連携記事

宇宙用固体潤滑技術について

Solid Lubrication Technology for Space

川邑正広
Masahiro Kawamura
（株）川邑研究所
代表取締役

1 はじめに

近年は衛星の商業利用が一般化しているが、一方で、技術的または学術的な目的で様々なプロジェクトが実施されている。宇宙機器の種類や機能は多岐にわたるが、その中には多種多様な駆動機構が用いられている。異なる目的の元で様々な条件下[1]で使用される部品が多く、宇宙特有の条件を考慮した潤滑技術が実用化されてきた歴史がある。宇宙機器は地上から遠く離れた宇宙空間へ向かって、大気圧から極高真空まで変化する雰囲気の中で運用され、トライボロジーにまつわる課題も多く、しゅう動部をいかに信頼性高く作動させられるかという課題が常に付いて回る。

潤滑剤に目を向けると、一般の工業用潤滑剤としては、液体の潤滑油、半固体のグリース、固体の固体潤滑剤が知られているが、いずれも宇宙用の潤滑剤として使用目的に適応した製品が開発され実用化されている。いずれの潤滑剤を用いるかは、個々の潤滑剤のもつ特性に応じて適材適所で使い分けが行われている。固体潤滑剤は油やグリースと比較すると一般的な認知度としては少し低いが、スペーストライボロジーの分野では、蒸気圧が低いという固体潤滑剤の特性が活きる場面が多いのが特徴と言える。本稿では固体潤滑剤の応用法のひとつである結合型固体被膜潤滑剤の話題を中心に、最近の取り組みを含めて紹介する。

2 固体潤滑剤

固体潤滑剤は、潤滑性を有する固体粉末を潤滑剤として応用する技術であるが、身近な生活の知恵であったり経験として利用されてきた一面もある。これまでに様々な固体潤滑剤が実用化されてきたが、コストと性能のバランスが良いということから黒鉛、二硫化モリブデン、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）が工業的に広く普及している。潤滑剤としては黒鉛の実用化が早かったが、1940年代あたりから二硫化モリブデン、そしてPTFEが普及してきた。潤滑剤としての詳細な解説は成書[2]に譲るとして、簡単に特徴をまとめると、黒鉛と二硫化モリブデンは、無機層状固体潤滑剤に分類され、板状結晶が積層したサンドイッチ構造を有する材料である。板状結晶の層間は結合力の弱いファンデルワールス力で結合しており、せん断応力が加わった際に、結合力の弱い層間ですべりが生じることで潤滑作用をするものである。一方、PTFEはテトラフルオロエチレンの重合体で、フッ素原子に覆われて表面エネルギーが低く平滑な断面形状をもつ分子鎖に由来して非常に低い摩擦係数を示す材料で、その粉末が固体潤滑剤として利用されている。

3 固体被膜潤滑法

3.1 固体被膜潤滑剤について

代表的な固体潤滑剤の応用法を表1に示した。最もシンプルな使用法は固体潤滑剤の粉末をしゅう動部に直接散布したり擦りつける（バーニッシュ法）方法である。この方法は、長期に及ぶ潤滑効果は期待できないが、簡便であることと固体潤滑剤がしゅう動面に配向しやすいため相応の効果が得られる。一方で、固体潤滑剤の効果を長寿命化するために、表面に固体潤滑剤を固定する様々な技術が開発されてきた。宇宙用途で採用されている固体潤滑の一例が表2[3]で、適用部品の条件に応じて異なる潤滑法が適材適所で使い分けられている。

使用法の一つとして結合材を用いて固体潤滑剤を被膜状にして摩擦面に固定する方法がある。結合型固体被膜潤滑剤（bonded solid film lubricant）と呼ばれるものであるが、塗料形態の潤滑剤であり、構成は結合材と固体潤滑剤等のフィラーと溶剤からなり、塗布後の乾燥工程で溶剤成分を揮発させて被膜化する。潤滑塗料、潤滑コーティングなど様々な呼び名が存在するが、中でも使用する結合材の種類により乾燥工程で熱処理を行うものを区別して焼成膜と呼ぶ。焼成

膜は、成膜に加熱を必要とする結合材を用いているのが一つの理由であるが、同時に溶剤成分を限りなく取り除けることから塗膜の機械的特性が上がり、潤滑剤としてもトライボロジー特性に優れることから宇宙用途では採用が多い。

固体被膜潤滑剤を活用する上で、その特性を理解することの大切さが各方面でまとめられている[4]が、宇宙用途を考慮してまとめると、おおよそ表3のようになる。油やグリースと比較すると扱い方が異なるので、効果的に活用するには特性を理解することが重要と思われる。

3.2 処理法

一般的な焼成膜の処理工程は表4のようになる。塗料形態の潤滑剤であることから処理工程は工業焼き付け塗装に近い。被膜組成に依るため必須ではないが、塗装後に行うバーニッシュ処理は、固体被膜潤滑剤特有と言える。固体被膜潤滑剤は不均質材料であることから、しゅう動初期に摩擦係数の変動が生じることが多いが、バーニッシュ処理は表面近傍の潤滑剤を強制的に配向させて、初期摩擦の低減や、摩擦係数安定化を短時間化する効果がある。

3.3 焼成膜の耐荷重能

固体潤滑剤は液体の潤滑剤と比較して耐荷重性が高いことが特徴で、低速高面圧条件で有効に活用されることが多い。図1はファレックス試験による二硫化モリブデン系被膜の耐荷重特性を固体潤滑、油潤滑、油併用潤滑で比較した結果である[5]。油は#320の多目的汎用油を用いたが、それぞれの荷

表1　代表的な固体潤滑剤応用法

適用法	内訳
擦り込み	固体潤滑剤粉末を擦りつけることで形成させる被膜
インピンジメント	固体潤滑粉末を高圧で打ち付ける被膜
PVD,CVD	物理蒸着、化学蒸着による被膜
めっき	金属マトリックスに固体潤滑剤を分散したメッキ膜
結合法	結合材を用いた塗料形態の被膜

表2　代表的な固体潤滑剤の適用部位[3]

固体潤滑剤	適用法	適用先	主な用途
MoS2	スパッタリング	転がり軸受の内外輪・玉	真空機器、宇宙機器
	焼成膜	歯車、ボールネジ、各種しゅう動部	真空機器、宇宙機器
	複合材	各種しゅう動部、転がり軸受の保持器、歯車	真空機器、宇宙機器
Ag, Au, Pb	イオンプレーティング	転がり軸受の内外輪・玉	真空機器、X線回転陽極
PTFE	焼成膜	転がり軸受の内外輪・玉	半導体装置
	複合材	すべり軸受、転がり軸受の保持器、各種しゅう動部	真空機器、宇宙機器
ポリイミド	複合材	転がり軸受の保持器、歯車	真空機器、宇宙機器

表3　宇宙用途における固体被膜潤滑剤の特徴

長　所	短　所
a 高温，低温，真空，高面圧環境で非常に安定している	1 液体潤滑と比較して摩擦係数が高く摩耗が多い
b 熱伝導性の高い潤滑剤を用いたものは放熱性が高い	2 高分子系の固体潤滑剤を用いると放熱性に劣る
c 耐放射線性が高い	3 潤滑剤の補給は困難で、被膜寿命は限定的
d 耐ダスト性が高い	4 色調が望み通りとならない
e 腐食環境で耐食性が高い	5 被膜膜厚を考慮したクリアランス設計が必要となる
f 低速かつ高荷重下では流体より効果がある	6 コーティングの習熟度により性能が変化する
g 保管性が高い	7 組み上がったシステムへの適用は困難
h 軽量かつシンプルな機構にできる	8 焼成膜の場合，熱処理の影響を考慮する必要がある
i メンテナンスが困難な状況下で信頼性が高い	9 個々の固体潤滑被膜の適用範囲は限定的な場合がある
j 光学特性，電気特性など潤滑以外の機能を付加できる	
k 塗布形式のため部分的な施工が容易	
l 潤滑剤の成分は多様で、様々な組成の被膜ができる	

重で摩擦試験した際の平均摩擦係数をプロットしたものである。固体潤滑剤のみでの潤滑では荷重の増加と共に摩擦係数が低下し0.02前後に落ち着いていることがわかる。一方、油潤滑は350N前後でかじりを生じるが、焼成膜と併用することでファレックス試験機の最大荷重でも潤滑できていることがわかる。ただし、高荷重領域はGPaオーダーの面圧のため潤滑油の粘弾性的な影響によって、固体潤滑よりも摩擦係数が高くなったと考えられる。油併用の使用法は、大気中では初期なじみやかじり防止の目的で一般的であるが、今後宇宙機器においても流体潤滑を行う機器の負荷が増す場合には固体被膜潤滑剤との併用の可能性も考えられる。

4 宇宙潤滑

次に焼成膜を宇宙用途で用いる際に宇宙環境特有の条件が焼成膜のトライボロジー特性にどのような影響を与えるかという点についてふれたい。

4.1 真空度の影響

潤滑剤の真空環境におけるトライボロジー特性は宇宙用途では最も重要と考えられる。図2はポリアミドイミド樹脂を結合材として30wt％の固体潤滑剤を含有した被膜を、大気中と真空中でボールオンディスク型の摩擦試験にて評価した際の摩擦係数の挙動である。試験は荷重9.8N速度0.7m/sで大気中と8.0x10-4Paの真空中で実施したものである[6]。特徴的な事象としては、黒鉛が真空中では試験直後に摩擦係数が上昇して試験が終了していることと、二硫化モリブデンは真空中で低く安定した摩擦係数を示す点である。黒鉛は試験開始と共に摩擦係数が急激に上昇して試験が終了しているが、被膜が破断している訳ではなく高摩擦で試験が終了したものである。黒鉛は活性な結晶端部にガスなどが吸着することで良好な潤滑状態が発現されるが、真空下では十分な吸着質がなく高摩擦となったと考えられる。このような性質のため黒鉛単体を固体潤滑剤として宇宙用に用いる場合は制約がある。一方、二硫化モリブデンは大気中では酸化や吸着水により摩擦係数が上昇する性質があるが、真空度が高くなると潤滑性が上がり図のように低く安定した摩擦係数を示す。PTFEに関しては、高分子材料という点で無機層状固体潤滑剤とは少々異なる特性を有する。白色で耐薬品性が高いことが大きな違いであるが、トライボロジー特性としては低荷重で低摩擦を示す一方で、耐荷重能は無機層状固体潤滑剤と比較して低い。真空特性としては、大気中と真空中の摩擦特性の差が

表4　焼成膜の標準的な処理工程

	工程	内容
1	脱脂	工作油や防錆油を除去して表面を清浄化する
2	前処理	塗膜の密着性を向上させるためにサンドブラストや化成処理による下地処理
3	塗布	エアースプレー法が一般的であるが、均質な被膜を形成させる
4	後処理	後乾燥、バーニッシュ処理にて被膜の最適化を行う
5	本焼成	焼成膜の場合は熱処理にて結合材を硬化をさせる
(6)	後加工	後加工で表面や寸法の調整を行うこともある

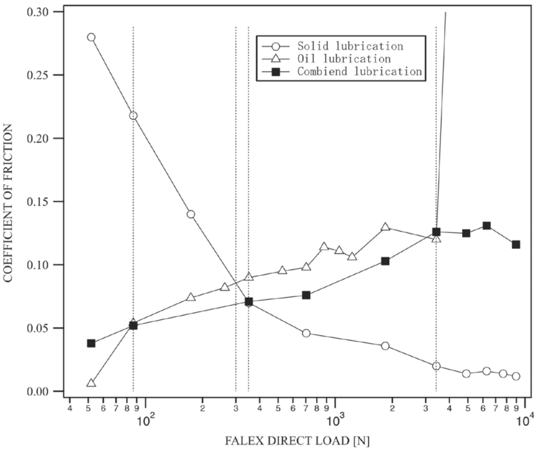


図1　各種潤滑形態における耐荷重特性の比較[5]

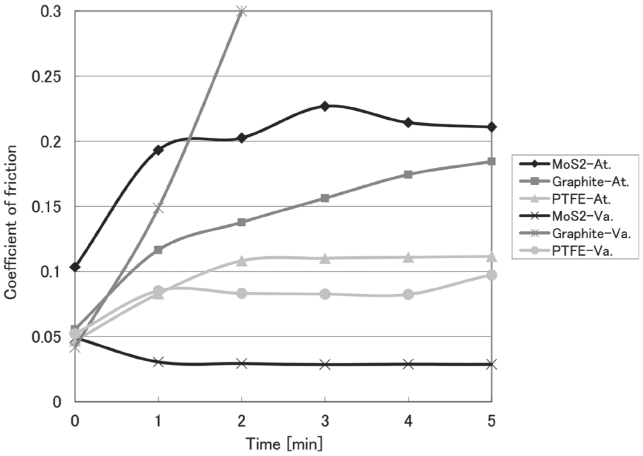


図2　代表的固体潤滑剤における摩擦係数の雰囲気依存性[6]

小さかったが、真空中の方が摩擦係数が低く寿命も長かった。

以上のような特性があることから宇宙用途では二硫化モリブデンやPTFEを活用することが多く、それらを単独または複合した被膜が多い。

4.2 温度特性

例えば月の赤道付近では温度が、昼は110℃ぐらいまで上がり、夜は-170℃ぐらいまで下がるというように、宇宙用の潤滑剤に求められる温度条件はミッションや使用目的によって異なる。固体被膜潤滑剤は比較的温度に対する許容範囲が広い材料であるが、温度特性は用いる結合材と固体潤滑剤等のフィラー成分の特性に依存するところが大きく、使用環境に適合した被膜を選択する事が必要である。低温に関して参考となるデーターとして、岩淵らは低温液体中における固体被膜潤滑剤の摩擦特性を調べている[7]。図3は雰囲気条件として液体ヘリウム、液体窒素、大気中を比較しているが、液体ヘリウム中が約1万回で被膜寿命となっている一方で、液体窒素中では試験を中断するまでしゅう動している。液体の性状や流体潤滑効果も加わっていることを加味する必要性があるものの、大気中でも徐々に摩擦係数が上昇しており被膜寿命が近いことが推定されることから、低温下で被膜が急激に劣化することはなく一定レベルの被膜性能があると結論づけている。

次に高温側についてであるが、真空中よりも酸化劣化の影響を受ける大気中の方が被膜には厳しいことが多い。一般的なポリアミドイミド一二硫化モリブデン系被膜の場合は大気中で300℃ぐらいまでは問題なく使用できるが、それ以上の温度領域の場合は組成の検討などが必要となる場合がある。300℃までの領域でも温度によりトライボロジー特性が変化するので、その点について調べた結果を紹介する。図4はポリアミドイミド一二硫化モリブデン系の被膜を、大気中で常温から300℃まで変化させて試験した際の摩擦係数の挙動を比較したものである。300℃ぐらいまでは常温よりもむしろ高温側の方が摩擦係数が低く摩擦寿命が長い傾向がある。二硫化モリブデンは摩擦下で吸着水の影響を受けることを述べたが、雰囲気温度が上がり相対湿度が下がることで吸着水の脱着がおこりトライボロジー特性が改善したと考えられる。むしろ摩擦熱により、しゅう動部の温度が一定程度上昇した方が安定している。

宇宙環境では放射線や紫外線をはじめとする様々な要因の影響を受けるが、特に曝露部分ではその影響が大きくなる傾向がある。特に高度200-500kmの低軌道環境では科学的に活性な原子状酸素や高エネルギー紫外線等による複合的な影響を受けることから、宇宙航空研究開発機構（JAXA）では国際宇宙ステーション（ISS）のロシアサービスモジュールにて材料曝露実験を実施し焼成膜の宇宙曝露の影響を地上で照射した被膜と対比して明らかにした[8]。1年および2年フライトの曝露試験片の摩擦挙動を比較した結果が図5であるが、曝露期間の増加により摩擦初期の摩擦係数が低下していることがわかる。原子状酸素により結合材が選択的にエッチングを受けること、それにより露出した二硫化モリブデンが酸化されること、紫外線によって結合材の架橋を促進した可能性が示唆されることを明らかにした。それらの複合的な影響により最表面では固体潤滑剤リッチとなり摩擦係数が低下するが、比摩耗量の増加がみられ、曝露期間の増加と共に摩耗寿命が低下する懸念があることが明らかとなった。

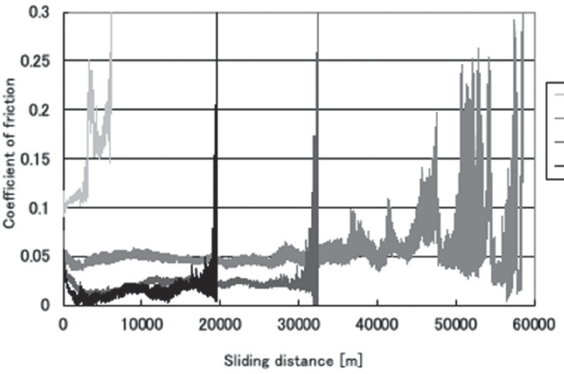


図4　焼成膜の高温特性

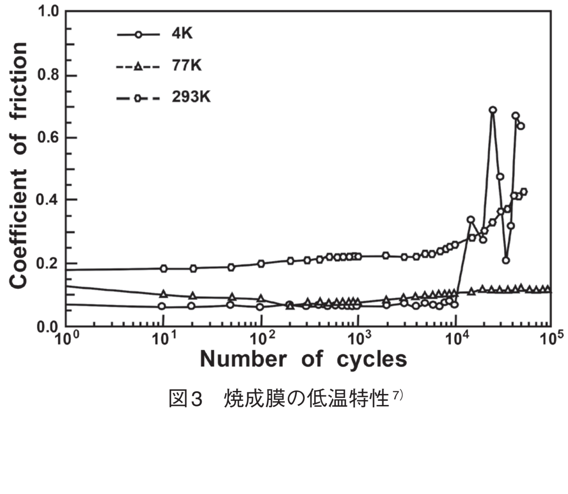


図3　焼成膜の低温特性[7]

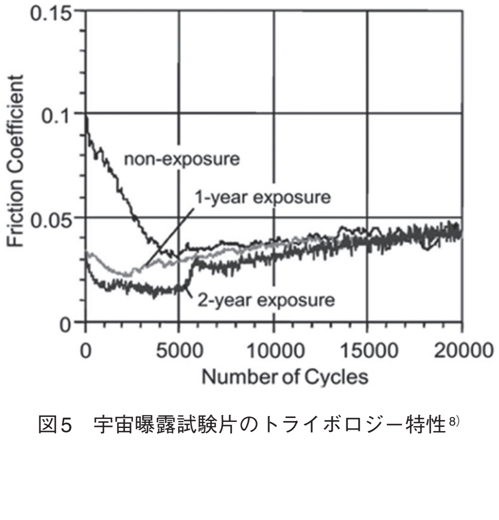


図5　宇宙曝露試験片のトライボロジー特性[8]

5 焼成膜の応用展開

最後に焼成膜の拡張性を示す応用事例を2例ほど紹介する。いずれも焼成膜が塗料形態であることを活用したものであるが、潤滑剤としてのトライボロジー特性を維持しつつ、それぞれの目的に応じた要件をみたす改良を行った事例である。

5.1 導電性ティザーへの応用

役目を終えた宇宙機器の一部は宇宙ゴミ（スペースデブリ）として宇宙空間に増加しており、宇宙環境保全の観点から、その削減が急務となっている。スペースデブリを取り除く方法のひとつとして、導電性ティザーを用いてスペースデブリを大気圏へ落下させて焼却する方法が提案され、その開発の中で導電性を有する固体被膜潤滑についての研究開発が行われた[9,10]。導電性ティザーは漁網を応用して異種金属を編んだワイヤーロープで、リール状に巻いたものを宇宙空間で放出して用いる。先端に電子を放出するエミッターを有し、長さ数キロの導電性ティザーに流れる電流によって生じるローレンツ力で軌道を低下させて大気圏に突入させる。糸巻き状に巻き取られたティザーには打ち上げ時の振動や解放時のしゅう動で金属凝着を起こすことが懸念されるため潤滑剤の適用が検討された。宇宙で実績のある焼成膜は導電性が要件を満たさないことから、新たに導電性フィラーによる改質を行った焼成膜を開発した。表5に示した候補被膜のトライボロジー特性を、ティザーを構成するステンレスとアルミ合金に対して検証した結果、図6のFilm C, Dのように良好なトライボロジー特性を示す被膜を開発した。

5.2 サンプルリターン機構用被膜

地球の起源をはじめ宇宙には解明されていない数多くの謎がある。サンプルリターンミッションは目標の天体からサンプルを採取して地球に持ち帰ることで様々な謎の解明に挑むものである。2024年には火星衛星探査計画（MMX）が計画されているが、初代はやぶさに始まったサンプルリターン

表5　試験片の成分[10]

No.	Lubricant	Binder	Additives	Volume resistivity [Ω•cm]
Film A	Graphite	Polymer	Carbon	$2.78x10^0$
Film B	MoS_2	Polymer	Graphite	
Film C	MoS_2	Polymer	Graphite, Carbon	$1.21x10^0$
Film D	MoS_2	Polymer	Graphite, Carbon, metal	$1.04x10^0$

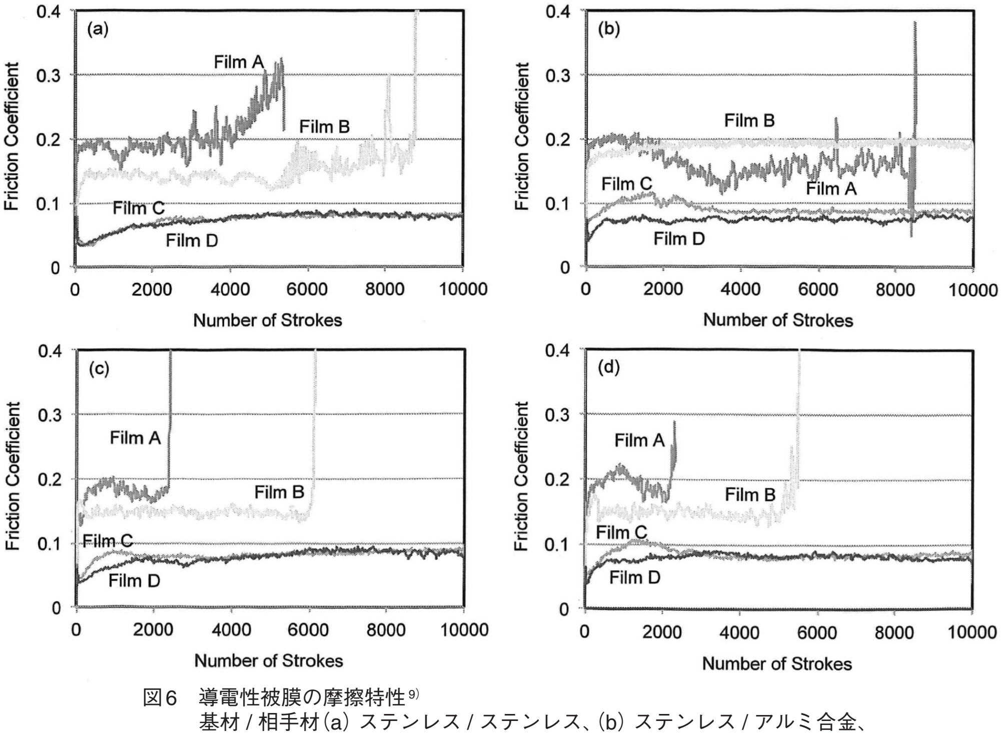
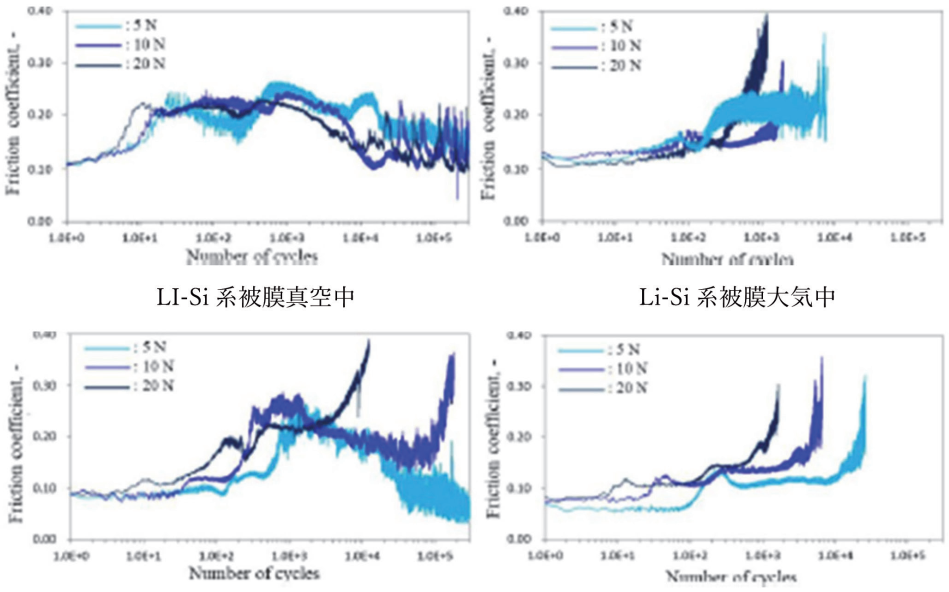


図6　導電性被膜の摩擦特性[9]
基材 / 相手材（a）ステンレス / ステンレス、（b）ステンレス / アルミ合金、（c）アルミ合金 / ステンレス、（d）アルミ合金 / アルミ合金



フッ素樹脂バインダー被膜　真空中　　フッ素樹脂バインダー被膜　大気中

図7　Li-Si系被膜とフッ素樹脂バインダー系被膜のトライボロジー特性[12]（Online version in color.）

ミッションも回数を重ねるごとに高度なミッションへと進化している。MMXではコアラー機構により目標地点の深さ方向のサンプリングが計画されていが、より多くのサンプルを持ち帰ることも目的の一つであり、機器の大型化によって駆動機構への負荷が増す傾向にある。加えて目標天体由来の物質以外はコンタミとなることから、潤滑剤の摩耗が少なく地球帰還後の解析作業に影響を与える禁止物質を含まない潤滑剤が必要とされている[11]。宇宙用途で実績のある二硫化モリブデンが禁止物質に指定されているため、限られた材料により開発要件を満たすトライボロジー特性を有する潤滑剤が必要となる。研究開発の中でリチウムシリケートないしはフッ素樹脂バインダーにPTFEを固体潤滑剤とした被膜において、図7に示したトライボロジー特性を示すことを明らかにした。大気中での被膜寿命が真空中と比較して劣るため、地上での試験に注意を要する点はあるものの、宇宙で実績のある焼成膜同等以上のトライボロジー特性を実現することを明らかにした[12]。

6 おわりに

固体潤滑剤は宇宙用の潤滑剤として広く使用されてきた。焼成膜を中心に解説を試みたが、応用しやすい潤滑剤として今後もユーザー方々の新しい着想を織り込むことで、新たな発展をするものと考えている。本稿が読者の方々にとって宇宙用の固体潤滑剤の理解の一助になれば幸いである。

参考文献

1）西村允：真空，38（1995）6，560.
2）固体潤滑ハンドブック，日本トライボロジー学会固体潤滑研究会編，（2010）.
3）鈴木峰男：J. VacSoc. Jpn.，51（2008）7，472.
4）J. V. Rensselar：TLT，65（2009）6，42.
5）M. Kawamura：ITC Yokohama，（1995）1199.
6）川邑正広：真空ジャーナル，146（2013）20.
7）岩淵明，新井治彦，清水友治，吉田清，杉本誠：トライボロジー会議東京予稿集，（1993）469.
8）松本康司，秋山正雄，田川雅人:J. VacSoc. Jpn.，51（2008）8，554.
9）松本康司，塩見裕，河本聡美，大川恭志，川邑正広：第10回固体潤滑シンポジウム予稿集，（2014）61.
10）松本康司，河本聡美：トライボロジスト，61（2016）3，173.
11）松本康司，松岡範子，劔持伸朗，佐藤泰貴，山田和彦，川邑正広，浅川瑞生：第63回宇宙科学技術連合講演会，3I04（2019）.
12）佐藤泰貴，松本康司，前田康博，石村康生，松岡範子，劔持伸朗，菅原春菜，臼井寛裕，浅川瑞生，川邑正広：トライボロジー会議福井予稿集，（2022），452.

（2022年12月6日受付）