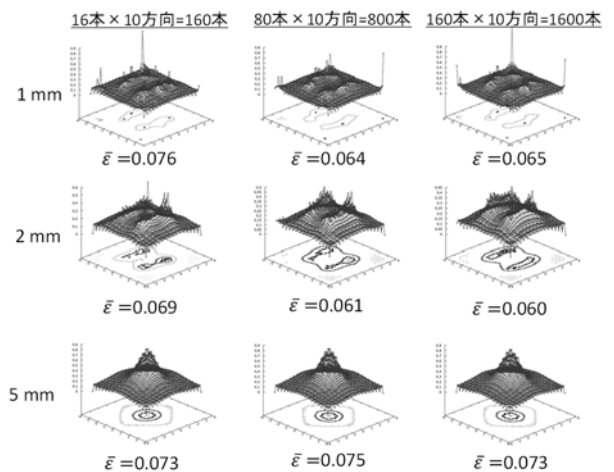


図6 10°間隔スキャンによる損耗強度分布の再現値

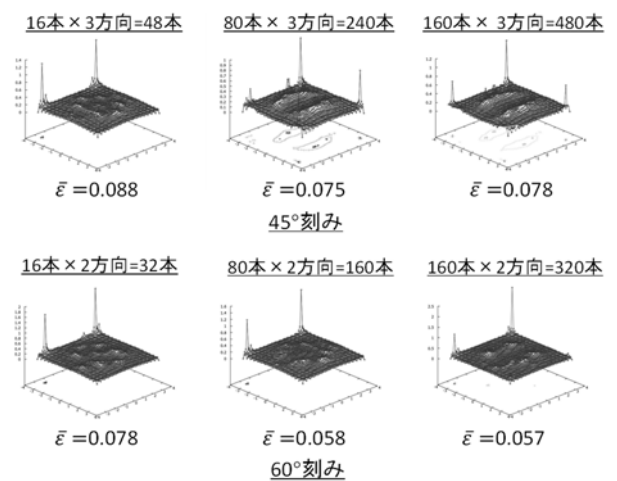


図7 45°と60°間隔スキャンによる損耗強度分布の再現値。グリッド面からの距離は 1 mm。

なお、微分スパッタ収量の線積分値を評価する際には、全ての偏角への放出量を均等にスキャンできるように、等しい偏角分割でレーザーを配置する場合 (図 5 の左)

$$(x_i, z_i) = \left(\frac{h}{\tan \pi \frac{i-0.5}{N}}, h \right) \quad (i = 1, \dots, N) \quad (13)$$

と、単純に水平面上を等間隔にスキャンする場合 (図 5 右) についても計算を行うものとする。ただし、単純に等間隔でスキャンする場合には、天頂部と水平方向にスキャン間隔が荒くなる部分が生じることに留意したい。

4. 結果 および 考察

4.1 損耗強度分布 スキャン角 10°に対して損耗強度分布を再現したものを図 6 に示す。一方向から取得するデータの個数を 16, 80, 160 と変えているが、16 個でも Pits & Grooves 形状の再現はできており、取得個数を増やしても解像度に大きな変化はない。なお、損耗強度分布の鮮明さとレーザーのターゲットから距離については強い相関があり、表面近傍 1 mm と 2 mm では損耗強度分布が再現できるが、5 mm 離れると再現性は落ちる。また、式(12)で定義した平

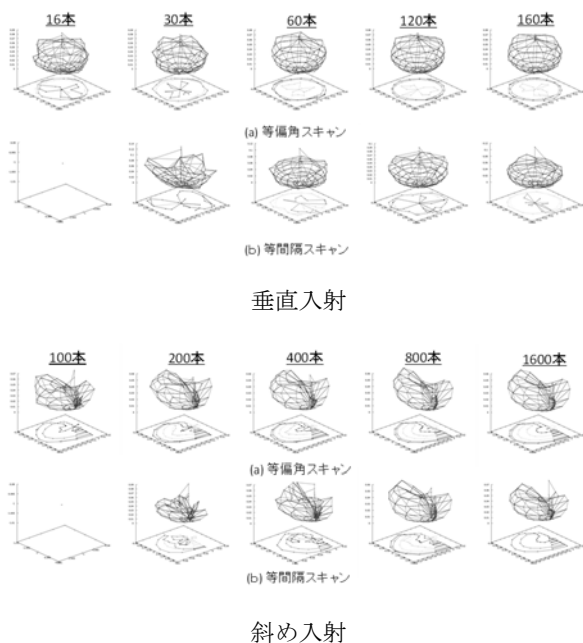


図8 微分スパッタ収量の再現値

均的な誤差については、5 mm 離れたもので 0.03 と最も小さくなっており、指標としては有効ではないことも分かった。ただし、一方向からのデータ数を増やすことで一定値に収束する傾向があり、データ数を決める際の参考となる可能性がある。

次に、スキャン方向に何らかの拘束条件がある場合を想定して、スキャン角度刻みを 45°ならびに 60°としたものを図 7 に示す。一方向からのデータ個数は同じく 16, 80, 160 個である。スキャン角度刻みが 45°のものでは一方向からのデータ個数が 16 個では再現性が悪いが、80 個にすると模擬データと同じ形状の Pits & Grooves 損耗が現れている。一方で、80 個を 160 個に増やしても解像度に向上は見られない (ϵ に変化がない)。なお、60 度間隔のものでは一方向からのデータ数を 16 から 160 まで増やしても Pits & Grooves 形状の損耗は再現することができなかった。

以上から、Pits & Grooves パターンが明瞭に再現できているのは、10°間隔の 16 本 (10 方向で合計 160 本) と 45°間隔の 80 本 (3 方向で合計 240 本) 以上からである。角度を変えた十分な数のスキャンができれば、1 方向から取得するデータは少なくともよく、多方向からのスキャンができない場合には、1 方向から取得するデータを増やすことで解像度を上げることができることも分かった。なお、スキャンする距離がグリッドから 2 mm 以上離れると損耗強度が再現できないことも明らかになった。

4.2 微分スパッタ収量 垂直入射の場合の微分スパッタ収量の再現結果を図 8 の上に示す。等偏角サンプリングと等間隔サンプリングでは、等間隔サンプリングで天頂部の再現性が悪く、本数が少ない場合には再現することすらできなかった。天頂部で再現性が悪いのは、図 5 に示すようにサンプリング間隔が天頂部で疎になるからである。いずれのスキャンでも、スキャン本数を多くすることで再現性が向上していることが分かる。測定本数に関しては、垂直入射の場合には、対称性から角度を変えたスキャンの必要

はないので、取得データ本数を少なくでき、等角度のスキャンで 30 本以上、等間隔のスキャンで 60 本以上のデータが必要である。

一方、入射角度のある場合についても等偏角スキャンで再現に成功しているが、入射面に対する対称性しかないために、角度を変えたスキャンが必要である。ここではスキャン角度刻みを 10°としたため、スキャン本数は、等偏角スキャンで 200 本、等間隔スキャンで 400 本程度である。この場合も、等間隔でスキャンするものよりも等偏角でスキャンするものの方が、同じ本数あたりの再現性は高い。

6. まとめ

CRDS 法を用いることでスパッタされたグリッド原子の密度の線積分値を求めることが可能となったので、角度を変えた複数の線積分値から CT アルゴリズムによりグリッドの損耗強度分布と微分スパッタ収量が計測可能かどうか数値実験を行った。その結果、グリッド近傍を測定することで、線積分値から損耗強度分布の再現が可能であった。しかしながら、必要な計測データは数 100 個のオーダーである。また、微分スパッタ収量についても測定可能か数値実験を行った結果、線積分値から微分スパッタ収量が再現可能であることが明らかとなった。垂直入射の場合には数 10 個の本数で微分スパッタ収量の取得が可能である一方で、斜め入射の場合には数 100 程度で再現できる。

今後は、実験によって垂直入射の微分スパッタ収量の測定を行い、実績やノウハウを積み上げることで、斜め入射の場合や損耗強度分布の取得へと実績を積み上げたい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, *J. Propul. Power* **18** (2002), pp. 169-175.
- 3) 國中均: 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, JAXA-SP-06-019, pp.5-9.
- 4) 船木一幸: 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論文集, JAXA-RR-09-004.
- 5) 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, 2012 年 3 月, JAXA-RM-11-023.
- 6) A. Yamaguchi, A. Kibe, N. Yamamoto, T. Morita, H. Nakashima and M. Nakano, Erosion Rate Measurement in Ion Thrusters Using Cavity Ring-Down Spectroscopy Technique, *Journal of Instrumentation*, Vol. **11** (2016), C01079 doi:10.1088/1748-0221/11/01/C01079
- 7) Hiroki Uchiyama, Masato Nakajima, and Shinichi Yuta, Measurement of flame temperature distribution by IR emission computed tomography, *Applied Optics* Vol. **24**, Issue 23, pp. 4111-4116 (1985)
- 8) 園田義人, 中宮俊幸, 光本文秋, 光波マイクロホンの開発とそのプラズマ計測への応用, *J. Plasma Fusion Res.* Vol.91, No.10 (2015), pp.641-647.
- 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, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, 2004.