

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560981

研究課題名(和文)カーボン・カーボン複合材のスputタリング現象の解明とモデル化

研究課題名(英文) Investigation and Modeling of Sputtering Yield of Carbon/Carbon Composite

研究代表者

中野 正勝 (Nakano, Masakatsu)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授

研究者番号：90315169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：イオンエンジンの寿命を予測する上で重要な電極材料のC/C複合材のスputタ率を精度よく求めるために、その物理現象の解明とモデル化を行った。電子顕微鏡による観察の結果、C/C複合材の表面には直径約10 μm 長さ数100 μm のファイバが指向性なく分布していることが明らかとなったため、剣持らの14%キセノンを含んだカーボン表面に対する垂直入射の山村のスputタ率モデルを斜め入射のスputタ収量モデルに拡張した上で、ファイバを模擬した円筒面上のスputタを全方位から合算して平均化することでC/C複合材のスputタ率を求めた。C/C複合材に対するスputタ率は μ10 イオンエンジンの耐久試験結果とよい一致を示した。

研究成果の概要(英文)：The angular and energy dependence of the sputtering yield of carbon-carbon composite due to xenon ion bombardment was investigated. Instead of assuming surfaces to be flat, a simple carbon fiber distribution model was introduced to account for the carbon-carbon composite surface structure observed using a scanning electron microscope. Yamamura's semi-empirical sputtering formula, which accounted for 14% xenon adsorption, was used to calculate the sputtering yield of the carbon fiber surface. The proposed model provided fairly good estimates of the angular and energy dependence of the sputtering yield of carbon-carbon composite. Comparative analysis demonstrated that the proposed model most accurately predicted both the accelerator and decelerator grid mass changes in the μ10 PM ion engine endurance test.

研究分野：電気推進

キーワード：イオンエンジン スputタリング カーボン・カーボン複合材 キセノン

1. 研究開始当初の背景

イオンエンジンでは、イオンや中性粒子がグリッドと呼ばれる加速電極に衝突して電極のスパッタ損耗が生じるが、衝突粒子の衝突角やエネルギーを評価するための数値的な技術は確立しており、残るのは衝突粒子とグリッド間のスパッタ収量を正確に算出するモデルの構築であった。現在主要なイオンエンジンのグリッド材であるカーボン・カーボン複合材のスパッタ収量を算出するために ACAT や分子動力学 (MD) 法を用いた計算が行われたが、スパッタ収量の絶対値や角度依存性などが実験値と整合せず、実験値を直接用いたデータベースが採用されることが多かった。実験値と不整合を起す原因として、シミュレーションでは原子レベルの平坦な面を想定しているのに対して、現実のカーボン・カーボン複合材にはファイバによる凹凸等があり、それら表面構造を考慮していないからと考えられる。したがって、これまでのスパッタ収量コードの結果を、カーボン・カーボン複合材の表面構造に適用させたモデルの構築が必要であった。

また、スパッタ損耗を正確に見積もるためには、イオンビーム中に含まれる 2, 3 価イオンのスパッタの定量的な把握が必要になるが、Xe のカーボン・カーボン複合材に対する 2, 3 価イオンのスパッタ収量データは存在しない。したがって、カーボン・カーボン複合材を用いた機器の高精度な寿命判定のためにはこれら多価イオンを含んだスパッタリングの定量的なモデル化が必要であり、高強度かつ高スパッタ耐力が必要とされる航空宇宙分野において早急に取り組むべき課題であった。

2. 研究の目的

本研究では、イオンエンジンのグリッド損耗評価に実用的に用いることが可能なカーボン・カーボン複合材のスパッタ率モデルを構築することを目的とした。具体的に以下の (1) ~ (3) について取り組んだ。

(1) カーボン・カーボン複合材表面のスパッタリングの理論的・数値的なモデリング

原子レベルの表面のスパッタリング解析を行う TRIM や ACAT などのコードは完成の域に達しており、山村らによる半理論半経験式など実用に供されるモデルも多数存在する。したがって、原子レベルの表面のスパッタ収量は工学的には十分に予測可能である。そのため走査型電子顕微鏡撮影によりカーボン・カーボン複合材の表面構造を明らかにした後、ファイバ等の構造をモデル化してことが大きな課題である。

(2) 実験によるモデル開発支援

イオン源とビーム加速装置を構築して、スパッタ収量モデルの構築において必要となるデータを取得することで、効率的な表面モデルの構築と妥当性評価の支援を行う。

(3) 多価イオンの影響評価とスパッタ収量モ

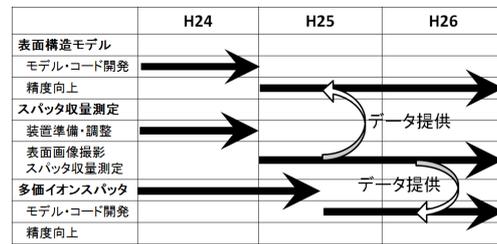


図 1 研究の年次遂行の様子

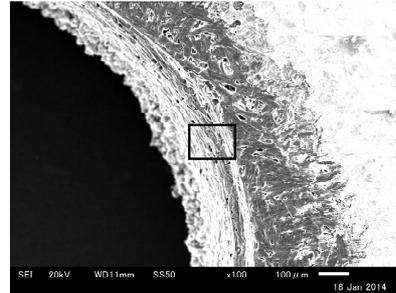


図 2 電子顕微鏡によるグリッド表面像

モデルの構築

多価イオンの有するポテンシャルエネルギーがスパッタ収量に与える影響を考慮した上で、スパッタ収量モデルを構築する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、図 1 のガントチャートに記すように

- (1) 表面構造モデルの構築
- (2) 表面画像・スパッタ収量取得
- (3) 多価イオンスパッタモデル構築

を行った。表面構造モデル構築については平成 24 年度に集中して行い、実験環境が整備される平成 25 年度以降にデータを取得し、モデル・コードの精度向上を行った。実験では、走査型電子顕微鏡を活用して、カーボン・カーボン複合材の表面画像データを取得するとともに、モデル化において用いたカーボンのスパッタ収量モデルの妥当性の評価を行った。数値解析では JIEDI ツールを用いてイオンエンジンの実時間耐久試験の結果との比較も行った。

4. 研究成果

(1) 平成 24 年度

カーボン・カーボン複合材表面の構造を明らかにするために、イオンエンジンの耐久試験に用いられたカーボン・カーボン複合材を入手し、走査型電子顕微鏡による観察を行った。その結果が図 2 である。カーボン・カーボン複合材の表面には直径約 10 マイクロメートルで長さが数 100 マイクロメートルのファイバが指向性なく分布しており、スパッタ損耗の後も塊として脱落することなく一様に損耗を受けている。すなわち、ファイバのスパッタリング損耗は、局所平面に対して働いていることが明らかとなった。

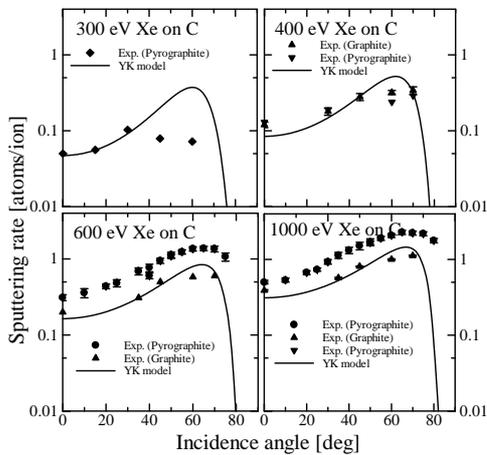


図3 キセノンのカーボンの平面に対するスパッタ率の角度依存性の比較

そこで、カーボン表面に対するスパッタ率モデルを構築した上で、ファイバを模擬した円筒面上のスパッタを全方位から合算して平均化することでカーボン・カーボン複合材のスパッタ率を求めることとした。

カーボンのキセノンに対するスパッタ収量に関しては、理論や半経験式から予測される値と実験値との間でずれがあることがこれまでに知られている。具体的には、実験的に得られるキセノンのスパッタ収量は半理論的に得られる値よりも大きい。この原因としては、カーボン表面に滞在する14%のキセノンの影響であることが剣持らにより示されており、その補正式を用いて斜め入射のYamamuraの公式を構築し直した。その結果を図3に示す。得られたカーボンに対するスパッタ収量モデルは、カーボンに対して取得されたこれまでの実験値を良好に再現することが確認された。

平成24年度はこの走査型電子顕微鏡による表面観察や表面スパッタ収量モデルの構築と同時に、実験的にスパッタ収量を評価するためにマイクロ波イオン源の実験装置の構築を行った。

(2) 平成25, 26年度

平成24年度に構築したキセノンのカーボン表面のスパッタ収量の素過程モデルにより、カーボン表面の原子レベルのスパッタ収量を予測することが可能になったため、走査型電子顕微鏡による観察結果を反映させることで、カーボン・カーボン複合材の表面構造を入れたモデルに拡張を行った。

カーボン・カーボン複合材の性質を反映するためには、ファイバを模擬した円筒状の表面構造を入れる必要がある。モデル化において、ファイバの縦横比などの特定の数値を必要とするとスパッタ収量モデルの汎用性がなくなるために、極力問題を単純化し、平面状に横たわる無限長のカーボンファイバに対してスパッタが生じるというモデル化を行った。その結果を図4に示す。カーボン・カーボン複合材に対してこれまでに取得さ

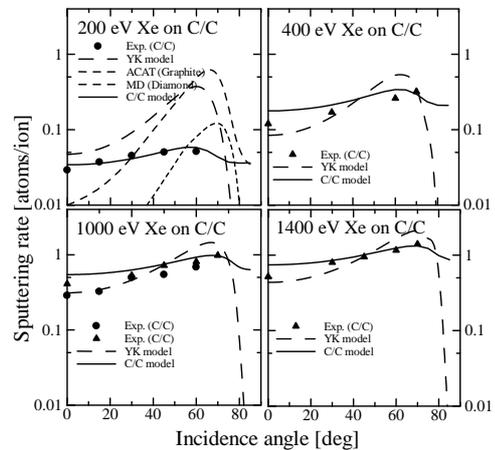


図4 カーボン・カーボン複合材のキセノンによるスパッタの角度依存性

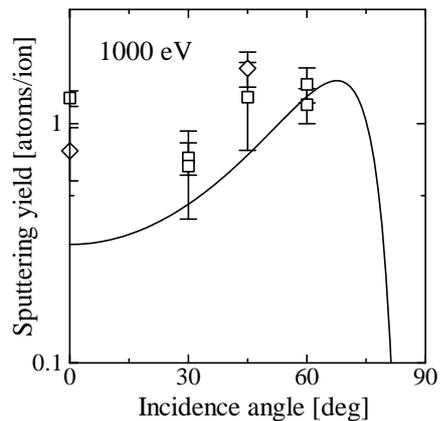


図5 キセノンのカーボンの平面に対するスパッタ率の角度依存性の比較

れた実験結果と非常に良好な一致を示している。

実験面では、平成24年度に整備したイオン源を用いてスパッタ収量実験を行った。カーボン・カーボン複合材に対するスパッタ収量モデルは、素過程モデルの精度が結果に重要な影響を与えられと考えられる。そのため、素過程モデルの精度、特に角度依存性について実験的に検証を行うことを目的として、アルゴンを用いた予備実験ならびにキセノンを用いた実験を行った(図5)。この実験により、キセノンのカーボンに対する素過程モデルの衝突角度依存性の妥当性が検証できたことから、残るカーボン・カーボン複合材のスパッタ収量モデルにおいて未決定であったパラメータの推定を行うこととした。具体的には、カーボンと母材の割合であり、カーボン・カーボン複合材の密度と純粋なカーボンとの密度の比を用いて、カーボン・カーボン複合材の空隙率を評価することが簡便でかつ高精度な決定法であることが判明した。

以上により、カーボン・カーボン複合材のスパッタ収量を効果的に評価するモデルを得た。また、多価イオンの影響については、

2, 3 価イオンは電場により 2, 3 倍のエネルギーを得るという単純なモデル化でスパッタ収量の実験結果と良好に合致することから、本研究で構築したスパッタ収量モデルをそのまま用いることで解決する。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) Nakano, M., Hosoda, S. and Nishiyama, N., “Sputtering Yield of Carbon-Carbon Composite due to Xenon Ion Bombardment in Ion Engines,” Trans of JSASS Vol. 58, No. 4, July 2015, Accepted for Publication.

(2) Nakano, M., Koizumi, H, Inagaki, T. and Komuasaki, K., “Numerical Study of μ 1 Ion Engine Optics Using JIEDI Tool,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol.12 (2014), pp.27-32.

(3) 中野正勝, “ μ 10 イオンエンジンのグリッドを活用した高比推力 2 段加速イオンエンジンのイオン加速部性能評価,” プラズマ応用科学 Vol.21 (2013), pp.91-96.

[学会発表] (計 1 件)

(1) 中野正勝, イオンエンジングリッド用 C/C 複合材スパッタ率モデル, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014 年 11 月 14 日.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

中野 正勝 (NAKANO, Masakatsu)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授

研究者番号 : 90315169