

宇宙機用保持解放機構の分離面のための表面処理に関するトライボロジー評価

Tribological Evaluation of Selected Surface Treatment for Separable Surfaces of Hold-Down and Release Mechanisms

都立大（正）*羽石 優平 JAXA（正）川村 俊一 JAXA（正）松本 康司 JAXA（正）小原 新吾

Yuhei Haneishi*, Shunichi Kawamura**, Koji Matsumoto**, Shingo Obara**

*Tokyo Metropolitan University, **Japan Aerospace Exploration Agency

1. 背景・目的

宇宙機の太陽電池パドルやアンテナ等の大型構造物は、ロケット打ち上げ時には折りたたまれた状態でフェアリング内に収納され、軌道上で展開される。この動作に必要な、折りたたみ状態を保持し、軌道上で保持を解放する機構は保持解放機構と称される。例えば、複数のパネルから構成される太陽電池パドルを保持する場合、各パネルの数か所にブッシュが取り付けられており、パネルを屏風のようにたたんでブッシュの端面同士を接触させ、ブッシュの中空部にボルト部品を通して締め付け、加圧することでパドルを保持している。これら保持解放機構のブッシュ分離面には固着防止のために固体潤滑処理が施され、摩擦係数が低くなっていることから、打ち上げ時の振動により分離面同士が面内方向に滑り、パネルが破損する恐れがある。そのため、現状の分離面では凹凸形状を設け、嵌合させることで滑り合いを防いでいるが、全ての分離面で嵌合を実現するために高精度な加工・取り付けが要求され、高コストの原因となっている。そこで現在、低コストで作製が容易な、分離面が平面状のブッシュを用いた機構の研究開発が進められている。

分離面を平面状にする場合、打ち上げ時の滑りを防ぐためには、大気中から真空中まで分離面同士の摩擦が高い状態にあり、さらに、しゅう動が生じた場合でも摩耗しにくいことが必要である。この要求を満足するための有効な手段のひとつとして、材料の表面硬化処理が挙げられる。宇宙機の金属材料としては軽量化の観点からアルミニウム合金が主流である。著者らは現在、保持解放機構の分離面への適用を目指し、アルミニウム合金に対する複数の表面硬化処理について試験評価を行っている。本報では、それらの表面硬化処理の中で比較的安価で処理も容易な、陽極酸化皮膜、通称アルマイドの摩擦摩耗特性を明らかにする。特に、大気中と真空中の両環境において固着せずに低摩耗性を有しながら、摩擦係数としては、実機採用の際の要求（設計上の滑らない条件）である‘分離面同士の接触面圧が 2.6 MPa の時に摩擦係数が 0.4 以上’を安定して維持するかに着目する。

2. 試験概要

2.1 リングオンディスク摩擦試験機

ロケット打ち上げ時のブッシュ分離面のしゅう動は微小な振幅の往復摩擦であることから、本研究では微小角での揺動が可能なリングオンディスク型の摩擦試験機を用いた。Figure 1 に試験片（本試験では皮膜厚さ 30 μm のアルマイドを使用）を含む主要部を示す。これらは真空槽内に設置されている。試験は、静止しているリングに対し、ディスクを揺動、または一方向に回転させることで行った。

負荷荷重は、上部のボールねじによる軸方向力でリング試験片に与え、ロードセル 3 で検出した。しゅう動面の片当たりは、調心座形スラスト軸受により防止した。

摩擦力は、ディスクを回転させ、リングに固定したアームに作用する摩擦トルクをロードセル 1, 2 で検出した。

2.2 試験条件

Table 1 に各試験条件を示す。しゅう動方式に示す ± の距離は、リングしゅう動面の平均半径位置での周方向滑り距離である。微小角での揺動のほか、± 360° や一方向回転による試験も実施した。

全試験で、リングとディスクの接触面圧が実機と等しい 2.6 MPa となるよう、負荷荷重は 515 N に設定した。また、真空中試験時の雰囲気圧力は 10⁻³ Pa 未満とした。

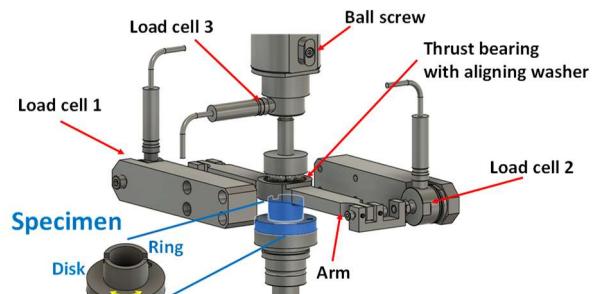


Fig. 1 Testing machine (main parts) and Specimen

Table 1 Test conditions

Sliding mode	Speed	Load [N]	Environments
± 71.6 mm (± 360°)	7.2 mm/s (6.0 rpm)	515	Vacuum
One-way rotation			1 atm - Air
± 0.1 mm (± 0.5°)			1 atm - Dry N ₂
± 0.2 mm (± 1.0°)			
± 0.5 mm (± 2.5°)	0.72 mm/s (0.6 rpm)		Vacuum
± 1.0 mm (± 5.0°)			

3. 結果・考察

最初に、雰囲気の摩擦摩耗特性への影響を調べるために、大気中（試験室雰囲気）、乾燥窒素中および真空中で一方向回転の摩擦試験を行った。結果をFig. 2に示す。同図には、真空中での $\pm 360^\circ$ （1回転）の揺動試験の結果も示した。大気中および乾燥窒素中では、長期にわたって摩擦係数0.8以上を維持した（1000回転以上継続することを確認）。試験後のしゅう動面の観察では、両雰囲気ともに表面の荒れは小さく摩耗粉は微細であり、マイルドな摩耗状態であった。一方、真空中では、摩擦係数は1.0以上を示した後に、30回転に達するまでに0.4～0.6に急減した。真空試験後のしゅう動面はアルマイト層が摩滅し母材であるアルミニウム合金が露出していたことから、摩擦係数が1.0以上の領域はアルマイトが残存しているしゅう動状態で、摩擦係数0.4～0.6への低下はアルマイト層の損耗により母材同士の接触へと移行したものと考えられる。本研究では、この摩擦係数の変化が生じた時点までをアルマイトの寿命と判断した。以上のFig. 2の結果から、アルマイトは、真空中での寿命は短くなるものの、全ての雰囲気に対し高摩擦を実現できることが分かった。

続いて、実際のロケット打ち上げ時のブッシュ分離面の滑りを想定して、微小角揺動での摩擦試験を行った。試験雰囲気は、寿命に対して最も厳しい条件となる真空中とした。Figure 3に結果を示す。同図より、アルマイトの寿命は揺動距離に依存し、0.2 mm以下では長寿命、0.5 mm以上では短寿命となることがわかる。Figure 4は、短寿命であった揺動距離0.5 mmの、摩擦試験後のディスク摩擦面の光学顕微鏡写真であり、露出したアルミニウム合金面やその摩耗粉が凝着、塑性変形を生じてシビアな摩耗状態であることがわかる（摩耗深さ約30 μm）。一方、Fig. 5は長寿命を示した揺動距離0.1 mmの摩擦面であり、アルマイトが全面に残存した状態で滑らかである（摩耗深さ約5 μm）。Figure 6は、Fig. 5において白色に見える部分の電子顕微鏡写真であり、ミクロンオーダーの微細なアルマイトの摩耗粉が堆積していることがわかる。さらに、一部の摩耗粉は互いに接合していることから、しゅう動での局所的な加圧と加熱に伴う焼結の発生が推測される。これらFig. 5および6の結果より、揺動距離が0.2 mm以下の小さい場合は、発生した微小なアルマイトの摩耗粉が、摩擦面以外に排出されることなく残存することで保護層として長期に機能し、さらに、摩耗粉同士が接触する機会が少ないと摩耗粉サイズの成長が制約されることでマイルド摩耗が継続するのに対し、揺動距離が0.5 mm以上に大きくなるとこれらの効果が得られにくくなるため、短寿命になった可能性がある。

4. 結論

本研究では、微小角での揺動が可能なリングオンディスク型の摩擦試験機を用い、アルマイトの摩擦摩耗特性を明らかにした。結果、大気中および真空中の両環境において、振幅が0.2 mm以下の条件では、摩擦係数が0.6以上の高摩擦状態を安定して示す、つまり、設計上の滑らない条件を満たしていることが確認された。

実機打ち上げ時の振動に伴う分離面の振幅は0.2 mmを十分に下回ると予測されているため、同処理は宇宙機用保持解放機構の分離面材料への表面処理方法として有望だと考えられる。

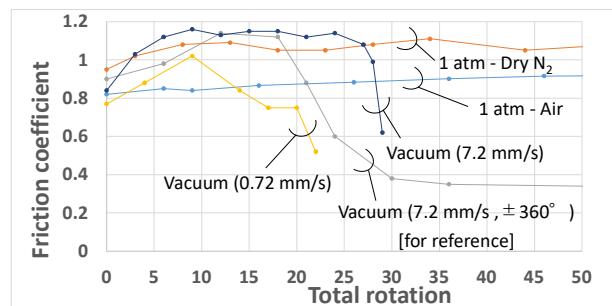


Fig. 2 Friction coefficients for one way rotation in humid air, dry nitrogen and vacuum

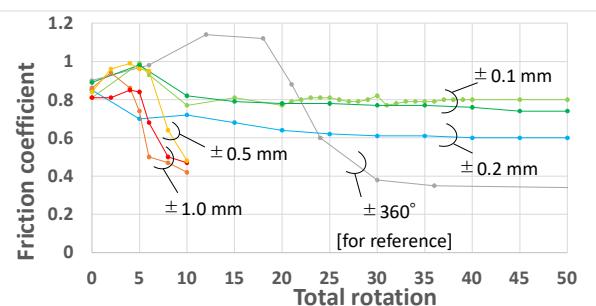


Fig. 3 Friction coefficients for small angle oscillation in vacuum



Fig. 4 Sliding surface after ± 0.5 mm test

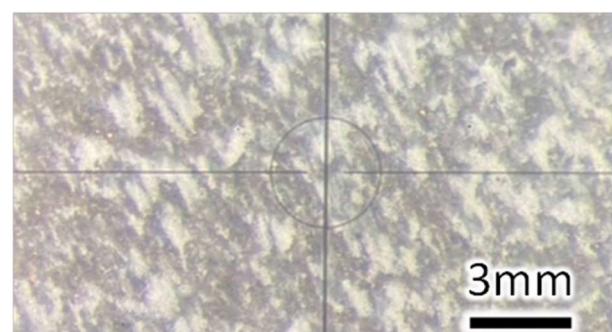


Fig. 5 Sliding surface after ± 0.1 mm test

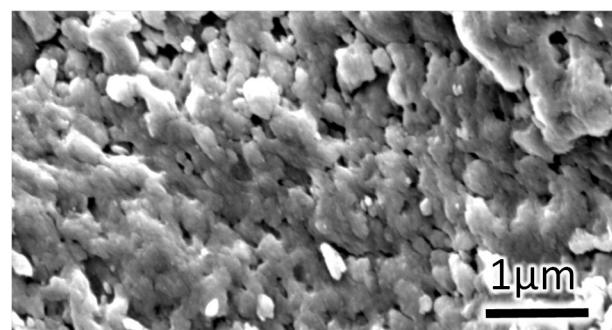


Fig. 6 SEM image of sliding surface in Fig. 5