

数値計算によるホール推進機の寿命評価

Influence on the thrust performance of Hall Thrusters by sputtering erosion

○伊藤 誠治(八戸工大・院)・石山 俊彦(八戸工大)・根城 安則(放送大)・田原弘一(大阪工大)

○Seiji Ito(Hachinohe Institute of Technology Graduate School)・Toshihiko Ishiyama(Hachinohe Institute of Technology)・Yasunori Nejoh(The Open University of Japan)・Hirokazu Tahara(Osaka Institute of Technology)

Abstract (概要)

This paper describes the evaluation method of hall thruster's lifetime by numerical analysis. The existing formulas represents the sputtering characteristics for plasma particles sputter the wall. The author proposed that the existing formulas shall be added the effect of particles depositing on the wall. Based on the proposed formulas, the author compared the calculated results with the experimental data which were published from the several research institutions. The author aimed to make the accurate prediction of sputtering characteristics using the proposed formulas.

In the simulation, based on the physical sputtering formula reported by each research institute, the effect was added that the sputtered plasma particles are deposited on the inner wall surface of the hole thruster chamber or not.

The results of research will design a hall thruster that achieves both performance and durability.

記号の説明

- Q : フィッティングパラメータ (ボダンスキーの公式)
 f : フィッティングパラメータ (山村の式)
 S_n : 核阻止断面積
 Ψ : 表面結合エネルギー依存性
 E_{th} : しきい値エネルギー
 $\cos\alpha$: イオン衝突角度
 $\cos\alpha_{opt}$: 最大スパッタ時のイオン衝突角度

1. はじめに

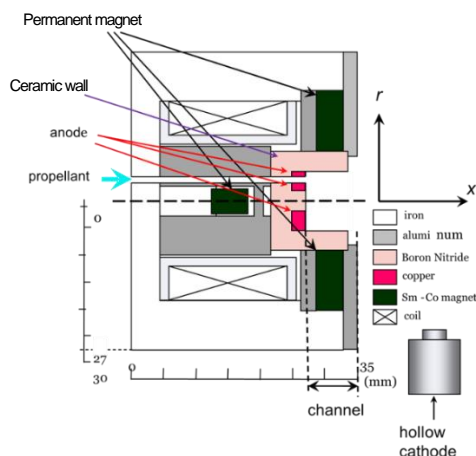


図 1.1 ホール推進機の構造図

ホール推進機は高効率、長比推力といった特徴を持つため、静止衛星や小惑星探査など宇宙開発の様々な局面で広く利用されており、将来的には惑星間航行といった長期ミッションへの投入も期待されている。

ホール推進機はイオン推進機と同じ静電加速型にカテゴライズされるが、イオン推進機と異なる点が多く、加速領域（放電室）が準中性状態（プラズマ状態）であるため、イオン推進機と比較して推力密度が高いという特徴を持つ。その為、様々なサイズのホール推進機を設計することができ、ミッションへの柔軟性が非常に高いと言える。

ホール推進機の推進剤は基本的に Xe（キセノン）や Ar（アルゴン）等の希ガスが用いられる。

ホール推進機は図 1.1 に示すように円柱状の形状をしており、加速チャンネルと呼ばれる放電室にてカソードから提供された電子が磁力線に沿って移動しプロペラントタンクから提供されたキセノンガスと電離的に衝突する事でプラズマを生成し、プラズマをアノードとカソードの電位差で排気する事で推力を得る仕組みになっている。カソードは電子を提供する機能を持つほか、排気されたプラズマの空間電荷を中和する中和器としての機能を持っており、ホール推進機を搭載した宇宙機の帯電を防ぐ役割を持つ。

しかし、ホール推進機は放電室の内壁がプラズマでスパッタリングされると推進性能の低下や深刻な場合だと動作不良を引

き起こす等の問題がある。そして、スパッタリングされた粒子が再度、内壁表面に付着し不純物として堆積することでスパッタリング収率が増加するといった現象も発生する。

本研究では放電室内壁におけるスパッタリング収率の不純物堆積による影響についてのシミュレーションを行った。

2. スパッタリングシミュレーション

本研究で使用するスパッタリングモデル式は入射イオン一個あたりの壁表面原子のスパッタリング収率を示す。

モデル式の導出にはイオン入射に対するスパッタリング収率を決定するボダンスキーの公式を使用した。[7]

$$Y(E) = QS_n(\varepsilon)\Psi(x) \quad (1)$$

式(1)の Q はフィッティングパラメータであり、数値は図 2.1 の C. Garcia-Rosales のフィッティングデータより設定される。

$$Q = 1.633Z_1^{2/3}Z_2^{2/3}(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/3} \frac{M_1^{5/6}M_2^{5/6}}{M_1+M_2} \frac{0.15+0.05M_2/M_1}{1+0.05(M_2/M_1)^{1.6}} \quad (2)$$

式(2)内の Z_1 は入射イオンの原子番号、 Z_2 はターゲット壁の原子番号、 M_1 は入射イオンの原子質量、 M_2 はターゲット壁の原子質量である。

式(1)内の S_n は核阻止断面積であり、入射イオンとターゲット原子が衝突する割合を示す。

$$S_n(\varepsilon) = \frac{0.5 \ln(1+1.2288\varepsilon)}{\varepsilon+0.1728+\sqrt{\varepsilon}+0.008\varepsilon^{0.1504}} \quad (3)$$

式(3)の ε はエネルギーパラメータとして表され[7]、式(3)内の数値は Lindhard が発表した核阻止断面積の近似値を用いた [7]。

式(1)内の Ψ は表面結合エネルギーの依存係数を示し、しきい値領域のスパッタリングの挙動を意味する。

$$\Psi(x) = \left\{1 - \left(\frac{E_{th}}{E}\right)^{2/3}\right\} \left\{1 - \left(\frac{E_{th}}{E}\right)\right\}^2 \quad (4)$$

式(4)内の E_{th} はしきい値エネルギーを表し、

$$E_{th} = \left\{7.0 \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{-0.54} + 0.15 \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{1.12}\right\} E_s \quad (5)$$

式(5)のように表される。尚、式内の E_s はターゲット壁の表面結合エネルギーである。

ボダンスキーの公式のみではイオンの入射角度の説明ができない為、イオンの入射角度によるスパッタリング収率の依存性を表す山村の式を導入した。[9]

$$Y(E, \cos\alpha) = Y(E) * (\cos\alpha)^{-f} \exp(f[1 -$$

$$(\cos\alpha)^{-1}]) \cos\alpha_{opt} \quad (6)$$

式(6)内の $Y(E)$ は入射イオンエネルギーによるスパッタリング収率を示す為、ボダンスキーの公式を代入すると、

$$Y = QS_n\Psi(x)(\cos\alpha)^{-f} \exp(f[-(\cos\alpha)^{-1}]) \cos\alpha_{opt} \quad (7)$$

式(3)に示すように本研究で使用するスパッタリングシミュレーションモデル式を導出できる。尚、式内の f は山村の式のフィッティングパラメータであり、入射するイオンとターゲット壁の原子の質量を表し以下のように表される。尚、式内の数値は図 2.2 の山村の入射エネルギーの入射イオンと壁材料原子の質量比との依存性のフィッティングデータから導入されている。

$$f = \sqrt{E_s} \left(0.4 - 1.33 \times 10^{-3} \frac{M_2}{M_1}\right) \quad (8)$$

式(7)の $\cos\alpha$ はイオン衝突角度を示し、 $\cos\alpha_{opt}$ は最大スパッタ時の衝突角度を示し、以下のように表される。

$$\alpha_{opt} = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 n^{-\frac{1}{3}} \left(2 \frac{E_0}{E_{TF}} \sqrt{\frac{E_s}{\gamma E_0}}\right)^{-1/2} \quad (10)$$

シミュレーションモデルのフィッティングは入射イオンと壁材料の原子番号(M_1, M_2)と原子質量(Z_1, Z_2)、そして壁材料の表面結合エネルギー(E_s)の 5 種類のパラメータによって決定される。

それぞれのパラメータの挙動は M_1, M_2, Z_1, Z_2 の 4 種類については入射イオンと壁材料によって決定され、イオン側の数値が高い場合は重イオンが衝突する事になるので、スパッタリング収率は増大する結果になり、逆にターゲット壁側の数値が高ければスパッタリング収率は減少する結果となる。表面結合エネルギー(E_s)は壁原子間の結合エネルギーを示し、イオン衝突時の壁原子のスパッタのしづらさの指標であり、数値が高いとスパッタリング収率は減少し、数値が低ければスパッタリング収率は減少する傾向にある。表面結合エネルギーの数値決定は報告されている材料損耗の報告データ[10,13]を元に数値調整を行って設定した。

式(7)の基本モデルは不純物堆積を考慮しないシミュレーションとして使用し、不純物堆積を考慮する場合のシミュレーションはモデル式のパラメータ内の表面結合エネルギーの数値を下げて設定を行った。表面結合エネルギーの数値を下げる理由としては壁表面は不純物が付着すると表面結合エネルギーが低下するという現象が発生するためである。表面結合エネルギーが低下する詳しいメカニズムについては考察にて記す。

以下の図 1 に、表面結合エネルギーの変更によるスパッタリング収率の変化の例を示す。図 2.3 より、表面結合エネルギーが増大すると壁原子をスパッタリングさせるためには必要なイオンの入射エネルギーが多く必要の為、結果としてスパッタリング収率が低下する。次に表面結合エネルギーが低下すると、壁原子を

スパッタリングする為の入射エネルギーは少なく済むため、結果としてスパッタリング収率は増大する。

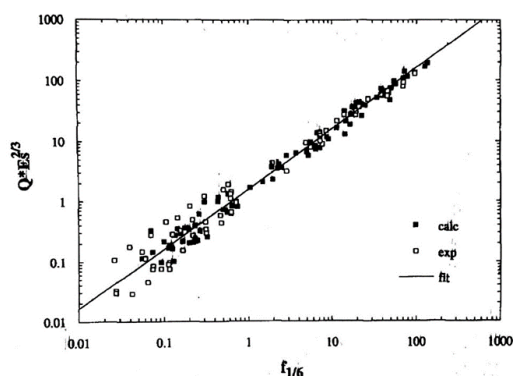


図 2.1 C. Garcia-Rosale フィッティングデータ(文献[8]より転載)

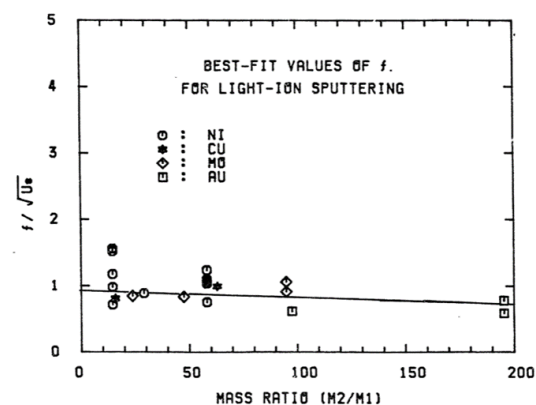


図 2.2 入射エネルギーの入射イオン・壁材料原子質量比との依存性のフィッティングデータ(文献 9 より転載)

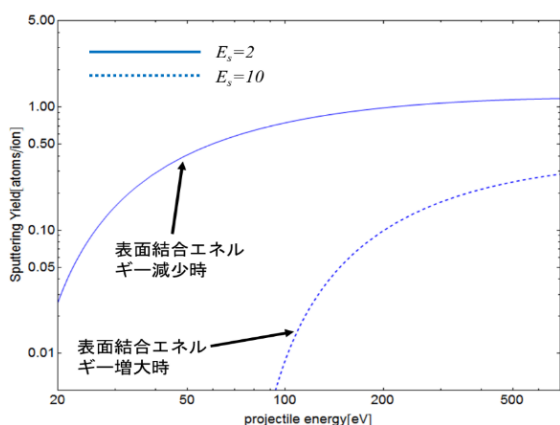


図 2.3 スパッタリング収率の表面結合エネルギー E_s との依存性

3. シミュレーション結果

導出したモデル式を元に放電室内壁におけるスパッタリングをシミュレーションした。今回のシミュレーションでは放電室内壁の大部分に使用される窒化ホウ素(BN)とアノードに使用さ

れる銅(Cu)を想定して行い、報告されている実験データとの比較を行った。

BN 材料のシミュレーションは、今回は二種類の HBR-BN と HBC-BN の報告データとの比較を行った。HBR-BN は焼結・形成時に固着剤としてホウ酸カルシウムを使用した BN 材料であり、一方で HBC-BN は製造過程において固着剤を使用しない高純度の BN 材料である。

図 3.1 と図 3.2 に BN 材料のシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果からイオン衝突エネルギー(projection energy)が増加するとスパッタリング収率は増大するが、低エネルギー領域ではスパッタリング収率は急激に低下する傾向にある。

報告されている実験データとの比較では、固着剤を使用しない HBR-BN の場合は固着剤によって不純物堆積が発生しやすい為、スパッタリング収率は増大する傾向にあり、不純物堆積を考慮した場合のシミュレーションとよく一致する結果となり、実験結果に示される傾向をよく説明できた。次に固着剤を使用しない HBC-BN の場合は不純物堆積が発生しにくい為、スパッタリング収率は低下する傾向にあり、不純物堆積を考慮しない場合のシミュレーションとよく一致する結果となり、実験結果に示される傾向をよく説明できた。

次にアノードに使用されている銅(Cu)のシミュレーション結果を図 3.3 に示す。シミュレーション結果から、イオン衝突エネルギーが増加するとスパッタリング収率も増加するという BN 材料と同じ傾向が見られた。しかし、低エネルギー領域ではスパッタリング収率は BN 材料よりも急激に低下し、更には不純物堆積を考慮した場合としない場合で差はあまり出ない結果となった。このような結果となった原因としては、Cu は BN と比較して重い元素である為、不純物堆積による影響は受けにくいと考えられる。

ホール推進機の放電室の内壁を構成する材料について、シミュレーション結果と報告された実験結果[10,13]を比較すると、不純物堆積を考慮した場合の方が実験結果をよく説明することができた。不純物が堆積することで、スパッタリング収率が影響を受けることについては、考察にて議論する。

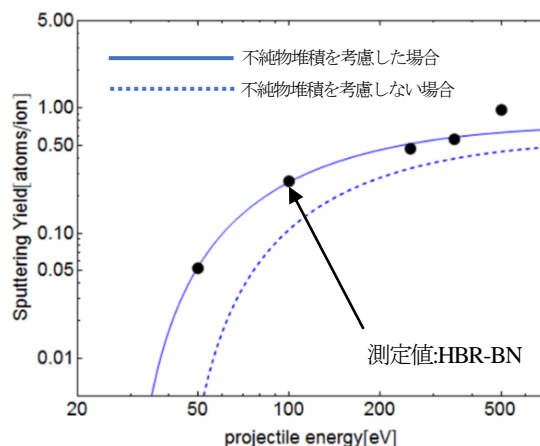


図 3.1 HBR-BN のスパッタリング率のシミュレーション結果 [10]

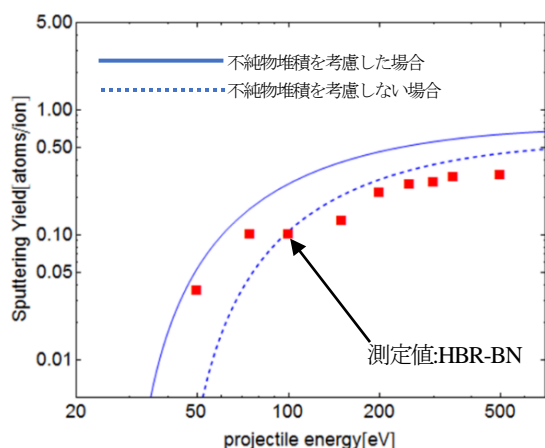


図 3.2 HBC-BN のスパッタリング率のシミュレーション結果 [10]

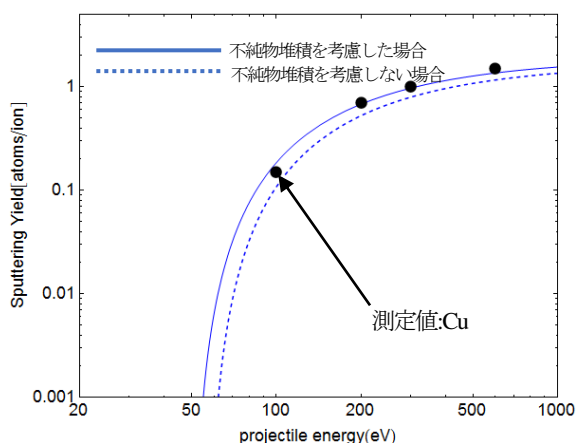


図 3.3 Cu のスパッタリング率のシミュレーション結果[13]

4. 考察

不純物堆積によるスパッタリング収率の増大メカニズムのマクロ的に示すと図 4.1 の様に表される。内壁表面からスパッタリングして飛散した原子の一部が、再度内壁に入射することで、内壁表面をスパッタリングもしくは不純物として堆積するといった現象が発生する。[14]

これにより、スパッタ原子の挙動を考慮することで、不純物堆積の増加を説明することができ、スパッタ原子の再度スパッタリングによってスパッタリング収率の増加についても説明できる。

次に、不純物堆積による壁材料のスパッタリング収率の増加についてミクロ的に示すと図 4.2 の様に表される。内壁表面は衝突連鎖によって壁材料と不純物は混成され、内壁を構成する材料の組成が変化する。[15] そして、更にその過程で、内壁の表面エネルギーが低下していく為、結果としてスパッタリング収率は増大していくものと考えられる。[16]

このような材料の混成は高温環境下にて発生しやすく、温度上昇によってスパッタ原子は材料内で拡散しやすくなり、材料の組成変化が発生しやすくなる。

ホール推進機は長時間稼働させると、結果的に放電室内は高

温になりやすく、結果として先述した内壁材料の組成変化が発生し、耐久性が低下することでスパッタリング収率が増加する。スパッタリング収率が増加すると推進性能が低下するだけではなく、深刻なケースだと動作不良が発生する可能性が大きくなる。

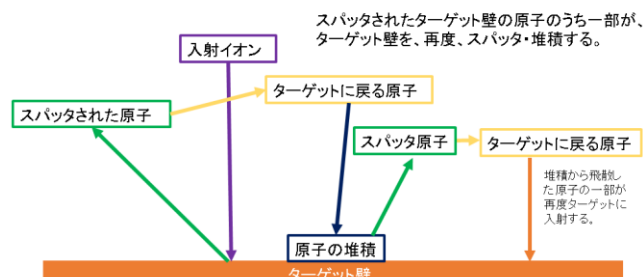


図 4.1 スパッタリングされた原子の壁への堆積と再スパッタ (マクロ的描像)

[文献 14 をもとに作成]

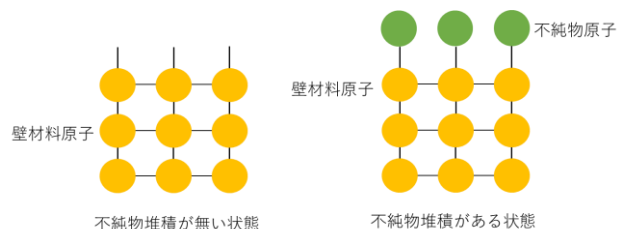


図 4.2 不純物堆積によるスパッタリング収率増大のメカニズム (ミクロ的描像)

5. まとめ

本研究では、ホール推進機のパフォーマンス向上を目的に、各研究機関で検討されてきた放電室の内壁への理論的なスパッタリング現象の評価に、放出されたプラズマ粒子の内壁表面への不純物堆積効果を付加した形で、定式化を検討した。作成したシミュレーションモデル式をもとに、各研究機関から発表された実測データと比較すること、スパッタリング特性の高精度な予測を可能にすることを目指した。

シミュレーション結果と報告されている測定値を比較した結果、以下のことが示された。

- ・イオン衝突エネルギーが増加することで、スパッタリング率も増加した。
- ・不純物堆積を考慮した場合と不純物堆積を考慮しない場合を比較すると、不純物堆積を考慮した場合の方がスパッタリング率は増大することが示された。
- ・各種の材料によって、スパッタリング率は変化することが示された。

不純物堆積を考慮した場合、スパッタリング収率が増大する現象については、不純物が内壁表面に堆積することで表面エネルギー

ギーが低下し、スパッタリングが促進されることが指摘されている。スパッタされたプラズマ粒子がホール推進機の放電室内壁表面に不純物として堆積することで、壁材料(を構成する物質(窒化ホウ素、銅など)の表面結合エネルギーが低下し、壁表面の組成が変化することで本来の耐久性が失われる。この効果によって、壁面への堆積がない場合に比べて、スパッタリング率は増大する。本研究でのシミュレーションをもとに検討したところ、この現象が再現できた。

本研究で得られた知見を活かすことで、高性能と耐久性を両立させたホールスラスタが設計、製造できるであろうこと、そして将来には、この過程で製造されたホールスラスタを搭載した深宇宙探査機が活動することが期待される。

6. 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, pp. 7-11, (2003).
2. ホールスラスタ研究会 - 九州大学 中島研究室.
<<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Hall/inspace/principle.html>>
3. 國中均, 西山 和孝, 中山 宜典, イオンエンジンによる動力航行 (宇宙工学シリーズ). コロナ社, p. 19, (2006).
4. 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, p. 21, (2003).
5. 渡邊裕樹, イオンエンジン加速電極の損耗予測技術, 第19回若手科学者によるプラズマ研究会, (2016).
6. Francesco Taccogna, Savino Longo, "Geometrical Scaling of Hall Thruster Particle Model" pp. 1119-1124, (2009)
7. J. Bohdansky, "A Universal relation for the sputtering yield of monatomic solids at normal ion incidence" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B2 pp. 587-591 (1984).
8. C. Garcia-Rosales, W. Eckstein, J. Roth, "Revised formulae for sputtering data", Journal of Nuclear Materials 218 pp. 8-17 (1994)
9. Yasumichi Yamamura, Yukikazu Itikawa, Noriaki Itoh, "Angular dependence of sputtering yields of monatomic solids" IPPJ-AM-26 pp. 1-16 (1983).
10. B. Rubin, J. L. Topper, and A. P. Yalin, "Total and Differential Sputter Yields of Boron Nitride Measured by Quartz Crystal Microbalance", IEPC-2009-042, pp. 1-18, (2009).
11. BN セラミックス (モメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社)
<<https://www.ipros.jp/product/detail/2000289830/>>
12. 國中均, 西山 和孝, 中山 宜典, イオンエンジンによる動力航行 (宇宙工学シリーズ). コロナ社, p. 70, (2006)
13. E. S. Wise, MS Liu, and T Miller, "Sputtering of cubic metal crystals by low-energy xenon-ions", Computational Materials Science, Vol. 107, pp. 102-109, (2015).
14. M. Warrier, et al, "Subroutines for some plasma surface interaction processes: physical sputtering, chemical erosion, radiation enhanced sublimation, backscattering and thermal evaporation", Computer Physics Communications, Vol. 160, pp. 46-68, (2004).
15. 大宅薫, 損耗・再堆積の計算機シミュレーション, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 77, No. 9, pp. 874-878 (2001).
16. 吉原 一紘, 新居 和嘉, "ホウ素と窒素を添加した 18-8 ステンレス鋼表面上への窒化ホウ素の析出挙動", 日本金属学会誌, Vol. 47, No. 11, pp. 941-949, (1983).
17. N.Sasaki, Y.N.Nejoh and H.Tahara, Proc. 29th Intern'I Space Tech. Symp, P.P.131. (2013).
18. H.Tahara, JIEE Jpn, Vol.129, (2009).