

高分子系固体潤滑剤に対する真空極低温環境下における長期保管の影響

Influence of Long-Term Storage under Vacuum and Cryogenic Conditions on Polymer-Based Solid Lubricants

JAXA (正) *羽森 仁志 JAXA (正) 佐藤 泰貴 JAXA (正) 松本 康司

Hitoshi Hamori*, Yasutaka Satou*, Koji Matsumoto*

*Japan Aerospace Exploration Agency

1. はじめに

将来の宇宙探査ミッションは長期化が予想されており、打ち上げから十数年オーダーの期間を経て探査機が目的の天体に到達した後、搭載機器を駆動させることが求められる。宇宙探査機は非修理系であり駆動機構の不具合はミッションフェイルに直結するため、長期真空低温保管という特有の環境条件にさらされた後でも確実に動作する機構が必要であり、信頼性を定量的に示すことは重要である。宇宙機に適用される潤滑剤の一つに、低温環境下で使用可能かつ天体を汚染しないものとして、固体潤滑剤である PTFE 焼成膜が考えられている。しかし、固体潤滑剤の十数年後の摩擦特性を実験により調べることは現実的でなく、現象の解明および推定式の構築が必要となる。

Dieterich らはアクリル・ガラスを対象として、荷重・荷重時間が長くなると真実接触面積が増大し、それに伴い摩擦係数が増大することを実験的に確認しており¹⁾、また、Brecht らの研究では、静止摩擦係数が荷重・荷重時間の対数関数で記述できることを示した物理モデルが報告されている²⁾。さらに、PTFE 系固体潤滑剤の静止摩擦係数の温度依存性に関する研究も発表されている³⁾。しかし、低温環境と長期の荷重・荷重を組み合わせた条件での研究は例がない。本研究では短期の摩擦特性から長期のものを予測することを目的とし、PTFE 焼成膜の長期真空低温保管による影響の明確化と現象理解のため、環境温度や保管時間をパラメータとした長期保管後の摩擦試験により摩擦特性の傾向を取得し、結果に基づく考察を行った。

2. 試験方法

長期保管後の摩擦試験では真空・冷却・保管の工程が必要であるため、1 ケースのデータを取得するために多くの時間を必要とする。そのため一度に 4 点のデータを取得するために Fig. 1 のような試験系を構築した。本試験はボールオンディスク試験でありチャンパ中心に固体潤滑剤を焼成したアルミ基板を配置し、四方から荷重・荷重アームによってボールを基板へ押し付ける形で所定の面外方向荷重を負荷している。Fig. 2 は試験系の断面図であり本試験系では大気側からおもりを負荷しているが、溶接ベローズを介することでチャンパを真空に保ちつつシーソーの要領によりチャンパ内の基板へ荷重を負荷することができる。また、基板は磁性流体シールを介してチャンパ外のモータへ接続されており、モータ駆動により静止摩擦係数を測定する。荷重・荷重アームには板ばねを挿入しており、板ばねに貼り付けたひずみゲージの値を用いて摩擦力を計測することができる。

本試験で用いた PTFE 焼成膜の諸元および試験条件をそれぞれ Table 1, 2 に示す。また、試験手順は以下の通りである。

1. スクロールポンプ、ターボ分子ポンプを用いて真空引きを行う。
2. 冷凍機を用いて試験片を冷却する。
3. 圧力・温度が定常となった後、おもりの重みを用いてボールを基板へ押し付ける形で、所定の時間荷重を負荷する。
4. 板ばねに貼り付けたひずみゲージのゼロ点を取り、モータ駆動により基板を 0.1rpm の速度で回転させる。
5. 滑り始めの板ばねのひずみを取得し、摩擦力に変換することで静止摩擦係数を算出する。

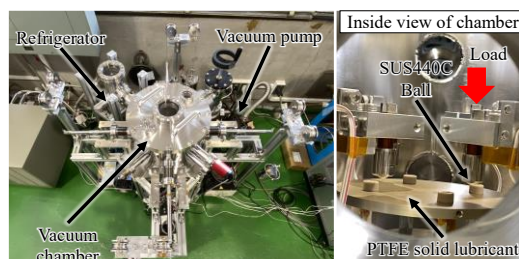


Fig. 1 Overview of experimental apparatus

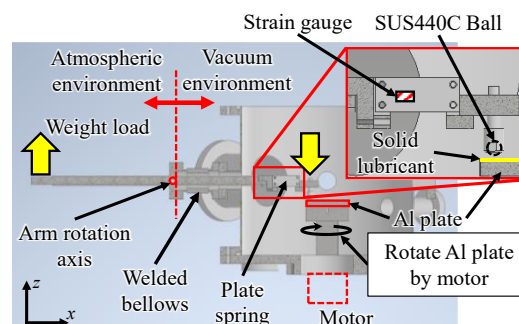


Fig. 2 Cross section of experimental apparatus

Table 1 Specification of solid lubricants

ID	Lubricant	Binder	Additive	Base material
A	PTFE	Li-Si	Sb ₂ O ₃	Al plate
B	PTFE	Polyimide	Polyimide powder	Al plate

Table 2 Experimental conditions

	Ball	Load	Pressure	Temperature
Material	Diameter [mm]	[N]	[Pa]	[deg C]
SUS440C	7.94	10, 20	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴	-120~20

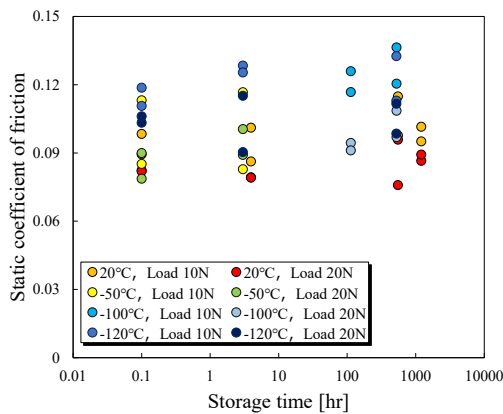


Fig. 3 Relationship between storage time and static coefficient of friction of specimen A

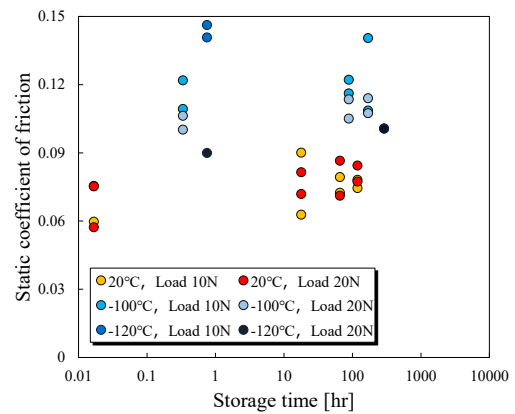


Fig. 4 Relationship between storage time and static coefficient of friction of specimen B

3. 試験結果

長期保管後の摩擦試験を実施した結果を Fig. 3,4 に示す. 傾向としていずれの試験片についても保管時間が長くなると、また、環境温度が低くなると摩擦係数が増大することが分かった. さらに、無機系バインダーを使用した PTFE 焼成膜と比べ有機系バインダーを使用したものの方が時間経過および温度低下による摩擦係数の増大幅が大きくなった. 本結果について考察を行う.

まず、保管時間の増加に伴い摩擦係数が増大した原因は、高分子材料の粘弾性特性であると考えられる. PTFE は粘弾性体としての挙動を示すことが知られているが、本試験で使用した焼成膜の配合率は PTFE に対しバインダーの比率が支配的であるため、バインダーの違いにより結果の差異が表れていると考えられる. 無機系バインダーとして用いた珪酸リチウムは粘弾性特性を示す材料ではない一方で、有機系バインダーとして使用したポリイミドは粘弾性体であるため、有機系バインダーを用いた試験片では、無機系のものと比べ荷重負荷時間が増加するにつれてより顕著なクリープ変形が発生し真実接触面積が増大することで、摩擦係数の増大幅が大きくなっていると考察できる.

一方で、低温環境下で摩擦係数が増大した原因については明確な理由を特定できていない. 材料の粘弾性特性に基づく現象であれば高温側で現象が加速するが、それとは逆の結果となっていることから粘弾性特性とは別の物理現象に基づくものであると考えられる. 仮説として、低温下での PTFE やバインダーの弾性率変化に注目している. Fig. 5 に示すように、ボールオンディスク試験ではボールを平板に押し付けることで弾性変形により局所的な凹みが生じる. その状態から滑りを発生させるためには、材料間の純粋な静止摩擦力に加えボールの周囲の領域をせん断変形させる力が必要となると考えられる. 先行研究では PTFE およびポリイミドについて低温下で弾性率が大きくなることが報告されており⁴⁾、本試験でも低温下での PTFE やバインダーの弾性率増大により、焼成膜をせん断変形させるために必要な力が増大し、摩擦係数に影響を与えていると考えられる. 本考察の妥当性については、別途数値解析等を用いて検証予定である.

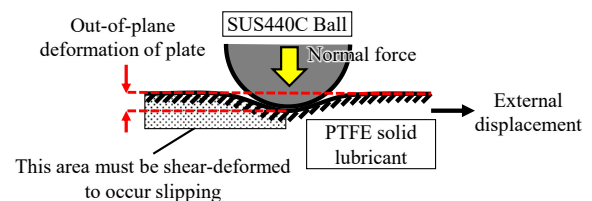


Fig. 5 Schematic view of geometric deformation at ball-on-disk test.

4. おわりに

本研究では将来の深宇宙探査に向け、真空低温環境に長期間さらされた後の PTFE 焼成膜の摩擦特性を予測することを目的とし、長期保管後の摩擦試験に取り組んだ. その結果静止摩擦係数が保管時間および環境温度に依存することが分かった. 保管時間に依存する原因は PTFE およびバインダーの粘弾性特性によるものであると考えられる. 環境温度に依存する原因は調査中であるが、低温による材料の弾性率変化が原因と仮定し検証を進めていく予定である. 今後は数値解析の観点から分析を行い、環境温度による弾性率変化の影響や、保管時間の影響を定量的に再現可能な計算モデルの構築に取り組む.

文献

- 1) J. H. Dieterich, B. D. Kilgore. Direct Observation of Frictional Contacts: New Insights for State-dependent Properties, *Pure and Applied Geophysics*, 143, 1994, 1-3.
- 2) Y. Brechet, Y. Estrin: The Effect of Strain Rate Sensitivity on Dynamic Friction of Metals, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 30(11), 1994, 1449-1454.
- 3) N. L. McCook, D. L. Burris, P. L. Dickrell, W. G. Sawyer: Cryogenic Friction Behavior of PTFE Based Solid Lubricant Composites, *Tribology Letters*, 20(2), 2005, 109-112.
- 4) Q. Wang, F. Zheng, T. Wang. Tribological Properties of Polymers PI, PTFE, and PEEK at Cryogenic Temperature in Vacuum, *Cryogenics*, 75, 2016, 19-25.