

水晶振動子マイクロバランスを用いた微分スパッタ率測定の予備実験

Preliminary Experiments on Differential Sputter Yield Measurements Using Quartz Crystal Microbalance

飯野 遥暉¹⁾, 中野 正勝²⁾

Haruki Iino¹⁾ and Masakatsu Nakano²⁾

Abstract: In this study, we report on a preliminary experiment of quartz crystal microbalance (QCM) measurement, which is planned to be conducted to evaluate sputtering on the inner wall of the vacuum chamber caused by the impact of energetic ions from ion engines. From the preliminary experiments, we determined the preparation time required to start the experiment and confirmed that the flux to the sputtering target and differential sputtering yield can be measured using our device. We also calculated the rotation angle of the sputtering target and QCM location required to measure the differential sputtering yield in all possible directions.

Keywords : Quartz Crystal Microbalance, Differential Sputtering Yield, Sputtering, Experimental Environment

1. 緒言

宇宙機器の性能確認のために、人工衛星などは打ち上げ前に様々な地上試験が行われる。これには、真空環境における人工衛星の熱収支の妥当性を確認するための熱真空試験や、ロケットの打ち上げ時の環境に耐えられるかどうかを判断する振動試験や音響試験が含まれる。これらの試験は専用の施設で行われ、十分な時間をかけて実施される。

近年ミッション数が増加している小型衛星に対しても性能確認のための地上試験が必要である。衛星が小型になったことから、熱真空試験なども従来よりも小型の真空装置を用いて実施しやすくなった。これは人工衛星が小型化したことによる大きな利点である。

近年の小型人工衛星には、位置や姿勢の変更のための小型推進機が搭載されるようになっており、プラズマを発生させて宇宙空間での移動に用いるタイプの電気推進機が用いられる場合もある[1-3]。この電気推進機の衛星搭載において問題となるのが、電気推進機と人工衛星本体の電磁干渉である。人工衛星が小型であることを活かすことで、電気推進機を衛星に搭載した状態で作動させる実作動試験の実施が可能であるが、電気推進機から放出される高エネルギーのイオンビームが真空容器内壁表面の材料をスパッタ損耗し、地上実験装置に影響を与えることが懸念されている。

この懸念を解消するためには、熱真空装置内部を再現した真空環境下において実際にイオンビームを作りだし、どの程度真空容器の内壁のスパッタ損耗が生じるのかを評価し、量的に問題がないことを示すことである。本稿では、小型イオン源からのイオンビームを熱真空装置の内壁を模擬したターゲット板に照射し、スパッタされた材料がどの方向にどれだけ飛散するのか（微分スパッタ率）を計測す

ることを目標とし、そのために必要な技術項目について予備実験を実施したのでその報告を行う。

予備実験においては、ターゲット板へのイオン入射量の把握、ターゲット板の質量減少の測定可能性や各方向にスパッタされた物質の飛散量の測定可能性について実験的に検討する。将来、実験で用いる材料はポリウレタン系の樹脂を予定しており、そのスパッタ率が高いことから、金属の中でもスパッタ率の大きい銅を用いて実験を行った。

2. 実験装置

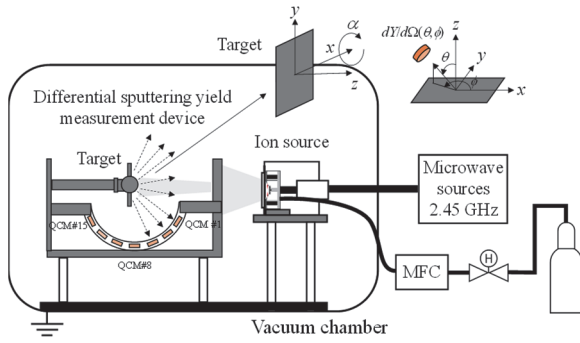
2.1 実験装置の概要

実験装置の概略図を図 1(a)に示す。イオンエンジンを模擬したイオン源、熱真空容器内壁を模擬したターゲット板、ターゲット板からのスパッタ量を測定する微分スパッタ率測定装置一式は、一辺が約 0.8 m の角型真空容器の内部に設置されている。真空容器の内部は、ターボ分子ポンプとロータリーポンプによって減圧されており、イオン源作動時（図 1(b)）でも 10^{-2} Pa 台の圧力を維持することができる。

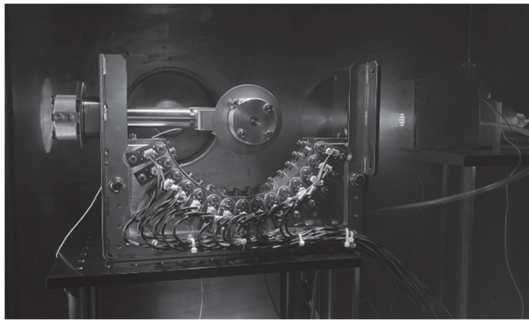
実験時には、真空容器の内部に設置されたイオン源からターゲット板に向けてイオンビームを照射し、ターゲット板からスパッタされた原子や分子をターゲット下部に配置した微分スパッタ率測定装置上のセンサで検出する仕組みとなっている。このセンサは円周上に配置されており、ターゲット板とセンサまでの距離は 10 cm である。ターゲット板へのイオンの入射角度は、ターゲット板を x 軸周りに回転させることで変更が可能である。なお、このターゲット板は軸上に設置されたハンドルによって z 軸周りに回転可能な仕様となっており（図 2）、真空容器のフランジに設置し

1)東京都立産業技術高等専門学校専攻科 創造工学専攻 航空宇宙工学コース

2)東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科 航空宇宙工学コース



(a) 実験装置の概要



(b) イオン源作動中の様子

図1 (a) 実験装置の概要と (b) イオン源作動中の様子

た真空マニピュレータによって真空容器を大気開放することなく動かすことができる。これによってターゲット板に対してイオンビームが斜めに入射する場合でも、全方位の微分スパッタ率を計測することができる。

2.2 微分スパッタ率測定装置

微分スパッタ率測定装置には、これまでに多くの測定実績[4-7]がある水晶振動子マイクロバランス (Quartz Crystal Microbalance : QCM) が 15 個配置されており、QCM の共振振動数を真空容器外部に設置した周波数カウンタ (MCP 社製 FC1024) にて測定する。

QCM は水晶の薄切片の両側に金属薄膜を成膜した構造をしたもので、それぞれの金属皮膜に交流電場を印加すると、ある一定の振動数 (共振振動数) にて振動する性質を利用したセンサである。この金属薄膜に物質が付着・剥離すると水晶の質量が変化するために共振振動数が変化する。共振振動数の変化 Δf とセンサ表面に付着・剥離した物質の質量変化 Δm は次の Sauerbrey の式を用いて算出することが可能である[8]。

$$\Delta m = -\frac{A\sqrt{\mu_q\rho_q}}{(2\pi f_0^2)} \cdot \Delta f = -C \cdot \Delta f \quad (1)$$

ここで、 f_0 は共振振動数、 A は水晶薄切片上の金属薄膜の面積、 μ_q は水晶の弾性率、 ρ_q は水晶の密度、 n は倍音数である。本研究で使用した QCM は多摩デバイス製の共振振動数が 5 MHz のもので、式(1)の C の値は物性値や寸法データを代入すると 3.47 ng/Hz となる。共振振動数変化

が正の時、質量変化は負であることから金属薄膜表面か

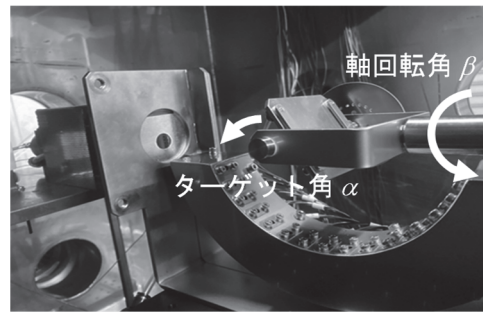


図2 ターゲット板と回転部の位置関係。

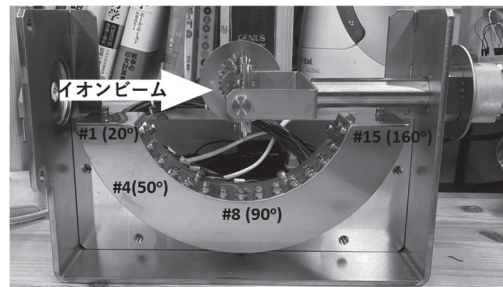


図3 QCM とイオンビームの位置関係 (QCM は 10°刻みで 15 個配置されている)

ら物質が離脱していることとなり、共振振動数変化が負の場合には、センサ表面に物質が吸着したことになる。

図3に示すように、微分スパッタ率測定装置にはこの QCM がイオンビーム照射方向に対して 20°から 160°の範囲に 10°刻みで 15 個取り付けられている。本稿では、20°に設置されたものを QCM #1 とし、160°に設置されたものが QCM #15 となるように順に番号を振る。なお、イオンビームの入射方向に対して 20°未満となる位置は、照射イオンビームと向きが重なることからデータが取得できない領域となる。また、軸周りにターゲット板を回転させる場合にもターゲット板を固定する取手のためにデータ取得ができない領域がある。

QCM 測定で得られた付着量は QCM の金属薄膜の面積あたりの値であることから、これを立体角 Ω あたりに換算して微分スパッタ率 $dY/d\Omega$ を求める。

2.3 イオン源

イオン源としては、イオンエンジンの代替推進剤探索用に研究室で開発した小型イオンエンジンを用いた。研究室での自作であることから必要な箇所をその都度改修できる。このイオンエンジンはマイクロ波放電によってプラズマを生成する。推進剤としては、通常のイオンエンジンに用いられるキセノンやアルゴンをはじめ、近年キセノンの代替推進剤として注目される水や二酸化炭素も用いることができる。今回の実験では推進剤として二酸化炭素を用いた。

このイオン源にはスクリーン電極と加速電極の2枚の電極が取り付けられており、19 個の引き出し孔が設けられてい

表 1. 実験条件

項目	Case 1	Case 2
ターゲット材料	銅	銅
推進剤	CO ₂	CO ₂
スクリーン電圧, V	1500	1500
スクリーン電流, mA	7.5	7.5
照射時間, hour	0.5	1.0

る。スクリーン電極には最大で 2 kV の電位を印加可能であり、典型的なイオンエンジンのスクリーン電圧は 1.5 kV 程度であることから、実験におけるスクリーン電圧の値は 1.5 kV とした。加速グリッドの電位は中和電子逆流の生じない -150 V とした。

イオン源から引き出される電流値（スクリーン電流）の値は 5–10 mA 程度であるが、グリッド孔から発散して放出されるためにターゲット板にまで到達するのはその一部である。したがって、スパッタ率等の算出のためには、ターゲット板に到達するイオンの流束を評価する必要がある。

3. 実験

3.1 ノイズ把握実験

QCM は温度、振動、コンタミネーションによるノイズ変動を受ける。実験は温度管理された実験室で行われ、振動源も特になくことから、本実験系において問題となるのは、真空容器の大気開放時に QCM 表面に付着する水分である。

実験時には真空容器内部は真空状態になることから QCM 表面から徐々に水分が離脱する。ただし、それには時間を要するために、水分離脱による QCM の出力変化や離脱に要する時間を事前に把握する必要がある。

具体的には、大気に 1 日程度暴露した実験装置を真空容器に入れて真空引きし、QCM の出力が経過時間に対してどのように変化するかを計測する。なお、真空引きを開始してから約 20 分で真空度が 10⁻² Pa になり、それ以降は真空度に大きな変化は無い。

3.2 ターゲット板へのイオン入射量測定

通常イオン源から噴射されたイオンは広がりを持つために、全てのイオンがターゲット板に衝突することはない。ターゲット板以外へのイオンの衝突をさけるために、微分スパッタ率測定装置のイオン入射側にオリフィスを取り付け、入射するイオンを制限している。すなわち、イオン源のスクリーン電流値とターゲット板に流れる電流値が一致することはない。また、スクリーン電圧等の作動パラメータを変えるとイオンビームの発散角は変化するので、作動パラメータ設定毎にターゲット板へのイオンの入射量を測定する必要がある。

測定の方法としては、ターゲット板とグラウンドの間にシャント抵抗を入れてシャント抵抗の電圧測定を行うことで、ターゲット板に流れるイオン電流を計測する。なお、ターゲット板とその固定台がどちらも金属であることから、ターゲット板の下にテフロンシートを置き、ターゲット板の固定に絶縁樹脂製のネジを用いることで絶縁状態を確保

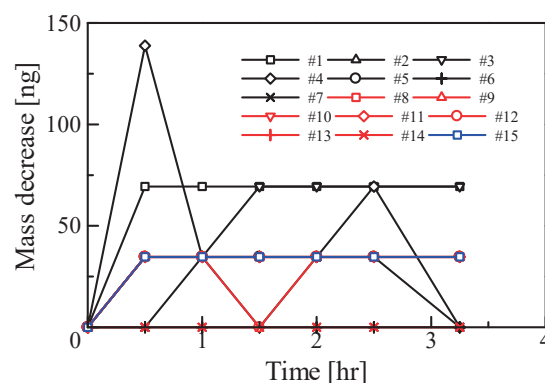


図 4 真空暴露下における QCM 金属薄膜の質量変化

した。実験では、スクリーン電圧を 1500 V に設定し、スクリーン電流が 7.5 mA となるように制御した。

3.3 イオンビーム照射と堆積質量の関係

本実験系で QCM を用いた微分スパッタ率測定が可能かどうか試験的に計測を実施した。図 2 に示すようにターゲット板をイオンビームに対して 45° に固定した状態でイオンビーム噴射を行い、それぞれの QCM における出力変化を計測する。イオン源の作動パラメータを表 1 に示す。3.2 節の実験と同様にイオン源のスクリーン電圧は 1500 V とし、実験時のスクリーン電流は 7.5 mA とした。

ターゲット材としては、スパッタ率が高く、詳細な物性が分かっている銅を用いた。スパッタ率の高さでは銀も候補であるが、高額であるので銅を選定している。今回はイオンビームの照射時間のみを変えてそれ以外のパラメータは同じにすることでイオンビームの照射時間と QCM への堆積質量の関係性を調べた。

イオンビーム照射によるスパッタリングでは、ターゲット板の質量が照射時間とともに減少することになる。この質量減少量 Δm とターゲット板への入射電流 J から、ターゲット材の分子量を M 、 N_A をアボガドロ数、 e を電荷素量として、全スパッタ率 $Y = (N_A \Delta m / M) / (J / e)$ を算出することができる。また、各 QCM から得られた質量変化の結果をまとめることで微分スパッタ率 $dY/d\Omega$ の相対分布を求めることができる。相対分布であるのは、スパッタされて QCM に到達する物質の全てが QCM の金属薄膜に堆積するとは限らないからである。そのため、微分スパッタ率の絶対値を求める場合には、微分スパッタ率を全立体角で積分したものが全スパッタ率となることを利用して、スパッタ率の値を用いて算出する。

4. 結果および考察

4.1 ノイズ把握実験

図 4 は真空引き開始からの経過時間に対する QCM の出力をプロットしたものである。作動開始時刻を基準として QCM の共鳴振動数が時間とともにどれだけ変化したのかを記録し、QCM の質量減少を正としてグラフ化した。

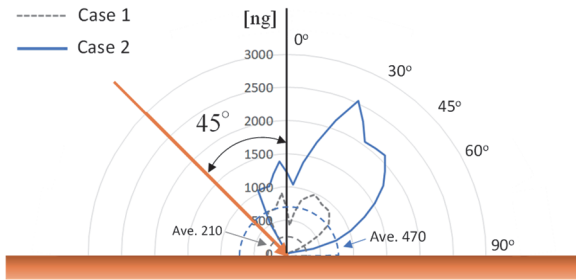


図5 ターゲット板へのイオンビーム45°入射における銅原子の飛散方向と飛散量の関係。(入射イオンと同一平面(yz平面上)に配置したQCMで計測された質量増加を示す。)

図4から、QCMの質量変化は作動開始時を基準にすると最大でQCM #4で140 ngの減少となり、これは後に示す30分から1時間のイオン照射実験で得られるQCMの質量変化の数割に達する値である。したがって、作動開始時のQCMの共鳴振動数を基準として、共鳴振動数の変化を計算することは予期しない誤差を招くこととなる。一方、作動開始後2時間以降では、QCMの変化がなくなっていることから、イオンビーム照射開始に先立って2時間以上の装置の真空暴露を行えば上述の誤差を防ぐことが可能と判断できる。

なお、QCMの質量変化には増減するもの(#4, #7, #12)や変化がないもの(#6, #14)があるが、全てのQCMにおいて実験開始からの共振振動数の変化量は正であり、これはセンサ表面に付着した物質が離脱して質量が減ったことを示している。

4.2 ターゲット板へのイオン入射量測定

表1の作動条件でターゲット板にイオンビームを照射し、シャント抵抗(10 kΩ)の両端の電圧値を計測したところ電圧は6.825 Vであった。したがって、ターゲットに流れた電流は 0.68 ± 0.3 mAである。なお、エネルギーの高いイオンがターゲット板に衝突すると二次電子放出が起きることから、計測された電流値から二次電子電流分を減じたものが入射した正味のイオン電流になる。文献[9]よりイオンの分子量が同程度のアルゴンの銅に対する1.5 keV入射における二次電子放出係数が0.82であることから、イオンビーム電流は $(0.68 \pm 0.3)/1.82 = 0.37 \pm 0.2$ mAと概算できる。

スクリーン電流に対するイオンビームの割合で考えると、イオンビームが流れているときのイオン源のスクリーン電流が7.5 mAであったことから4.9%のイオンビーム電流がターゲット板に当たっていることとなる。なお、イオンの一部がターゲット板に衝突するまでに電荷交換衝突や弾性衝突を起こすことから、中性粒子もターゲットに衝突する。したがって、必ずしもターゲット板へのイオン入射電流がターゲット板に衝突した粒子の流束を表すわけではない。詳細な流束は、真空容器の圧力やイオン源とターゲット板との距離が分かっていることから、推進剤の物性値を用いることで計算により評価可能である。ただし、今回の予備

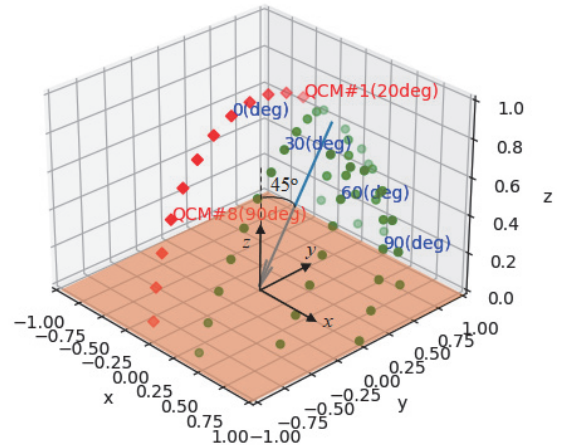


図6 ターゲット板45°におけるQCMの位置関係。(◇のプロットは軸回転が無い場合($\beta=0^\circ$)のQCMの方向。ターゲットを30°, 60°, 90°に回転させたときのQCM方向を○で示す。)

実験で使用した二酸化炭素の電荷交換衝突断面積や弾性散乱衝突断面積のデータは必ずしも十分に整備されていないことから、本論文では値の詳細な評価は実施しないこととした。

4.3 イオンビーム照射時間と堆積質量の関係

図5は、ターゲット板に対して45°の角度でイオンビームを照射した際に各QCMで計測された共振振動数の変化をもとにして、スパッタされた物質の飛散方向とQCMへの付着量が分かるように示したものである。ターゲット材の表面を下側として図示した。中心からの距離がQCMに付着した質量を示しており、質量の単位はngである。

図5に示される通り、QCMへの堆積質量の分布は入射イオンがターゲット材表面に対して鏡面反射する方向に広がりを持った分布となる。これはイオンのエネルギーがターゲット層内部の衝突カスケードを十分に発達させるほどに強くないために、表面の浅い原子がイオンの進行方向に飛び出したからだと説明される。なお、全方向成分を合算して平均化したものはCase 1で300 ng、Case 2で760 ngであった。物質の堆積や熱入力等によってQCMの出力に予測できないノイズが入る懸念があったが、図5からイオンビームの照射時間が2倍になったときに、堆積量はおよそ2.5(=760/300)倍となっており、照射時間1 h程度では照射時間に比例した堆積量が期待できる。

山村らのスパッタ率モデル[10, 11]を用いると、二酸化炭素と分子量が同程度のアルゴンの銅に対するスパッタ率は、入射角45°、入射エネルギー1.5 keVで53であり、今回イオンの入射量が0.37 mAであったことから、10 cm離れた直径5 mmのQCMの電極表面には平均して980 ng/hourの銅原子がイオンのスパッタにより衝突することになる。これに加えて、電荷交換衝突により中性化したイオンがターゲット

表 2. 天頂角 θ , 方位角 ϕ 方向の微分スパッタ率を計測する際に必要なターゲット板の回転角 β と QCM 番号. (a) イオンビーム入射角 $\alpha = 30^\circ$, (b) イオンビーム入射角 $\alpha = 45^\circ$, (c) イオンビーム入射角 $\alpha = 60^\circ$ について示す.

(a) イオンビーム入射角 $\alpha = 30^\circ$ の場合

ϕ (deg) θ (deg)		-90	-60	-45	-30	0	30	45	60	90
0	QCM #	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	β (deg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	QCM #	5	5	4	4	3	2	1	1	1
	β (deg)	0	15	30	30	45	60	75	75	120
45	QCM #	6	6	6	5	4	3	2	1	1
	β (deg)	0	15	30	45	60	90	105	120	180
60	QCM #	8	8	7	7	5	4	3	3	2
	β (deg)	0	30	45	45	75	105	120	135	180
90	QCM #	11	11	10	9	8	7	6	5	5
	β (deg)	0	30	45	60	90	120	135	150	180

(b) イオンビーム入射角 $\alpha = 45^\circ$ の場合

ϕ (deg) θ (deg)		-90	-60	-45	-30	0	30	45	60	90
0	QCM #	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	β (deg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	QCM #	6	6	6	5	4	3	2	1	1
	β (deg)	0	15	15	30	45	45	45	45	0
45	QCM #	8	8	7	7	5	3	2	1	1
	β (deg)	0	15	30	45	60	75	75	75	75
60	QCM #	9	9	8	8	6	4	3	2	1
	β (deg)	0	30	45	45	75	90	90	105	180
90	QCM #	12	12	11	10	8	6	5	4	3
	β (deg)	0	45	60	75	90	105	120	135	180

(c) イオンビーム入射角 $\alpha = 60^\circ$ の場合

ϕ (deg) θ (deg)		-90	-60	-45	-30	0	30	45	60	90
0	QCM #	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	β (deg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	QCM #	8	8	7	7	5	4	3	3	2
	β (deg)	0	15	15	30	30	30	30	30	0
45	QCM #	9	9	8	8	6	4	3	2	1
	β (deg)	0	15	30	45	45	60	60	45	0
60	QCM #	11	10	10	9	7	4	3	2	1
	β (deg)	0	30	45	45	60	75	75	75	75
90	QCM #	14	13	12	11	8	5	4	3	2
	β (deg)	0	45	60	75	90	105	120	135	180

板をスパッタするために QCM への到達量はこの値よりも多くなる. QCM の共振振動数の変化は, それら QCM に衝突した銅原子の何割かが付着した結果であることを考えると,

これは図 4 の実験結果の 300 ng/0.5 h, 760 ng/1 h とオーダー的によく一致している. なお, このときターゲット材の質量はイオンの衝突により 4.6 mg/hour の割合で減少すると予

測されるが、これは繰り返し性 1 mg の電子天秤を用いて 1 時間程度のイオンビームの照射を行った際に 20% 程度の誤差で質量変化を計測可能な値である。実際に今回の実験に近い条件（スクリーン電圧 1.5 kV, スクリーン電流 5.9 mA, ターゲット板角度 45°）で計測された銅製のターゲット板の質量減少は 9 ± 1 mg であり、イオンのみの衝突を仮定して概算した 3.6 mg と同じオーダーであった。

次に yz 平面の外にスパッタされた原子の計測について考える。図 2 の位置関係でターゲット板に対してイオンを斜めに入射させた場合に QCM で計測される共振周波数変化は、図 6 の菱形方向に飛散するスパッタ原子の QCM 金属薄膜への堆積が原因である。本実験系では、QCM がイオン源に対して固定されていることから、全方位の微分スパッタ率を計測したい場合には、それ以外の方向（例えば、図 6 の丸印方向）に飛散するスパッタ原子についても計測する必要がある。それにはターゲット板を軸周りに回転させる必要がある。真空容器のフランジに設置した真空マニピュレータを使用すれば回転そのものは可能であるが、角度変更に時間を要することから、効率的に軸の回転角度や計測に用いる QCM 番号を事前に決めなくてはならない。この用途に用いることが可能なように、微分スパッタ率（ターゲット表面から天頂角 θ , 方位角 ϕ ）を計測する際に必要な、イオン入射角 30°, 45°, 60° に対するターゲット板の軸周りの回転角と、対応する QCM の番号を計算した結果を表 2 に示す。

5. まとめ

電気推進機を搭載した小型人工衛星の地上試験を行う際には、電気推進機から排出された高エネルギーのイオンビームが熱真空容器の壁面に衝突して実験設備へ悪影響を与える懸念を解消する必要がある。この影響を評価するためには、熱真空装置の内壁を模擬したターゲット材に対して実際にイオンビームを照射して、微分スパッタ率を計測することが一番確実な方法である。

本研究では、今後実施予定の微分スパッタ率測定に向けて、実験装置の立ち上げを行い、必要となる技術の取得を目的として一連の予備実験を実施した。具体的には、QCM 測定におけるノイズの影響を評価し、ターゲット材へのイオン入射量の他、ターゲット材の質量減少量と各方向へのスパッタ物質の飛散量（微分スパッタ率）が計測可能かどうか検討した。予備実験から、イオン照射実験に先立って 2 時間程度の真空暴露が必要であること、また、所有するイオン源と微分スパッタ率測定装置を用いて銅板の微分スパッタ率の測定が可能であることが確認できた。本実験で用いるターゲット材料はポリウレタン系の材料であり、スパッタ率は銅よりも高く、データ取得の時間は短縮できるものと考えられる。今回の予備実験から今後実施を予定している本実験に対する十分な準備を整えることができた。

参考文献

- [1] Y. Arakawa, H. Kuninaka, N. Nakayama, and K. Nishiyama : Ion Engines for Powered Flight in Space, Corona Publishing, Tokyo, 2006, pp. 18–20 (in Japanese).
- [2] Lev, D., Myers, R. M., Lemmer, K. M., Kolbeck, J., Keidar, M., Koizumi, H., Liang, H., Yu, D., Schönherr, T., Gonzalez del Amo, J., Choe, W., Albertoni, R., Hoskins, A., Yan, S., Hart, W., Hofer, R. R., Funaki, I., Lovtsov, A., Polzin, K., Olshanskii, A., Duchemin, O.: The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the Past 24 Years, 35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, USA, IEPC-2017-242, 2017.
- [3] Holste, K., Gärtner, W., Köhler, P., Dietz, P., Konrad, J., Schippers, S., Klar, P. J., Müller, A., Schreiner, P. R. : In Search of Alternative Propellants for Ion Thrusters, Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Kobe, Japan, IEPC-2015-320/ISTS-2015-b-320, 2015.
- [4] J. D. Williams, M. M. Gardner, M. L. Johnson, and P. J. Wilbur : Xenon Sputter Yield Measurements for Ion Thruster Materials, in 28th International Electric Propulsion Conference, 2004.
- [5] B. Rubin, J. L. Topper, C. C. Farnell and A. P. Yalin : Quartz Crystal Microbalance-Based System for High-Sensitivity Differential Sputter Yield Measurements, *Rev Sci Instrum* **80**, 103506 (2009).
- [6] 西村太一郎, 小泉宏之, 國中均, 山極芳樹 : 多チャンネル QCM を用いたディフュージョン・スパッタリングの計測, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-09-004, pp. 53–59.
- [7] L. J. Buntrock, C. Volkmar and K. Hannemann : Sputtering of Mo and Ag with Xenon Ions from a Radio-Frequency Ion Thruster, *Rev Sci Instrum* **92**, 045109 (2021).
- [8] G. Sauerbrey : Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung, *Zeitschrift für Physik*, 155, 1959, pp. 206–222.
- [9] A. von Engel : Ionized Gases, Clarendon Press, Oxford, 1965, Chap. 3.
- [10] Y. Yamamura and H. Tawara : Energy Dependence of Ion Induced Sputtering Yields from Monatomic Solids at Normal Incidence, *Atomic Data and Nuclear Tables*, Vol. 62, 1996.
- [11] Y. Yamamura, Y. Itikawa and N. Itoh : Angular Dependence of Sputtering Yields on Monatomic Solids, IPPJ-AM Report, 26, Institute of Plasma Physics, Nagoya University, 1983.