

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

種々のMoS₂焼成膜の各条件下でのトライボロジー特性

松本 康司, 鈴木 峰男, 野木 高, 青木 由雄, 川邑 正広

2008年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

種々の MoS₂ 焼成膜の各条件下でのトライボロジー特性^{*}

松本 康司^{*1}, 鈴木 峰男^{*1}, 野木 高^{*1}, 青木 由雄^{*2}, 川邑 正広^{*3}

Tribological Characteristics of Several Bonded MoS₂ Films under Various Conditions^{*}

Koji MATSUMOTO^{*1}, Mineo SUZUKI^{*1}, Takashi NOGI^{*1}, Yoshio AOKI^{*2}
and Masahiro KAWAMURA^{*3}

Abstract

Pin-on-disk friction tests were carried out for bonded MoS₂ films with various binder materials. Tribological characteristics of the MoS₂ films were evaluated at high temperature in vacuum, under several contact pressure and under a few combinations of substrate and counterpart material. Roll/slide friction tests were also performed for a bonded MoS₂ film with organic binder. Significant data in tribological properties and maps of wear life against temperature and contact pressure were obtained. The data and the map will be utilized to design mechanical component having sliding surfaces.

Keywords: MoS₂, Bonded film, Vacuum, Substrate, High temperature, Contact pressure

要旨

ますます多様化する宇宙での活動において、二硫化モリブデン (MoS₂) 焼成膜を潤滑剤として使用するにあたっての設計指針とするため、結合材等を変えた数種の被膜に対して、様々な環境・条件下でのトライボロジー特性評価を行った。基板材料をステンレスとチタン合金とした場合の試験を行い、下地材・相手材の違いに伴うトライボロジー特性の変化が把握できた。また、面圧および真空中での試料温度を常温から 400℃まで変化させて摩擦試験を行い、宇宙用の機械機構のしゅう動面設計に有効に活用できる、温度・面圧をパラメータとした寿命マップの作成を行った。

^{*} 原稿受付：2008 年 3 月 3 日 (Received 3 March, 2008)

^{*1} 総合技術研究本部 宇宙先進技術研究グループ (Advanced Space Technology Research Group, Institute of Aerospace Technology)

^{*2} 元 総合技術研究本部 宇宙先進技術研究グループ (Former, Advanced Space Technology Research Group, Institute of Aerospace Technology)

^{*3} 川邑研究所 (Kawamura Res. Lab., Inc)

1. はじめに

二硫化モリブデン (MoS_2) 被膜は、真空中で優れたトライボロジー特性を示すことから宇宙用の固体潤滑剤として広く使われている。宇宙用としては、スパッタリング法で製作される膜が厚さ $1\ \mu\text{m}$ 程度と薄くても耐久性がすぐれることからもっぱら転がり軸受に採用されているのに対し、 MoS_2 を結合材、添加剤と混合し、スプレー等によりコーティング後、高温で乾燥させて成膜する MoS_2 焼成膜は、膜厚が $10\ \mu\text{m}$ 程度と厚く長寿命が期待できることから、歯車、ボールネジ、すべり軸受等のしゅう動部に多用されている。

MoS_2 焼成膜は、その結合材の種類や乾燥する温度、下地材の表面処理方法等によってトライボロジー特性は大きく異なる。しかし、焼成膜の作成条件の詳細に立ち入った系統的な研究報告はほとんど公表されていない。既に民生用として確立された技術であり、製膜条件、下地処理、焼成条件などが製膜メーカーのノウハウとして蓄積されているためと思われる。ただし、機械要素レベル、摩擦試験レベルで MoS_2 焼成膜のトライボロジー特性を評価した結果は多数報告されている。これらの報告では、どの焼成膜を評価したのか具体的に、例えば商品名等で示されていないケースがほとんどであり、直接的に結果を比較することが難しい。このため、本報告ではこれらの報告を本文で引用することを避け、参考情報として、付録に国内の学会等で公表された MoS_2 焼成膜に関する論文リストを付した。

今後、宇宙での活動は更なる多様化が進み、 MoS_2 焼成膜をはじめとする固体潤滑剤には単に真空だけでなく、様々な環境において機能の健全性と信頼性が求められる。例えば、低地球軌道における原子状酸素や紫外線に対しても優れた特性を維持する必要がある。また、再使用宇宙機の再突入時の駆動部などでは、真空高温下で使用可能な潤滑剤が求められている。 MoS_2 膜については、高温ではその特性が大きく劣化するが、結合材を用いる MoS_2 系焼成膜については、その結合材の種類によって高温でのトライボロジー特性も大きく変わると考えられる。

宇宙用の駆動機構では軽量化のため、構造材として

チタン合金などが採用される場合が多いが、 MoS_2 被膜のトライボロジー特性は、これまでもっぱらステンレス鋼を下地とした場合についてデータが取得され、チタン合金を下地とした場合のデータはあまり蓄積されていない。

本研究では、既存の MoS_2 焼成膜が高温でどの程度使用できるのかのデータを取得するため、真空高温下でのトライボロジー特性を調べた。結合材や添加剤によってトライボロジー特性がどのように異なるのかを調べるため、結合材や添加剤の違う数種の MoS_2 系焼成膜を試験被膜とした。また、下地材や相手材を変えて、その影響を調べた。さらに面圧と温度を変化させて取得した寿命データから、温度－面圧をパラメータとして寿命マップを作成した。さらに、ころがり／すべり摩擦試験を行い、すべり率、面圧の影響を調べた。

2. 試料, 実験装置, 実験方法

2.1 試験被膜

結合材や添加剤を変えた数種の MoS_2 系焼成膜についてトライボロジー特性評価を行った。試験した被膜は、有機系結合材の被膜2種（被膜A、被膜B）と無機系結合材の被膜2種（被膜C、被膜D）の計4種類である。各被膜の結合材と潤滑剤の種類を表2.1.1に示す。被膜Aは、実際に宇宙用として使われている被膜である。結合材にはポリアミドイミドを用いており、その割合は約65%である。被膜Bは、被膜Aのトライボロジー特性の向上を目指して被膜Aにグラファイトが添加されている。被膜C、Dについては、高温におけるトライボロジー特性の向上を期待して、結合材として無機材料である珪酸ソーダ、リン酸塩を使ったものを選択した。

被膜は、標準の下地処理を行った後にスプレーにより塗膜し、焼成炉で焼付け処理を行った。焼付け温度は各結合材に応じて $190 \sim 250^\circ\text{C}$ である。膜厚はどの被膜も $10 \sim 15\ \mu\text{m}$ である。

下地材、相手材はステンレス鋼 (SUS440C)、チタン合金 (Ti-6Al-4V) の2種である。試験被膜のトライボロジー特性は、ピン／ディスク摩擦試験及びころがり／すべり摩擦試験により評価した。

表2.1.1 試験被膜の組成

	潤滑剤	結合材
被膜A	MoS_2	ポリアミドイミド
被膜B	MoS_2 + グラファイト	ポリアミドイミド
被膜C	MoS_2	ケイ酸塩
被膜D	MoS_2	リン酸塩

2.2 ピン／ディスク摩擦試験

真空中で温度を変えてピン／ディスクタイプの摩擦試験を行った。試験の概要を図 2.2.1、表 2.2.1 に示す。

ピン／ディスク摩擦試験に用いた円板試験片は、直径 45 mm、厚さ 8 mm で、中心には試験機取付けのために直径 8 mm の孔を設けてある。被膜は円板試験片にのみ施した。下地が SUS440C の場合の試験には、相手材として SUS440C 製の直径 ϕ 7.94 mm のボールを用い、荷重 20 N、すべり速度 0.5 m/s の条件で試験を行った。下地が Ti-6Al-4V の場合には、面圧を変化させるため、Ti-6Al-4V 製の直径 ϕ 7.94 mm、 ϕ 5 mm のボール、先端を R50 に加工したピンを用い、荷重 20 N または 10 N、すべり速度 0.5 m/s の条件で試験を行った。相手材質の影響を調べるため、SUS440C 製の直径 ϕ 7.94 mm のボールを用いた試験も行った。いずれの下地の場合も、試験温度は常温～400℃である。

試験では、試験片を取り付けた後、まず真空槽内を約 $1 \sim 5 \times 10^{-5}$ Pa までターボ分子ポンプにより真空引きした。ついで、円板試験片周辺に設置したモリブデンヒーターを使って試験温度まで試料を加熱した。本研究では、試験温度は円板試験片の温度とした。静止状態で加熱した予備試験で、円板試験片に挿入した熱電対とヒ

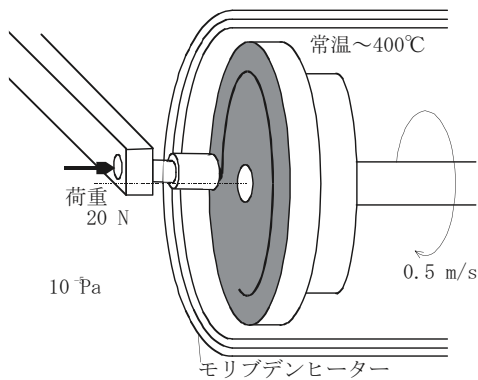


図2.2.1 ピン／ディスク摩擦試験概要

表2.2.1 ピン／ディスク摩擦試験条件

荷重	20 N (10 N)
速度	0.5 m/s
圧力	$\times 10^{-5}$ Pa
温度	常温～400 °C
ディスク材料	SUS440C, Ti-6Al-4V
ピン材料	SUS440C, Ti-6Al-4V

ータ取付治具に取り付けた熱電対の温度の関係を把握し、実際の摩擦試験では、円板試験片の温度が試験温度になるようにヒータ取付治具の温度を設定した。なお、試験部を囲むように石英ガラス管を設置しており、その外部からヒータ加熱することにより、ヒータからのアウトガスで試験部が汚染されないように配慮している。また、同一ディスクを用いて摩擦半径を変えて数回の試験を行ったが、その場合には低い温度から試験を行い、加熱による被膜の変質があったとしても試験結果に影響がないように配慮した。

温度が十分に安定した後、回転を開始し、真空槽外部から重錘により荷重を負荷することにより試験を開始した。試験は、摩擦係数が 0.3 を越えた時点を被膜の寿命とし、寿命に至るまで試験を続行した。また、一部の試験では、加熱開始時から Q マスによるアウトガスの測定も行った。試験時の真空度は、高温の場合でも 10^{-5} Pa 台であった。

2.3 ころがり／すべり摩擦試験

真空中ですべり率を変え、ころがり／すべり摩擦試験を行った。本試験では、被膜 A のみを評価し、試験は常温で行った。試験機の概略、試験片の形状、試験条件をそれぞれ図 2.3.1、表 2.3.1 に示す。

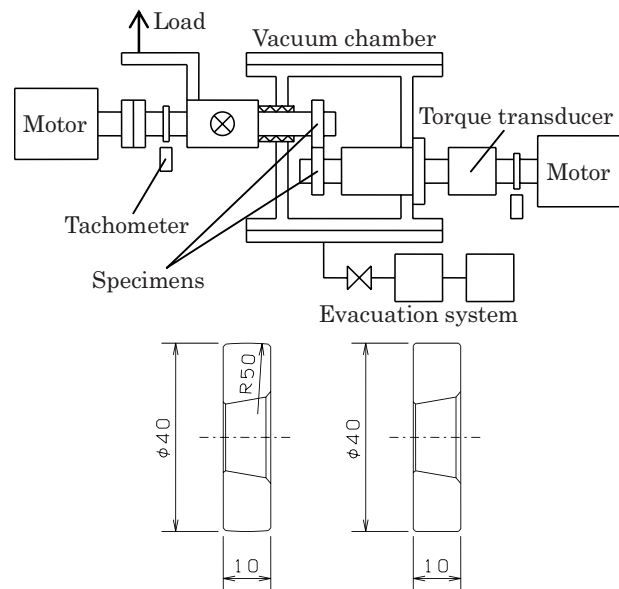


図2.3.1 ころがり／すべり試験機の概略、試験片の形状

表2.3.1 ころがり／すべり試験条件

Substrate	SUS440C	Ti6Al4V
p, GPa (W, N)	1.2 (250) 0.86 (100)	0.78 (250) 0.65 (100)
ω_F , rpm	240	
ω_R , rpm	238, 235, 228, 216, 192, 144, 48.0	

ころがり／すべり摩擦試験に用いた試験片は、直径 40 mm、厚さ 10 mm で、中心には試験機取付けのためのテーパ孔を設けてある。所定の面圧で片当たりなく接触させるため、一方の試験片は円筒型、もう一方は R50 の曲率をもつ樽型形状である。被膜は両試験片に施した。下地材は SUS440C、Ti-6Al-4V の 2 種である。

試験では、試験片を取り付けた後に真空槽内を 10^{-5} Pa 台までターボ分子ポンプにより真空引きし、ついで両試験片の回転を開始した。計測されたトルクには回転軸に設置された磁性流体シールの摩擦が含まれるため、この摩擦が安定した値を示すまで（約 1 時間程度）回転させた後に、真空槽外から重錘により荷重を加えて摩擦試験を開始した。円筒型試験片は 240 rpm 一定で回転させ、樽型形状試験片の回転数を 0 ～ 238 rpm に変化させ、所定のスリップ率で試験した。試験条件を示した表 2.3.1 で、 p は被膜を無視したヘルツ最大圧力、 W は荷重、 ω_F と ω_R はそれぞれ円筒形 (F) と樽形 (R) 試験片の回転速度である。すべり率 s は

$$s = (\omega_F - \omega_R) / \omega_F$$

と定義した。

試験中の真空圧力は 10^{-5} Pa 台であった。試験は、摩擦係数が 0.15 を超えた時点を寿命とし、寿命に至るまで試験した。 $s=2\%$ の場合は寿命に至る以前に試験を中断し、摩擦面の観察と触針式粗さ計による断面形状の測定を行った。

3. 試験結果及び考察

3.1 ピン／ディスク摩擦試験 (SUS440C)

－被膜種、温度の影響－⁴⁾

各被膜の常温～400℃における摩擦係数の推移を図 3.1.1 ～ 3.1.4 に示す。どの被膜についても、常温では低く安定した値を示したのに対し、温度が高い試験では、試験開始直後に上昇が見られた。200℃では、再度低くなり安定したのに対し、400℃では、そのまま、または低下後すぐに急上昇して寿命に至った。常温、200℃では被膜 A と B で同程度の摩擦係数であった。400℃の試験では被膜 B は被膜 A よりも低い値を示した。被膜 A、B 両被膜とも、どの温度でも摩擦係数が急に上昇して寿命に至った。被膜 C では、安定時の摩擦係数は被膜 A と同程度であった。常温及び 200℃の試験では寿命に至るかなり前から摩擦係数が上昇をはじめた。試験中に回転速度を遅くしても摩擦係数は 0.3 を越えず、部分的に摩擦係数が高くなっていることが分かった。被膜 D の高温の試験でもかなり前から摩擦係数が上昇し始めるが、試料の表面一様に摩擦係数が高くなっていった。

各被膜の温度に対する寿命の変化を図 3.1.5 に示す。宇宙用として使われている被膜 A は、100℃では常温と

同程度の寿命を示した。150 ～ 200℃で常温より 1 桁程長くなり最大となったが、その後は温度とともに短くなった。300℃では常温と同程度、400℃では常温より 1 桁ほど短かった。他の被膜でも同様に 100 ～ 200℃で、寿命のピークが見られた。グラファイトを添加した被膜 B は、被膜 A に比べて 300、400℃の高温で寿命の改善が見られた。被膜 C は、常温～300℃で他の被膜より長い寿命を示した。400℃では被膜 B、C、D で同程度の寿命であったが、被膜 A より長くなった。結合材を変えたり、添加剤を添加することによって、従来の被膜 A に比べて高温で長寿命を得られることがわかった。

寿命のピークは以前の荷重を変化させた研究などでも報告されている。本試験の結果からも温度の上昇による影響である可能性が高い。ポリアミドイミドを結合材に用いた被膜 A、B はほぼ同じ温度で寿命のピークが見られたが、被膜 C のピークは異なった温度であった。結合材が寿命のピークに影響を与えていると考えられるが、100 ～ 200℃で寿命が長くなるメカニズムについてははっきりと分かっておらず、今後、詳細な検討が必要である。

真空中で高温に曝されることによって、寿命が短くなった理由を調べるため、400℃で試験した試料と未試験の試料に対して、光学顕微鏡による観察とナノインデントによる微小押し込み硬さ測定を行い、被膜の表面形態及び機械的性質がどのように変化しているかを調べた。硬さ測定は顕微鏡で観察して比較的平らだと思われる箇所を選び、全 20 点測定し、最大と最小を除いた 18 点の平均をとった。被膜 A と C の表面の写真及び硬さ測定の結果を図 3.1.6、3.1.7、表 3.1.1 に示す。表面の写真からは、被膜 A、C とともに高温に曝したことによる大きな変化は見られなかった。被膜 C については、ぶつぶつと穴の空いたような表面が、若干なだらかになったようにも見える。硬さについては、今回測定した箇所については、有機結合材を用いている被膜 A は、温度の上昇により硬くなり、無機結合材の被膜 C は柔らかくなっていた。

400℃で試験した被膜については、数時間 400℃の高温に曝されており、400℃で焼き付けしたのと同等の効果があつたのではないかと考えられる。焼き付け温度によって、トライボロジー特性にどのような影響が出るかを調べるため、400℃で試験した被膜について、再度、常温での試験を行った。被膜 C について試験を行ったところ、高温に曝す前とほぼ同じ寿命が得られ、硬さが低くなった影響、焼き付け温度の影響は明確には分からなかった。被膜 C では、高温真空中に曝したことによる、トライボロジー特性へ及ぼす不可逆的な変化は、さほど大きくないという結果になった。

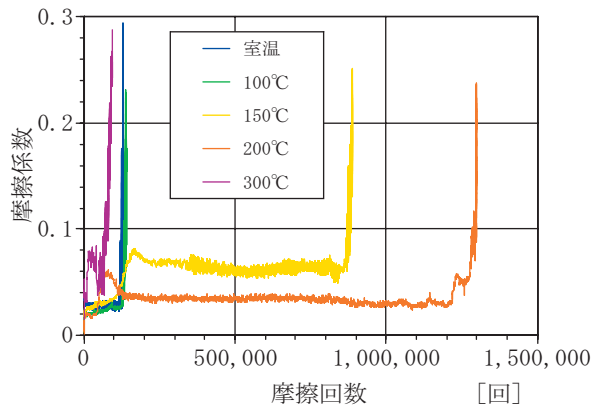


図3.1.1 摩擦係数の推移(被膜A, ピン,ディスク:SUS440C)

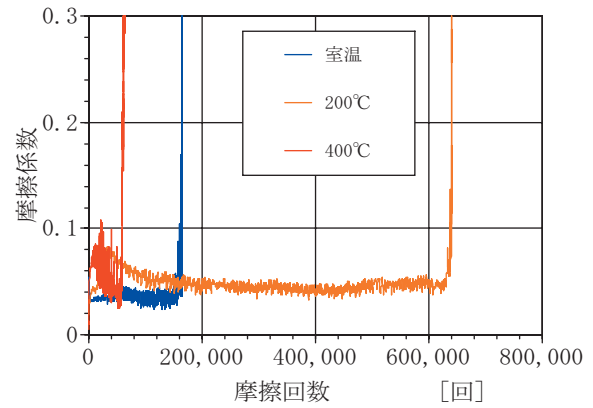


図3.1.2 摩擦係数の推移(被膜B, ピン,ディスク:SUS440C)

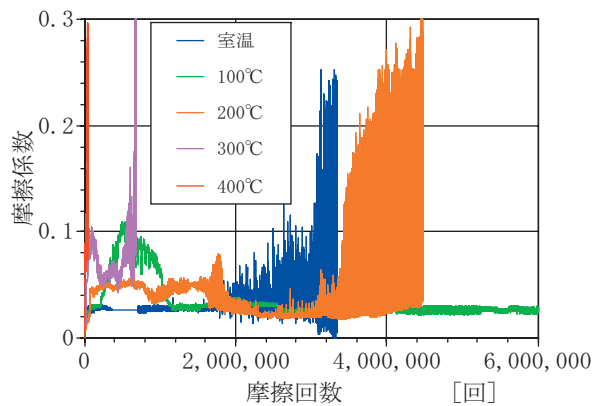


図3.1.3 摩擦係数の推移(被膜C, ピン,ディスク:SUS440C)

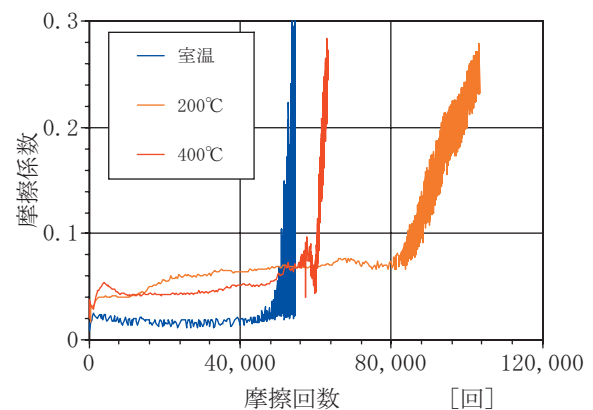


図3.1.4 摩擦係数の推移(被膜D, ピン,ディスク:SUS440C)

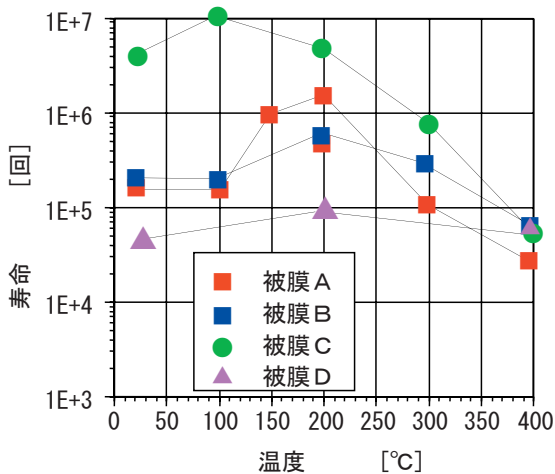


図3.1.5 真空中における温度変化にともなう被膜寿命の変化

高温に曝されたことによる不可逆的な変化だけでなく、高温に曝されている最中の特性変化を調べるために、真空中高温で観察可能な走査プローブ顕微鏡のAFMの機能を用いて、微小荷重での摩擦後、摩耗痕の観察を行った。試験室を約 5×10^{-5} Pa まで真空引きし、常温の時と加熱試料台が 300°C で安定した後に摩擦を行った。この時の試料表面の観察部近傍の温度は約 200°C であっ

た。走査範囲は $10 \times 10 \mu\text{m}$ 、荷重は 4 μN で、24 回スキャンした。被膜Aの常温と高温での摩耗痕のAFM観察結果及び断面形状を図 3.1.8 に示す。常温、高温とも 400 ~ 500nm の深さまで摩耗しており、温度による大きな差異は見られなかった。温度が上昇しても、被膜の最表面の摩耗率は大きく変化しないことが分かった。

400°C まで加熱した高温の試験での圧力の推移を図 3.1.9 に、被膜AとCのアウトガススペクトルを図 3.1.10 に示す。どの被膜も常温でも高温でも、摩擦による顕著なアウトガスの発生は見られなかった。加熱開始とともに各被膜で圧力の上昇が見られた。特に被膜Aではアウトガスが多く、溶剤の残留成分と思われるスペクトルが検出された。試験した被膜の中では、被膜Cのアウトガスが最も少なかった。

3.2 ピン/ディスク摩擦試験(下地 Ti-6Al-4V)

- 温度、面圧の影響⁻⁵⁾

宇宙用部品では、軽量化のためしゅう動部をもつ部位にもチタン合金が採用されるケースが多い。しかし、チタン合金を下地材とした場合の MoS₂ 焼成膜のトライボロジー特性に関するデータの報告例が少ない。そこで

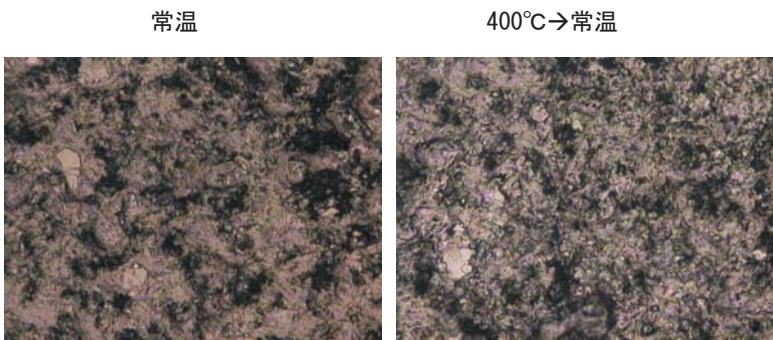


図3.1.6 被膜表面の光学顕微鏡写真(被膜A)

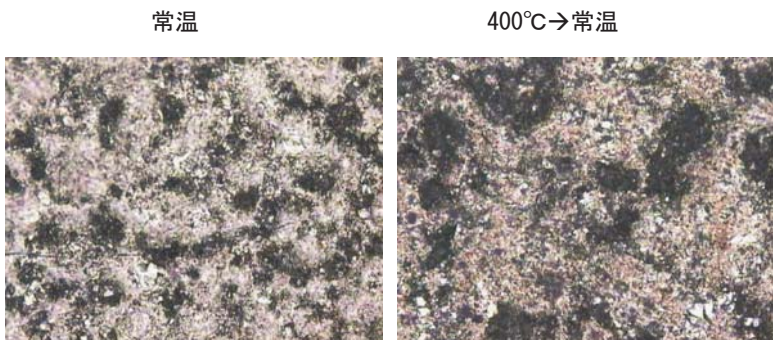


図3.1.7 被膜表面の光学顕微鏡写真(被膜C)

被膜 A

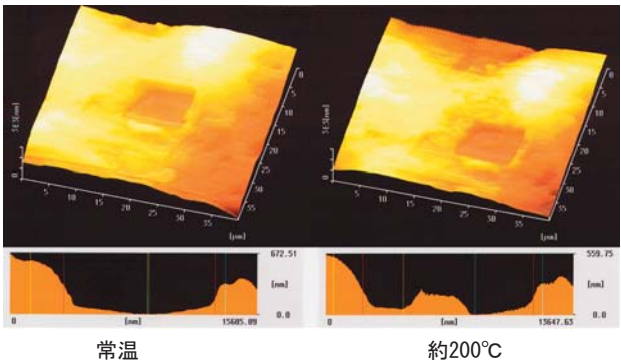


表3.1.1 被膜の硬さ [mgf/μm²]

	常温	400℃→常温
被膜 A	38.2	62.8
被膜 C	28.0	10.9

図3.1.8 AFMによるマイクロ摩擦試験

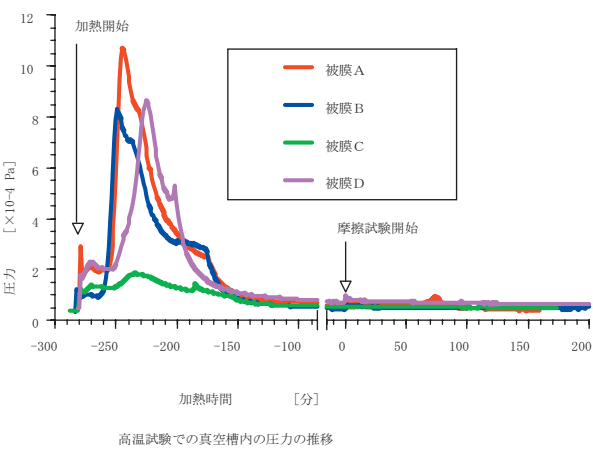


図3.1.9 高温試験での真空槽内の圧力の推移

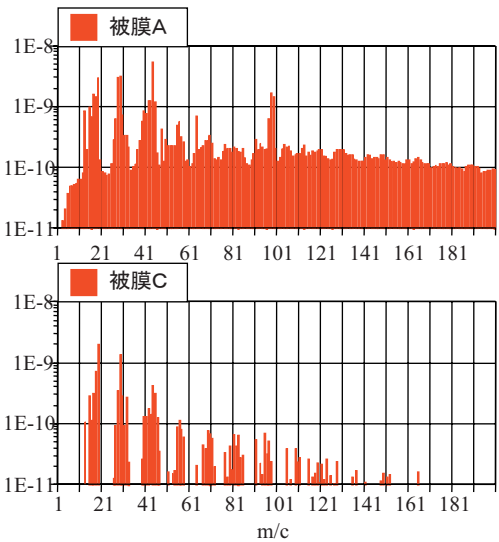


図3.1.10 アウトガススペクトル

本節では、SUS440C を下地材とした 3.1 節での試験で長寿命が得られた被膜 A、被膜 C の 2 種の MoS₂ 系焼成膜について、チタン合金を下地材、相手材とし、トライボロジー特性に大きな影響を及ぼすと考えられる温度と面圧を変化させて摩擦試験を行った結果について述べる。変化させた温度は、常温、100℃、200℃、300℃、400℃の 5 水準、面圧は 0.18 GPa、0.79 GPa、0.99 GPa、1.35 GPa の 4 水準で、各被膜について合計 20 条件で試験を行った。なお、面圧は被膜がないとした場合の計算値であり、被膜があることにより初期面圧は低くなること、摩擦にともない摩耗が進むことにより実際の面圧は相当低下していくことに留意する必要がある。

3.2.1 被膜 A

図 3.2.1 に、Ti-6Al-4V を相手摩擦材とした場合の被膜 A の寿命への温度と面圧の影響を示す。温度の影響を見ると、どの面圧の試験においても 200℃までは寿命の劣化は見られず、100℃または 200℃で最長の寿命を示した。200℃から 400℃までは温度の上昇にともない寿命低下が見られたが、寿命の低下は一桁レベルに留まった。一方、面圧については、どの温度においても、面圧の増大にともない寿命が大きく低下した。被膜 A の寿命特性は、温度に関しては比較的鈍感であるのに対し、面圧が大きく影響するという結果が得られた。

図 3.2.2 ～図 3.2.4 に、面圧が 0.18 GPa の場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状を示す。本試験では、相手摩擦材は先端を R50 としたピン材である。図 3.2.2 の摩擦係数の推移を見ると、いずれの試験温度でも、摩擦係数は初期に 0.1 以上まで上昇した後に 0.05 程度まで低下し、最終的に急上昇して寿命に至るといった経過をたどっている。常温～200℃の試験では摩擦係数が 0.05 程度まで低下していた時間が比較的長いのに対し、300℃、400℃の試験では摩擦係数が低下した直後に再び急増したことが寿命低下につながっ

ていることがわかる。また、100℃の試験では初期の摩擦係数が 0.1 以上を示した期間が長かったため結果的に寿命増大となったようにも見える結果である。

図 3.2.3 は、試験後のピンおよびディスクの摩擦面の顕微鏡写真である。いずれの温度の試験でもピン摩耗痕は 1 ～ 2 mm 程度と大きく、試験中に実際の面圧がかなり低下していたことが窺える。一方、ディスク側は一部に筋状の摩耗痕が明瞭に見られ、局部的な被膜破断が摩擦の増大となり寿命に至ったものと推定される。図 3.2.4 は、試験後のピンおよびディスクの摩擦部の形状である。被膜が下地まで摩耗したと思われる凹部が一部に見られた。

図 3.2.5 ～図 3.2.7 に、面圧が 0.79 GPa の場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状を示す。この試験では、相手摩擦材は直径 7.93 mm の玉で、荷重が 10 N である。図 3.2.5 の摩擦係数の推移では、下段に横軸を拡大した図を示してある。摩擦係数は、常温の試験では 0.05 程度を示したが、100℃以上の試験では 0.1 程度であった。面圧 0.18 GPa の試験のように摩擦に伴い摩擦係数が低下する現象は見られなかった。図 3.2.6 の摩擦面の顕微鏡写真に見られるように、摩耗痕は面圧 0.18 GPa のピンを用いた試験に比べかなり小さい。摩擦に伴う摩耗により面圧が低下する度合いが少ないために摩擦係数の推移に相違が現れた可能性がある。ボールの摩耗痕には移着膜が認められ、ディスク側には筋状の摩耗痕が見られる。試験温度による相違はあまり明確ではなかった。図 3.2.7 の摩耗痕形状では、ディスクの被膜が下地まで摩耗していたことが確認される。

面圧 0.79 GPa の試験では、100℃での寿命が予想よりも短かった（試験番号 5-3）ため、追試を行った（試験番号 7-1）。その結果、図 3.2.5 にみられるように、寿命は約 30 倍を示した。図 3.2.6 の摩擦面の状態を比べても、このような大きな相違の要因は見あたらない。

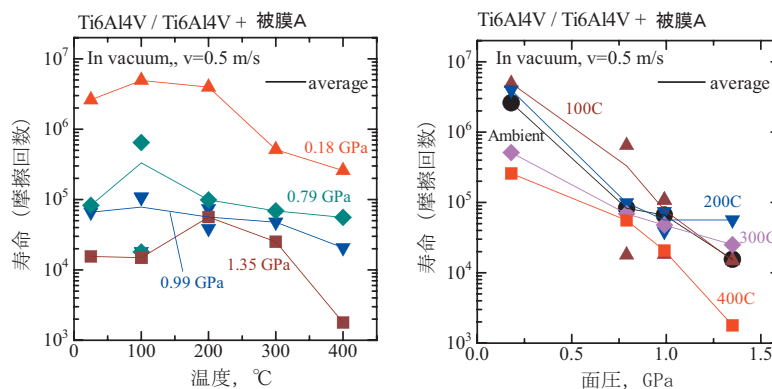


図3.2.1 被膜Aの寿命に及ぼす温度、面圧の影響

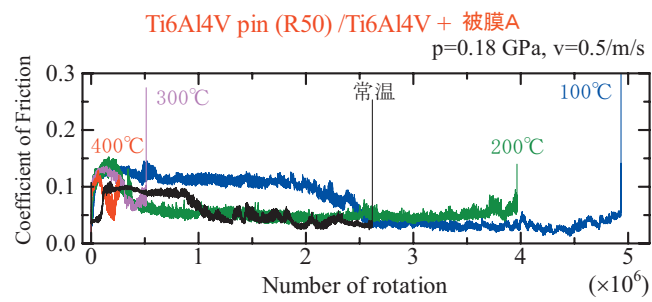


図3.2.2 摩擦係数の推移(被膜A, 面圧0.18GPa)

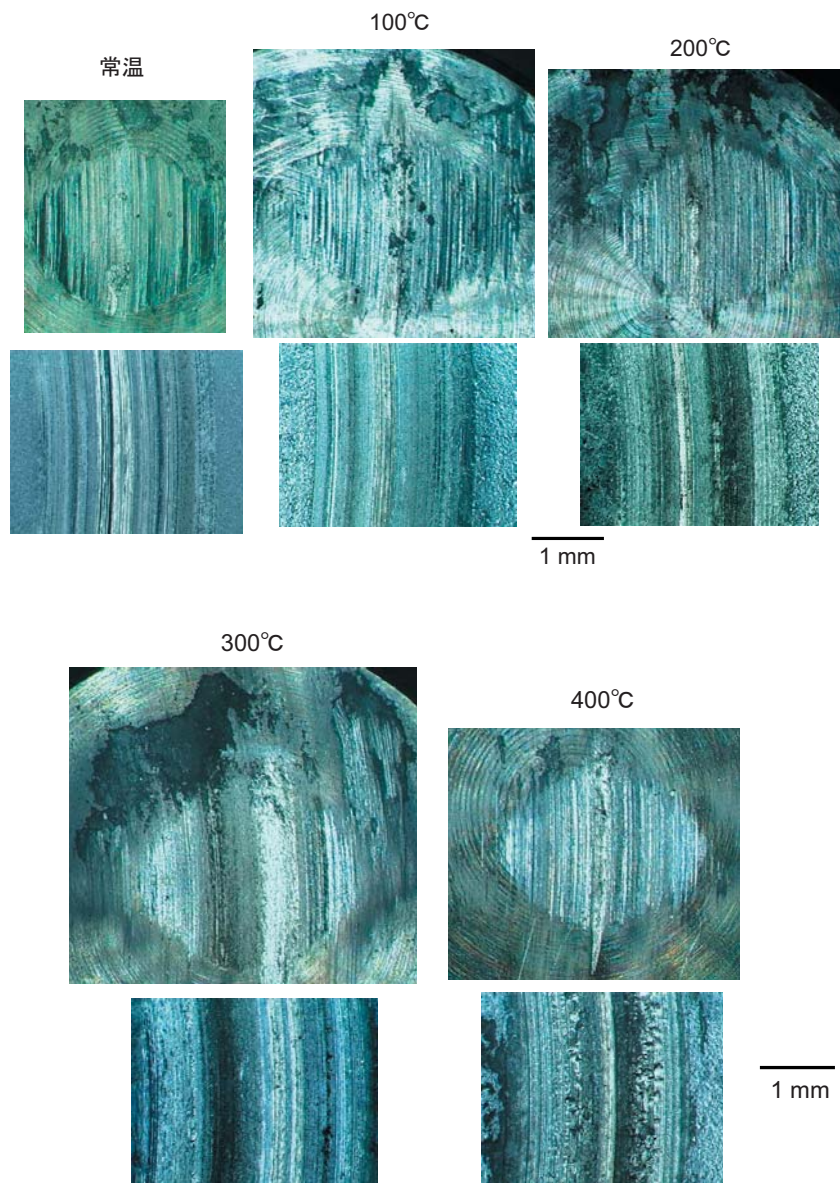


図3.2.3 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜A, 面圧0.18GPa)

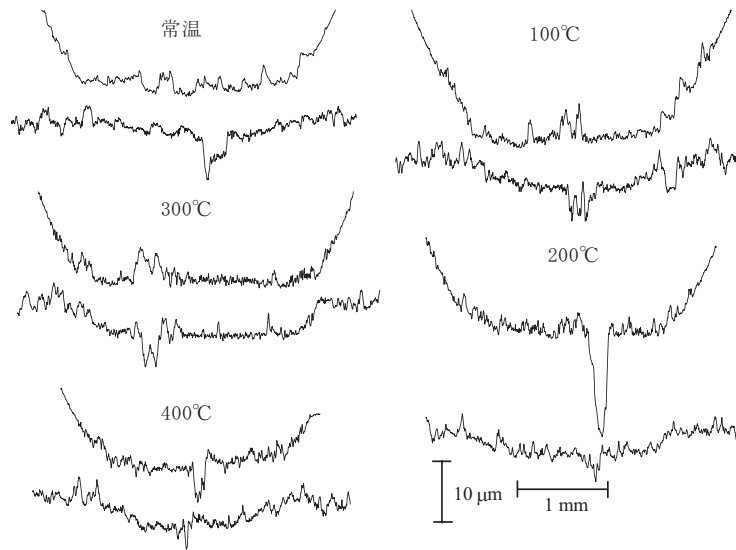


図3.2.4 試験後のピン、ディスクの摩耗形状(被膜A, 面圧0.18GPa)

ただし、図 3.2.7 の摩耗痕形状では、寿命が長い場合には摩耗痕部が一様に下地まで摩耗している。摩擦初期にボール側に良好な移着膜が形成され、被膜の摩耗が軽減され、かつ局所的な摩耗が発生しなかったため長寿命になったものと思われる。

図 3.2.8 ～ 図 3.2.10 は、面圧が 0.99 GPa の場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状である。この試験では、相手摩擦材は面圧 0.79 GPa の試験と同じ直径 7.93 mm の玉で、荷重を 20 N とした。寿命の再現性をみるため、100°C で 3 回、200°C で 2 回の試験を行った。図 3.2.8 の摩擦係数の推移をみると、常温の場合は摩擦係数が 0.05 程度、200°C 以上では 0.1 程度であるのに対し、100°C では 0.05 程度で推移する場合

と 0.1 程度まで上昇して推移する場合の両方の現象が現れた。また寿命のばらつきも 100°C で大きかった。摩擦・摩耗のメカニズムが 100°C 付近で変化することが想定されるが、その要因は不明である。MoS₂ は水分の影響を大きく受けるが、超高真空中での試験であり水分の蒸発温度とは直接関係がない。水分の吸着が関係している可能性があるが、この点についてはさらに検討が必要である。図 3.2.9 に示した試験後の摩擦面は、面圧が 0.79 GPa の場合と相違はなく、ボールの摩耗痕に移着膜が認められ、ディスク側には筋状の摩耗痕が見られた。図 3.2.10 の摩耗痕形状でも、ディスクの被膜が下地まで摩耗していたことが確認され、また同じ条件で寿命が長い場合には、摩耗痕部が一様に下地まで摩耗していることも面圧

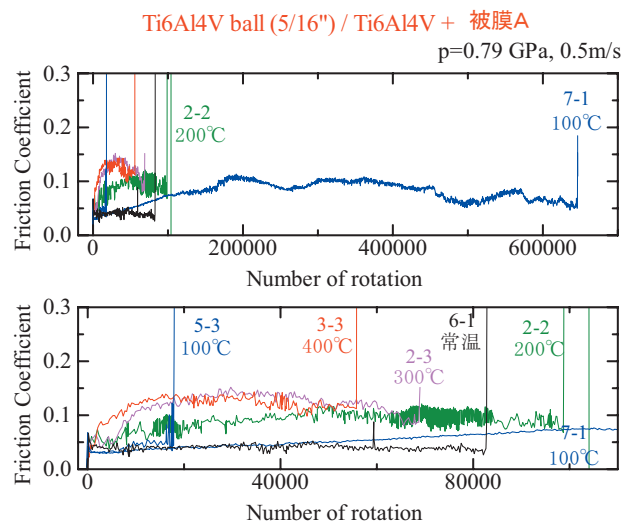


図3.2.5 摩擦係数の推移(被膜A, 面圧0.79GPa)

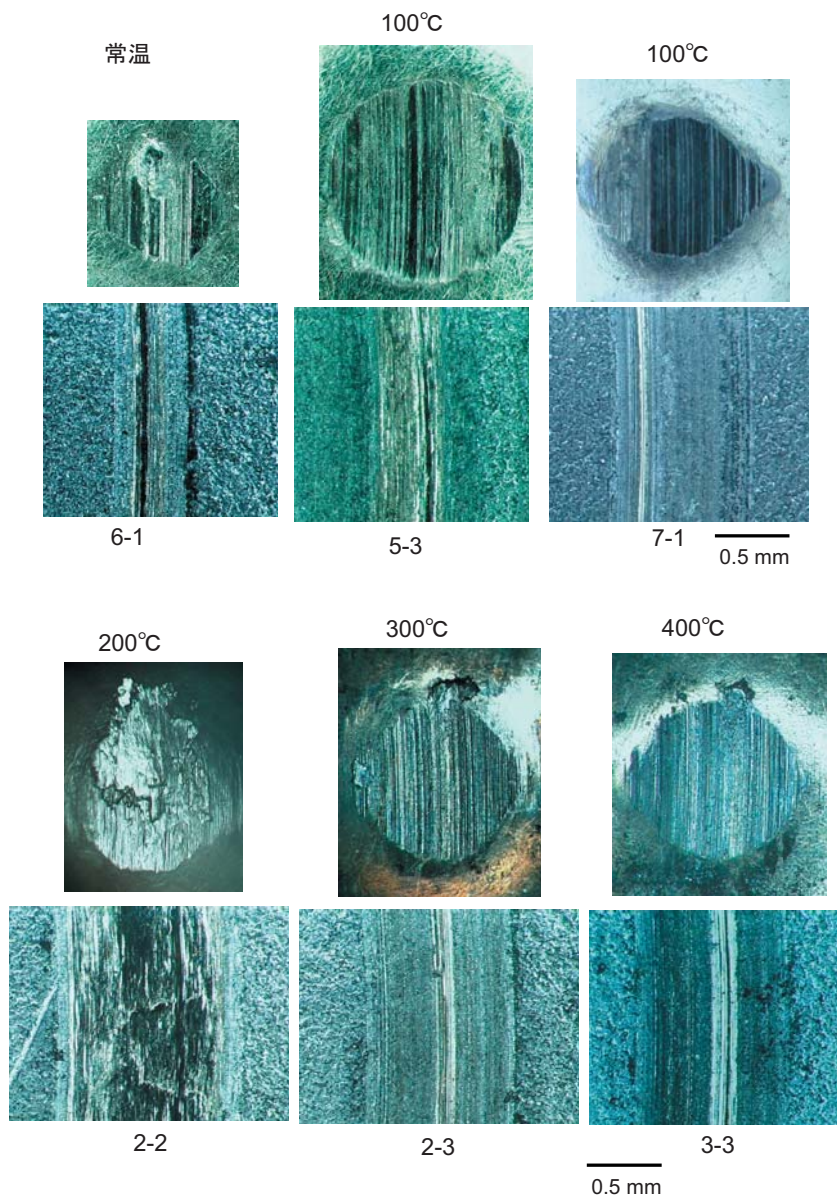


図3.2.6 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜A, 面圧0.79GPa)

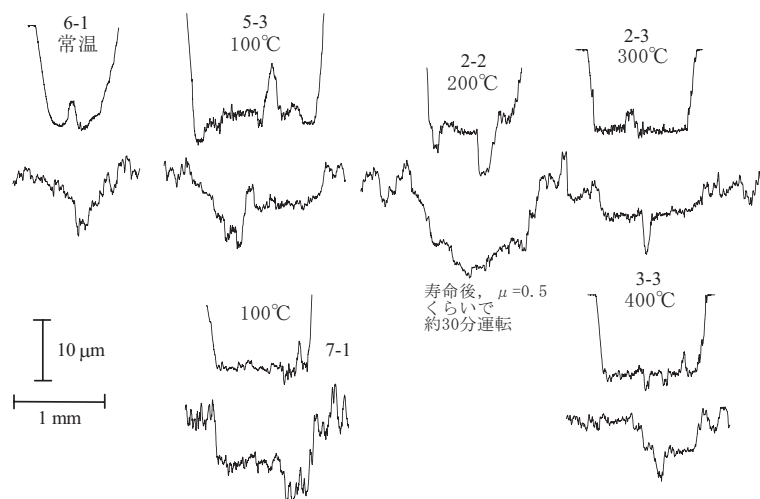


図3.2.7 試験後のピン, ディスクの摩耗形状(被膜A, 面圧0.79GPa)

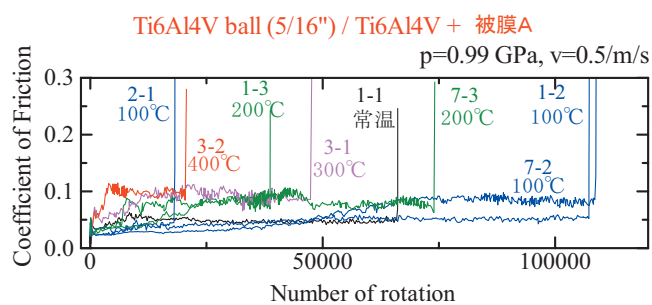


図3.2.8 摩擦係数の推移(被膜A, 面圧0.99GPa)

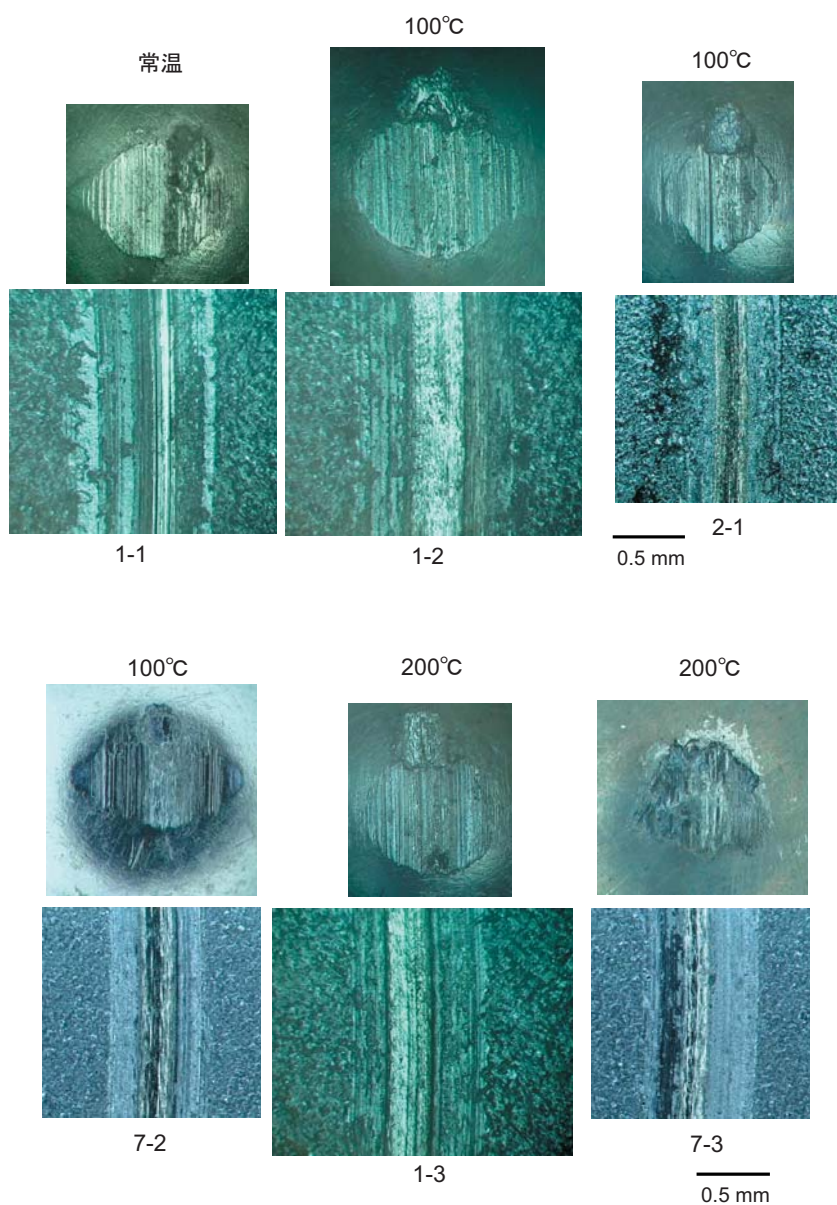


図3.2.9(1/2) 試験後のピン、ディスクの摩擦面(被膜A, 面圧0.99GPa)

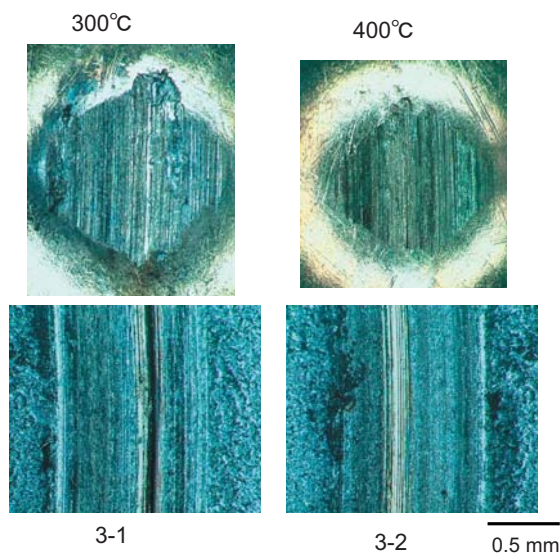


図3.2.9(2/2) 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜A, 面圧0.99GPa)

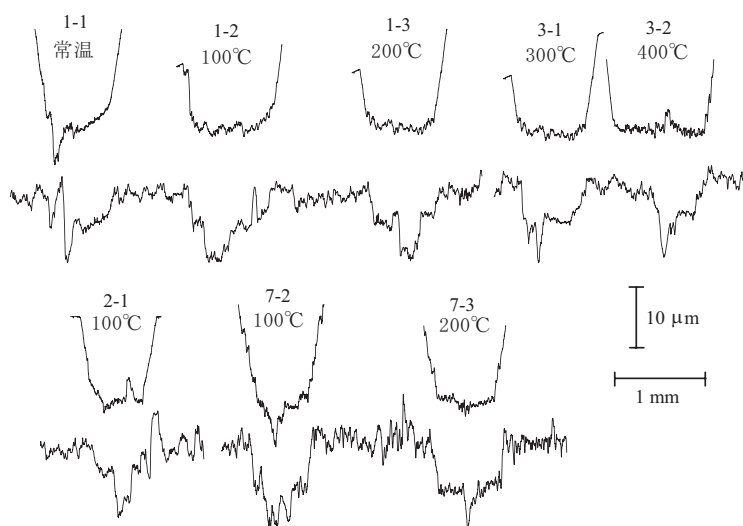


図3.2.10 試験後のピン, ディスクの摩耗形状(被膜A, 面圧0.99GPa)

0.79 GPa の試験と類似している。

図 3.2.11 ～図 3.2.13 は、面圧が 1.35 GPa の場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状である。この試験では、相手摩擦材に直径 5 mm の玉を用いている。荷重は 20 N である。図 3.2.11 の摩擦係数の推移をみると、200°C までの温度では摩擦係数が 0.05 程度、300°C 以上では 0.1 程度であった。面圧が低い場合に比べ、温度が高くても低摩擦を示す傾向が見られた。また、面圧が低い他の試験では寿命は 100°C で最長となったが、面圧 1.35 GPa では 200°C で最長を示した。再現性を確認するため 100°C で 2 回の試験を行ったが、結果は同じであった。図 3.2.12 に示した試験後の摩擦

面、図 3.2.13 の摩耗痕形状は、面圧 0.79 GPa, 0.99 GPa と類似しており、ボール側への移着、ディスクの筋状の摩耗痕、ディスクの被膜が下地まで摩耗していることなどが確認された。

3.2.2 被膜C

図 3.2.14 に、Ti-6Al-4V を相手摩擦材とした場合の被膜Cの寿命への温度と面圧の影響を示す。温度の影響を見ると、どの面圧の試験においても常温よりも 100°C の方がやや長寿命を示す傾向が見られるが、それ以上に温度が上昇すると寿命が急激に低下していく傾向が認められる。100°C から 400°C で 1 桁から 2 桁の寿命低下であ

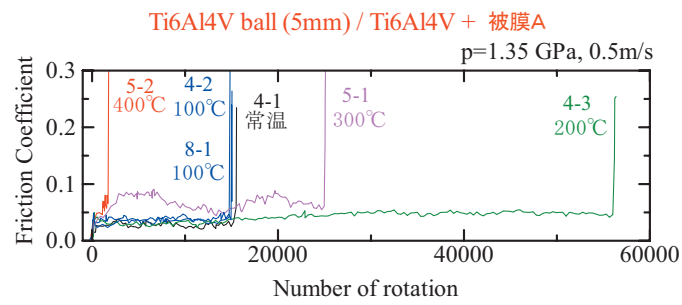


図3.2.11 摩擦係数の推移(被膜A, 面圧1.35GPa)

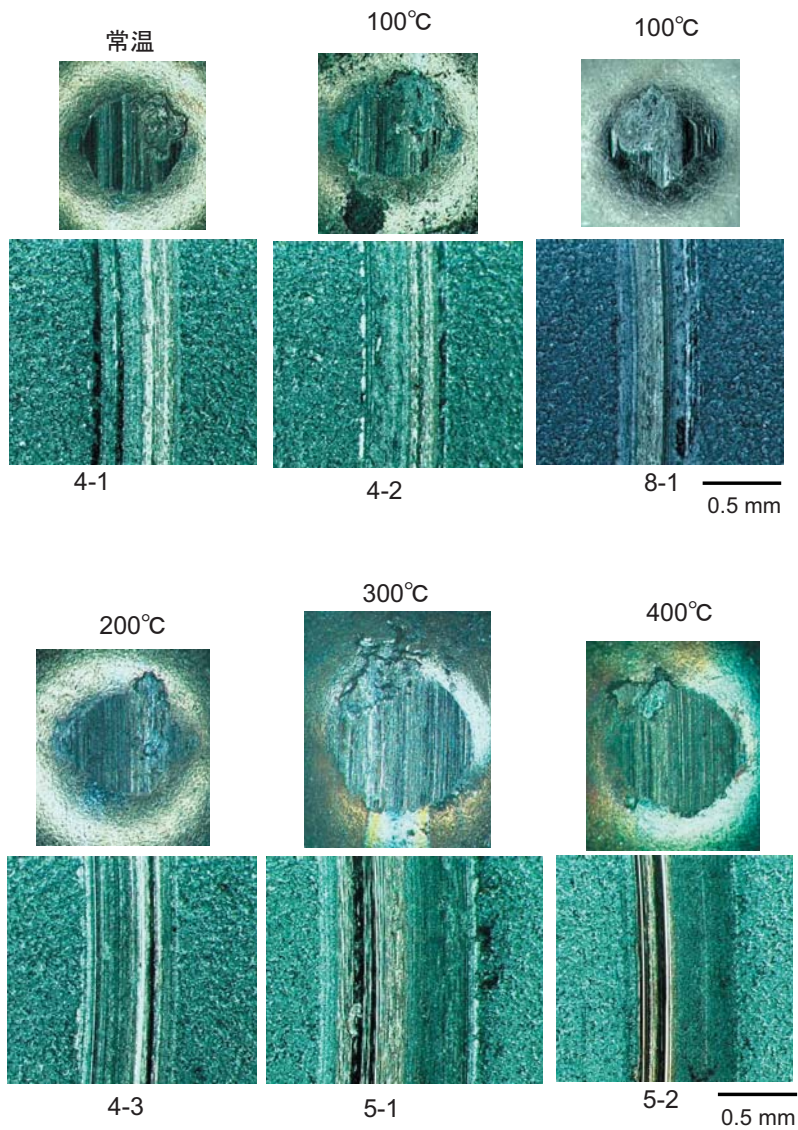


図3.2.12 試験後のピン、ディスクの摩擦面(被膜A, 面圧1.35GPa)

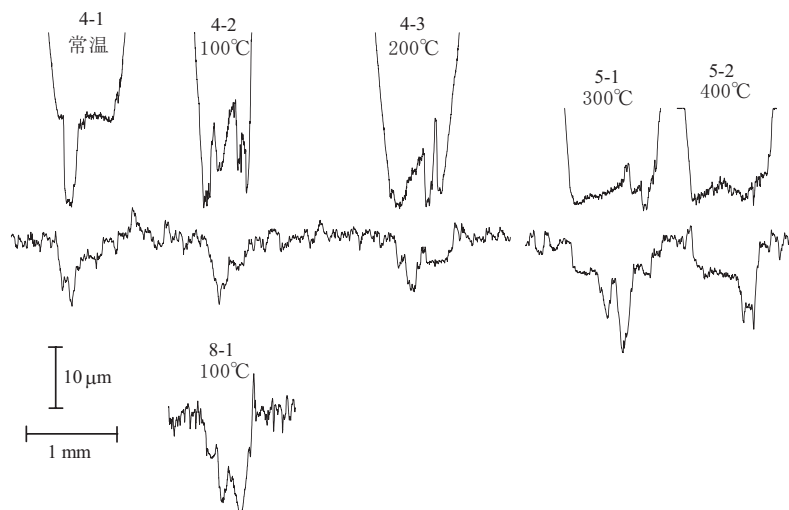


図3.2.13 試験後のピン、ディスクの摩耗形状(被膜A, 面圧1.35GPa)

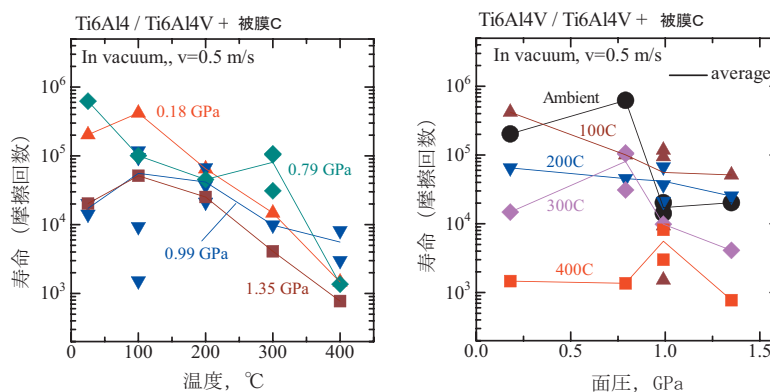


図3.2.14 被膜Cの寿命に及ぼす温度、面圧の影響

った。一方、面圧については、どの温度においても、面圧が1 GPa程度を境にしてそれ以上ではやや寿命低下は認められるが、面圧による寿命の差はあまり認められない。被膜Cの寿命特性は、被膜Aとは正反対に、面圧に関しては比較的鈍感であるのに対し、温度が大きく影響するという結果が得られた。被膜Cは、高温での特性改善を期待して無機系のバインダーを用いたが、高温での使用に適さないという、逆の試験結果となった。

図3.2.15～図3.2.17に、面圧が0.18 GPaの場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状を示す。図3.2.15の摩擦係数の推移を見ると、試験温度が高いほど摩擦係数がやや高くなる傾向が認められる。前節で述べた被膜Aでは摩擦係数はあまり温度に依存しなかったが、被膜Cでは異なる特性を示した。寿命は、被膜A同様に、100°Cで最長を示した。図3.2.16は、試験後のピンおよびディスクの摩擦面の顕微鏡写真である。被膜A同様、いずれの試験でもピン摩耗痕は1～2 mm程度と大きく、試験中に実際の面圧がかなり低下してい

たことが窺える。ディスク側は一部に筋状の摩耗痕が明瞭に見られており、被膜A同様、局部的な被膜破断により寿命に至ったものと推定される。図3.2.17は、試験後のピンおよびディスクの摩擦部の形状である。被膜が下地まで摩耗したと思われる凹部が見られた。

図3.2.18～図3.2.20に、面圧が0.79 GPaの場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状を示す。図3.2.18では、下段に横軸を拡大した図を示してある。常温に比べ100°C以上で寿命が急激に低下することが明瞭に見て取れる。摩擦係数は試験温度が高いほどやや高くなる傾向はこの試験でも認められる。図3.2.19の試験後のピンおよびディスクの摩擦面の顕微鏡写真をみると、300°C以上の試験で明らかに下地が露出しているのがみられた。試験後期に界面から被膜が剥がれたことが想定される。図3.2.20の試験後のピンおよびディスクの摩擦部の形状からも、該当する試験では被膜が完全に失われたと思われる凹部が観察された。

図3.2.21～図3.2.23は、面圧が0.99 GPaの場合の

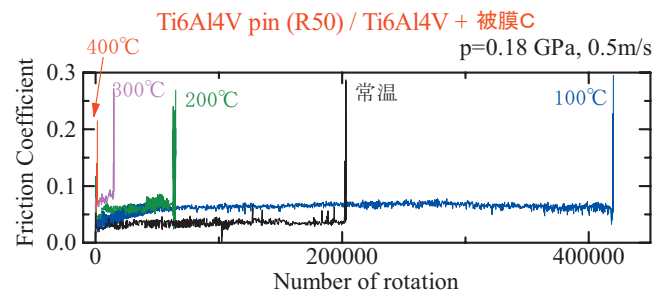


図3.2.15 摩擦係数の推移(被膜C, 面圧0.18GPa)

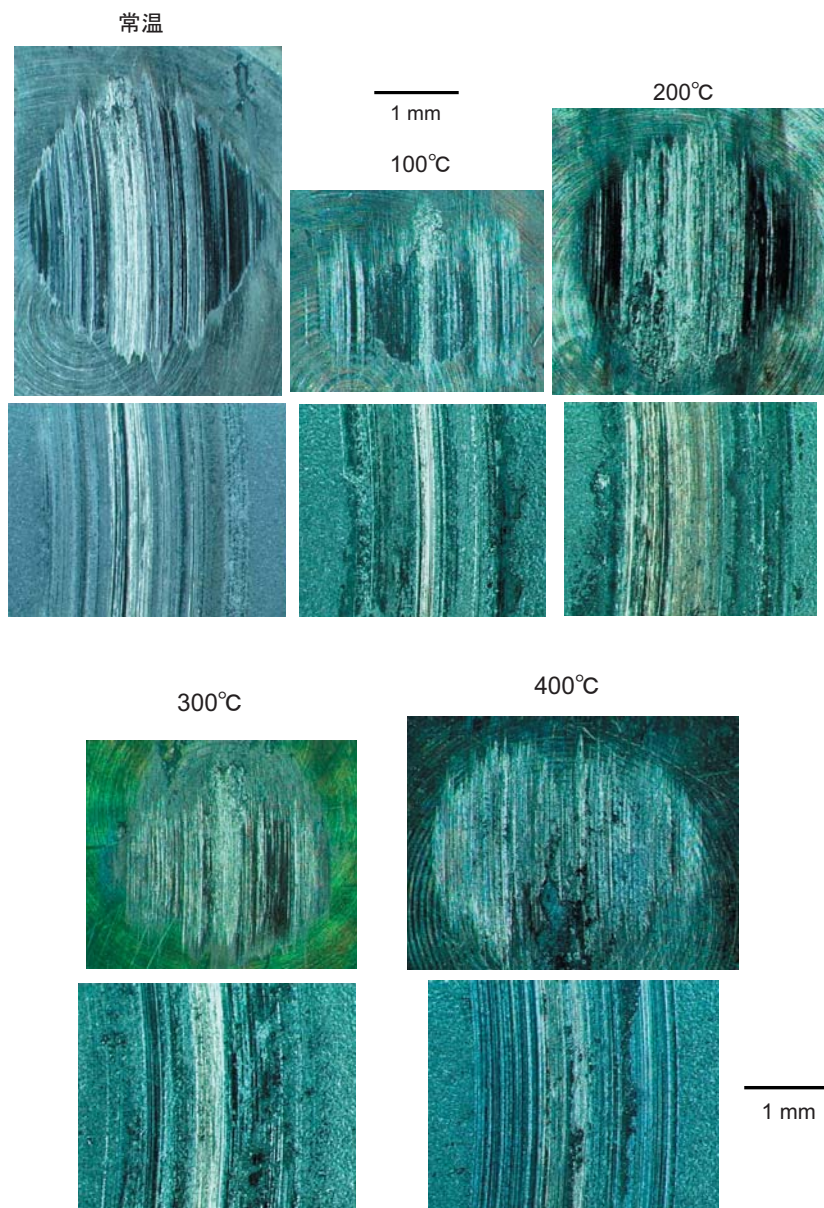


図3.2.16 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜C, 面圧0.18GPa)

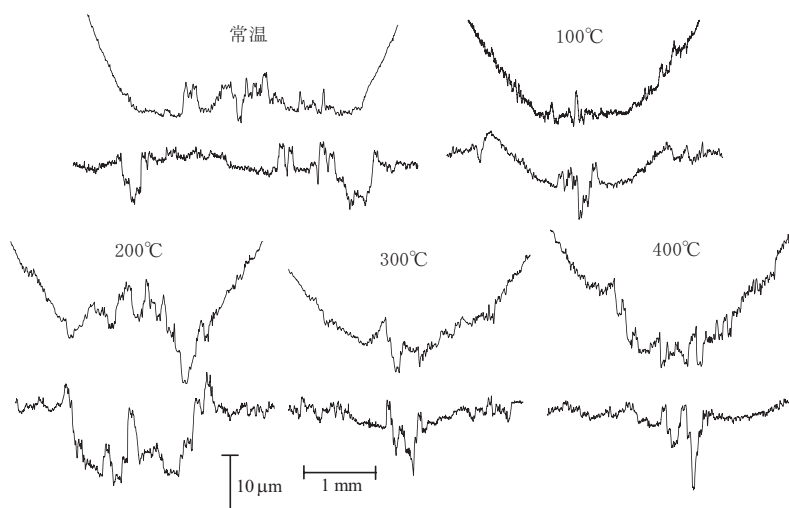


図3.2.17 試験後のピン、ディスクの摩耗形状(被膜C, 面圧0.18GPa)

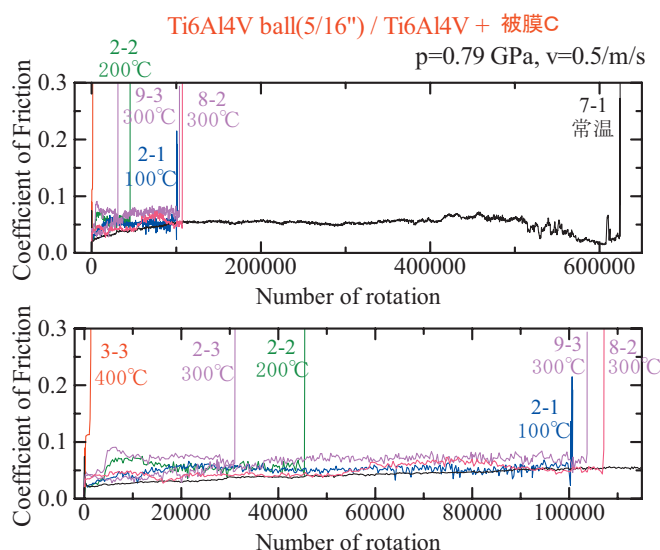


図3.2.18 摩擦係数の推移(被膜C, 面圧0.79GPa)

摩擦係数の推移, 試験後の摩擦面の顕微鏡写真, 表面形状である. 図 3.2.21 では, 下段に横軸を拡大した図を示してある. この試験でも, 温度が高いほど摩擦係数が高い傾向が見られた. また, 寿命は 100°C ~ 200°C で最大となる傾向が見られ, 0.79 GPa の試験とは異なる結果である. ただし, 0.79 GPa の常温試験がたまたま良好な移着膜が形成され寿命が長かったケースという可能性は否定できない. 図 3.2.22 の試験後のピンおよびディスクの摩擦面の顕微鏡写真, 図 3.2.23 の試験後のピンおよびディスクの摩擦部の形状は, 寿命に達した後では, 温度や面圧による影響や, 被膜A との相違は見取れない.

図 3.2.24 ~ 図 3.2.26 は, 面圧が 1.35 GPa の場合の摩擦係数の推移, 試験後の摩擦面の顕微鏡写真, 表面形状である. 図 3.2.24 から, この試験では摩擦係数の温

度依存性は見られない. 100°C ~ 200°C で寿命が最大となるのは面圧 0.99 GPa と同様である. 図 3.2.25 の試験後のピンおよびディスクの摩擦面の顕微鏡写真, 図 3.2.26 の試験後のピンおよびディスクの摩擦部の形状は, 他の試験と顕著に異なる点は見いだせない.

寿命に至った後の摩擦面は, 温度や面圧, 被膜A・被膜Cの相違によらず, かなり類似していた. このことは, 試験した範囲の被膜, 試験条件では, 寿命となる摩耗状況が類似していたことを想定させる.

3.2.3 寿命マップ

宇宙用部品に MoS₂ 焼成膜を適用する場合, 種々の使用条件に対してどのように寿命が変化するかを一見してわかる図があると便利と思われる. そこで, チタン合金を下地材, 相手材として温度, 面圧を変化させた本実

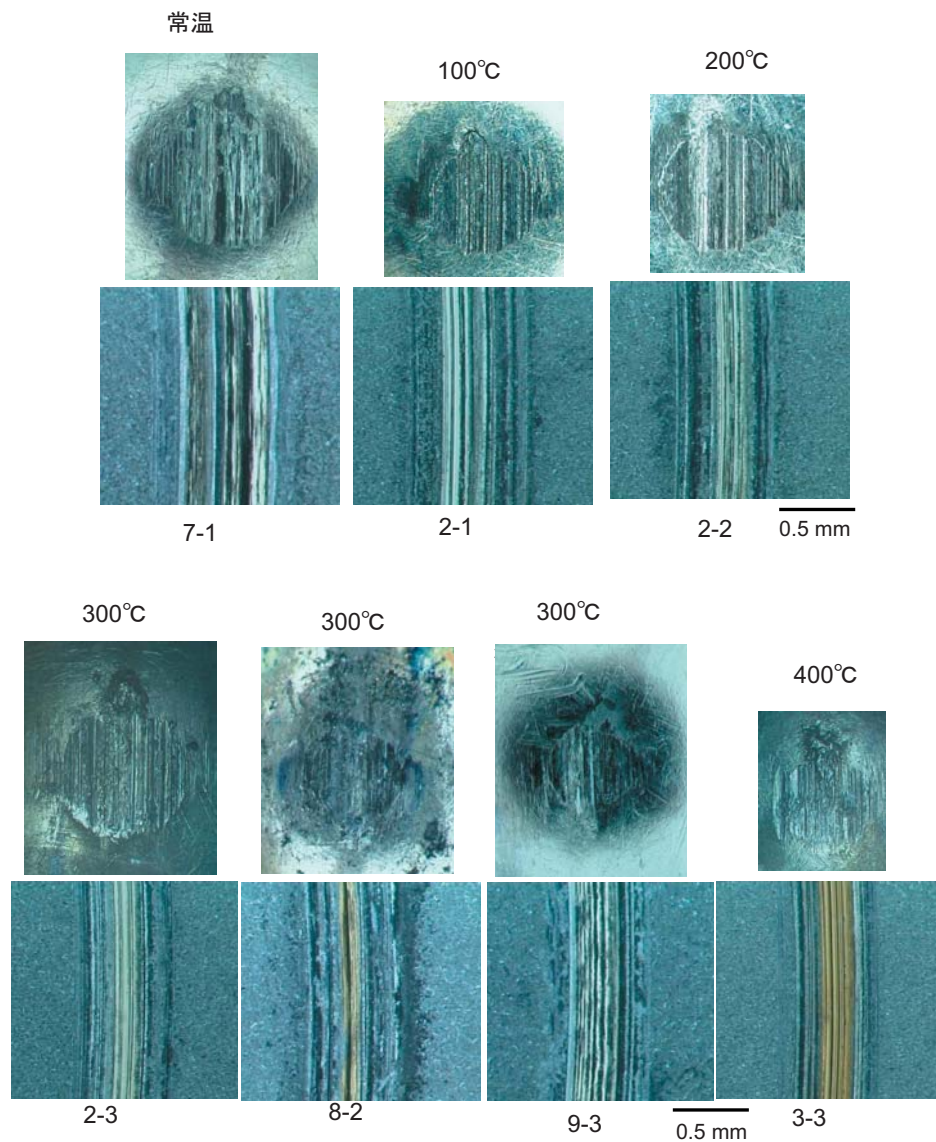


図3.2.19 試験後のピン、ディスクの摩擦面(被膜C, 面圧0.79GPa)

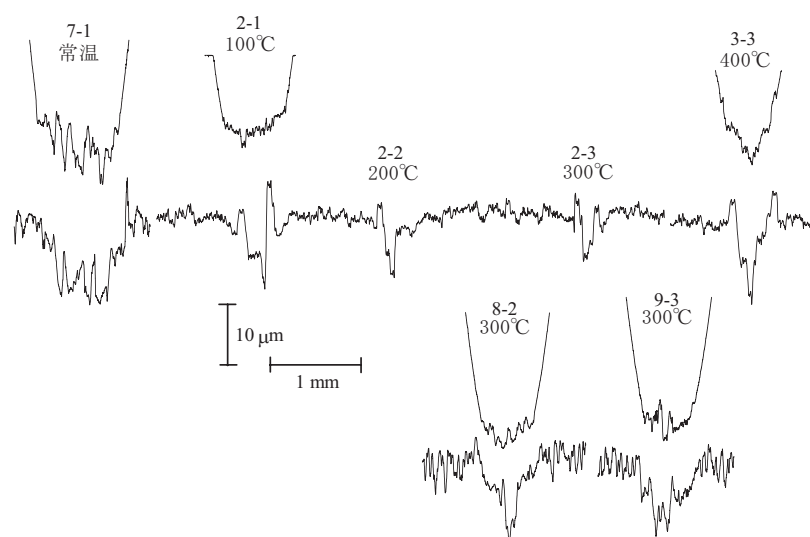


図3.2.20 試験後のピン、ディスクの摩耗形状(被膜C, 面圧0.79GPa)

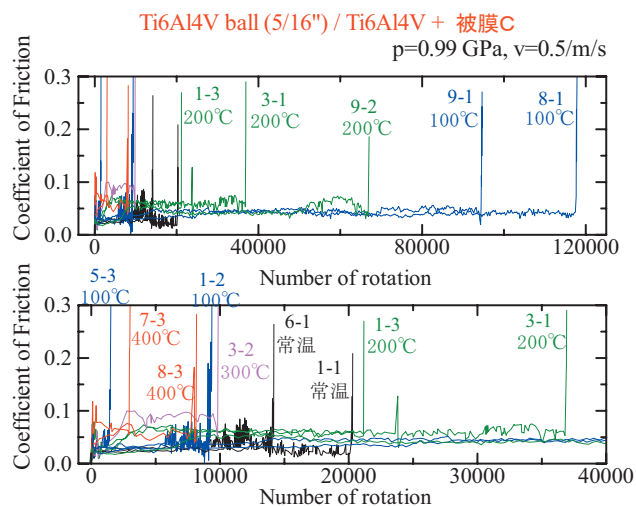


図3.2.21 摩擦係数の推移(被膜C, 面圧0.99GPa)

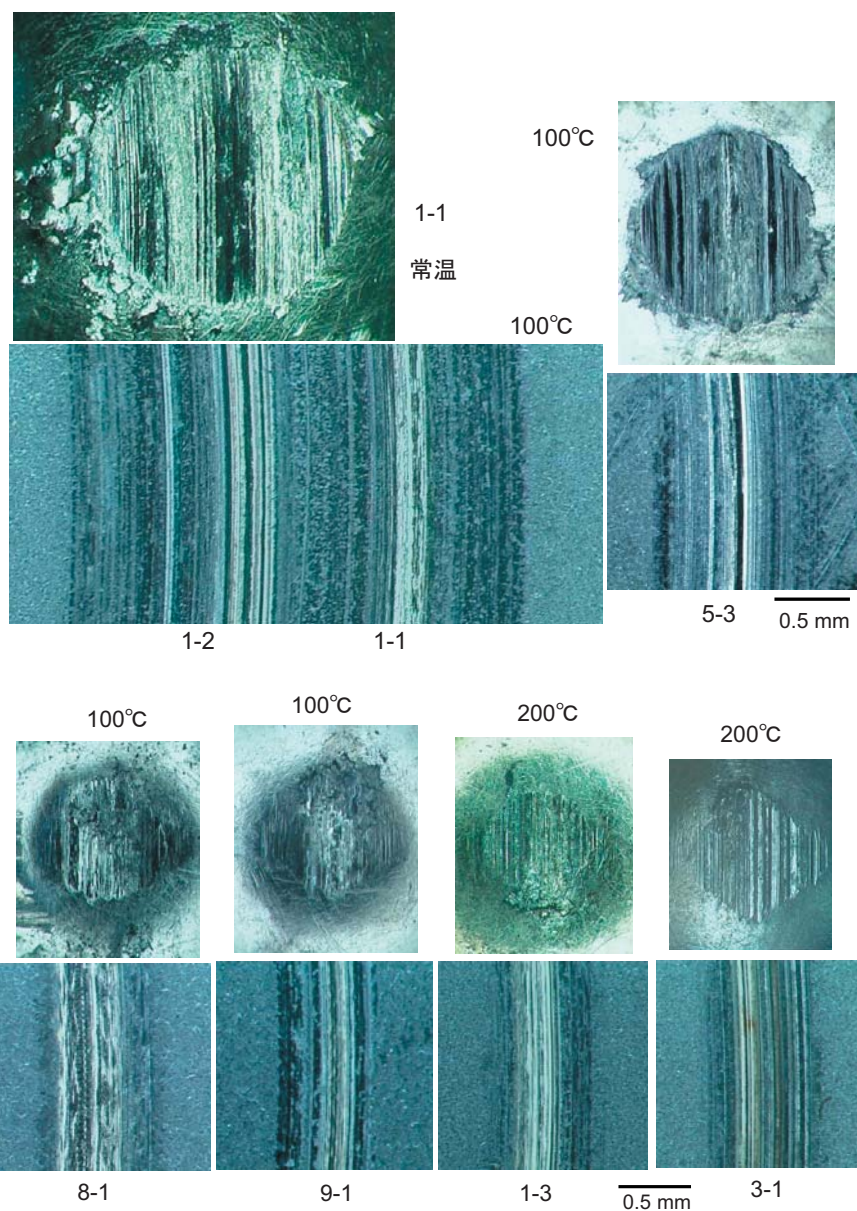


図3.2.22(1/2) 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜C, 面圧0.99GPa)

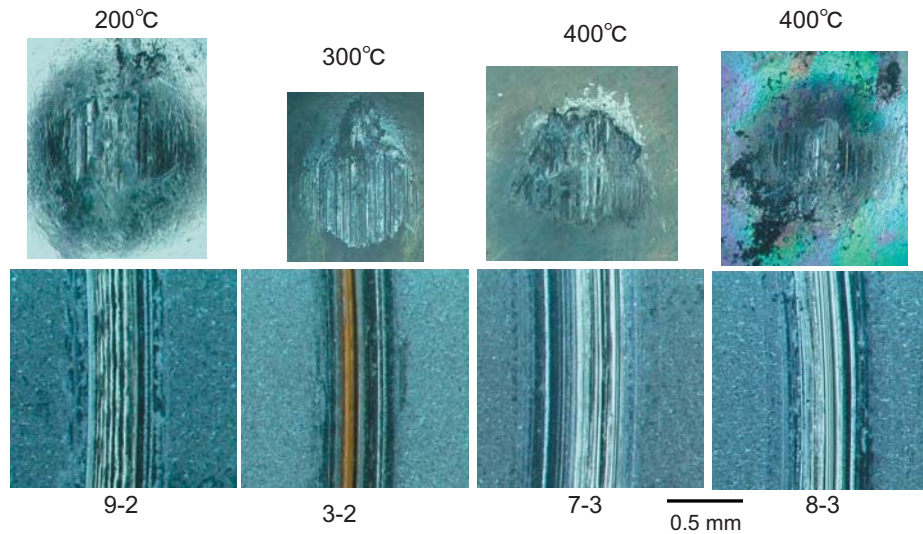


図3.2.22(2/2) 試験後のピン、ディスクの摩擦面(被膜C, 面圧0.99GPa)

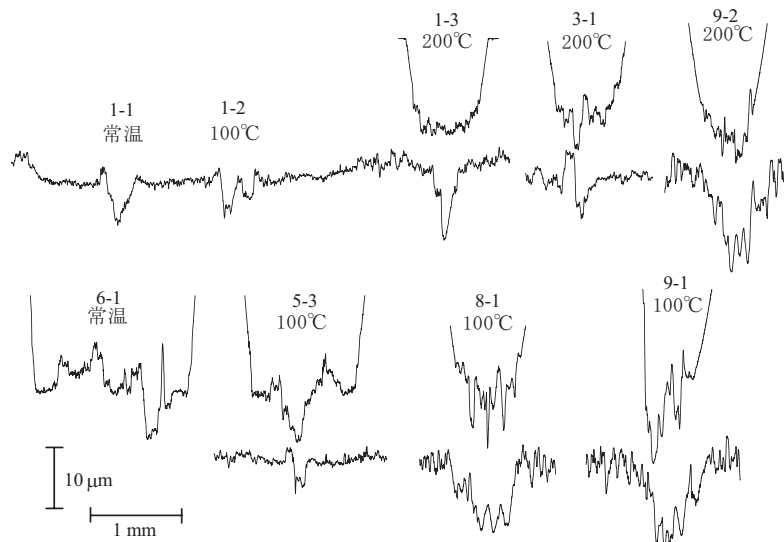


図3.2.23 試験後のピン、ディスクの摩耗形状(被膜C, 面圧0.99GPa)

験の結果を、寿命マップとすることを試みた。具体的には、図 3.2.1, 図 3.2.14 のグラフから、一定の寿命となる面圧、温度を読み取り、面圧を横軸、温度を縦軸とした図に寿命を等高線のように書き入れてみた。その結果が、図 3.2.27 である。

図の左側の有機系バインダーの被膜Aでは、全体に縦線が目につく。寿命が温度にはあまり依存せず、面圧が寿命を決める重要なパラメータであることを示している。温度が 100℃～200℃近辺でやや右に（面圧が高い方に）膨らんでいるのは、同じ面圧であれば温度が 100℃～200℃近辺でより長寿命が期待されることを意味する。一方、無機系バインダーの被膜Cでは、全般にやや右下がりの横線が目につく。寿命が面圧よりも温度に強く依存することを示している。ただし、面圧が高い部分では被膜Cでも縦線傾向となる。面圧がある一定以上の

値になると、急激に寿命が低下すること、すなわち限界荷重があることを示している。

留意すべきは、このマップがピン／ディスク摩擦試験の結果であるという点である。ピン／ディスク摩擦試験では、摩擦に伴う摩耗により面圧が変化する。このため摩擦試験の結果は、実機のトライボロジー特性とは異なる。しかし、これまでの経験から、摩擦試験でもどの要因が効くかについては、実機と比較的一致することがわかっている。従って、図 3.2.27 では、寿命の値は単なる指標、被膜Aでは寿命が温度にはあまり依存せず、面圧が寿命を決める重要なパラメータであること、逆に被膜Cでは寿命が温度に強く依存すること、等を読み取ればよい。

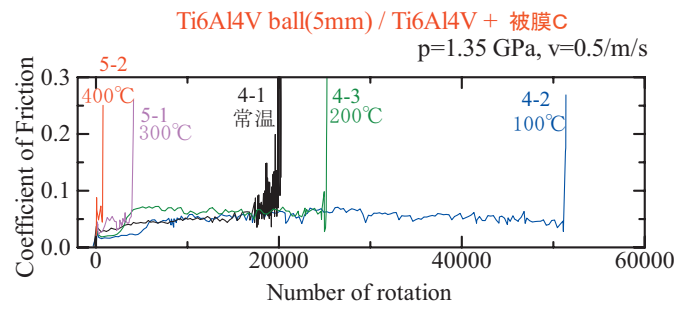


図3.2.24 摩擦係数の推移(被膜C, 面圧1.35GPa)

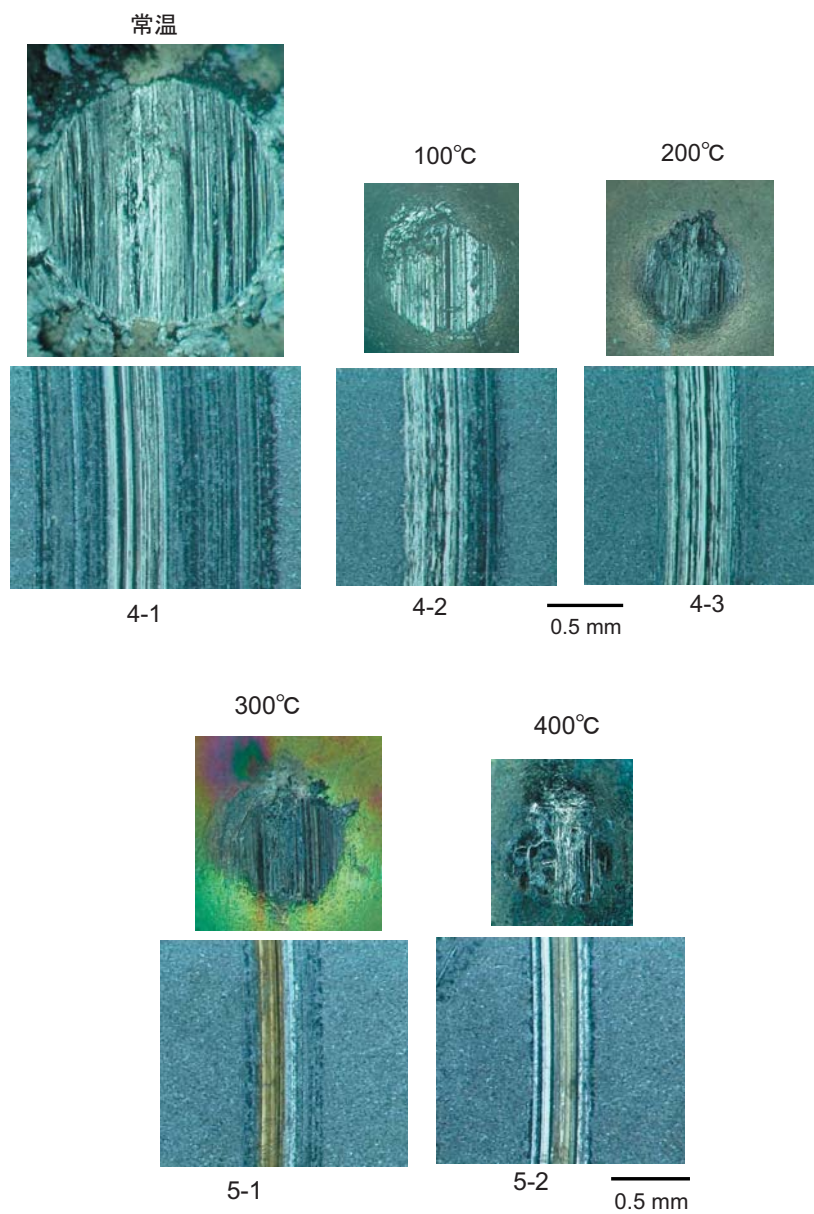


図3.2.25 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜C, 面圧1.35GPa)

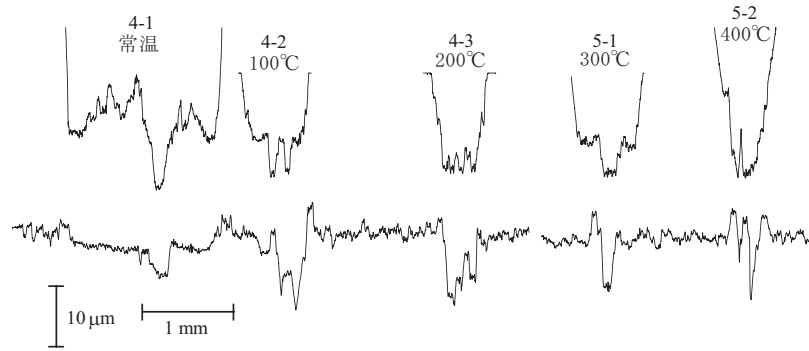


図3.2.26 試験後のピン、ディスクの摩耗形状(被膜C, 面圧1.35GPa)

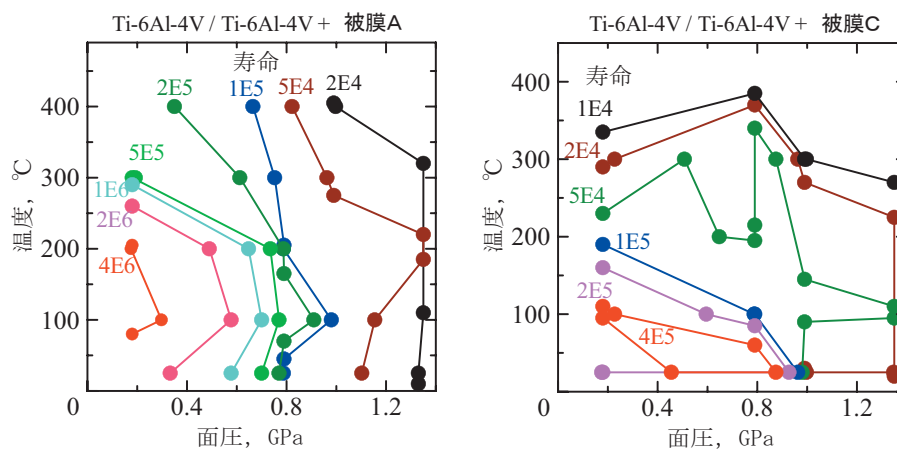


図3.2.27 面圧、温度に対する寿命マップ(被膜A, 被膜C)

3.3 ピン／ディスク摩擦試験

- 下地材、相手材の影響 -

下地材、相手材が SUS440C の場合のトライボロジー特性を 3.1 節で、チタン合金の場合については 3.2 節で述べた。その結果、被膜 A、被膜 C とともに、寿命の温度特性は類似の傾向を示したが、SUS440C を下地材、相手材とした場合には寿命が 1 桁～2 桁ほど長かった。本節では、下地材をチタン合金、相手材を SUS440C とした場合の試験結果について述べるとともに、3.1 節、3.2 節の結果も踏まえ、下地材、相手材の影響について考察する。

3.3.1 下地材 Ti-6Al-4V、相手材 SUS440C の時のトライボロジー特性

図 3.3.1～図 3.3.3 に、Ti-6Al-4V 円板に被膜 A を施し、相手材を SUS440C 製の直径 7.94mm のボールとした場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状を示す。荷重は 20N で、被膜がないと仮定した場合の面圧は 1.17 GPa である。

図 3.3.1 の摩擦係数の推移を見ると、常温、100℃の試験では摩擦係数が 0.03 程度と小さな値を示したが、200℃では 0.1 程度まで上昇し、その後漸減しながら長寿命を示した。300℃では一旦 0.1 程度まで増加し、ついで 0.03 に減少するがすぐに寿命に至る。400℃では 0.15 程度を示し、すぐに寿命に至る。試験温度に摩擦特性が異なる結果であった。

図 3.3.2 に示した試験後の摩擦面は、どの温度でもボールの摩耗面に移着膜が認められ、ディスク側には筋状の摩耗痕が見られる。図 3.3.3 の摩耗痕形状では、ディスクの被膜が下地まで摩耗していることが確認される。寿命に至った後の摩擦面からは、摩擦特性や寿命の相違がわかるような兆候は見られなかった。

図 3.3.4～図 3.3.6 は、被膜 C の場合の摩擦係数の推移、試験後の摩擦面の顕微鏡写真、表面形状である。図 3.3.4 の摩擦係数の推移を見ると、被膜 C の場合はいずれの温度でも摩擦係数が一旦上昇し、その後低下するという経過をたどっていることがわかる。一旦上昇した時の摩擦係数は、温度が高いほど大きくなる傾向を示し

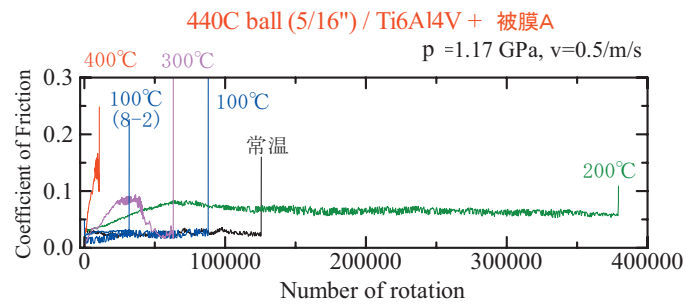


図3.3.1 摩擦係数の推移(被膜A, 相手材440C, 面圧1.17GPa)

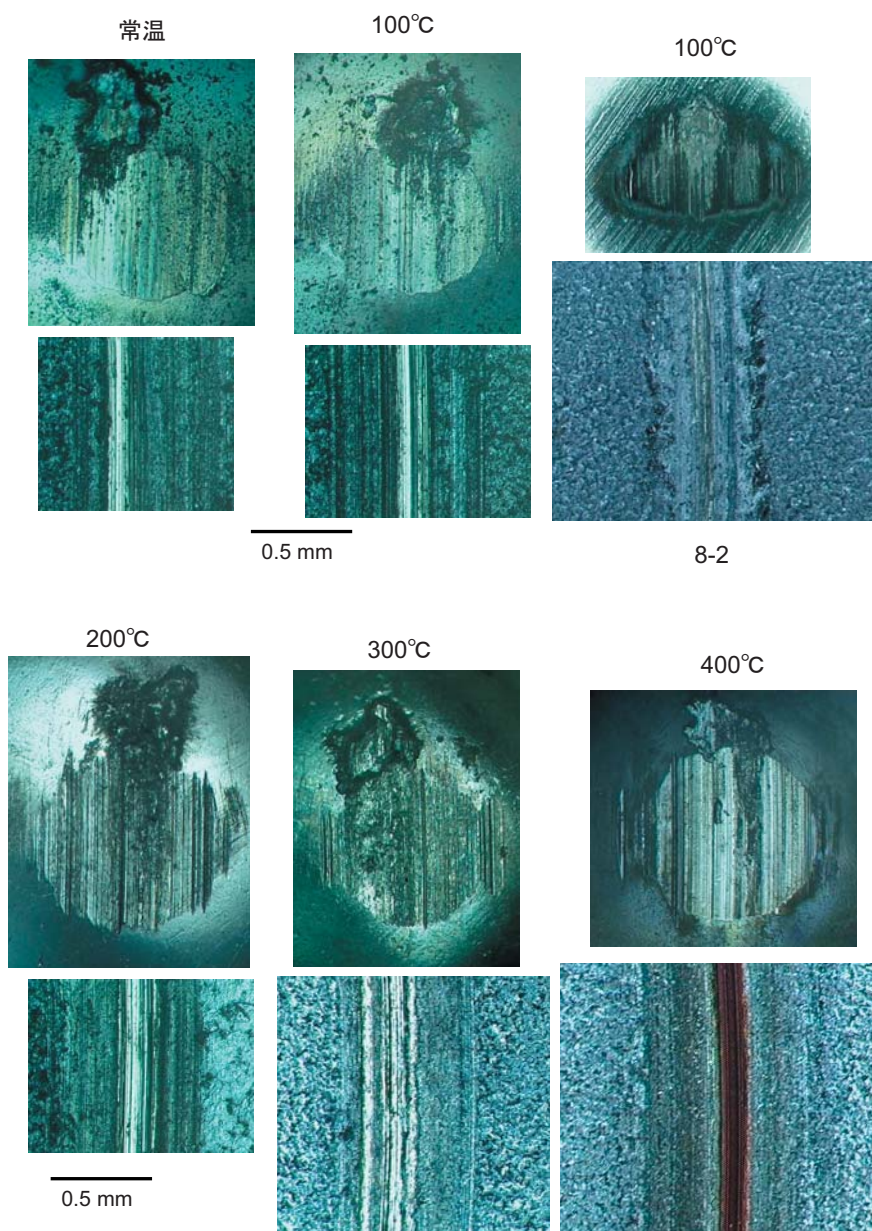


図3.3.2 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜A, 相手材440C, 面圧1.17GPa)

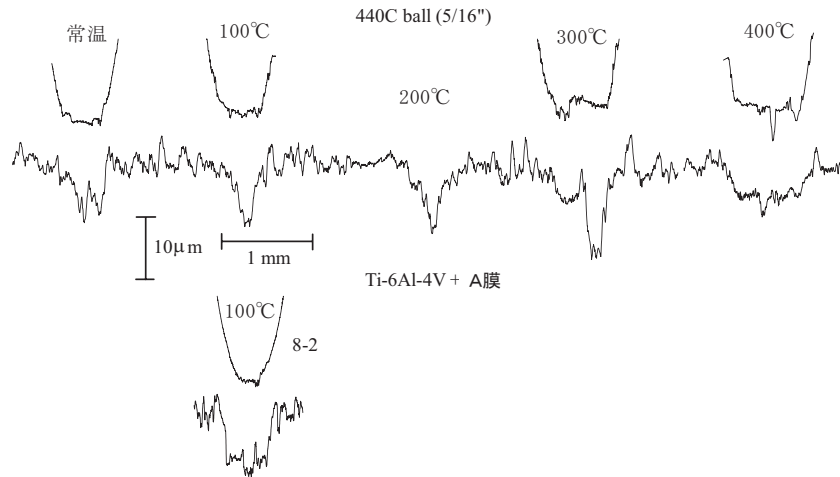


図3.3.3 試験後のピン・ディスクの摩耗形状(被膜A, 相手材440C, 面圧1.17GPa)

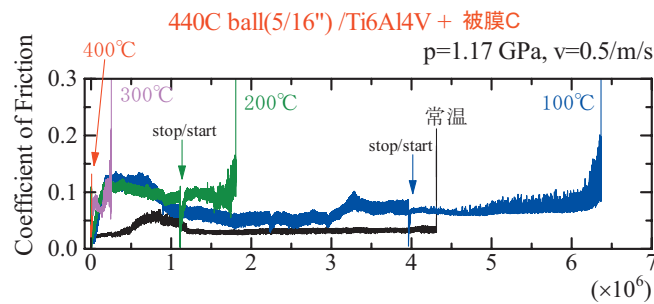


図3.3.4 摩擦係数の推移(被膜C, 相手材440C, 面圧1.17GPa)

た。図 3.3.5 の試験後の摩擦面では、被膜 A に比べ、ボールにややなめらかな移着膜が形成されていた。ディスク側には筋状の摩耗痕、及び図 3.3.6 の摩耗痕形状から、ディスクの被膜の一部が下地まで摩耗して摩擦が増大し、寿命に至ったことが推察される。

3.3.2 下地材、相手材の影響

図 3.3.7 は、下地材、相手材の組み合わせを変えた場合の寿命の温度特性を比較したものである。面圧が同程度の試験結果を比較して示したが、面圧は相手材 / 下地材の組み合わせが SUS440C 同士の場合が 1.47 GPa, SUS440C/Ti-6Al-4V では 1.17 GPa, Ti-6Al-4V/Ti-6Al-4V で 0.99 GPa と 1.35 GPa であり、若干異なる。

図 3.3.7 を見ると、相手材が寿命に及ぼす影響が大きいことがわかる。特に被膜 C では相手材が SUS440C の場合は、Ti-6Al-4V に比較して寿命が 2 桁近く長くなっている。SUS440C 下地と Ti-6Al-4V 下地では、相手材が SUS440C ボールであれば寿命の差は小さい。これは、相手材が SUS440C の場合には良好な移着膜が形成され、その移着膜によって寿命が大きく支配されることを強く示

唆している。被膜 C では、SUS440C に比べ、Ti-6Al-4V の上には移着膜が形成されにくいことが推察される。

一方、被膜 A では相手材、下地材が寿命に及ぼす影響は比較的少ない。ただし、200°C では相手材が SUS440C の場合のみ、寿命が約 1 桁長くなっており、相手材の影響が現れた。200°C 付近でバインダー成分のポリアミドイミドの性質が SUS440C 上で移着膜を形成しやすいように変化したという可能性も考えられるが、そのメカニズムについてはさらに検討が必要である。

被膜 A、被膜 C ともに、寿命は温度が 100°C ~ 200°C 付近で最大となり、さらに温度が上がると急減する傾向を示した。この傾向は下地材、相手材が異なっても現れている。MoS₂ スパッタ膜の試験では、温度が高いほど単調に寿命が減少することが報告されている⁹⁾。従って、100°C ~ 200°C 付近で寿命が長くなる現象には、バインダー成分が関与していると考えられる。また、被膜 A と被膜 C で相手材の影響の現れ方が大幅に異なることも、バインダー成分の影響と考えられる。焼成膜では、潤滑剤である MoS₂ だけでなく、バインダー成分が試験条件や相手材などによりどのような挙動を示すのかを把握する

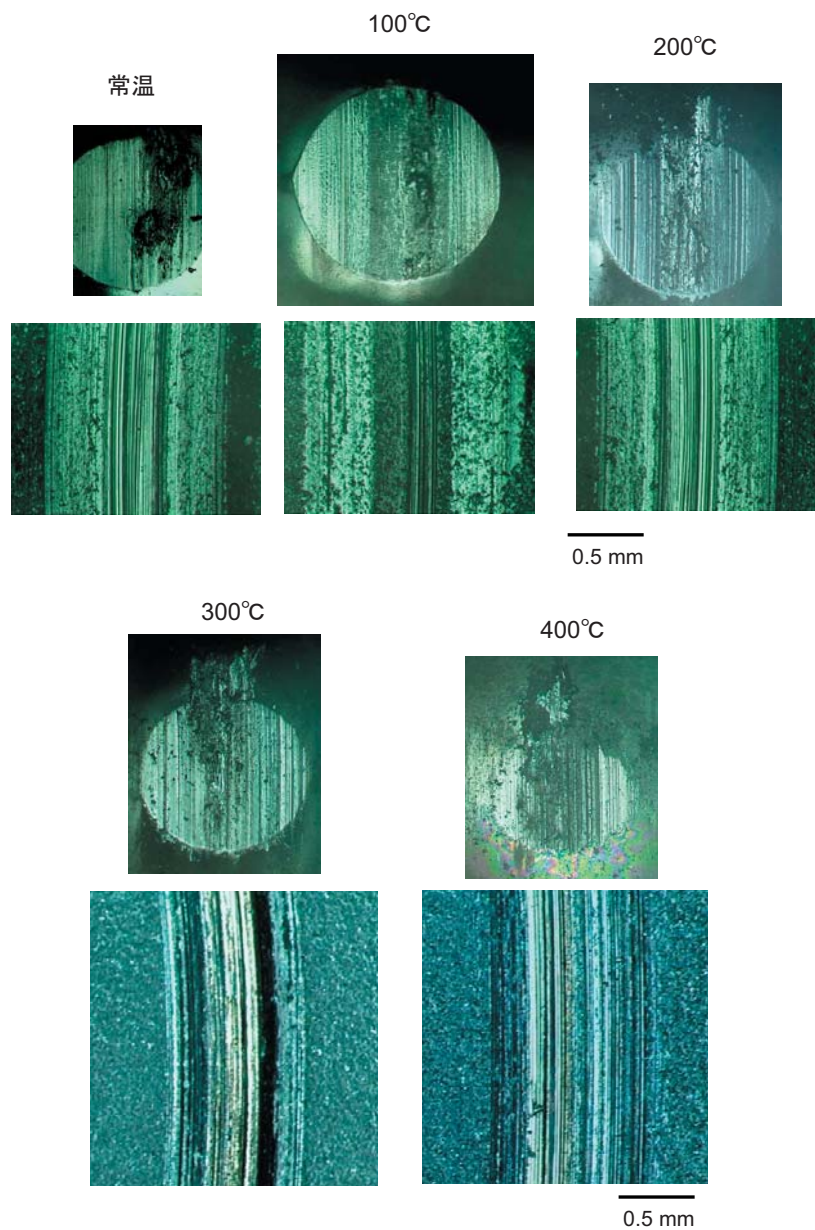


図3.3.5 試験後のピン, ディスクの摩擦面(被膜C, 相手材440C, 面圧1.17GPa)

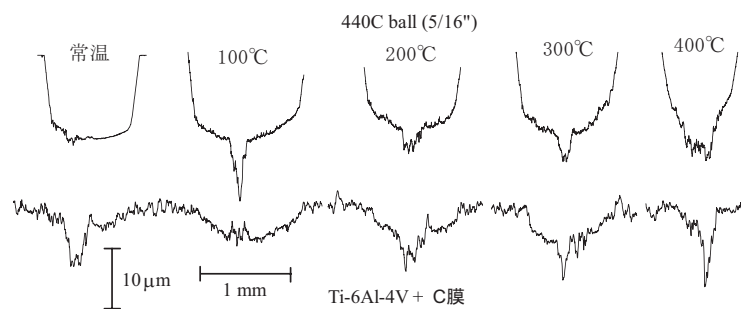


図3.3.6 試験後のピン, ディスクの摩耗形状(被膜C, 相手材440C, 面圧1.17GPa)

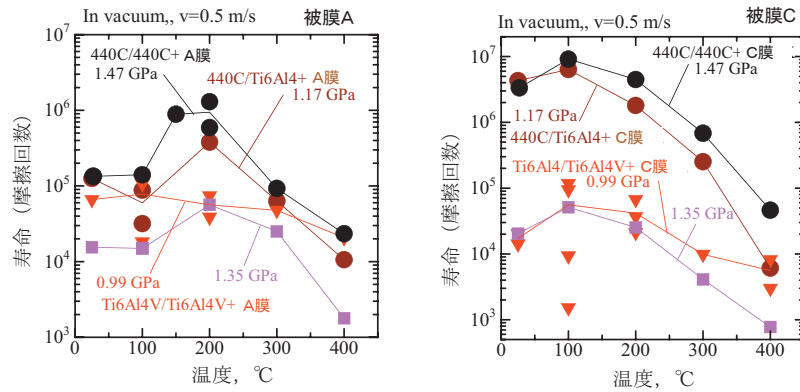


図3.3.7 相手材, 下地材が寿命に及ぼす影響

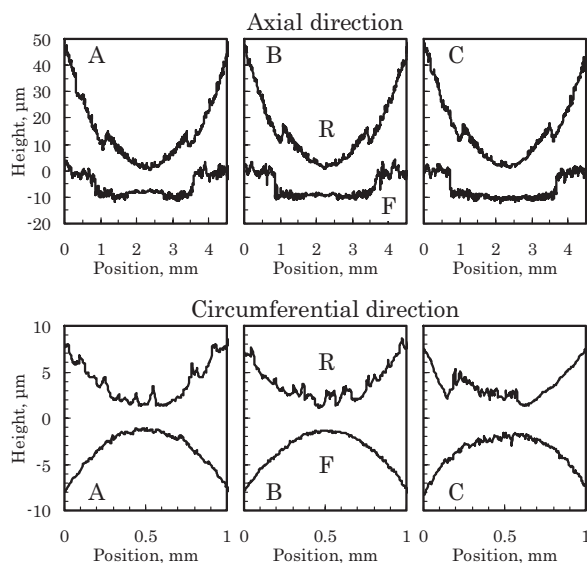
必要がある。

3.4 ころがりすべり摩擦試験 (SUS440C, Ti-6Al-4V)

図 3.4.1 は $p=1.2$ GPa, $s=2\%$, SUS440C の, 試験開始後 60 分 (A), 180 分 (B), 630 分 (C) における断面曲線である。W=250N における摩擦係数の推移を図 3.4.2 に示す。SUS440C, $s=2\%$ の場合, 摩擦係数は, 試験開始から A までの 60 分間に 0.069 から 0.041 まで低下し, 被膜は深さで 7 μm 摩耗している。粗さ (最大高さ) は試験前の 8 μm から R で 3 μm , F で 1 μm まで減少する。F の粗さが R より小さくなるのは, F では接点の移動と接線力の方向が一致するのに対し, R では逆になるからであろう。

A ~ B の 120 分間で摩擦係数は 0.033 まで減少し, F の被膜は 1 μm 摩耗した。粗さの変化は小さく, 被膜が薄くなるのに伴って摩擦係数が低下している。

B ~ C の 450 分間では, 摩擦係数が 0.044 まで増加した後, 0.029 まで減少した。F の被膜の摩耗は 1 μm である。

図3.4.1 断面曲線 (SUS440C, $p=1.2$ GPa, $s=2\%$)

C の直前から摩擦係数の変動が大きくなり, C は寿命に達する直前であったと考えられる。

C の時点で, R の被膜に, 図 3.4.3 の矢印で示すような剥離が見られた。図 3.4.1 (右下) によれば, 剥離した被膜の厚さは 1 μm で, 被膜の表面の粗さは著しく減少している (下地の粗さは大きい)。F に剥離は見られなかった。B ~ C の摩擦係数は, R の粗さが小さくなるのに伴って増加した後, 膜厚とともに減少したと考えられる。

SUS440C, $s=5\%$ の場合も, 摩擦係数は増加の後に漸減し, 0.030 から急増して寿命に達した。 $s=2\%$ の場合と同様に, 被膜が剥離したと考えられる。

SUS440C, $s=40\%$, 80% の場合, 摩擦係数は寿命に達する直前で 0.023 まで低下しており, これは $s=2\%$, 5% の場合に比べて明らかに小さい。寿命に達する直前の被膜はかなり薄かったと思われる。試験途中の観察を行っていないので断定はできないが, μm オーダの厚さの被膜が剥離したのではなく, 摩耗によって被膜が薄くなり破

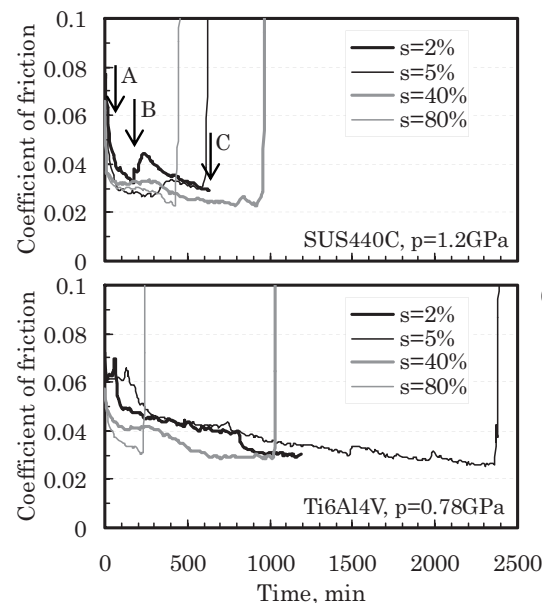
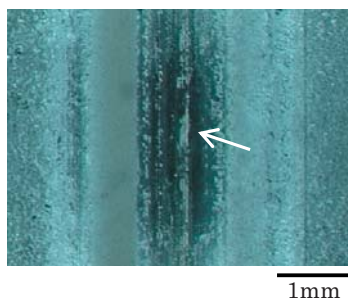


図3.4.2 ころがり／すべり試験における摩擦係数の推移 (W=250N)

図3.4.3 試験片Rの摩擦面(SUS440C, $p=1.2\text{GPa}$, $s=2\%$, 630分)

断したと思われる。

基材が Ti-6Al-4V, $s=40\%$, 80% の場合、摩擦係数の推移は SUS440C の場合と同様であり、被膜の破断の機構に大きな違いはなかったようである。摩擦係数が SUS440C に比べて大きいのは、基材が軟らかく、接触面積が大きいからであろう。

Ti-6Al-4V, $s=2\%$, 5% の場合、摩擦係数は試験開始から 480 分で 0.042 まで減少した後には一度は安定する。 $s=2\%$ の場合は断面形状の測定を行っており、SUS440C と大きな違いはなかった。試験開始から 480 分の時点で粗さは $1\text{ }\mu\text{m}$ 、被膜の厚さは μm オーダであったと考えられる。同じ時間で $s=40\%$ の摩擦係数は小さく (0.034)、すべり率が大きい場合は被膜が薄くなっているようである。

すべり率が小さい領域で Ti-6Al-4V が SUS440C と異なるのは、一度は安定した摩擦係数が再び減少し、すべり率が大きい場合と同等の値になる点である。 $s=2\%$ の試験を打切った時点で摩擦係数の変動は小さく、寿命には達していなかったと思われるが、F の被膜には SUS440C の R と同様の剥離が見られ、R の摩擦面は再び粗くなっていた。被膜の剥離の直後に寿命とならず、剥離部が摩耗粉や移着で修復され、摩耗が進行して長寿命を示すと考えられる。

このような挙動は SUS440C でも $p=0.86\text{ GPa}$ の低面圧下で見られ (図は省略)、 $s=10\%$ では寿命直前の摩擦係数が小さく (0.025)、剥離の後の摩耗で寿命に達したと思われる。一方、 $s=1\%$ では摩擦係数が大きく (0.043)、剥離で寿命となったようである。面圧が小さく、すべり率が大きいと剥離部が修復されやすく寿命が長いという結果であった。低すべり率で寿命が短い理由としては、摩耗が小さいと、被膜が厚くなって剥離しやすいということもあり得る。

寿命を、別途に行ったすべり摩擦 ($s=100\%$) 試験の結果^{4),5)}と併せて図 3.4.4 に示す。面圧が大きいと寿命が低下するのは明らかで、Ti-6Al-4V が SUS440C より長寿命となるのも低面圧の効果と考えられるが、上述のように剥離が修復されることも影響している。すべり率を 1% ~ 10% で変化させても、最長と最短の寿命比は高々

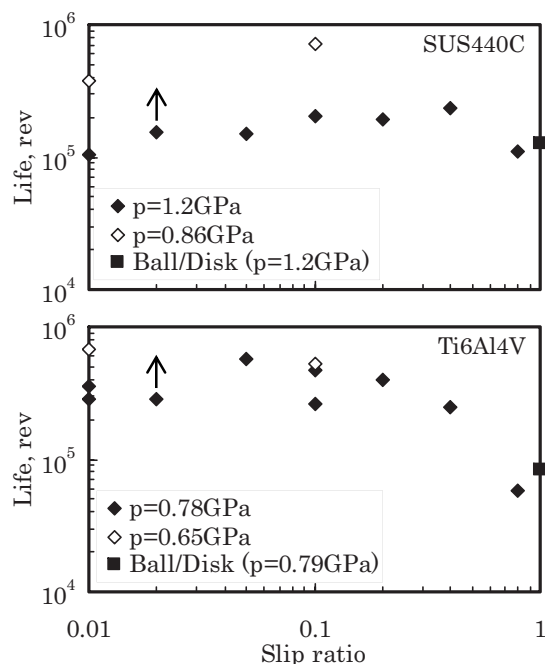


図3.4.4 ころがり／すべり試験における被膜寿命

1.9 (SUS440C), 2.2 (Ti-6Al-4V) であった。すべり率が小さい領域では被膜が剥離した後に寿命となることから、すべり率が寿命に及ぼす影響は小さく、主に接触応力の大きさと繰返し数、被膜の付着力が寿命を決めると考えられる。

本節では、真空中の転がりすべり摩擦における MoS_2 焼成膜の寿命試験を行った。寿命は面圧が大きいと低下し、同じ荷重ではステンレス鋼よりチタン合金の方が長寿命であった。すべり率の影響は小さく、これは寿命に達する前に μm オーダの厚さの被膜が剥離しているからであると考えられる。本報では、すべり摩擦と転がりすべり摩擦の寿命の差は小さかったが、1桁以上変わるとい報告もあり⁷⁾、被膜の破断の機構は異なる可能性が高い。破断の機構の詳細な解析、付着力の評価と向上が今後の課題である。

4. まとめ

結合材や添加剤を変えた数種の MoS_2 系焼成膜について、温度、接触面圧、下地・相手材を変えて、真空中の

トライボロジー特性評価を行った。得られた結果を整理すると、

温度の影響

- (1) どの被膜も 100 ～ 200℃で、寿命のピークが見られ、400℃では約 1 桁の寿命低下が見られた。
- (2) 下地・相手材をステンレスとした場合、現在、宇宙用として使われている有機結合材を使った被膜に比べて、グラファイトを添加した被膜は、300, 400℃で寿命の改善が見られた。
- (3) ケイ酸塩を結合材とした被膜は、試験した温度域では、特にステンレス下地で他の被膜に比べて長寿命が得られた。
- (4) 温度をパラメータとした寿命マップを作成した。宇宙用の駆動機構の設計に有効に活用できる。

下地・相手材の影響

- (5) 下地・相手材をチタン合金とした試験では、下地・相手材をステンレスとした場合に比べ、無機結合材焼成膜の寿命が大幅に低下した。

面圧の影響

- (6) 有機結合材焼成膜では、面圧の増加にともない、被膜寿命が大きく低下したのに対し、無機結合材焼成膜では、面圧の被膜寿命に対する影響は僅かであった。
- (7) 面圧をパラメータとした寿命マップを作成した。宇宙用の機械機構のしゅう動面設計に有効に活用できる。

すべり率の影響

- (8) 真空中のころがり／すべり摩擦試験において、寿命は面圧が大きいと低下し、同じ荷重ではステンレス鋼よりチタン合金の方が長寿命であった。
- (9) すべり率の影響は小さく、これは寿命に達する前に μm オーダの厚さの被膜が剥離しているからであると考えられる。

これらの結果から、宇宙用駆動機器へ MoS₂ 系焼成膜を使用する場合には、一口に MoS₂ 焼成膜と言っても、結合材や添加剤、成膜条件等によって様々な特徴を有すること及びそれらの特徴を把握しておく必要がある。どの焼成膜も数百度の真空高温化での使用は可能だが、温度の上昇に伴い摩擦係数の上昇、被膜寿命の低下が見られるため、注意を必要とする。結合材等の種類によっては、面圧の上昇に伴い寿命が急激に低下する被膜もあり、注意を必要とする。また、使用する基板（下地）材、相手材、ころがり／すべりなどの条件により焼成膜のトライボロジー特性は大きく変化するため、使用条件に見合った被膜の選択、適材適所の利用が必要となる。

参考文献

- 1) 松本，鈴木，川邑，西村，真空中における二硫化モリブデン焼成膜の荷重特性，トライボロジー会議予稿集，(1996-11)
- 2) 川邑，梅田，固体潤滑剤の試験片形状及び面圧，速度の影響，トライボロジー会議予稿集，(1991)，611-612.
- 3) 宮川，豊田，二硫化モリブデン膜の真空中高温すべり摩擦、摩耗特性，トライボロジー会議予稿集，(1991-10)，569-572.
- 4) 松本，鈴木，川邑，種々の MoS₂ 焼成膜の高温真空中でのトライボロジー特性，宇宙科学技術連合講演会予稿集，(2001)
- 5) 松本，鈴木，MoS₂ 焼成膜の真空中での寿命に及ぼす温度と面圧の影響，トライボロジー会議予稿集 (2003-11).
- 6) 西村，鈴木，宮川，高周波スパッタリング法による二硫化モリブデン膜の潤滑特性に関する研究（第 3 報）－被膜の接触電気抵抗特性および諸条件下における潤滑特性－，潤滑，31，10（1986）721.
- 7) 宮川・金子，二硫化モリブデン焼成膜のころがり／すべり接触下における摩擦，摩耗特性，トライボロジスト，38（1993），254.

付録1 国産 MoS₂ 焼成膜の真空中における トライボロジー特性に関する研究報告

本リストでは、内容別に以下のグループに分類し、各グループ内で発表年代順に並べた。調査対象は1980年代後半からとした。

- ・ 全般的解説
- ・ 歯車
- ・ ボールねじ
- ・ すべり軸受
- ・ 宇宙用の機構
- ・ ころがり／すべり摩擦
- ・ 摩擦試験－耐宇宙環境
- ・ 摩擦試験－種々の観点
- ・ 物性等

<全般的解説>

- * 1994, 平岡尚文、吉井保夫、川島教嗣：二硫化モリブデン焼成膜の宇宙用潤滑要素への応用，トライボロジスト，第39，第2号，1994，p. 87～92.
- * 1996, N. Kawashima, N. Hiraoka, Y. Yoshii: Space Tribology in Japan, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J, Vol. 210, P. 173.

<歯車>

- * 1987, 佐々木 彰、丸茂 茂、川島教嗣、西岡 岳、本田登志雄、岩田敏彰、町田和雄、川田正国：真空中における平歯車の特性（第2報），日本潤滑学会第31期春季研究発表会予稿集，P. 377～380.
- * 1988, 階戸秀雄、土居良規、西田 徹、松崎義郎、半田正樹：宇宙用歯車潤滑特性試験，第32回宇科連，1H15，P. 248～249.
- * 1989, 階戸秀雄、西田 徹、土居良規：歯車の固体潤滑に関する研究，日本潤滑学会第34期全国大会（富山）予稿集，P. 707～710.
- * 1989, 西田 徹、階戸秀雄、土居良規、半田正樹：宇宙用歯車潤滑試験（その2），第33回宇科連，3F10，P. 846～847.
- * 1989, 岩田敏彰、町田和雄、川田正国、佐々木 彰、丸茂 齊、川島教嗣、西岡 岳、本田登志雄：宇宙用歯車の潤滑法と耐久性，トライボロジスト，第34巻，第4号，P. 265～272.
- * 1989, 西村 允、関 勝美、劔持伸朗、本田登志雄、川村達男、川島教嗣、佐々木 彰：固体潤滑歯車の摩擦摩耗挙動（その1），第33回宇科連，P. 830～831.
- * 1989, 西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島教嗣、本

田登志雄、劔持伸朗：固体潤滑歯車の摩擦摩耗挙動（その2），第33回宇科連，P. 832～833.

- * 1989, 西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島 教嗣、吉井 保夫、本田 登志雄、川村 達男：固体潤滑歯車の摩擦摩耗挙動（その1），日本潤滑学会第33期春季研究発表会予稿集，C・29，p. 403.
- * 1989, 西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島 教嗣、本田 登志雄、川村 達男、劔持 伸朗：固体潤滑歯車の摩擦摩耗挙動（その2），日本潤滑学会第34期全国大会（富山）予稿集，F・30，p. 711.
- * 1990, 西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島 教嗣、本田 登志雄、川村 達男、劔持 伸朗：固体潤滑歯車の摩擦摩耗挙動（その3），第34回宇科連，1H12，p. 254.
- * 1990, 宮川行雄、西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島教嗣、本田登志雄、川村達男、劔持伸朗：二円筒試験と歯車試験における固体潤滑皮膜寿命について，第34回宇科連，P. 250.
- * 1990, 宮川行雄、西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島教嗣、本田登志雄、川村達男、劔持伸朗：二円筒試験と歯車試験における固体潤滑皮膜寿命について，日本トライボロジー学会予稿集 '90 春，P. 425～428.
- * 1991, 佐々木 彰、川島教嗣、本田登志雄、川村達男、劔持伸朗、納富良文、西村 允、関 勝美：固体潤滑歯車の摩擦挙動（その4），第35回宇科連，P. 651.
- * 1991, 宮川行雄、西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島教嗣、本田登志雄、川村達男、劔持伸朗：宇宙用固体潤滑歯車の開発（第1報），第7回宇宙ステーション講演会予稿集，P. 27.
- * 1991, 西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島教嗣、本田登志雄、川村達男、劔持伸朗、納富良文：固体潤滑歯車の摩擦摩耗挙動（その3），日本トライボロジー学会予稿集 '91 春，P. 23～26.
- * 1991, 西村 允、関 勝美、佐々木 彰、川島教嗣、本田登志雄、川村達男、劔持伸朗、納富良文：固体潤滑歯車の摩擦摩耗挙動（その4），日本トライボロジー学会予稿集 '91 秋，P. 587～590.
- * 1993, 斉藤芳和、岸 克宏、南沢英昭、喜多 深、木崎俊幸：宇宙用歯車の潤滑寿命特性について，第37回宇科連，2F16，P. 341～342.
- * 1993, Y. Nodomi, T. Honda, A. Sakaki, N. Kawashima, K. Seki, M. Nishimura, Y. Miyakawa: Development of gears for space use, 5th ESMAT, p. 243, ESA SP-334
- * 1994, 吉井保夫、川島教嗣、本田登志雄、佐々木 彰、劔持伸朗、納富良文、鈴木峰男：宇宙用固体潤滑歯車のミスアラインメントの影響，トライボロジー会議予稿

集' 94 秋, P. 669 ~ 672.

- * 1995, Yasuo YOSII, Noritsugu KAWASHIMA, Toshio HONDA, Akira SASAKI, Mineo SUZUKI: The Influence of misalignment on the durability of solid-lubricated spur gears, ITC 横浜 '95, P.1591 ~ 1596.
- * 1995, 吉井 保夫, 平岡 尚文, 佐々木 彰, 鋦持 伸朗, 納富 良文, 本田 登志雄, 鈴木 峰男: 宇宙用固体潤滑歯車のミスアラインメントの影響, 第 39 回宇科連, 1C1, 1995, p. 53.
- * 1995, 佐分 茂, 山口幹夫, 小川利明: MoS₂ 焼成膜のコーティングした宇宙機器用歯車の摩擦特性: トライボロジー-会議予稿集' 95 春東京, P. 169 ~ 172.
- * 1998, 吉井 保夫, 平岡 尚文, 佐々木 彰, 鋦持 伸朗, 納富 良文, 川島 教嗣, 鈴木 峰男: 固体潤滑歯車のミスアラインメントの影響と緩和効果, 第 42 回宇科連, p. 1 ~ 5.
- * 2000, 西村 允, 佐々木 彰, 川島 教嗣, 鋦持 伸朗, 本田 登志雄: 固体潤滑膜で潤滑した平歯車の真空中および窒素ガス中におけるトライボロジー-特性, トライボロジスト, 45, 7, 544-553.
- * 2000, 佐々木 彰, 西村 允, 川島 教嗣, 納富 良文, 鋦持 伸朗: 固体潤滑歯車の真空中および窒素ガス中におけるトライボロジー-特性, 第 44 回宇科連, p. 1 ~ 4 (paper), 00-1F2

<ボールねじ>

- * 1987, 西村 允, 関 勝美, 千葉正敏, 丸泉春樹, 熊切康雄, 行木 徹: 真空中における固体潤滑ボールねじに関する研究, 日本潤滑学会第 32 期全国大会 (大阪) 予稿集, P. 405 ~ 408.
- * 1988, 千葉 正俊, 行木 徹, 丸泉 春樹, 西村 允, 関 勝美: 真空中における固体潤滑ボールねじに関する研究-第 2 報 長期運転結果-, 日本潤滑学会予稿集 (第 33 期秋), p. 509.
- * 1988, 道岡英一, 岸本 健, 迎 久幸: 宇宙用ボールねじの試作, 第 32 回宇科連, 1H14, P. 246 ~ 247.
- * 1989, 千葉正俊, 行木 徹, 西村 允, 関 勝美: 真空中における固体潤滑ボールねじに関する研究-第 3 報 Ti 製ボールねじ運転結果-, 日本潤滑学会第 34 期全国大会 (富山) 予稿集, P. 717 ~ 720.
- * 1989, 大石 建, 道岡英一, 竹之内 泰, 興石 宏: 宇宙用ボールねじの開発, 第 33 回宇科連, 2F15 P. 516 ~ 517.
- * 1989, 千葉正俊, 行木 徹, 西村 允, 関 勝美: 宇宙用固体潤滑ボールねじの試作試験, 第 33 回宇科連

, 3F11, P. 848 ~ 849.

- * 1990, Masatoshi Chiba, Toru Gyogi, Makoto Nishimura, Katsumi Seki: Evaluation of solid-lubricated ball-screw in a vacuum, ISTS '90 東京, p. 439.
- * 1990, 吉井保夫, 川島教嗣, 本田登志雄, 川村達男, 鋦持伸朗: 真空雰囲気における固体潤滑ボールねじの研究, 第 34 回宇科連, P. 248.
- * 1991, 吉井保夫, 川島教嗣, 鋦持伸朗, 納富良文, 本田登志雄: 真空雰囲気における固体潤滑ボールねじの研究, 第 35 回宇科連, P. 649.
- * 1991, 吉井保夫, 川島教嗣, 本田登志雄, 川村達男, 鋦持伸朗: 真空雰囲気における固体潤滑ボールねじの研究, 第 7 回宇宙ステーション講演会予稿集, P. 25.
- * 1991, Masatoshi Chiba, Toru Gyogi, Makoto Nishimura, Katsumi Seki: Development of solid-lubricated ball-screw for use in space, NASA 25th Aerospace Mechanism Symposium, p. 195, NASA CP-3113
- * 2001, 水谷朋史, 佐分 茂, 吉江勇貴, 松永茂樹, 春日慎一: 宇宙用ボールねじの摩擦特性に及ぼすなじみ運転の影響, トライボロジー-会議予稿集' 01 秋宇都宮, P. 225 ~ 226.

<すべり軸受>

- * 1990, 佐藤仁利, 山口幹夫: 真空中における揺動すべり軸受の摩擦特性, 日本トライボロジー-学会予稿集 '90 春, p. 459.
- * 1990, 平岡 尚文, 川島 教嗣, 本田 登志雄: 固体潤滑焼成膜の寿命特性, 第 34 回宇科連, p. 252.
- * 1991, N. Hiraoka, A. Sasaki, N. Kawashima, T. Honda: Wear Characteristics of Bonded Solid Film Lubricant under High Load Condition, NASA 25th Aerospace Mechanism Symposium, P. 179, NASA CP-3113
- * 1991, 平岡尚文, 吉井保夫, 川島教嗣, 納富良文, 本田登志雄: 宇宙用すべり軸受の開発, 第 35 回宇科連, P. 647.
- * 1991, 平岡尚文, 川島教嗣, 本田登志雄: 宇宙用すべり軸受の寿命について, 第 7 回宇宙ステーション講演会予稿集, P. 23.
- * 1992, 佐分 茂, 佐藤 仁利, 山口 幹夫, 小川 利昭, 深津 敦: 真空中における MoS₂ 焼成膜潤滑揺動すべり軸受の摩擦特性, 日本トライボロジー-学会予稿集 '92 秋, p. 121.
- * 1992, 佐分 茂, 山口幹夫, 佐藤仁人, 佐野文明, 小

川利昭、森 武、深津 敦：暴露部装置交換機構用揺動すべり軸受の摩擦特性，第 36 回宇科連，P. 209 ～ 210.

- * 1993, 山口孝夫、半田正樹、平岡尚文、川島教嗣、本田登志雄、納富良文：二硫化モリブデン焼成皮膜の大気中・真空中寿命特性，トライボロジー-会議予稿集' 93 秋名古屋，P. 57 ～ 58.
- * 1996, 鹿内 勉、吉井保夫、平岡尚文、佐々木 彰、剣持伸郎、納富良文：宇宙用すべり軸受のすべり出しトルクの測定，トライボロジー-会議予稿集' 96 春東京，P. 539 ～ 540.
- * 1996, 吉井保夫、平岡尚文、鹿内勉、佐々木彰、納富良文、剣持伸郎：宇宙用すべり軸受の起動トルク特性，第 40 回宇科連，p. 431.
- * 1998, 齊藤 剛，松永 茂樹，水本 宗男，柳瀬 裕一：真空用固体潤滑直動案内軸受の潤滑特性，トライボロジー-会議予稿集' 98 秋名古屋，p. 504.
- * 2001, 平岡尚文：二硫化モリブデン焼成膜すべり軸受の揺動寿命のメカニズムについて，トライボロジー-会議予稿集' 01 春東京，P. 175 ～ 176.

＜宇宙用の機構＞

- * 1988, 三宅正二郎、平野元久、三澤正吉：アンテナはね上げ展開機構用潤滑部品評価法の研究，日本潤滑学会第 32 期春季研究発表会予稿集，P. 357 ～ 360.
- * 1991, 三宅正二郎、三澤正吉、平野元久：衛星搭載アンテナはね上げ機構用潤滑部品評価法の研究，トライボロジスト，36, 7 (1991) 549 ～ 556.
- * 1991, 三沢正吉、目黒 在、納富良文、本田登志雄、川村達男：ETS - VI 搭載用 20GHz 主鏡機構部品特性評価試験（第 1 報）はね上げ機構ラッチ部，第 35 回宇科連，P. 641.
- * 1991, 三沢正吉、目黒在、川村達男、本田登志雄、納富良文：ETS - VI 搭載用大形アンテナの機構部品特性試験（はねあげ機構ラッチ部），日本トライボロジー-学会予稿集' 91 秋，p. 603.
- * 1996, 松本甲太郎、木部勢至朗、若林幸子、佐藤等、上野浩史、青木滋、深瀬勇太郎、澤田行英、吉田哲二：ETS-VII 搭載トラス構造物実験装置フライトモデルの開発，第 40 回宇科連，p. 609.

＜ころがり／すべり摩擦＞

- * 1987, 宮川行雄、伏見博久、中山孝一：MoS₂ 皮膜のころがりすべり接触下における摩擦・摩耗特性，日本潤滑学会第 32 期全国大会（大阪）予稿集，P. 149 ～ 152.
- * 1988, 宮川 行雄，佐々木 彰，川島 教嗣，吉井 保

夫，本田 登志雄，川村 達男，川本 治：ころがり・すべりにおける固体潤滑膜の評価（その 1），日本潤滑学会予稿集（第 33 期秋），p. 501.

- * 1988, 宮川行雄、佐々木 彰、川島教嗣、吉井保夫、本田登志雄、川村達男、川本 治：ころがり・すべりにおける固体潤滑膜の評価（その 1），第 32 回宇科連，P. 232 ～ 233.
- * 1988, 川村達男、本田登志雄、川本 治、川島教嗣、佐々木 彰、吉井保夫：ころがり・すべりにおける固体潤滑膜の評価（その 2），第 32 回宇科連，P. 234 ～ 235.
- * 1988, 宮川 行雄，川村 達男，本田 登志雄，川本 治，川島 教嗣，佐々木 彰，吉井 保夫：ころがり・すべりにおける固体潤滑膜の評価（その 2），日本潤滑学会予稿集（第 33 期秋），p. 505.
- * 1989, 宮川行雄、金子裕二：ころがりすべり摩擦試験による MoS₂ 膜の評価，日本潤滑学会第 34 期全国大会（富山）予稿集，P. 691 ～ 694.
- * 1989, 宮川 行雄，川村 達男，本田 登志雄，剣持伸郎，川島 教嗣，佐々木 彰：ころがり・すべりにおける固体潤滑膜の評価（その 3），第 33 回宇科連，p. 834.
- * 1990, 宮川行雄、金子裕二：MoS₂ 焼成膜のころがりすべり接触下における摩擦・摩耗特性，日本トライボロジー-学会予稿集' 90 春，p. 461.
- * 1990, 宮川行雄、水野重雄：固体潤滑剤のころがりすべり接触下における摩擦・摩耗特性（第 1 報）—ころがりすべり接触下における鋼の乾燥摩擦特性—，トライボロジスト，35, 12 (1990) 899 ～ 906.
- * 1991, 宮川行雄、飯島利恒：二硫化モリブデン焼成膜の破断寿命におよぼす配合比の影響，日本トライボロジー-学会予稿集' 91 秋，p. 575.
- * 1991, 岸克宏、有田正司、寺内克徳：二硫化モリブデン焼成膜の寿命に及ぼす基材下地処理の影響，日本トライボロジー-学会予稿集' 91 秋，p. 583.
- * 1991, 鍵本良実、松本將：真空中ころがりすべりによる固体潤滑膜の損傷過程，日本トライボロジー-学会予稿集' 91 春，p. 305.
- * 1991, 宮川行雄、馬場基文：二硫化モリブデン焼成膜の真空中高温の破断寿命とすべり率，日本トライボロジー-学会予稿集' 91 秋，P. 579 ～ 582.
- * 1992, 宮川 行雄，金子 裕二：二硫化モリブデン焼成膜のころがりすべり接触下における摩擦・摩耗特性，トライボロジスト，38, 3 (1992) p. 254.
- * 1992, 岸 克広，有田 正司，保田 芳輝，行木 徹：二硫化モリブデン焼成膜の寿命に及ぼす基材下地処

理の影響 — 2 —, 日本トライボロジー学会予稿集 '92 秋, p. 125.

- * 1992, 岸 克宏、有田正司、保田芳輝、喜多 深：間欠動が MoS₂ 焼成膜の寿命に及ぼす影響, 第 36 回宇科連, P. 207 ~ 208.
- * 1993, 岸 克宏、喜多 深：有機バインダー結合の MoS₂ 焼成膜の摩耗過程の追跡, トライボロジー会議予稿集' 93 秋名古屋, P. 81 ~ 84.
- * 1994, 遠藤壽彦、宮川行雄、飯島利恒、西村 允：ころがり・すべり接触下における二硫化モリブデン焼成膜のトライボロジー特性, トライボロジー会議予稿集' 94 春東京, P. 279 ~ 282.
- * 1995, T. Endo, T. Iijima, Y. Kaneko, Y. Miyakawa and M. Nishimura: Tribological characteristics of bonded MoS₂ films evaluated in rolling-sliding contact in a vacuum, Wear, 190, pp219-225.
- * 1996, 大村田和久、西村 允：転がり・すべり摩擦で評価した MoS₂ 焼成膜の真空中におけるトライボロジー特性, トライボロジー会議予稿集' 96 秋北九州, P. 276 ~ 278.
- * 1997, 大村田和久、西村 允、木船知之：ころがり/すべり摩擦で評価した MoS₂ 焼成膜の真空中におけるトライボロジー特性 第 2 報 — 接触電気抵抗による摩耗の進行の把握 —, トライボロジー会議予稿集' 97 秋大阪, P. 615 ~ 617.
- * 1998, 飯塚和洋、岡村聡、西村 允：転がり軸受シミュレーションによる固体潤滑膜の摩耗機構解明, トライボロジー会議予稿集' 98 秋名古屋, P. 509-511.

<摩擦試験—耐宇宙環境>

- * 1989, 保田芳輝、相川俊彦、有田正司、秋山正雄、大前伸夫：原子状酸素を照射した MoS₂ 固体潤滑膜の摺動特性, 日本潤滑学会第 33 期春季研究発表会予稿集, P. 379 ~ 382.
- * 1990, M. Arita, Y. Yasuda, T. Aikawa, M. Akiyama, N. Ohmae: Investigation of lubrication characteristics of MoS₂ films in space environment, ESA European Symposium on Space Mechanisms and Tribology, p. 67, ESA SP-299.
- * 1991, 有田正司、保田芳輝、岸克宏、寺内克徳、大前伸夫：原子状酸素を照射した固体潤滑剤の摺動特性, 日本トライボロジー学会予稿集' 91 春, p. 311.
- * 1992, Masashi Arita, Yoshiteru Yasuda, Katsuhiko Kishi, Nomuo Ohmae: Investigations of Tribological characteristics of solid lubricants exposed to atomic oxygen, Tribology Trans., 35 (1992) 374-380.
- * 1992, 有田正司、保田芳輝、岸克宏、大前伸夫、志智

雄志：二硫化モリブデン系固体潤滑剤と原子状酸素との反応について, 日本トライボロジー学会予稿集 '92 春, p. 405.

- * 1995, 岸 克宏, 秋山 正雄, 行木 徹：低地球軌道暴露を模擬した MoS₂ 焼成膜の劣化調査結果, 第 39 回宇科連, p. 55.
- * 1995, Masahi Arita, Yoshiteru Yasuda, Katsuhiko Kishi, Nobuo Ohmae, Yushi Shichi: Investigation of the degradation of MoS₂ solid lubricants exposed to atomic oxygen, ITC 横浜 '95
- * 1995, 大前伸夫、田川雅人、松下宗弘、梅野正隆：原子状酸素照射下のトライボロジー、in-situ 測定, トライボロジー会議予稿集' 95 春東京, P. 149 ~ 152.
- * 1996, 有田 正司, 大前 伸夫：宇宙におけるマイクロトライボロジー, 真空, 39, 9, p. 12.
- * 1996, 深津敦、柴田雅広、岸克広、秋山正雄：EFFU 材料暴露実験 — MoS₂ 焼成膜の劣化 —, 第 40 回宇科連, p. 365.
- * 1997, 有田 正司, 岸 克宏, 深津 深, 大前 伸夫：宇宙空間に暴露した MoS₂ 潤滑膜のトライボロジー特性, トライボロジー会議予稿集' 97 春東京, p. 102.
- * 2001, 松本康司、鈴木峰男、小原新吾、今川吉郎：原子状酸素、紫外線照射中の MoS₂ 皮膜のトライボロジー特性, トライボロジー会議予稿集' 01 秋宇都宮, P. 215 ~ 216.

<摩擦試験—種々の観点>

- * 1989, 岸 克宏、有田正司、相川俊彦、秋山正雄、西村 允：二硫化モリブデン膜の潤滑特性に及ぼす基材表面処理の影響, 日本潤滑学会第 34 期全国大会 (富士) 予稿集, P. 673 ~ 676.
- * 1989, 平岡 尚文, 川島 教嗣, 本田 登志雄：固体潤滑剤焼成膜の変形特性, 第 33 回宇科連, p. 852.
- * 1990, 宮川行雄、吉川英昭、豊田秀和：MoS₂ 膜の真空中の高温摩擦、摩耗特性, 機械学会全国大会, 1990-9
- * 1991, 宮川行雄、豊田秀和：二硫化モリブデン膜の真空中の高温すべり摩擦、摩耗特性, 日本トライボロジー学会予稿集' 91 秋, p. 569
- * 1991, 岸克宏、有田正司、寺内克徳、西村允：二硫化モリブデン膜の潤滑特性に及ぼす基材表面処理の影響, 日本トライボロジー学会予稿集' 91 春, p. 307.
- * 1991, 川邑正広、梅田一徳：固体皮膜潤滑の試験片形状及び面圧、速度の影響, 日本トライボロジー学会予稿集' 91 秋, p. 611.
- * 1992, 宮川 行雄, 豊田 秀和, 吉川 英昭：二硫化モリブデン膜の真空中の高温摩擦、摩耗特性, トライボロジスト, 38, 12, p. 1039.
- * 1992, 平岡尚文、川島教嗣、本田登志雄：片当り緩

和のための固体潤滑皮膜下地面の試作，第36回宇科連，P.203～204.

- * 1992, 平岡尚文、川島教嗣、本田登志雄：片当り緩和のための固体潤滑皮膜下地面の試作，日本トライボロジー学会予稿集'92秋，P.133～134.
- * 1993, 岸 克広，相川 俊彦，行木 徹，喜多 深，田川 雅人：MoS₂焼成膜の固着に関する一考察，第37回宇科連，p.599.
- * 1993, 鷲本剛志、宮川行雄、馬場基文、西村 允：二硫化モリブデン系皮膜の潤滑特性に及ぼす雰囲気圧力の影響，トライボロジー会議予稿集'93秋名古屋，P.63～66.
- * 1993, 岩渕 明、清水友治、有田正司、岸 克宏：MoS₂皮膜のフレッティング摩耗，トライボロジー会議予稿集'93秋名古屋，P.531～534.
- * 1993, 山口 直、似内昭夫：Mo系コーティング皮膜の真空摩擦特性に及ぼす周速度面圧の影響，トライボロジー会議予稿集'93春東京，P.175～178.
- * 1994, 長澤和毅、階戸秀雄：二硫化モリブデン焼成皮膜の潤滑性能に与える皮膜施工前処理の影響，トライボロジー会議予稿集'94春東京，P.277～278.
- * 1995, Tomoharu Shimizu, Akira Iwabuchi, Hidenobu Mifune, Katsuhiko Kishi, Masashi Arita: The frictional properties of a spray-bonded MoS₂/Sb2O₃ film under the fretting in vacuum, Lubrication Engineering, 51, 12, p.943.
- * 1996, 伊藤 誠、高橋 知仁、西村 允：ロケット打ち上げ時の振動による固体潤滑膜のトライボロジー特性変化第一報 試験機の試作，第40回宇科連，p.363.
- * 1996, 松本康司、鈴木峰男、川島正広、西村 允：真空中における二硫化モリブデン焼成膜の荷重特性，トライボロジー会議予稿集'96秋北九州，P.281～283.
- * 1996, 岸 克宏：固体潤滑剤の固着現象の解明－1－，トライボロジー会議予稿集'96秋北九州，P.297～298.
- * 1997, 高橋 知仁，西村 允：ロケット打ち上げ時の振動による固体潤滑膜のトライボロジー特性変化－第二報－ 寿命に及ぼすPSDレベルの影響，第41回宇科連
- * 1997, 柳本俊之、階戸秀雄、水田明能、大西洋二、堀内勇二：MoS₂コーティング膜の摩擦特性について，トライボロジー会議予稿集'97秋大阪，P.417～419.
- * 1999, 西山暢樹、中村裕則、高橋知仁、西村 允：ロケット打ち上げ時の振動による固体潤滑膜のトライボロジー特性変化，トライボロジー会議予稿集'99秋高松，P.129～130.
- * 1999, 吉田 彰、藤井正浩、赤木康宏、本多康洋、長澤和毅、階戸秀雄、半田正樹：航空宇宙用材料の真

空高温摩擦・摩耗特性，トライボロジー会議予稿集'99秋高松，P.237～238.

- * 1999, 岩木雅宣、小原新吾、今川吉郎：真空用固体潤滑剤のトライボロジー特性に与える保管環境の影響，トライボロジー会議予稿集'99秋高松，P.133～134.
- * 2000, H.Nakamura, N.Nishiyama, M.Nishimura: Effect of Rocket Launch Vibration on Tribological Characteristics of Bonded Films, Proceedings of the International Tribology Conference, P.1127～1131.

<物性等>

- * 1995, 盛合郁代、橘内浩之：真空用固体潤滑軸受の放出ガス特性，トライボロジー会議予稿集'95春東京，P.161～164.
- * 1998, 岸 克宏，森 俊則，小鍵 幸雄，村上 淳，吉江 勇貴：JME暴露部 固体潤滑材について，第42回宇科連，98-3A6.
- * 1998, 平岡尚文、吉井保夫、佐々木 彰：二硫化モリブデン焼成膜の縦弾性率の測定，トライボロジー会議予稿集'98春東京，P.202～203.
- * 1998, 佐々木 彰，納富 良文，剣持 伸朗，平岡 尚文，吉井 保夫，川島 教嗣：二硫化モリブデン焼成膜の縦弾性率の特性，第42回宇科連，98-1F12.