

修士学位論文要約（令和3年3月）

スパッタリングによる推力発生の評価と電気推進応用

三浦 英将

指導教員：安藤 晃， 研究指導教員：高橋 和貴

Direct measurement of a thrust induced by sputtered materials and application to electric propulsion

Hidemasa MIURA

Supervisor: Akira ANDO, Research Advisor: Kazunori Takahashi

A thrust is equal in magnitude and opposite in direction to the momentum flux exhausted from the system. When accelerating positively charged ions to increase the momentum flux, electrons have to be exhausted to maintain the charge neutrality and to avoid the charge up of the satellite. Here a new concept of the compact electric propulsion device using metallic propellant is proposed, where the thrust is generated by mass ejection due to sputtering of a metallic material. When a magnetron sputtering device and DC power supply are adopted, A maximum thrust of up to 12 mN/kW with Cu target. It realizes neutralizer free electric propulsion device. This is one of ways to miniaturize an electric propulsion device.

1. 概要

近年宇宙開発に対する関心が高まってきており、その中でも10 cm立方程度の大きさのCubeSatと呼ばれる小型衛星が注目を集めている。このような小型衛星のミッション終了後には軌道遷移によるスペースデブリ化への回避が必要不可欠である。しかしながら、従来の方式では気体燃料や中和器を用いるために同時搭載できるほどの小型化には限界があると考えられる。

本研究では、スパッタリング現象及び液体金属に着目した。スパッタリング発生時に放出される粒子は中性であり中和器を必要とせず、液体金属をプラズマ生成の燃料とすることによって気体燃料及びそれらの容器分の小型化・軽量化をする。本研究ではスパッタリングによって発生する推力の評価及びセシウムプラズマの生成を行った。

2. スパッタリングによる推力発生の評価

スパッタリング現象とは、プラズマ中のイオンが電界等によって加速されることにより金属ターゲットに衝突した際に、入射したイオンと金属ターゲット中の粒子との間で運動量交換が行われることで、金属クラスターが運動エネルギーを持った粒子として叩き出されることを指す。スパッタリングによって放出される粒子は中性粒子であり、この粒子群によって推力が発生するならば、電気推進機の電気的中性を維持するための装置である中和器を必要としない方式の推進機を開発できると考えられる。

作成した推進機であるマグネトロンスパッタ装置を図1に示す。今回採用したマグネトロンスパッタ方式は、比較的スパッタ量が多い特徴を有している。本装置で

はアルゴンガスがターゲット表面から噴出する機構となっており、電極間に直流電源で電圧を印加することでプラズマの生成を行う。プラズマ源を圧力 1.0×10^{-3} Pa程度の真空容器内にスラストバランスとよばれる振り子状の構造を用いて吊るし推力計測を行った[1]。実験ではスパッタ率の異なる三種類の材質である銅・アルミニウム・炭素をターゲットとして結果を比較した。ここでスパッタ率とは、入射イオンひとつあたりの放出ターゲット粒子数である。図2に各ターゲットにおける推力の投入電力依存性を示す。銅ターゲットの場合で8~12 mN/kW程度の推力が観測された。図から推力の大きさがスパッタ率に依存していることが考えられる。また静電ラングミュアプローブを用いてプラズマパラメータ(電子温度, アルゴンイオン密度)の計測を行ったところ、それらにターゲット材質による値の違いは殆ど見られなかった。以上のことから、推力がスパッタ率にのみ依存しており、スパッタ粒子の放出によって推力が発生していると考えられる。

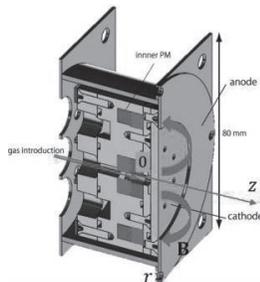


図1：プラズマ源

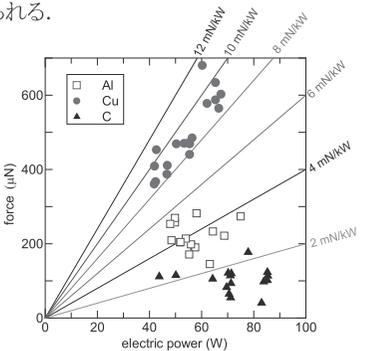


図2：各ターゲットでの推力計測

3. DCMS と HiPIMS での比較

マグネトロンスパッタ方式では、直流電源を用いる DCMS とパルス電源を用いる HiPIMS の2種類が主流となっている。特に HiPIMS においては高エネルギー粒子の放出が生じるために、高推力の発生が期待できる。各方式において発生する推力及び単位時間に放出される粒子数を調べるために推力計測と膜厚計測を行った。図3に各電源を使用した際の推力及び膜厚の比較を示す。図から推力、膜厚ともに DCMS が大きくなっていることがわかる。HiPIMS の場合に推力が低いのは、セルフスパッタリングと呼ばれる現象によると考えられる[2]。ここで推力 $F = m\dot{m}u$ 、膜厚 $T \propto nu$ より $F/T \propto mu$ が算出でき、 F/T が運動量の次元を持つことがわかる。運動量の値は HiPIMS の場合に大きくなっている。これは中性のターゲット粒子より大きなエネルギーを持つターゲットイオンが放出されることに起因するものである。HiPIMS 動作中には両極性拡散によって高エネルギーイオンがシステムから排気される[3]。

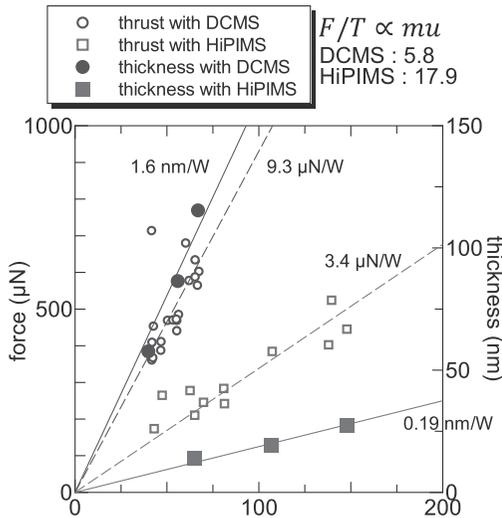


図3: DCMS, HiPIMS での推力計測及び膜厚計測

4. セシウムプラズマの生成

常温で液体であるセシウムを燃料としてプラズマ生成を行った。プラズマ源後方から加熱したセシウム蒸気を導入可能な構造となっている。またプラズマ源およびセシウムタンクがヒーターによって加熱されている。真空容器内部の圧力は 1.0×10^{-4} Pa 程度であり、その圧力下でのセシウムの沸点は 30°C である[4]。このときのセシウムプラズマの様子を図5に示す。セシウムプラズマの生成は確認されたものの、電流値は小さく、アルゴン動作時と比較するとスパッタ量及び発生する推力は非常に小さいと考えられる。

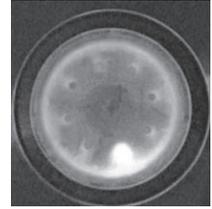
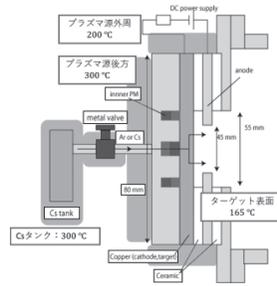


図4: セシウムプラズマ源 図5: セシウムプラズマ

5. まとめ

本研究では小型電気推進機の開発を目的として、スパッタリングでの推力発生の評価とセシウムプラズマの生成を行った。スパッタリング発生時には最大 $8\sim 12$ mN/kW の推力が確認された。また DCMS と HiPIMS での動作特性比較を行ったところ、DCMS は推進剤質量流量 \dot{m} が、HiPIMS は排気速度 u が大きいことがわかった。またセシウムプラズマの生成を行ったが電流値が低く、今後は電流値の向上による性能改善が必要と言える。

文献

[1] K. takahashi, et. al. *Appl. Phys. Lett.* **98**,141503, (2011)
 [2] André Anders, et. al, *Journal of Applied Physics* . **102**, 113303,(2007)
 [3] Ludovic de Poucques, et al, *Plasma Sources Sci. Technol.* **15**, 661,(2006)
 [4] Daniel A. Steck, <http://steck.us/alkalidata> (2019)