

宇宙探査機用機構品のための固体潤滑剤の開発と変形特性の評価

Development and Deformation Characteristics of Solid Lubricant Film for Space Exploration

JAXA (正) *佐藤泰貴 JAXA (正) *松本康司 早大・学 (非) **前田康博 早大 (非) **石村康生

JAXA (正) *松岡範子 JAXA (正) *剣持伸朗 JAXA (非) *菅原春菜 JAXA (非) *臼井寛裕

川邑研究所 (正) ***浅川瑞生 川邑研究所 (正) ***川邑正広

Yasutaka Satou*, Koji Matsumoto*, Yasuhiro Maeda**, Kosei Ishimura**, Noriko Matsuoka*, Nobuo Kenmochi*,

Haruna Sugahara*, Tomohiro Usui*, Mizuo Asakawa***, Masahiro Kawamura***

*JAXA, **Waseda University, ***Kawamura Research Laboratories, Inc.

1. 序論

近年、小惑星探査機はやぶさシリーズ¹⁾や火星衛星探査計画 MMX²⁾などのように、目標天体から砂などの物質を採取し、地球に持ち帰るサンプルリターンミッションが活発に検討されている。このような探査機においては、サンプルの採取やカプセルへの搬送および格納といった動作のために潤滑剤が必要不可欠である。例えば、著者らが開発している、火星衛星探査計画 MMX でサンプル採取機構を行うコアラー機構 (Fig. 1) には、約 20 か所のしゅう動部が存在し、場所に応じて潤滑剤が適切に選定されている。

一方、コアラー機構のように採取サンプルに直接触れるような機構においては、潤滑剤によるサンプルへの汚染を避けるため、従来宇宙機で使用される潤滑剤は忌避される場合が多い。小惑星探査機はやぶさでは、摩耗粉の排出が少ないとされ、人工的な高分子材料であることから探査天体由来の物質との区別が容易な PTFE 等の樹脂系の固体潤滑が用いられてきた⁴⁾ものの、今後のサンプルリターンに向けては、よりサンプルへのコンタミを少なくすることや、耐荷重・耐摩耗性を向上させること、また、軌道上での負荷を適切に推定し寿命設計ができるようになることが求められる。

本研究では、PTFE 焼成膜をベースとした (1) サンプルへのコンタミの少ない固体潤滑剤の開発と、PTFE 焼成膜の弱点である耐荷重性を適切に設計で考慮するため (2) しゅう動部の寿命予測のための潤滑被膜の変形特性を検討する。

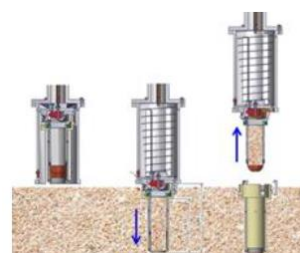


Fig.1 MMX corer mechanism³⁾

2. サンプルへのコンタミの少ない固体潤滑材の開発

2.1 開発方針

採取したサンプルへの固体潤滑被膜によるコンタミは、打ち上げ振動や駆動時のしゅう動による被膜の摩耗と、その摩耗粉の混入による汚染という過程を経るため、下記の二つのアプローチで開発を行う。

A) サンプルに混入しても理学分析の観点では汚染しない物質で構成する潤滑剤 (多少の摩耗は許容)

B) そもそも摩耗しにくい潤滑剤 (禁止物質で構成されるもサンプルに混入しても許容量以下となりうる)

方針 A) の前提となる、サンプルに混入してはいけない禁止物質は、将来のサンプルリターンを見据えて選定しており、火星衛星探査計画 MMX のキュレーション開発仕様書をベースとしている。

トライボロジー特性は、打ち上げ時を対象としたフレッチング試験および駆動時を対象としたピンオンディスク方式の往復しゅう動試験により評価した (Table 1, 2)。往復しゅう動試験に加え、フレッチング試験を実施したのは次の理由である。これまでのサンプルリターンに用いられた機構のしゅう動部を調査した結果、駆動時のしゅう動回数が少ないもの (ワンショット品) がほとんどだが、打ち上げ時に潤滑被膜に押し付けた状態となるものが多かった。このため、通常のトライボロジー試験のようなしゅう動ストロークが長いものだけでなく、打ち上げ時の微小なしゅう動を対象としたフレッチング試験も行う必要があると考えた。尚、ピンオンディスク試験での被膜の厚みの目標値は 15 μm とした

Table 1 Test condition for fletching

Frequency	200 Hz
Stroke	0.5 mm
Duration	80 sec
Atmospheric/Vacuum	Atmospheric
Temperature	R. T.
Ball	SUJ2, $\phi 10\text{mm}$
Disk	A5052B
Load	19 N

Table 2 Test condition for Pin-on-disk

Velocity	17 mm/s
Stroke	10 mm
Number of cycles	300,000 (Max.)
Atmospheric/Vacuum	Vacuum (Approx. 10^{-5} Pa)
Temperature	R. T.
Ball	SUS440C, $\phi 7.94$ mm
Disk	A7075-T7351
Load	5, 10, 20 N

2.2 方針 A)：サンプルに混入しても理学分析の観点では汚染しない物質で構成する潤滑剤の開発

現在、2.1 節記載の A)と B)の方針に基づき開発を進めているが、本稿では A)の「サンプルに混入しても理学分析の観点では汚染しない物質で構成する潤滑剤」の開発結果について報告する。まず、禁止物質を避けつつも潤滑剤になりうる材料選定を行い、PTFE 焼成膜のサンプルを作成した。次に、Table 1 に記載のフレッチング試験によりスクリーニングし、耐摩耗性を有するものを数種類に絞った。続いて、Table 2 に示すピンオンディスクによるしゅう動試験により、真空中でのしゅう動特性を取得した。最後に、焼成過程で禁止物質が新たに生成される可能性があるため、作成したサンプルに対してガスクロマトグラフを用いた質量分析を行った。上記の開発および評価の結果、Table 3 に示す2つの PTFE 焼成膜が、サンプルのコンタミ源になりにくいと同時に、トライボロジー特性が優れていることが分かった。

Fig. 2 は Table 1 のフレッチング試験後の摩耗状態および摩耗深さを示したものであり、Fig. 2a は PTFE 焼成膜 No. A-1、Fig. 2b は参考として宇宙で実績のある MoS₂ を潤滑剤に用いた焼成膜である。この結果から、開発した A-1 の PTFE 焼成膜は、フレッチング負荷後も膜がほとんど摩耗しない一方で、MoS₂ 焼成膜は明らかな摩耗痕が認められた。一般的に、MoS₂ 焼成膜は大気中での耐摩耗性が悪いため、このような比較結果になると考えられる。一方、打ち上げ時のフレッチング摩耗は大気中で生じるため、そのような摩耗が生じる場合においては、被膜 A-1 の方が Fig. 2b 記載の MoS₂ 潤滑剤よりも有効であると考えている。A-2 はフレッチング試験による摩耗が顕著だったものの、ガスクロマトグラフの結果、A-1 よりも構成物質が少ないため、PTFE 焼成膜の選択肢から外さなかった。

Fig. 3 は Table 2 の往復しゅう動試験で得られた摩擦係数、Fig. 4 は試験後の摩耗状態である。A-1 のしゅう動試験の結果、真空中では全ての荷重において試験打ち切り回数の 30 万回に達し、摩擦係数も 0.2 前後で推移している（摩擦係数が 0.4 を超えた時点で被膜の破断と判断）ことから、長寿命であることが示された（Fig. 3a）。一方、大気中では真空中に比べて二桁以上短い寿命となった（Fig. 3b）ことから、地上で駆動試験する場合は注意が必要である。A-1 の摩耗状況の観察の結果、被膜がボール側に移着されることはほとんどないことが明らかとなった（Fig. 4a）。A-2 の結果、真空中では A-1 よりも短寿命であるとともに摩擦係数が徐々に上昇する結果となった（Fig. 3c）。また、大気中では A-1 と同等の結果であった（Fig. 3d）。A-2 の摩耗状況は、被膜の移着はなかったものの、大気中では真空中と異なり、ボール側が顕著に削れる結果となった（Fig. 4b）。このため、地上試験では注意が必要であることが示された。

Table 3 Less-Contaminant PTFE bonded film

No.	Binder	Lubricant	Additive
A-1	Li-Si	PTFE	Sb ₂ O ₃
A-2	Fluorine polymer	PTFE	Sb ₂ O ₃



(a) No. A-1 (Li-Si, PTFE, Sb₂O₃)

(b) (Reference) MoS₂ solid lubricant film

Fig. 2 Wear surface and depth after fretting test

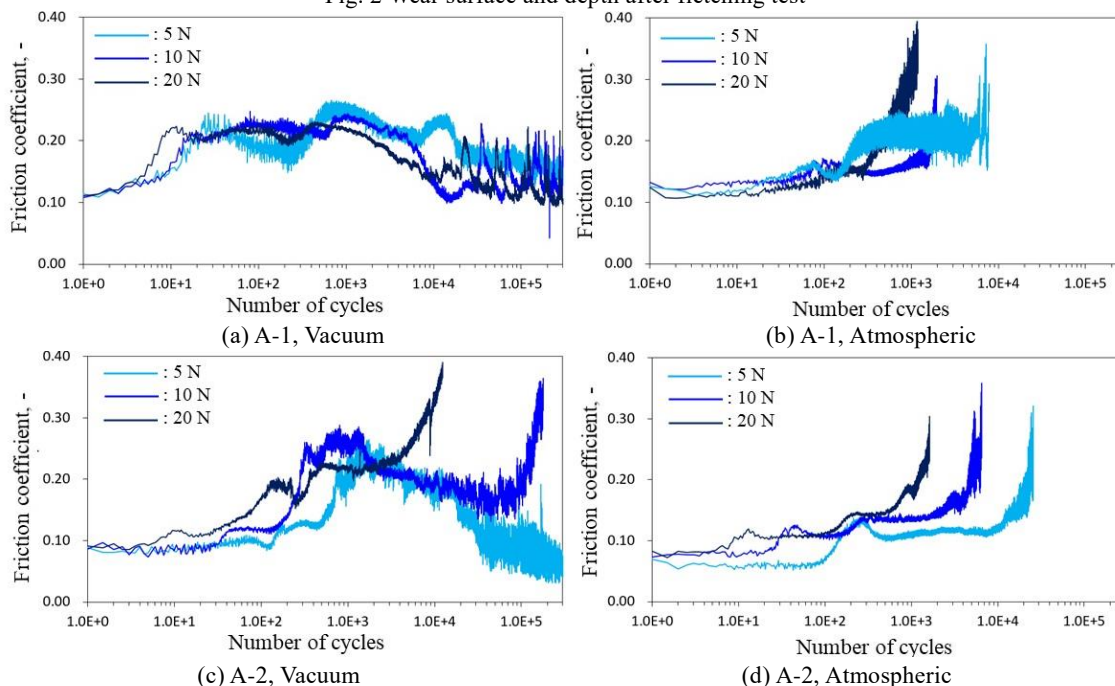
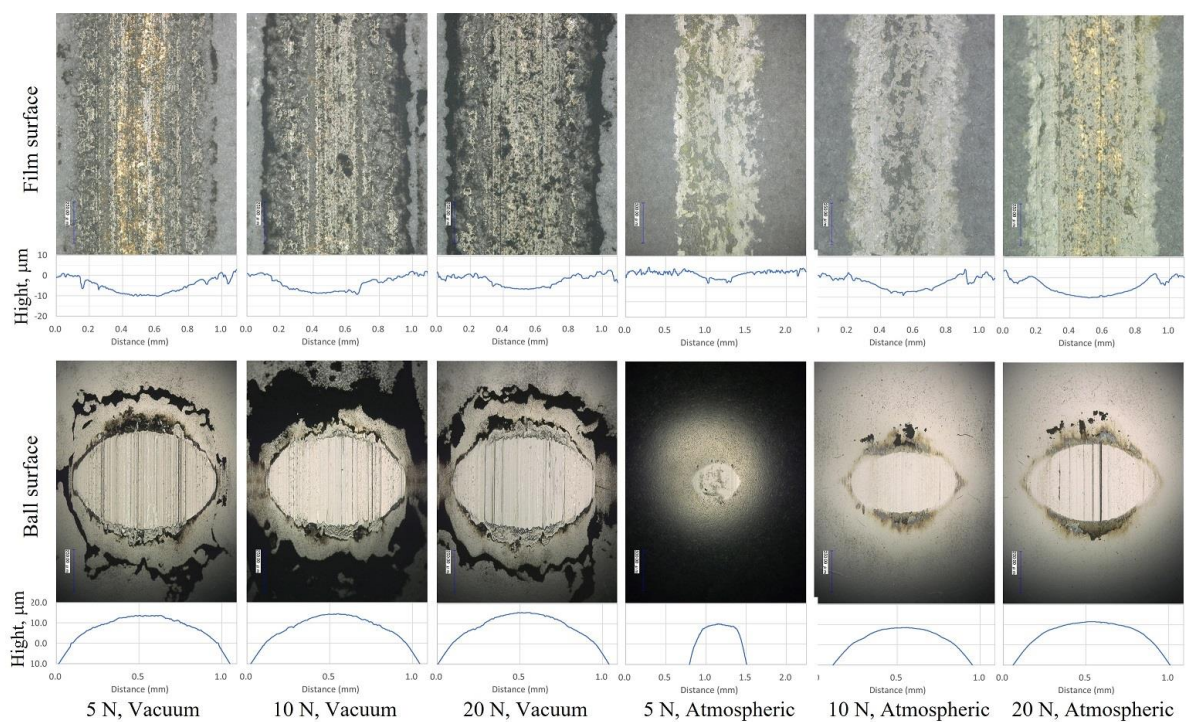
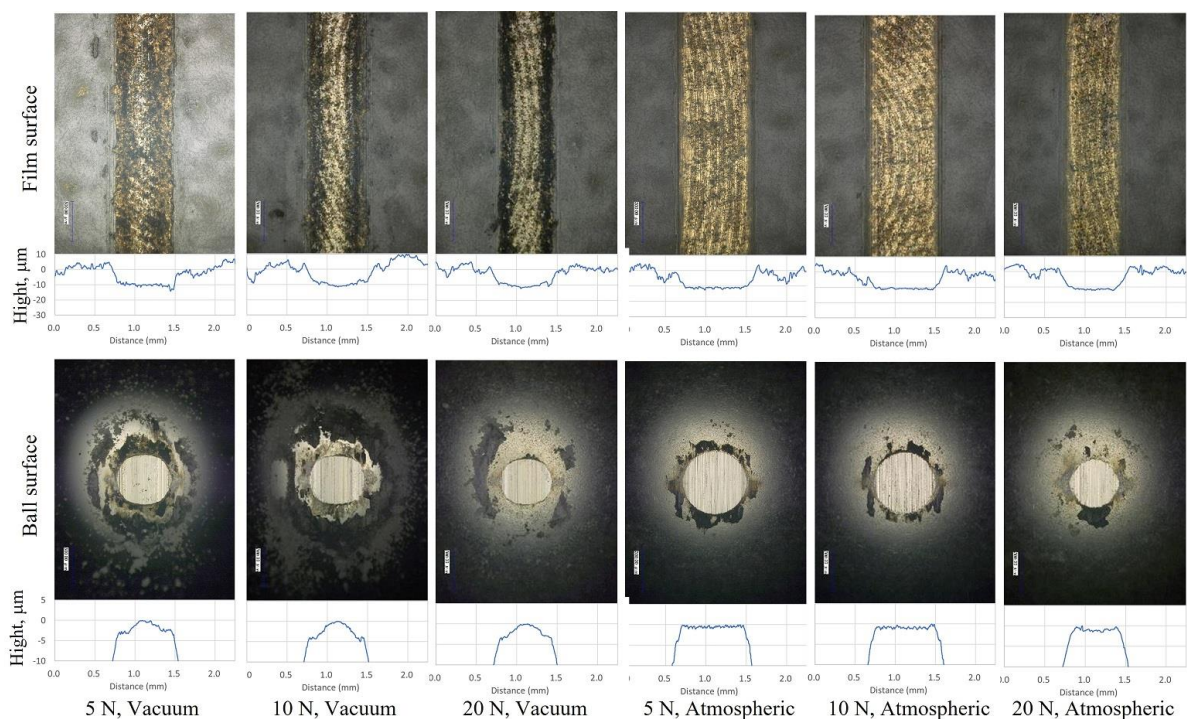


Fig. 3 Results of pin-on-disk test for less-contaminant PTFE solid lubricant film



(a) No. A-1 (Li-Si, PTFE, Sb_2O_3)



(b) No. A-2 (Fluorine polymer, PTFE, Sb_2O_3)

Fig. 4 Wear surface and depth after pin-on-disk test

3. 潤滑被膜の変形特性

軌道上での被膜への荷重は、熱変形などによって随時変化するため、駆動開始から終了までの機構部品のライフサイクルに渡った寿命を事前に予測し、適切に設計に反映することが求められる。このような荷重状態を予測するためには、潤滑被膜の変形特性が重要である。特に、今回の対象のように、弾性率の高い金属の表面に柔らかく材料非線形性が生じやすい PTFE 焼成膜がある場合、その被膜が接触圧にどの程度影響し、寿命がどのように変わるのかといった現象を定量的に明らかにすることが必要と考えている。ここでは、最初のアプローチとして、被膜に対して円柱を鉛直方向に押し付けた場合の被膜のひずみ分布の計測を行い、被膜の変形特性を評価した。

3.1 試験方法

試験セットアップを Fig. 5 に示す。図のように被膜に対して直径 0.6 mm の S440C の円柱を鉛直下向きに押し付け、

横からマイクロスコープによって撮像する。円柱および被膜の奥行方向の幅は 5 mm である。被膜は文献 5) に記載のバインダーがポリイミド、添加剤がポリイミドパウダー、焼成温度 230 °C のものを使用し、基板は A7075-T7351 とした。被膜の厚みは、初期の試みということもあり、有意なひずみを生じさせるために、厚いもの (100 μm) を使用した。押し付け荷重は 406 N とした。マイクロスコープによって、円柱の押し付け前後で撮影し、その 2 枚の画像を用いて DIC (Digital Image Correlation, デジタル画像相関法) によって変位およびひずみを算出した。通常、DIC では表面にランダムパターンを塗布し、その模様の変化から変位を算出するが、今回の被膜は断面に模様のようなものが存在したため、パターンを塗布せずとも変位を計測できた。

3.2 試験結果

試験結果の一例を Fig. 6 に示す。Fig. 6a は z 方向変位、Fig. 6b は z 方向垂直ひずみを示している。これらの図から、変位は円柱との接触部が最大となっており、垂直ひずみは接触面から少し内部に入った領域で最大となっており、Hertz の接触理論と比べると、最大値の場所がおおむね一致していることが示される。

定量的な評価のため、Hertz 接触理論で得られたひずみとの比較を試みた。同じ被膜に対してナノインデンテーションを 5 回行い、得られた縦弾性率を平均した結果、3.7 GPa となった。この値を用いて Hertz 接触理論から z 方向のひずみの最大値を求めた結果、0.054 mm/mm であった。Fig. 6b の計測結果が 0.058 [mm/mm] であったことから、Hertz 理論に近い結果と言える。このため、100 μm 程度の厚膜であれば、接触応力は被膜の弾性率によって決まると考えられる。

今後、試験の再現性の確認や、他の面圧、他の膜厚での試験を実施し、実際の被膜における力学状態を予測できるようにしていく。

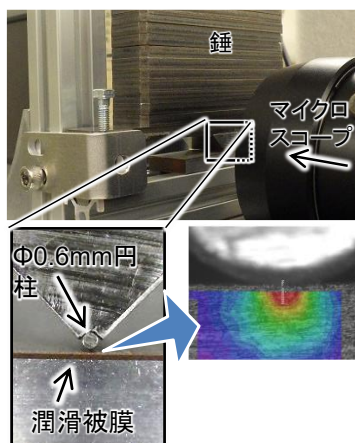


Fig. 5 Exp. setup for strain measurement

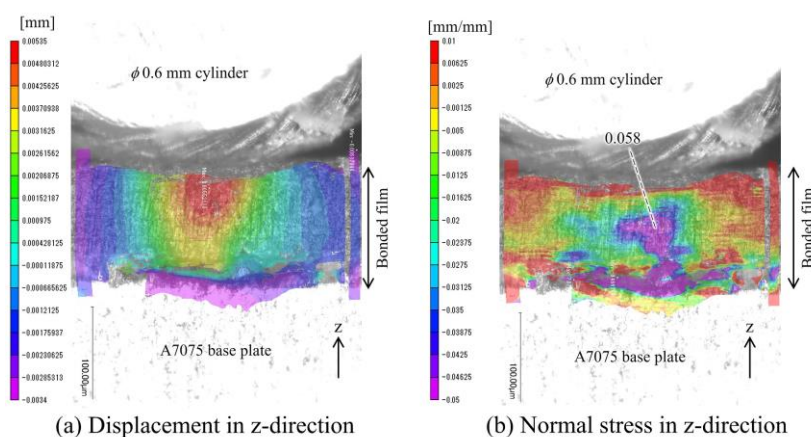


Fig. 6 Results of DIC

4. 結論

将来のサンプルリターンの機構部品に求められる、PTFE をベースとしたサンプルへのコンタミの少ない固体潤滑剤の開発と、しゅう動部の寿命予測のための潤滑被膜の変形特性を検討した。潤滑剤の開発では、サンプルリターンにおける禁止物質をほぼ使用しない潤滑剤を実現するとともに、そのトライボロジー性能が、宇宙で実績のある潤滑剤と同等かそれ以上に優れることを明らかにした。被膜の変形特性の検討では、被膜の変形の直接撮像により、ひずみ分布を計測できる見通しを得た。

文献

- 1) J. Kawaguchi, A. Fujiwara & T. Uesugi: Hayabusa—Its technology and science accomplishment summary and Hayabusa-2, *Acta Astronautica*, 62(10-11), (2008) 639-647.
- 2) Y. Kawakatsu, et al.: Preliminary Design of Martian Moons eXploration (MMX), 72nd International Astronautical Congress (IAC) Dubai, IAC-21-A3.4A.6 (2021) 1-17.
- 3) H. Sawada, H. Kato, Y. Satou, K. Yoshikawa, T. Usui, H. Sugahara, ... & T. Kuratomi: The MMX Sampler for Phobos Sample Return Mission, 2021 IEEE Aerospace Conference (2021) 1-8.
- 4) 松本康司・松岡範子・剣持伸朗・佐藤泰貴・山田和彦・川邑正広・浅川瑞生：サンプルリターン探査ミッションに対応した機構部品の潤滑設計，第 63 回宇宙科学技術連合講演会 (2018) 1-4.
- 5) K. Matsumoto, N. Kenmochi, N. Matsuoka, Y. Satou, M. Asakawa & M. Kawamura: Development of PTFE Bonded Films for Sampling Mechanisms in Space Exploration, 7th World Tribology Congress (2022).