

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

百武 徹*, 西田 迪雄**, 剣持 貴弘***, 村本 哲也****

Toward Sputtering Analysis for Ion Engine Accelerator Grid

By

Toru HYAKUTAKE *, Michio NISHIDA **,

Takahiro KENMOTSU *** and Tetsuya MURAMOTO ****

Abstract: The erosion of accelerator grids of an ion engine due to the sputtering of charge-exchange ions is the primary failure mechanism to shorten the life of ion engines. In this report, the semi-empirical formulae for such sputtering are introduced and some problems for the application of these formulae to the analysis of the accelerator grid erosion are discussed. In future, grid erosion rates will be analyzed by using the ACAT and MD simulation.

Key words: Ion Engine, Grid Erosion, Sputtering Yield

1. はじめに

イオンエンジンを搭載したはやぶさ小惑星探査機による深宇宙動力航行の成功は、宇宙ミッションにおける本格的なイオンエンジン利用の可能性を示した。これまで、イオンエンジンのグリッド耐久認定には、実時間で数万時間級の寿命試験が行われてきたが、耐久性の向上や要求寿命の進展に伴い、このような旧態依然とした開発方式では、時期を得た宇宙機の実現が困難となってきた。そのような中、数値解析によるグリッド寿命評価方法として、現在、イオンエンジンのグリッド耐久認定用数値解析ツール（JIEDI ツール）の研究開発が進められている。

JIEDI ツールの信頼性の向上のためには、入力情報としての正確な物性値が必要不可欠である。イオンエンジンの加速グリッドでは、電荷交換反応によって生じた CEX イオンによるスパッタリング現象が起これ、グリッド損耗をもたらす。このグリッド損耗を評価する際に必要なスパッタリング率は、JIEDI ツールの中でも特に重要な物性値となる。しかしながら、現在のところ、低エネルギーで照射する CEX イオンのスパッタリング率に関するデータは不足しているため、JIEDI ツールの要求を満たす正確なスパッタリング率を与えることは難しい。

著者らはこれまで、イオンエンジンのブルーム解析に関する研究を行ってきた [7] が、本研究では、これらのプログラムコードをイオンエンジン加速グリッドのビーム解析に適用するとともに、その解析に必要な低エネルギーイオンにおけるスパッタリング率をシミュレーションによって評価することを目的とする。本報告では、このスパッタリング解析に向けて、まず始めに、スパッタリングに関する半経験式の紹介、および、イオンエンジン加速グリッド損耗にこれらの式を適用する際の問題点について説明を行う。

* Okayama University

** Sojo University

*** Kibi International University

**** Okayama University of Science

2. スパッタリング率に関する半経験式

2.1 垂直入射におけるスパッタリング率

スパッタリングとは、固体表面に数十 eV 以上の運動エネルギーを持ったイオンが照射すると、固体中においては引き出し衝突の連鎖（衝突カスケード）が起き、結果として標的原子が固体表面から真空中に放出される現象である。このイオン照射による固体のスパッタリング率に関しては、実験データおよびシミュレーションから得たデータをもとに、任意の入射イオンと任意の固体との組み合わせに対して成立する次のような半経験式が提案されている [14]。

$$Y(0) = 0.042 \left(\frac{Q\alpha}{U_s} \right) \left\{ \frac{S_n}{1 + \Gamma k_e \varepsilon^{0.3}} \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{E_{th}}{E} \right)^{1/2} \right\}^s \quad (1)$$

ここで、 Q, s は標的原子に依存するフィッティングパラメータである。また、 U_s は標的原子の表面結合エネルギーで、通常、昇華エネルギーが用いられる。 E は入射イオンのエネルギー、 E_{th} はしきい値のエネルギーであり、この値以下になるとスパッタリングは起こらない。その他のパラメータは以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.249 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{0.56} + 0.0035 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1.5} \quad \text{for } M_1 \leq M_2 \\ \alpha &= 0.088 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{-0.15} + 0.165 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \quad \text{for } M_1 \geq M_2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 M_1, M_2 はそれぞれ入射イオンと標的原子の質量である。また、核的阻止能 S_n は

$$S_n = 84.78 \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_1}{M_1 + M_2} s_n \quad (3)$$

となる。ここで、 Z_1, Z_2 はそれぞれ入射イオンと標的原子の原子番号である。また、換算核的阻止能 s_n は以下のようになる。

$$s_n = \frac{3.441 \varepsilon^{1/2} \ln(\varepsilon + 2.718)}{1 + 6.35 \varepsilon^{1/2} + \varepsilon(6.882 \varepsilon^{1/2} - 1.708)} \quad (4)$$

ここで、換算エネルギー ε は

$$\varepsilon = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \frac{0.03255}{Z_1 Z_2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})} E \quad (5)$$

である。次に Γ は

$$\Gamma = \frac{W}{1 + (M_1/7)^3} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 W は標的原子に依存する別のフィッティングパラメータである。 k_e は Lindhard の電子的阻止能であり、

$$k_e = 0.079 \frac{(M_1 + M_2)^{3/2}}{M_1^{3/2} M_2^{1/2}} \frac{Z_1^{3/2} Z_2^{1/2}}{(Z_1^{3/2} + Z_2^{2/3})^{3/4}} \quad (7)$$

となる。最後に、しきい値のエネルギー E_{th} に関して、山村らは次のように定義している。

$$\begin{aligned} E_{th} &= \frac{[1 + 5.7(M_1/M_2)] U_s}{\gamma} \quad \text{for } M_1 \leq M_2 \\ E_{th} &= \frac{6.7 U_s}{\gamma} \quad \text{for } M_1 \geq M_2 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 γ は弾性散乱におけるエネルギー移行因子で、

$$\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} \quad (9)$$

である。図1は、上記の半経験式と実験値との比較を示したものである。入射イオン Xe に対して、それぞれ、Mo と C を標的原子とした場合である。標的原子が Mo の場合、半経験式は比較の実験値とよく一致している。一方、標的原子が C の場合、特に Xe の入射エネルギーが低い領域において、山村らの半経験式は、実験値から大きく外れていることが分かる。従って、はやぶさ搭載イオンエンジン加速グリッドにはカーボン/カーボン複合材が採用されていることから、山村らによる半経験式をそのまま適用すると加速グリッドのスパッタリング率を過小評価してしまう可能性がある。

2.2 スパッタリングの角度依存性

前節では垂直入射に対するスパッタリング率を示してきたが、実際には、イオンの入射方向が垂直方向からずれるに従って、スパッタリング率は変化する。つまり、入射角が大きくなるとカスケードがより表面で発達するのでスパッタリング率は増加するが、入射角がさらに大きくなると表面にある隣接する原子の遮蔽効果により衝突径数が制限され表面層を通過しにくくなり、最後にはすべての入射イオンはほとんどエネルギーを固体に付与することなく反射され、スパッタリング率は急激に減少する。そこで、実験データを解析することにより山村らは次のスパッタリング角度依存性に関する半経験式を提案している [13]。

$$\frac{Y(\theta)}{Y(0)} = t^f \exp[-\Sigma(t-1)], \quad t = 1/\cos\theta \quad (10)$$

ここで、 θ は表面に垂直な面からの入射角である。この半経験式は二つの未知パラメータ f と Σ は実験データを通して決められる。実際には、中・重イオンと軽イオンとはスパッタリング機構が非常に異なっているため、それぞれ分けて考えなければならない。イオンエンジンの加速グリッドは、入射イオンは Xe に限定されるので、ここでは、中・重イオンにおけるスパッタリング率の角度依存性について説明する。まず、 f に対する実験式として次のような式が示されている。

$$f = f_s \left(1 + 2.5 \frac{1-\zeta}{\zeta} \right) \quad (11)$$

ここで、 f_s はシグムンドの f -因子である[11]。また、

$$\zeta = 1 - \left(\frac{E_{th}}{E} \right)^{1/2} \quad (12)$$

である。次に、散乱断面積に比例する量である Σ に関しては、

$$\Sigma = f \cos\theta_{opt} \quad \text{for} \quad \theta_{opt} = 90^\circ - 286.0\psi^{0.45} \quad (13)$$

と示される。ここで、 θ_{opt} は中・重イオンにおけるスパッタリング率の最大値を与える角度を意味する。また、表面の臨界角に対応する量 ψ は次のように与えられる。

$$\psi = \left(\frac{U_R(0)}{E} \right)^{1/2} \quad (14)$$

ここで、 $U_R(0)$ はアモルファス表面での平均ポテンシャルである。図2は、それぞれ、Mo と C を標的原子とした場合のスパッタリング率と Xe イオンの入射角度の関係を表している。入射角が大きくなるにつれてスパッタリング率は増加し、最大値 θ_{opt} を経た後、急速にスパッタリング率は減少している。特に標的原子が C の場合、入射エネルギーの

低いしきい値付近では、角度によってスパッタリング率は急激に増加しており、現実的でない値を示すようになる。また、式 (10) は、しきい値以上においてのみ有効であるため、しきい値以下の入射エネルギーをもったイオンが斜めに入射した場合のスパッタリング率は考慮されていない。実際には、図 1 に見られるように、しきい値以下においてもある程度スパッタリングが起きていることから、低入射エネルギーの領域において、スパッタリング率の角度依存性に関する新たなデータベースを構築する必要がある。

3. おわりに

山村らによる半経験式 (1), および式 (10) は、本来、高エネルギーをもった入射イオンによるスパッタリング現象を対象に導出された式である。つまり、本研究の背景となっている低エネルギーの CEX イオンによるスパッタリングにこれらの式を直接適用することは難しい。特に標的原子が C の場合、低い入射エネルギーにおいて既存の実験値との大きな相違が見られた。スパッタリングの角度依存性に関して、今回、実験値との比較は行っていないが、低い入射エネルギーにおいて、半経験式が実際の現象を再現できているかは疑問である。従って、今後は、二体衝突近似法を基にしたモンテカルロコード ACAT [8], 並びに MD シミュレーション [9] を用いたスパッタリング解析を行い、実験値との比較を通して、イオンエンジン加速グリッド損耗を対象とした新しいスパッタリングモデルの構築を行う予定である。

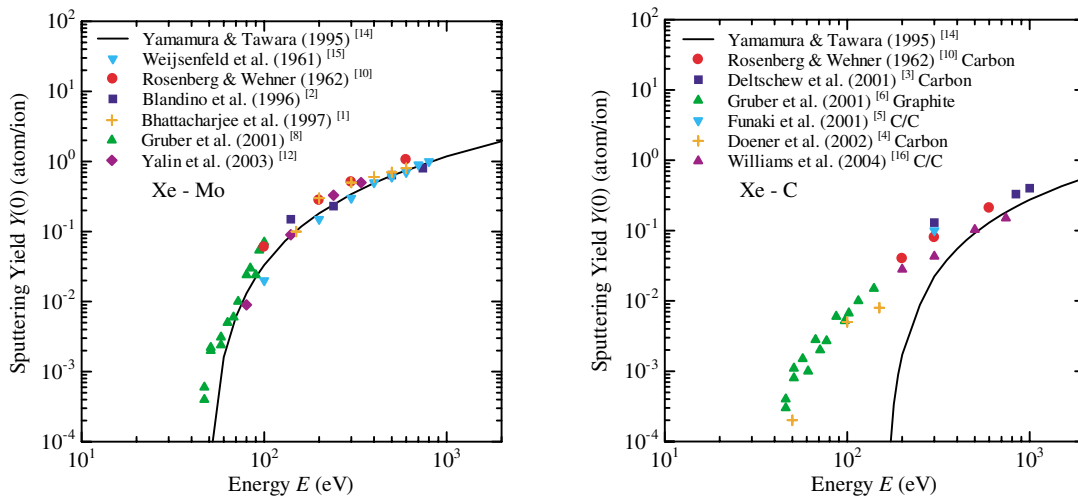


図 1 垂直入射におけるスパッタリング率 (実験値との比較)

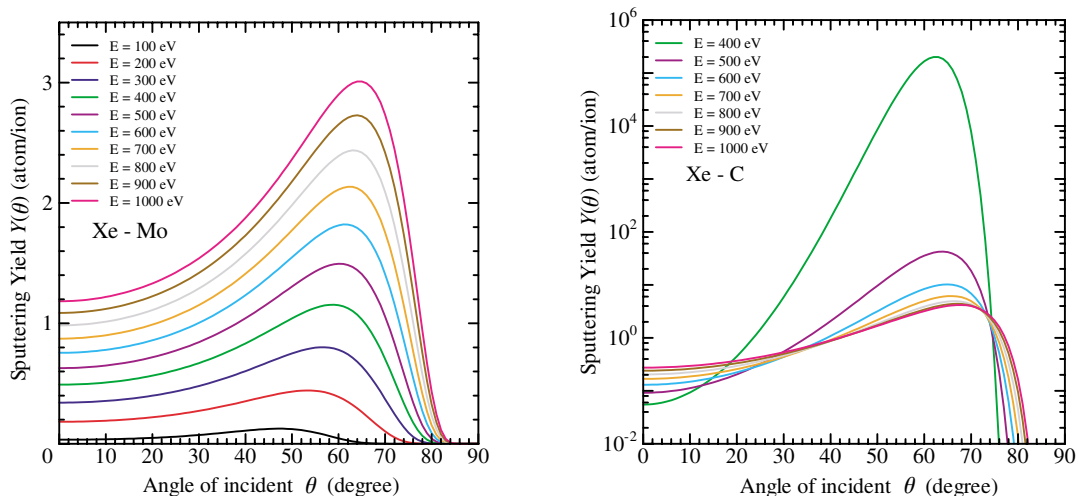


図 2 スパッタリングの角度依存性

参 考 文 献

- [1] Bhattacharjee, S., Zhang, J., Shutthanandan, V., Ray, P. K., Shivaparan, N. R. and Smith, R. J., “Application of secondary neutral mass spectrometry in low-energy sputtering yield measurements”, Nucl. Instr. Meth. Phys. B, Vol. 129, 123-129, 1997.
- [2] Blandino, J. J., Goodwin, D. G. and Garner, C. E., “Evaluation of Diamond Grids for Ion Thruster Optics: Low Energy Sputter Yield Measurements”, AIAA- 96-3203, 1996.
- [3] Deltschew, R., Tartz, M., Plicht, V., Hartmann, E., Neumann, H., Leiter, H. J. and Esch, J., “Sputter Characteristics of Carbon-Carbon Compound Material”, IEPC-01-118, 2001.
- [4] Doerner, R. P., Whyte, D. G., Goebel, D. M., “Sputtering yield measurements during low energy xenon plasma bombardment”, J. Appl. Phys., Vol. 93, No. 9, 5816-5823.
- [5] Funaki, I., Nishiyama, K., Kuninaka, H., Toki, K., Shimizu, Y. and Toki, H., “20mN-class Microwave Discharge Ion Thruster”, IEPC-01-103, 2001.
- [6] Gruber, J. R., “Low-Energy Sputter Erosion of Various Materials in a T5 Ion Thruster”, IEPC-01-307, 2001.
- [7] Hyakutake, T., Nishida M., Kuninaka H. and Toki K., “DSMC-PIC Analysis of a Plume from MUSES-C Ion Engines”, T. Jpn. Soc. Aeronaut. S, Vol. 43, No. 139, 1-7, 2000.
- [8] Yamamura, Y. and Mizuno, Y., “Low-Energy Sputtering with The Monte Carlo Program ACAT,” Inst. Plasma Phys., Rept. No. IPPJ-AM-40, Nagoya University, 1985.
- [9] Muramoto, T. and Kenmotsu, T., “MD simulation of sputtering on surface index and surface roughness dependence”, Nucl. Instr. Meth. Phys. B, In press, 2007.
- [10] Rosenberg, D. and Wehner, G. K., “Sputtering Yields for Low Energy He⁺, Kr⁺, and Xe⁺ Ion Bombardment”, J. Appl. Phys., Vol. 33, No. 5, 1842-1845, 1962.
- [11] Sigmund, P., “Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets”, Phys. Rev., Vol. 184, 383-416, 1969.
- [12] Yalin, A. P., Surla, V., Farnell C., Butweiller, M. and Williams, D., “Sputtering Studies of Multi-Component Materials by Weight Loss and Cavity Ring-Down Spectroscopy”, AIAA-2006-4336, 2006.
- [13] Yamamura, Y., Itikawa, Y. and Itoh, N., “Angular Dependence of Sputtering Yields of Monatomic Solids”, Inst. Plasma Phys., Rept. No. IPPJ-AM-26, Nagoya University, 1983.
- [14] Yamamura Y. and Tawara H., “Energy Dependence of Ion-Induced Sputtering Yields from Monatomic Solids at Normal Incidence”, Nat'l. Inst. Fusion Sci., Res. Rept. No. NIFS-DATA-23, 1995.
- [15] Weijnsfeld, C. H., Hoogendoorn, A. and Koedam, M., “Sputtering of Polycrystalline Metals by Inert Gas Ions of Low Energy (100 - 1000 eV)”, Physica, Vol. 27, 763-764, 1961.
- [16] 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.