

真空環境下における Ag 薄膜を用いた USM の性能向上

Improvement of Performance for USM with Ag Thin Film in Vacuum Environment

電気電子情報通信工学専攻 青木 貴規
Takanori AOKI

1. はじめに

近年、急速に宇宙の商業利用が進み、近い将来、宇宙産業の需要が大きく増加する可能性がある。その際には、まず無人移動探査機を必要とした科学観測ミッションが必要とされ、惑星表面を直接探査する惑星探査ローバは、将来の表面探査ミッションにおいて中心的な役割を担うことが期待されている。宇宙環境では限られたリソースで作業を続ける必要があり、省エネルギー化が望まれる。そのため、我々は駆動関節部に超音波モータ (USM: Ultra Sonic Motor) の利用を考える。USM には DC モータに比べ次のような特徴がある。

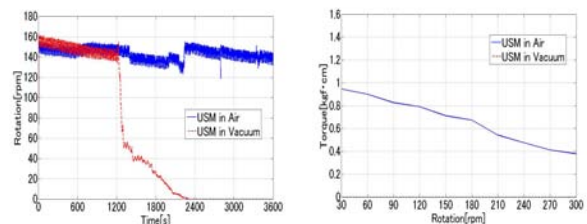
- 低速・高トルク
- 無通電時の自己保持特性
- 小型・軽量

よって駆動部において小型・軽量化及び省エネルギー化が見込まれる。真空環境でも利用可能な宇宙機器を設計する場合、まず、摺動部がなくてもすむ設計が可能かどうかを検討すべきである。摺動部を持つということはその部分に摩擦が発生し、真空では伝播媒体が存在しないために摩擦熱は増加し性能が劣化する。この摩擦熱による宇宙機器の性能劣化を防ぐために潤滑材が必要である。宇宙で潤滑するのは容易ではない。従って、摺動部がない機器を設計することは信頼性の向上につながる。しかし、可動する機構で摺動部をなくすことは難しい。例えば、月面探査ロボットについて、考えると探査車には、走行系、アーム、アクチュエータ等の摺動部を有する可動部が多く存在する。よって摺動部をどのように潤滑し、長時間低摩擦をいかに持続させるかが問題である。本研究で用いる USM は回転子と振動子の接触摩擦により駆動するため、この部分が摺動部となり、真空環境において摩擦を低減する必要がある。そこで、固体潤滑材による摩擦低減を考える。本研究では、USM の特性を考慮し、真空環境下における潤滑材として、本多らによって摩擦低減や寿命についての実証がなされている軟質金属の Ag に注目した [1]。以上より、本論文ではアクチュエータの真空利用の検討を行うために

USM の摺動部に Ag を塗布し、摩擦低減させることを提案する。

2. USM の問題点

まず、現状での真空利用での問題点把握のため、真空チャンバを用いて真空中での USM の無負荷動作を行う。大気中で駆動させた場合と真空中で 60 分動作させた後の大気中での性能の比較を図 1、動作前後の USM の表面を電子顕微鏡 (SEM) で観察したものを図 2 に示す。これより、真空での動作後は通常のものとは明らかに表面の凹凸が現れている。これは圧電セラミックが熱膨張を起こし、接触している振動子と回転子が凝着摩擦をおこしたためだと考えられる。この凹凸が摩擦の増加の原因となり、USM の摩擦熱の増加につながっていくと考えられる。実際に通常の USM では最終的に約 90% の性能劣化が見られた。よって、通常の USM では真空利用においては 30 分程度でほぼ使用不可の状態になっていることがわかる。また、トルク特性においてもトルクにおいて 30 分後には特性が取れなくなった。現在では USM は真空環境下においては最大で 70 分しか動作しないという報告も挙げられており、振動子の長さを調節することにより共振状態を改善することにより真空での性能劣化を回避しているが、それでも長時間の駆動を実現できていないという報告がある [2]。以上のことから、現状のままでは惑星探査等のような真空環境での長時間における USM の利用は非常に難しいということが分かった。そこで、真空環境下での USM の摺動部における摩擦熱の低減のために固体潤滑材の Ag に着目し、実験・検討を行っていく。



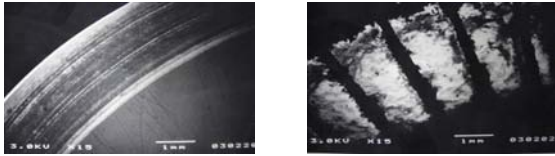
Rotation Data

Torque Data

図 1: USM Data (Air and Vacuum)



Rotor Stator
(a) Before Operating in Air



Rotor Stator
(b) After Operating in Vacuum

図 2: USM Surface

3. Ag 薄膜における摩擦低減特性

3.1 Ag の結晶構造変化

Ag の摩擦低減のメカニズムを考える。摺動前後での Ag の結晶は摺動前が粒径が 5[nm] であったものが摺動後には 40[nm] になり、形状も島構造から鱗状へと変形している。この結晶形状の変化により、Ag はすべり面と平行になり、摩擦係数の低減が行われている。また、Ag の結晶は再配列が可能であることから磨耗痕ができない理由として、生成しても再び Ag が流れ込み、膜の一部として再編成されるからであると考えられる。更に注目すべきは Ag 原子は単独で Si 上の移動が常温でも可能であるということである。

3.2 Ag の流動性

Ag のような軟質金属の薄膜は通常よりはるかに低い融点を示す。よって摺動中の Ag 結晶は全体が同時に融解せず、接触部とその周辺の一部が溶解している状態である。この流動状態によって磨耗痕の修復と低摩擦環境が実現できる。また、環境を問わず、摺動後には再結晶をするプロセスを繰り返すことができ、自己修復機能を持ち合わせる。よって USM の特性を考慮した潤滑材において大気実験も可能であり、低摩擦を長時間維持できる Ag を採用する。また、Ag の再配列は常温でも可能であるのでこの Ag を用いた摩擦低減は半永久的に持続するものであると考えられる。従って、Ag には低摩擦を実現でき、固体潤滑材の欠点である寿命の制限を改善している。

ここで、Ag の問題は Si 上に蒸着という点のみである。よって、Si 上に Ag を蒸着してこれらの特性を活かし、潤滑材として利用することにより、真空利用可能なアクチュエータの検討について行っていく。

4. 真空仕様化の問題点と原因解析

4.1 従来研究と問題点

従来研究では、銀蒸着の膜厚は 50[nm] が適切な厚さであると推定され、真空中で連続動作をさせた結果、通常の USM の性能を維持できるものと考えられる。Ag の膜厚を 50[nm] で蒸着した USM と通常の USM において性能を比較する。過去の研究における実験結果、時間 回転数特性とトルク 回転数特性を図 3 に示す。これより、図 1 に示した従来製品の USM の性能と比較してみると回転数、トルクについて同様の性能を維持していることがわかる。また、真空動作後のトルクと通常の USM の大気上でのトルクについては同様の性能を示していることから Ag 薄膜により長時間駆動において摩擦を低減でき、性能を維持していることから真空環境下において USM の耐性を向上させていると考えられる。

しかし、過去の実験において、連続駆動実験を 60 分以上行っていないことから、どの程度耐久性が向上しているのか分からないと言える。そこで、銀蒸着がどれほど有効であるかどうかの真偽を確かめるために再実験を行う。

実験を行った結果、未蒸着時はアルマイト加工が剥離し、駆動時間は 18 分となった。蒸着時はアルマイト加工と銀蒸着が剥離し、駆動時間は 31 分となった。蒸着時の摺動前後の様子を図 4 に示す。よって、従来研究ほどの良い効果が得られていないことが分かる。これらの結果より、接触面の摩擦が問題であると考えられ、接触面における剥離問題の検討が必要だと言える。そこで、FTA を用いて問題の原因を追及していく。

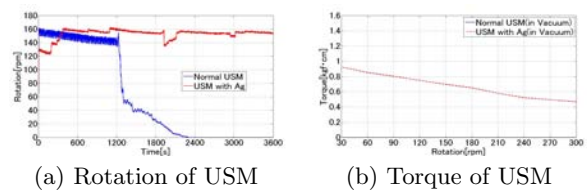


図 3: Compare Normal USM and USM with Ag



(a) Before Slides (b) After Slides

図 4: Deposition USM

4.2 FTA を用いた原因解析

FTA(Fault Tree Analysis) とは、製品の故障、およびそれにより発生した事故の原因を分析する手法である。FTA では、製品の好ましくない事象を初めに仮定する。これをトップ事象と呼ぶ。そして、上位の故障・事故から、下位の原因へとトップダウン的に展開していく手法である。

剥離の原因と考えられる事象を図 5(a), 図 5(b) に示す。上述の実験の結果、接触面の摩擦が問題ではないかという検討を付けた。更に、ロータの表面が削られていることがわかり、ステータ側またはロータのアルマイト加工に問題があるのではないかと考えられる。従って、FTA に挙げた事象の通り、ステータの表面の荒れ具合を確認する必要があると言える。そこで、顕微鏡を用いて観察を行ったところ表面が荒れていることが確認された。よって、ステータの表面に関して以下の様に検討を行う。

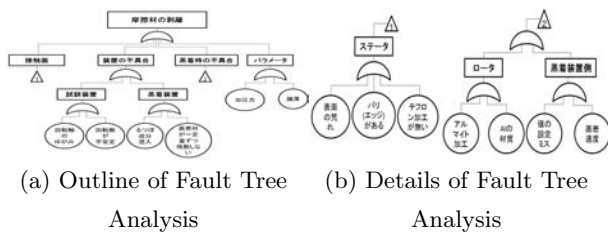


図 5: Fault Tree Analysis

- ステータ表面を滑らかにした際の比較・検討
- 蒸着時と未蒸着時の比較・検討

5. 試験システムの構築

5.1 計測システム

銀蒸着を施した USM や通常の USM を用いて T-N 特性を取る場合、トルク測定器が必要である。また、真空環境下での実験を行うため、真空チャンバ内で USM を動作させて実験を行うことを検討する。そこで、真空チャンバ内に USM を取り付け、その軸を真空チャンバの外部へ接続し、トルク測定器へと接続することを考える。実際に CAD を用いて装置を設計し、反動トルクを計測することでモータのトルクを計測する仕組みを構築した。また、USM のトルク測定試験を行う際、銀を蒸着する膜厚によって加圧力が変わることが考えられる。従って、ステータ側から鉛直方向に押し付け、荷重センサによって加圧力を任意の大きさに固定する加圧力調整機構を構築した。

5.2 制御システム

USM を駆動させるための入力周波数は使用環境の変化によって USM の動特性に合わせ、供給する周波数を手動によりロータとステータの共振点に調整する必要がある。そのため、環境に応じて逐次その動作共振周波数に合わせる必要がある。また、USM の動作原理および構造から速度の脈動現象、すなわち回転むらを生じる [3]。本研究では、DDS(Direct Digital Synthesizer) ドライバを開発して周波数を制御する方式を採用する。ある基準となる駆動周波数 f からの変化分 Δf によって USM を制御する。PID 制御器の速度制御ブロック図を図 6(a) に示す。ただし、 $y_m(k)$, $y(k)$ は入力周波数 Δf [kHz], 速度偏差 $e(k) = y_m(k) - y(k)$ であり、 $u_P(k)$ は PID 制御器出力である。PID 制御器の出力 $u_P(k)$ は 1 式により決定する。

$$u_P(k) = K_P e(k) + K_I \int_0^k e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(k)}{d(k)} \quad (1)$$

ここで、 K_P, K_I, K_D はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインである。また、USM の温度変化に対する特性を見るため、周波数を一定にし、無負荷状態における USM の表面温度と回転数の関係を調べた。その結果を図 7(a) に示す。これより、駆動時間が経過するにつれて USM の温度が上昇し、それに伴い回転速度が低下していることがわかる。そこで、構築した制御器を用いて無負荷状態での USM の速度制御実験を行った。目標回転速度を 100[rpm] とした場合、図 7(b) より、若干の速度脈動があるものの、安定して制御を行えていると言える。

その時の USM の表面温度と周波数の関係は、図 8(d) からわかるように、時間が経つにつれて温度が上昇しても周波数を変化させることにより速度を維持できると言える。

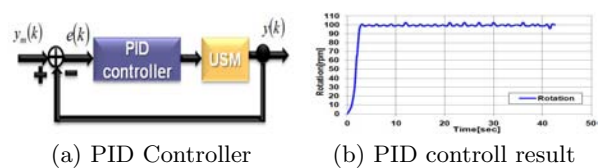


図 6: PID Control

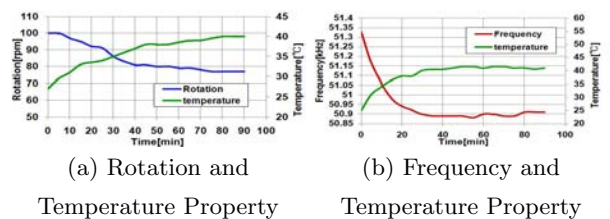


図 7: Frequency Control

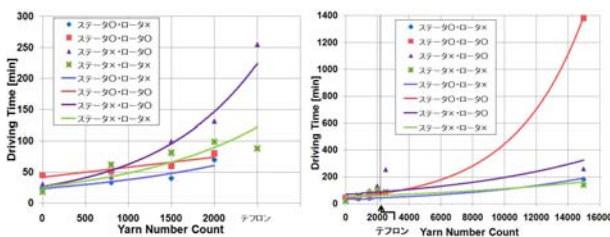
6. 実験と検討

FTA で行った解析を基に実験と検討を行う。剥離問題を解決すべく、研磨機を用いて均一的に研磨をステータ表面を滑らかにする。研磨紙は# 800, # 1500, # 2000 を使用し、各パターンで実験を行う。表 1 に示す通り、蒸着の有無を含めた 18 通りの試験パターンの実験を行う。ここで、試験を行う前に仮説を立てる。銀の特性とステータの表面の滑らかさに注目した場合、ステータとロータの両方に蒸着を施し、ステータを # 2000 の研磨紙で研いだ USM が最も良い結果が得られるのではないかと考えられる。

表 1: Examination Pattern

蒸着の有無 ステータ	蒸着の有無 ロータ	ステータの研磨種類
		/
	×	研磨無し, 有り
		研磨無し, 有り
×		研磨無し, 有り, テフロン
×	×	研磨無し, 有り, テフロン

この表に沿って行った実験結果を図 8(a) に示す。これより、ステータにテフロン加工を施したものとロータに銀蒸着した場合が最も良い結果が得られた。一方で、ステータの表面摩擦がテフロン加工を施したものよりも高いと考えられる。また、ステータ表面を研磨することで耐久性が向上し、有効性があると言える。従って、剥離問題はステータ表面の摩擦に影響していると言え、より番手の高い研磨紙 (# 15000) を用いて、各蒸着パターンにて実験を行う。



(a) Friction Decrease Experiment-1
(b) Friction Decrease Experiment-2

図 8: Friction Decrease Experiment

図 8(b) の結果より、全体的に研磨によるステータの摩擦低減が得られたことが分かる。そして、ステータ・ロータ共に蒸着した場合に最も摩擦を低減できたと言える。ゆえに、当初の仮説の通り、このパターンにおいて銀薄膜の特性が発揮されたと考えられる。しかし、どの USM も実験後

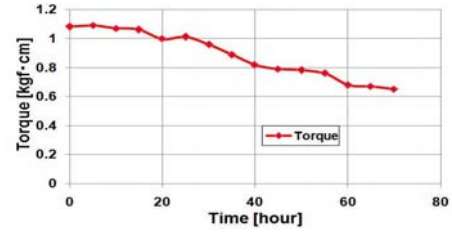


図 9: Torque of USM with Ag

はロータの銀蒸着が剥離している為、前述の通り、FTA よりアルマイト加工が剥離の原因と考えられ、これを剥がした上に蒸着し、回転速度を 100[rpm] で実験を行う。その結果、剥離を防げ、大幅な駆動時間の増大に繋がった。また、トルク測定を行った。仕様書より、この回転速度の時、USM の性能は 0.51[kgf·cm] を満たせば良く、図 9 よりそれを満たしていることが言える。真空動作中におけるトルクを長時間維持していることから、Ag 薄膜により、摩擦熱や表面の傷による摩擦、銀蒸着の剥離を低減できたと言える。この要因としては、銀薄膜における特性である、結晶構造の変化と流動性が現れたためだと考えられる。銀蒸着を施し、ステータ表面を滑らかにすることにより、長時間駆動において摩擦を低減でき、長時間駆動する様になったことから、真空環境下において大幅に性能が向上したと言える。

7. まとめと今後の課題

USM の真空環境下での利用を提案し、USM と従来の研究が有する問題点を示した。銀蒸着の剥離問題に対して FTA を用いて検討し、試験システムを構築した上で、それに沿って実験・検討を重ねた。そして、銀蒸着をステータとロータの両面に行い、ステータ表面を研磨することにより、摩擦が低減され、長時間駆動に繋がり、性能向上がなされたと言える。今後の課題としては温度上昇における特性検証、膜厚の違いによる性能変化の検証がある。

参考文献

- [1] M. Goto, F. Honda: "Superlubricity of Ag Nanometer-Thick Layers under Macroscopic Sliding System in UHV Condition," Superlubricity, pp.179-198(2007).
- [2] T. Ishii, E. Matsuno, K. Nakamura, S. Ueha, and K. Ohnishi: "Characteristics of Ultrasonic Motors Driven in a Vacuum," Jpn. J. Appl. Phys. Vol.37, pp.2956-2959 (1998).
- [3] 前野隆司: "固体・滑りを考慮した超音波モータの接触解析", 日本音響学会誌, Vol.54, No.4, pp.305-311, 1998 .