

ISSN 0389-4010
UDC 621.762
669.018.45
+54-31.
62-982.531-44

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1192

真空中高温における自己潤滑性複合材の
トライボロジー特性に及ぼす相手材の影響

鈴木 峰男・森山 稔

西村 尤・長谷川 正二

1993年2月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

真空中高温における自己潤滑性複合材の トライボロジー特性に及ぼす相手材の影響*

鈴木 峰男^{*1} 森山 稔^{*2}

西村 尤^{*1} 長谷川 正二^{*2}

Effect of Counterpart Materials on Tribological Performance of Self-lubricating Composites Evaluated at High Temperature in a Vacuum

Mineo SUZUKI^{*1}, Minoru MORIYAMA^{*2}, Makoto NISHIMURA^{*1}
and Masaji HASEGAWA^{*2}

ABSTRACT

Pin-on-disk friction tests were carried out at temperatures up to 450°C in a vacuum using a self-lubricating composite pin. The composites used were molybdenum disulphide (MoS_2) + molybdenum dioxide (MoO_2) + niobium (Nb), and MoS_2 + MoO_2 + Nb + stainless steel (SUS304). Tested disk materials were silicon nitride (Si_3N_4), three types of tool steel (M-50, SK-3 and SKD-11) and stainless steel (SUS304).

When the counterpart material was Si_3N_4 , excellent tribological performance was obtained at high temperatures up to 450°C in a vacuum. Good wear resistance was also obtained with an M-50 tool steel disk. In both cases, a thin transfer film was formed on the disk surface from the composite pin. A considerable amount of wear, for both the composite pin and steel disks, was observed when the disks had a low hardness, such as SUS304 disk, and not-hardened SK-3 and SKD-11 disks. With SK-3 and SKD-11 disks, hardening the disk was effective in decreasing wear of both the pin and the disk. The results indicated that a counterpart material which had a fairly hard surface and developed a thin, adherent transfer film was essential to obtain good tribological performance.

Addition of SUS304 to the composite improved strength, and also improved tribological performance when slid against an Si_3N_4 disk.

The composites, with appropriate counterpart materials, have potential high temperature vacuum applications.

Key Words: Self-lubricating composite, High temperature, Vacuum, Silicon nitride, Molybdenum disulphide, Hot-press

要 旨

MoS_2 , MoO_2 , Nb から成る自己潤滑性複合材料、及びこれに SUS304 をさらに添加した複合材料をピン試験片として用い、真空中、450°Cまでの温度でピン / 円板型の摩擦試験を行なった。相手円板材料は窒化珪素

* 平成4年12月7日受付 (received 7 December 1992)

*1 宇宙研究グループ (Space Technology Research Group)

*2 (株)高純度物質研究所 (Pure Materials Laboratory Co., Ltd.)

(Si_3N_4)、3種の工具鋼 (M-50, SK-3, SKD-11)、ステンレス鋼 (SUS304) について試験した。

相手材が Si_3N_4 の場合、真空中、450°Cまでの高温下できわめて良好なトライボロジー特性を示した。また、相手材が M-50 の場合でも優れた耐摩耗性を示した。相手材が SUS304、焼入れしていない SK-3 や SKD-11 などのように硬度が低い場合には、複合材とともに相手材にも多量の摩耗が発生した。しかし、焼入れにより相手材を硬くすると、複合材、相手鋼とともに摩耗量は大幅に低下した。表面が硬くかつ軽移膜が強固に付着する相手材がこの複合材に適していると推測した。

SUS304 を添加した複合材は無添加の場合に比べ強度が向上するとともに、相手材が Si_3N_4 の場合にはトライボロジー特性も改善された。

適した相手材と組合わせることにより、この複合材は、今後、高温・真空中での用途に有望である。

1. まえがき

宇宙開発の進展にともない、より厳しい条件下での潤滑が必要とされる宇宙機器が増えてきており、トライボロジー特性に優れる新しい宇宙用潤滑材料の開発が要求されている。例えば、宇宙ステーションでは原子状酸素雰囲気で長期間にわたって動作できる耐酸化性に優れる固体潤滑剤が必須であるし、また大気再突入を行なうスペースプレーンでは耐熱性に優れ、真空中で動作できる固体潤滑剤が要求される。

本研究は、このような背景を踏まえ、トライボロジー特性に優れる新しい宇宙用固体潤滑材料の開発を目指して行われたものである。前報¹⁾では、二硫化モリブデン (MoS_2)、耐火金属の酸化物および耐火金属からなる自己潤滑性複合材料をホットプレス法で作成し、これらが特に真空中で良好なトライボロジー特性を示し、高温真空中でも異常なアウトガスがなく使用可能であることを明らかにした。しかし、この複合材がやや脆いこと、高温になると相手鋼を摩耗させるという欠点があることを見いだし、相手材としてセラミックスなどの材料を選択したり、適切なコーティングを施すなどの処置を行なう必要のあることを指摘した。

本報は、前報で最も良好なトライボロジー特性を示した 80% MoS_2 + 10% MoO_3 + 10% Nb の組成をもつ複合材、及び強度を向上させるためステンレス鋼の粉末をさらに添加した複合材について、窒化珪素 (Si_3N_4)、M-50 工具鋼、SUS304 ステンレス鋼など種々の相手材に対して高温真空中で摩擦させた試験結果について述べたものである。また、この複合材が真空高温中で良好なトライボロジー特性を発揮するための最適相手材の条件について検討した結果も述べる。

2. 試料及び実験方法

2.1 摩擦試験機と実験方法

試験に用いたピン / 円板型摩擦摩耗試験機の構造を図 1 に示す。円板試験片は、磁性流体シールユニット内蔵の玉軸受によって支持される回転軸上部に取り付けられる。この軸は真空槽外のモータで、タイミングベルトを介して駆

動される。主軸は中空になっており、ロータリジョイントを通して軸内部に水を流して冷却できるようになっている。複合材ピン試験片は試料ホルダーに固定され、アームの一端に取り付けられている。このアームは真空槽外のジムバル機構で支えられているため、荷重方向（垂直）、摩擦力方向（水平）いずれにも自由に動ける構造である。ピンに負荷する荷重は、このアームの大気側の端に重錘を吊すことによって与えた。摩擦力は、大気側でこのアームをひずみゲージを張り付けた板バネに押し当てて測定した。

試験部は SUS304 製の反射板で囲まれており、その内部に設置したモリブデン (Mo) 製のヒータで加熱した。設定した試験温度で一定となるよう、ヒータに流す電流は ON/OFF 制御される。温度は、複合材ピン試験片の中心にあけられた穴に挿入した熱電対を用いて、しゅう動面から約 2mm の位置で測定した。

真空排気には、粗引きにはロータリーポンプ、主排気にはクライオポンプを用いた。摩擦試験中の真空槽内の圧力は、摩擦初期などアウトガスが比較的多い時に 10^{-4} Pa 台となる場合があったが、これ以外は 10^{-5} Pa 台であった。

ピン試験片、ディスク試験片を試験機に取り付け真空中に引いた後、水分を除去するため、100°C、2 時間のベーキングを行なった。その後、ヒータに電流を流し始め試験温度で安定したところで摩擦試験を開始した。

摩擦試験は、すべり速度 0.33 m/s (軸回転数 200 rpm)、荷重 10N の条件で行ない、試験温度は常温～450°C に変化させた。試験時間は、試験温度が常温の場合は 24 時間、それ以外の高温で試験する場合は 8 時間とした。試験中は、摩擦力と試験温度を打点式のレコーダを用いて記録した。

摩耗量は、ディスク試験片の場合、しゅう動痕の周上 4 カ所を表面あらさ計を用いて測定し、その摩耗面積から算出した。ピン試験片の場合は、摩耗量が非常に少ない場合が多く、試験前後の試験片の重量差で測定するのが困難であった。このような場合にはピンが片当たりしていたため、表面あらさ計を用いて摩擦面の形状を測定し、摩耗量を算出した。この際の摩耗量算出方法を付録に示す。摩耗量が多く、ピンが全面当たりしている場合は、試験前後の重量差から摩耗量を算出した。

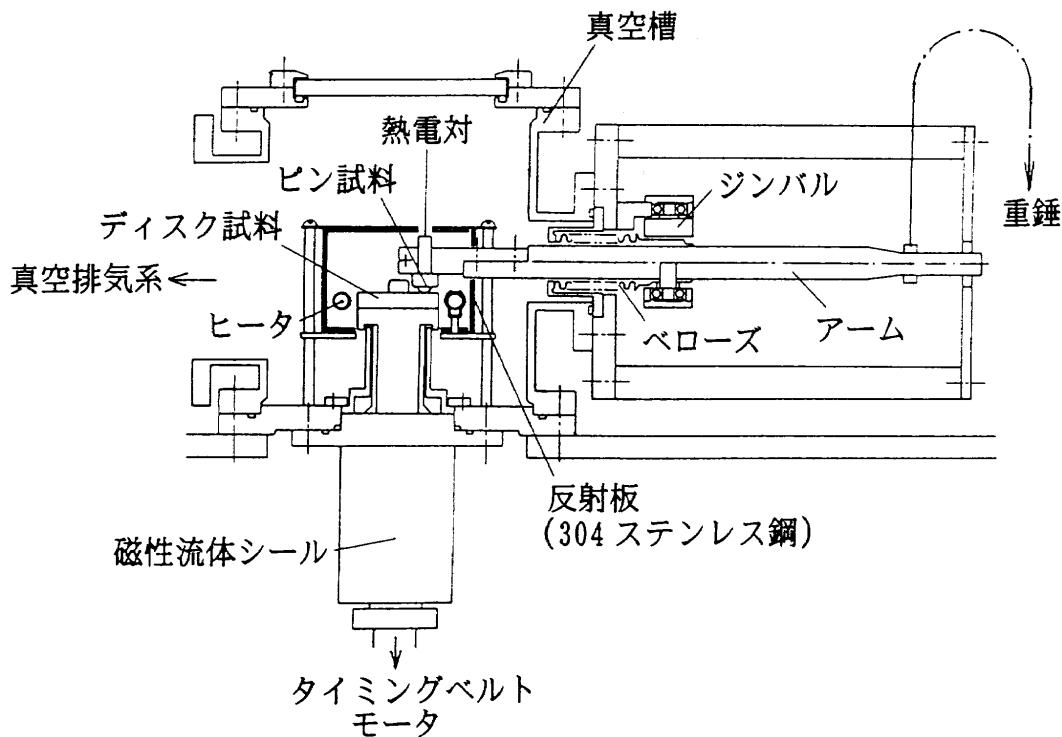


図1 摩擦試験機

試験後の試料は光学顕微鏡、電子顕微鏡を用いて観察するとともに、一部の試料についてはX線光電子分光分析(XPS)を行なった。X線源はMgK α で、10kV, 30mAの条件で励起したX線を厚さ2μmのアルミ箔のフィルターを通した後、試料に対して45°で照射した。試料とX線源の距離は約18mm、分析面積は直径約0.55mmである。試料を熱陰極型のArイオン銃を用いて直径約4mmの範囲をエッチングすることにより深さ方向分析を行なった。エッチング条件は2kV, 20mAで、圧力は 5×10^{-4} Paである。この条件でのエッチング速度は金の場合が約4.8nm/min、MoS₂の場合で約3nm/minであった。

2.2 試料

試料はホットプレス法で作成した。試料の作成条件や用いた粉末などは前報とは若干異なっているが、作成手順は全く同じである。そのフローチャートを図2に示す。

試料の試作に用いた粉末の種類と性質^{2~4)}を表1に示す。MoS₂粉末は平均粒径が比較的細かい1μmのものを用いた。酸化物・金属粉末の粒径は325メッシュ(44μm以下)で、固体潤滑剤の粉末粒径よりもかなり大きい。

原材料粉末は、アルゴン(Ar)ガス雰囲気中でステンレス製のボールミルによって1時間混合した後、まず大気中で600MPaの圧力で予備成形し、ついでArガス雰囲気中でホットプレスして作成した。加熱には、黒鉛ダイスに電流を流す直接通電法を用いた。通電量は1000~3000Aである。ホットプレス中は、図3に示したように、上部パンチにあけられた孔にW-5%Rh対W-26%Rh熱電対を挿入し、

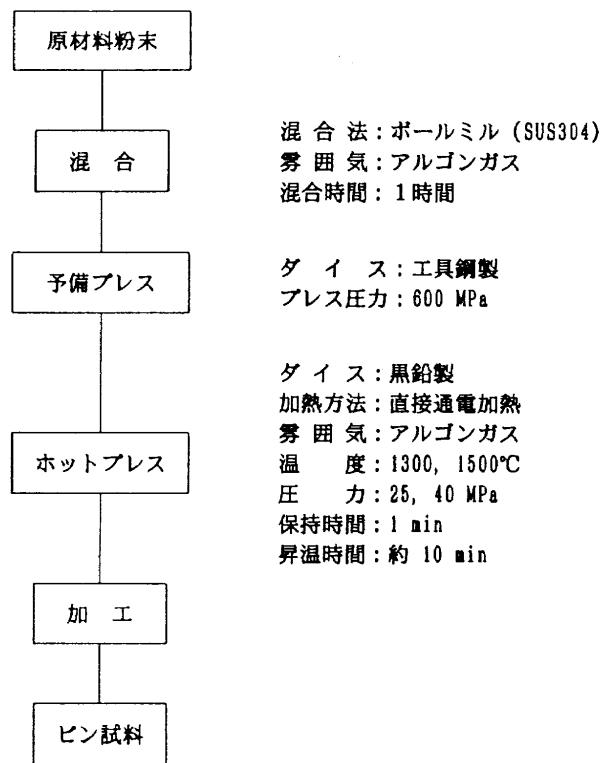


図2 ホットプレス法のフローチャート

試料上部約20mmの位置で温度を測定した。この熱電対で測定した温度をホットプレス温度とした。試料に加える圧力は、温度が約500°Cになった時点で所定のホットプレス圧力の半分まで上昇させ、ついでホットプレス温度に達したところで所定のホットプレス圧力まで上昇させた。昇温時間は約10分であった。

表1 試作に用いた粉末^{2~4)}

粉末	粒径 (μm)	純度 (%)	密度 (g/cm^3)	融点 (°C)	備考
MoS ₂	1	>98	4.8	>1800	熱安定性 <350°C (大気中), <1350°C (真空中)
MoO ₃	44	>99.9	6.44	1927	1100°C以上で徐々に昇華
Nb	44	>99.9	8.56	2467	
SUS304	74	---	7.93	1400-1450 (溶融温度範囲)	

表2 試作した複合材の組成, ホットプレス条件, 密度

組成	ホットプレス 温度 (°C)	圧力 (MPa)	密度 (g/cm^3)	密度比 (%)
80%MoS ₂ +10%MoO ₃ +10%Nb	1500	25	4.75--4.93	92.1--95.6
		40	4.82--4.91	93.4--95.2
75%MoS ₂ +10%MoO ₃ +10%Nb+5%SUS	1300	25	4.91--5.00	93.2--94.9
		40	4.94--5.00	93.7--94.3
70%MoS ₂ +10%MoO ₃ +10%Nb+10%SUS	1300	25	4.96--5.08	92.1--94.3
		40	5.09	94.5

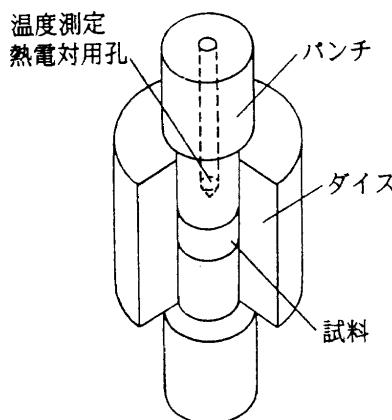


図3 黒鉛ダイス

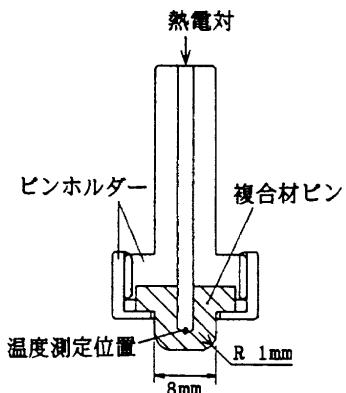


図4 ピン試験片

試験に用いた試料の組成, ホットプレス条件, 密度および密度比を表2に示す。複合材の組成は, 前報で最も良好なトライボロジー特性を示した80%MoS₂+10%MoO₃+10%Nb, 及び強度を向上させるためSUS304ステンレス鋼の粉末をさらに5%または10%添加した3種である。ホットプレス温度は, SUS304を添加していない試料については前報と同じ1500°Cとしたが, SUS304を添加した試料の場合には, 焼結温度を高くし過ぎるとポーラスになることが認められたため温度を1300°Cと低くした。

ホットプレス圧力は25 MPaと40 MPaに変化させた。ただし, 後述するように40 MPaで作成した方が良好なトライボロジー特性が得られたため, 一部の試験を除き, トライボロジー特性の評価には40 MPaで作成した試料を用いた。

ホットプレスされた複合材は直径18 mm, 厚さ約15 mmの円板状であり, これを図4に示す形状のピンに機械加工して摩擦試験に用いた。複合材ピンの先端部は直径8 mmの円筒状で, 摩擦面端部は1 mmのRをとっている。従って, しゅう動面の直径は約6 mmである。ピンの中心には

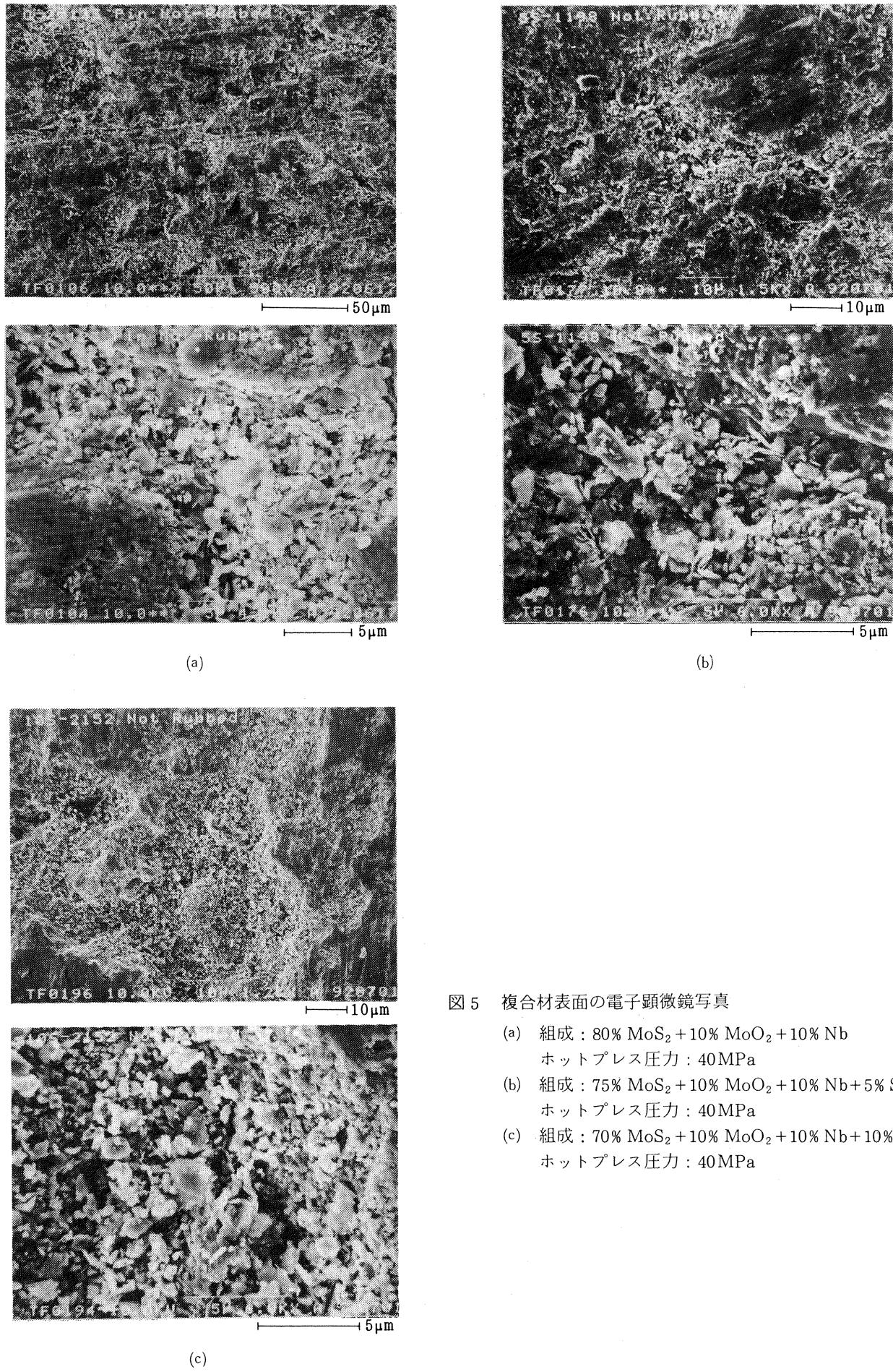


図 5 複合材表面の電子顕微鏡写真

- (a) 組成 : 80% MoS₂ + 10% MoO₂ + 10% Nb
ホットプレス圧力 : 40 MPa
- (b) 組成 : 75% MoS₂ + 10% MoO₂ + 10% Nb + 5% SUS
ホットプレス圧力 : 40 MPa
- (c) 組成 : 70% MoS₂ + 10% MoO₂ + 10% Nb + 10% SUS
ホットプレス圧力 : 40 MPa

熱電対が挿入できるよう直径 2mm の穴をあけ、しゅう動面から約 2mm の位置で温度が測定できるようにした。摩擦面はホットプレス方向とは垂直な面で、#800 のペーパで研磨してから摩擦試験に用いた。図 5 に研磨した後の複合材表面の電子顕微鏡写真を、SUS304 を添加していない試料と、5% 及び 10% 添加した試料を比較して示す。いづれの試料の場合も、表面が平坦になっている台地状の MoS₂ と思われる突起が点在しており、摩擦の際にはこの部分でのみしゅう動すると思われる。また、谷の部分には薄片状や球状の粒子が観察されるが、電子顕微鏡で見た限りでは SUS304 を添加したことによる差異はあまり認められない。

図 6 に、試料の圧縮強度及び圧環強度が SUS304 を添加することにより向上している様子を示す。曲げ強度の測定には幅 8mm、厚さ 4mm、長さ 24mm の棒状試片、圧縮強度測定には直径 5mm、長さ 7mm の円柱試片、また圧環強度測定には外径 18mm、内径 8mm、幅 6mm の円筒試片を、それぞれ機械加工により作成して用い、速さ 0.5 mm/min で破壊試験を行なった。SUS304 を 5% 添加すると圧縮強度は約 1.3 倍、圧環強度が約 1.2 倍、10% 添加した場合は圧縮強度が約 1.9 倍、圧環強度は約 1.4 倍になった。

表 3 は、SUS304 を添加していないもの、5% 添加したもの 2 種の試料について、機械的特性や熱的特性などを測定した結果を示す。SUS304 の添加により曲げ強度、ヤング率などの機械的性質が向上している。熱伝導率は低下しており、SUS304 を添加した複合材には少しポーラスな部分が残っていることをうかがわせる。

表 4 は X 線回折で検出されたピークを示したものである。SUS304 を 5% 添加した試料からは、MoS₂、MoO₂、Mo₂S₃

などの他に、FeMo₂S₄ ($d=0.59\text{nm}$) のピークが検出されており、SUS304 と MoS₂ が反応を起こしたことがわかる。また、ホットプレス温度が低いにもかかわらず SUS304 を添加した試料の方が MoS₂ のピークは小さかった。SUS304 は MoS₂ の分解を促進させる効果があると思われる。

図 7 は、SUS304 を複合材に添加したことによるトライボロジー特性への影響を予備的に調べた結果で、相手ディスク材として 440C を用い常温で試験した際の摩擦係数と複合材の比摩耗量である。比較のため、図には前報の結果¹⁾も併せて示した。ただし、前報では 440C リング/複合材円板（面圧 1 MPa）、440C ポール/複合材円板（試験終了時

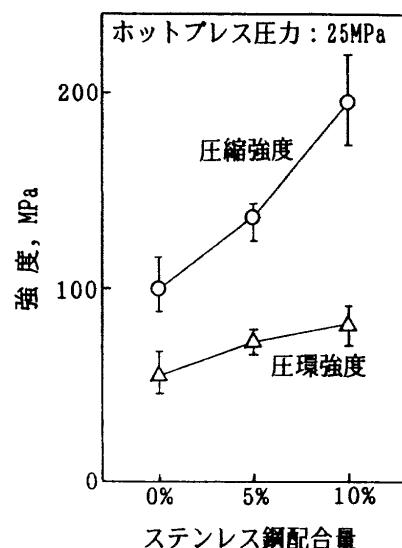


図 6 複合材の機械的強度
複合材組成 : MoS₂ + MoO₂ + Nb + SUS304

表 3 試作した複合材の性質

組成	MoS ₂ 80% MoO ₂ 10% Nb 10%	MoS ₂ 80% MoO ₂ 10% Nb 10% SUS 5%	測定方向
ホットプレス温度 圧力	1500°C 25 MPa	1300°C 40 MPa	
硬さ	HRL 10	HRM 93	ホットプレス方向
ヤング率 GPa	27.9	43.8	ホットプレス方向
熱膨張係数 20-100°C 20-500°C 20-900°C	5.0 × 10 ⁻⁶ 7.4 × 10 ⁻⁶ 8.3 × 10 ⁻⁶	6.4 × 10 ⁻⁶ 6.5 × 10 ⁻⁶ 7.7 × 10 ⁻⁶	ホットプレス方向と直角 ホットプレス方向と直角 ホットプレス方向と直角
熱伝導率 W/m·°C	15.57	8.20	ホットプレス方向と直角
比抵抗 Ω·cm	0.19	0.12	ホットプレス方向

表4 複合材X線回折結果

組成	検出されたピーク	
	ホットプレス前	ホットプレス後
MoS ₂ 80%	MoS ₂ , MoO ₂ , Nb	MoS ₂ , MoO ₂ , Mo ₂ S ₃ , Mo ₂ C
MoO ₂ 10%		
Nb 10%		
MoS ₂ 75%	MoS ₂ , MoO ₂ , Nb	MoS ₂ , MoO ₂ , Mo ₂ S ₃ , Mo ₂ C
MoO ₂ 10%		
Nb 10%		FeMo ₂ S ₄
SUS304 5%		

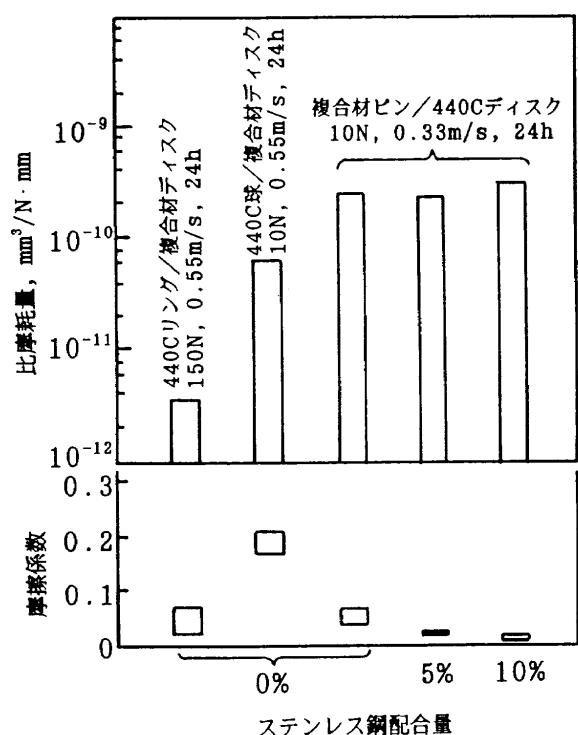


図7 相手材が440Cの場合の摩擦試験結果

試験雰囲気：真空中，常温

複合材組成：MoS₂+MoO₂+Nb+SUS304ホットプレス圧力；複合材ディスク：50 MPa
複合材ピン：25 MPa

の面圧79 MPa)のコンフィグレーションで試験したが、SUS304を添加した効果は複合材ピン/440C円板(面圧0.35 MPa)で評価している。

試験コンフィグレーションのトライボロジー特性への影響は、図7に示したように特に比摩耗量に大きく出るようである。この理由は明確ではないが、リング/ディスク型の試験では摩耗粉が系外に排出されにくいため再付着等が起こり、結果として摩耗量が少なくなるためと思われる。摩擦係数はボール/円板タイプの試験の場合に高くなっているが、面接触の他の2試験ではほぼ同じ値を示した。

一方、複合材にSUS304を添加した効果をみると、比摩耗量はSUS304の添加の有無による差はみられないが、摩

表5 ディスク試験片

ディスク 材質	焼入れ	あらさ Ra, μm
SUS304	—	0.02--0.03
M-50	あり	0.02--0.03
SK-3	なし あり	0.03 0.03--0.04
SKD-11	なし あり	0.03--0.04 0.02--0.03
Si ₃ N ₄	—	0.02--0.04

擦係数はSUS304を添加すると低下する傾向が認められた。複合材にSUS304を添加することにより強度が増加するだけでなく、トライボロジー特性の向上も期待できそうである。トライボロジー特性へのSUS304の添加効果については3.1節で述べる。

試験に用いた相手ディスク試験片を表5に示す。SK-3及びSKD-11については硬さの影響をみるために、焼入れした試料と焼入れしていない試料の2種の試料を用いた。ディスク試験片は、鋼製ディスクの場合はベンゼン潤滑下で#800のペーパーで研磨した後、トリクロロエチレン、アセトンで超音波洗浄を行なってから試験に用いた。Si₃N₄ディスクの場合は、研磨は行なわず超音波洗浄のみを行なった。

3. 実験結果と考察

3.1 相手材がM-50及びSi₃N₄の場合

前報¹⁾で、試作した複合材が高温下では相手鋼材を選択的に摩耗させること、および複合材と化学反応を起こさない相手材を選ぶことにより高温下でも良好な特性が得られる可能性があることを述べた。これを確認するため、相手材としてSi₃N₄を用い、雰囲気温度を常温から450°Cまで変化させてトライボロジー特性を調べた。また、比較のためM-50工具鋼を相手材とした試験も行なった。鋼としてM-50を選択したのは、440C等と比較して比較的高温まで硬度低下を起こさないためである。複合材ピンには、SUS304の添加量が0%, 5%, 10%の3種を用い、SUS304の添加効果も併せて調べた。相手材がSi₃N₄の場合は、450°Cの試験のみホットプレス圧力を40 MPa, 25 MPaに変化させた複合材を用いたが、それ以外の温度では25 MPaで作成した複合材を用いた。相手材がM-50の場合にはホットプレス圧力40 MPaで作成した複合材を使用した。

実験結果を図8～10に示す。図8は相手ディスク材がSi₃N₄の場合の摩擦係数、図9はM-50の場合の摩擦係数である。図10は複合材ピンの比摩耗量で、相手材がM-50, Si₃N₄の両方の場合をまとめて示してある。

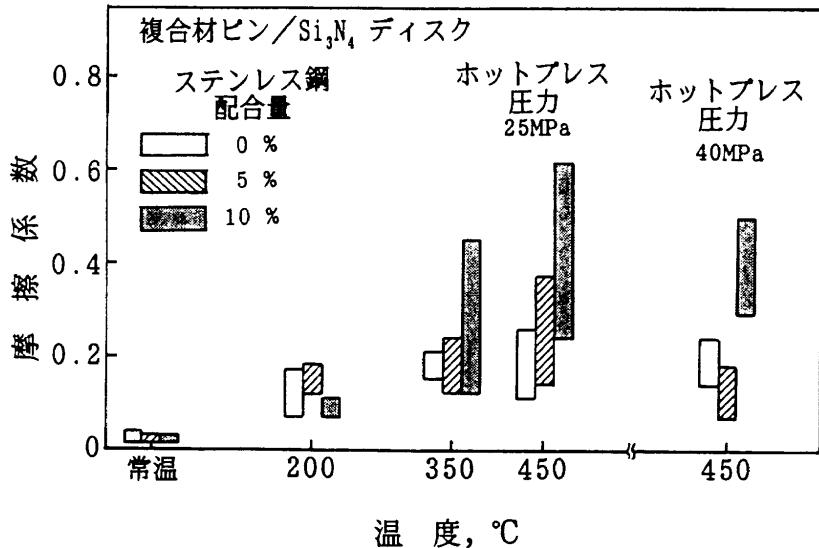


図 8 温度を変化させた場合の摩擦係数
相手ディスク材 : Si_3N_4

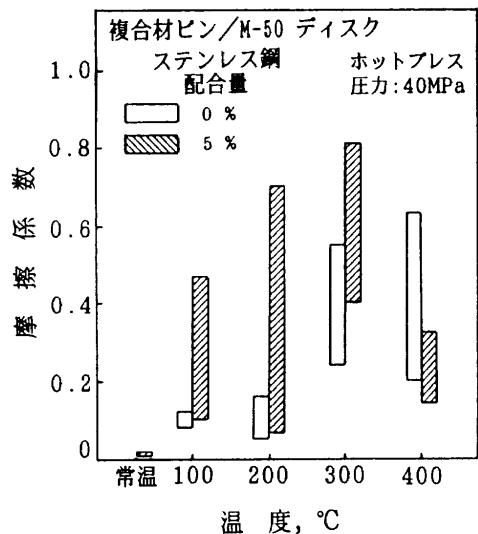


図 9 温度を変化させた場合の摩擦係数
相手ディスク材 : M-50

常温では、相手材がM-50でも Si_3N_4 でも、また複合材へのSUS304の添加の有無にかかわらず、前述した440°Cの場合とほぼ同等の良好なトライボロジー特性を示した。

この複合材は、常温では摩擦相手材の種類によらず良好なトライボロジー特性を示すようである。しかし、試験温度が高くなるにつれて、相手材がM-50, Si_3N_4 のいづれの場合でも摩擦・摩耗ともに増大した。

まず、相手材が Si_3N_4 の場合の高温でのトライボロジー特性をみてみよう。図8、図10に示したように、摩擦係数、ピンの比摩耗量はともに温度が高くなるにつれて徐々に増大する傾向が認められる。また、SUS304を複合材に添加すると、高温では摩擦係数の値・変動幅ともにやや大きくなるものの、比摩耗量は低下する傾向がみられ、SUS304の添加によりトライボロジー特性が改善されることがわか

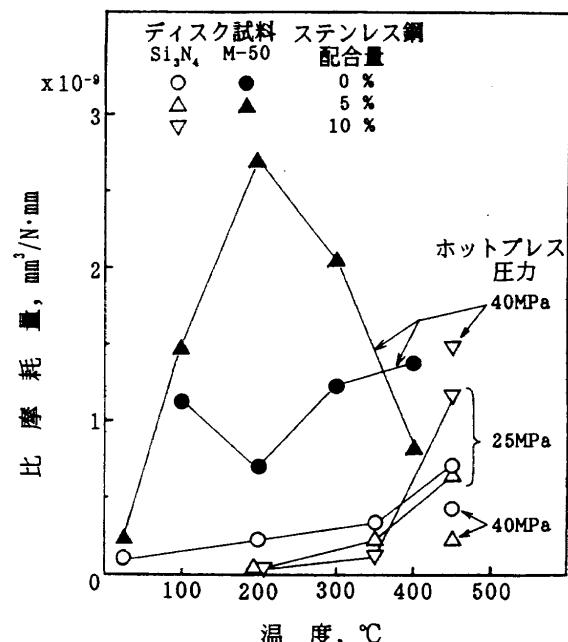
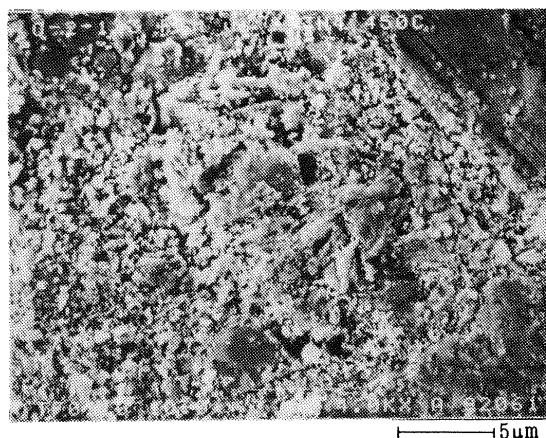
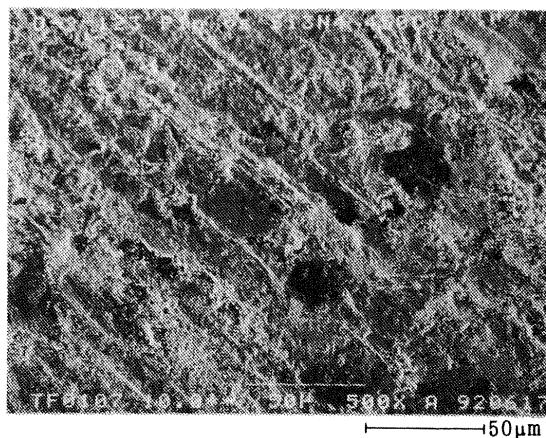


図10 温度を変化させた場合の比摩耗量
相手ディスク材 : M-50, Si_3N_4

った。ただし、SUS304を10%添加した複合材は450°Cでは特に比摩耗量が急増し、添加し過ぎるとかえって悪影響を及ぼす。SUS304の最適配合量は5%程度と思われる。

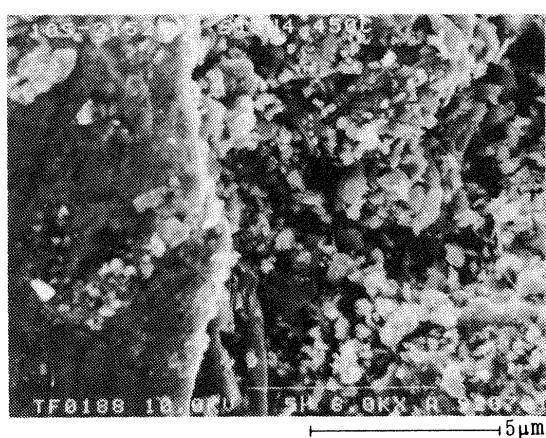
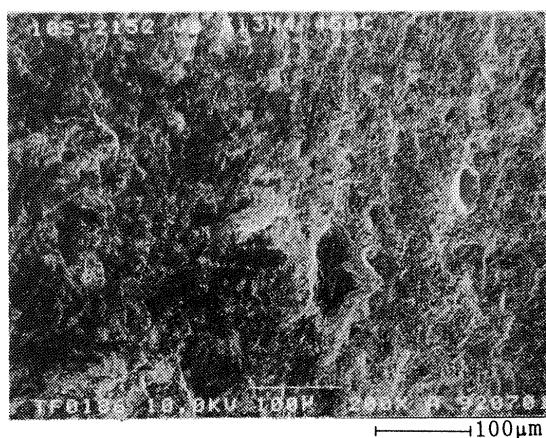
450°Cの試験のみ、ホットプレス圧力を40MPa, 25MPaに変化させた試料を用いて試験したが、SUS304の添加量が10%の場合を除けば、ホットプレス圧力が高い方が摩擦・摩耗ともに小さくなつた。450°Cで最も良好な結果は、SUS304を5%添加しホットプレス圧力40MPaで作成した複合材の場合に得られ、摩擦係数は0.07-0.18、ピンの比摩耗量が $2.2 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{N}$ であり、相手 Si_3N_4 円板にも後述するように摩耗は認められなかった。



(a)



(b)



(c)

図11 450°C試験後のピンの電子顕微鏡写真

相手ディスク材： Si_3N_4 (a) 組成：80% MoS_2 + 10% MoO_2 + 10% Nb
ホットプレス圧力：40 MPa(b) 組成：75% MoS_2 + 10% MoO_2 + 10% Nb + 5% SUS
ホットプレス圧力：40 MPa(c) 組成：70% MoS_2 + 10% MoO_2 + 10% Nb + 10% SUS
ホットプレス圧力：40 MPa

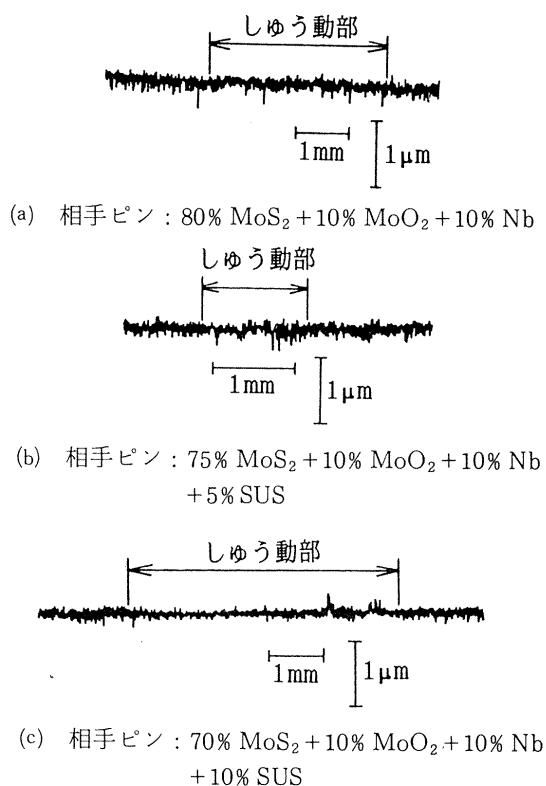
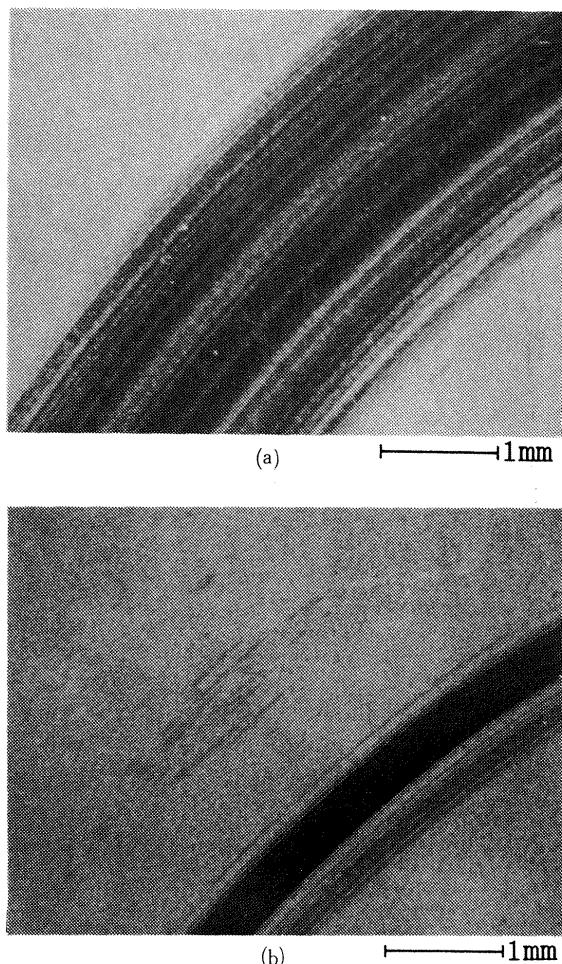


図13 450°C試験後のSi₃N₄ディスク摩耗痕の表面あらさ 相手複合材ピンのホットプレス圧力はいづれも40MPa

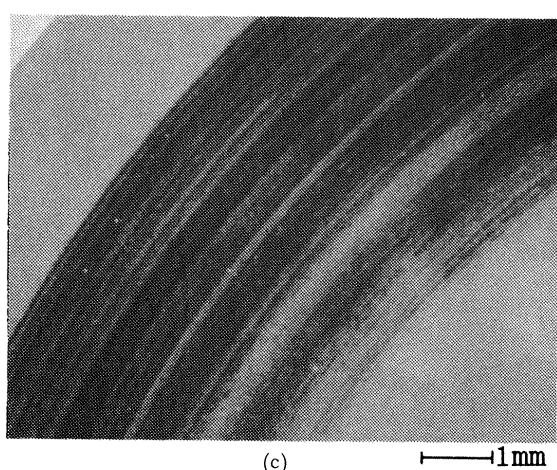


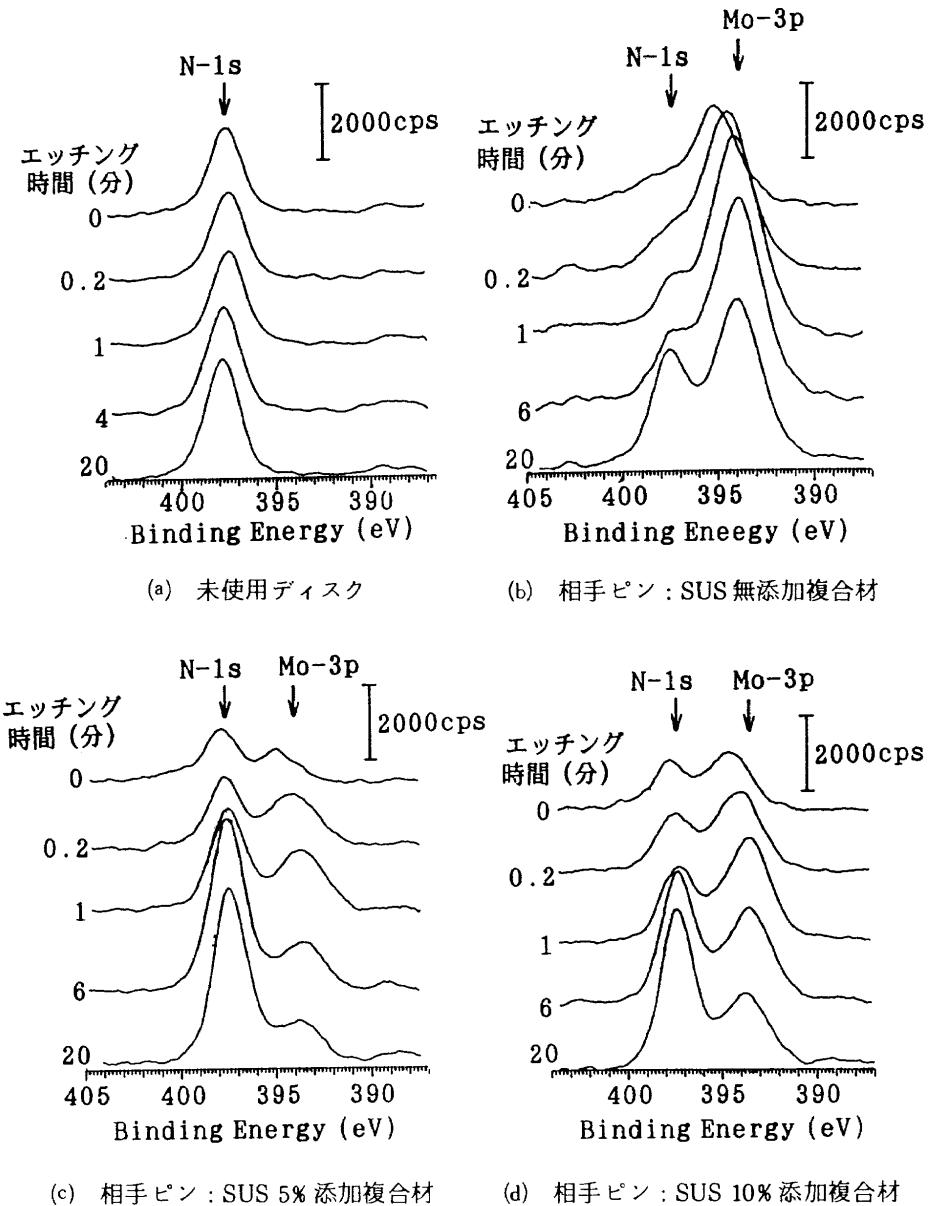
図12 450°C試験後のSi₃N₄ディスク摩耗痕

- (a) ピン: 80% MoS₂ + 10% MoO₂ + 10% Nb
- (b) ピン: 75% MoS₂ + 10% MoO₂ + 10% Nb + 5% SUS
- (c) ピン: 70% MoS₂ + 10% MoO₂ + 10% Nb + 10% SUS
相手複合材ピンのホットプレス圧力はいづれも40MPa

この複合材は、相手材がSi₃N₄の場合に、450°Cの高温下でもきわめて良好なトライボロジー特性を示すことを確認した。

図11に450°C試験後の複合材ピン表面の外観、図12に相手Si₃N₄ディスク表面の外観、図13にSi₃N₄ディスクしゅう動部の表面あらさを示す。ピン表面は、MoS₂と思われる表面が平坦な台地状の突起が点在しており、試験中はこの部分でのみしゅう動していたものと思われる。谷の部分に詰まっている粒子が図5に示したしゅう動前のピン表面と比べてやや小さくなっている他は、しゅう動前後で表面の様子にはあまり差は認められない。また、SUS304の添加量による差もほとんど認められなかった。ディスク表面は、SUS304添加量が5%の場合のみ片当たりのためしゅう動幅が狭いが、いづれのディスクにもしゅう動部には比較的密な転移膜が形成されている。図13の表面あらさの測定効果から、Si₃N₄ディスクには摩耗がなく、転移膜もきわめて薄いことがわかる。良好なトライボロジー特性を示したのは、Si₃N₄ディスク表面にごく薄い転移膜が形成され、この転移膜とピンのMoS₂の台地状の突起間のみで摩擦していたためと推測される。

図14は450°C試験後のSi₃N₄ディスクしゅう動部のXPS分析結果の一例で、N-1sとMo-3pスペクトルについて

図14 Si_3N_4 ディスクのXPS分析結果

N-1s, Mo-3pスペクトル

相手複合材ピンのホットプレス圧力はいづれも40 MPa

Arエッティングにより深さ方向に分析した結果である。図には比較のため未使用ディスクの分析結果も併せて示した。なお、図では Si_3N_4 のNピークを基準として帯電補正を行なっている。試験後のディスクからは、未使用ディスクには現れていないMoのピークが検出されており、いづれのSUS304添加量の場合も転移膜が形成されていることが確認できる。SUS304を添加していない場合には、Moのピークが高いこと、20分エッティング後でもNピークよりMoピークの方が高くなっていることから、厚い転移膜が形成されているものと考えられる。

次に、相手材がM-50の場合の高温下でのトライボロジー特性をみてみよう。図8～10に示したように、M-50ディスクの場合には Si_3N_4 ディスクと比べると摩擦係数、複

合材ピンの比摩耗量はかなり大きくなった。SUS304を添加していない複合材では、摩擦係数は図9に示したように温度上昇につれて高くなる傾向がみられ、特に300°C以上になると急増した。ピンの比摩耗量も図10に示したように温度とともに徐々に増加しており、トライボロジー特性は温度が上昇するにつれて劣化している。

一方、SUS304を5%添加した複合材では、摩擦係数は100°Cから300°Cまでは温度とともに増大していく傾向がみられるが、400°Cでは低下している。また、比摩耗量も200°Cまでは温度とともに急増するが、さらに温度が高くなるとかえって小さくなかった。SUS304を複合材に添加することにより、400°Cではトライボロジー特性がやや改善されたが、100～300°Cでは逆にSUS304を添加しない方が

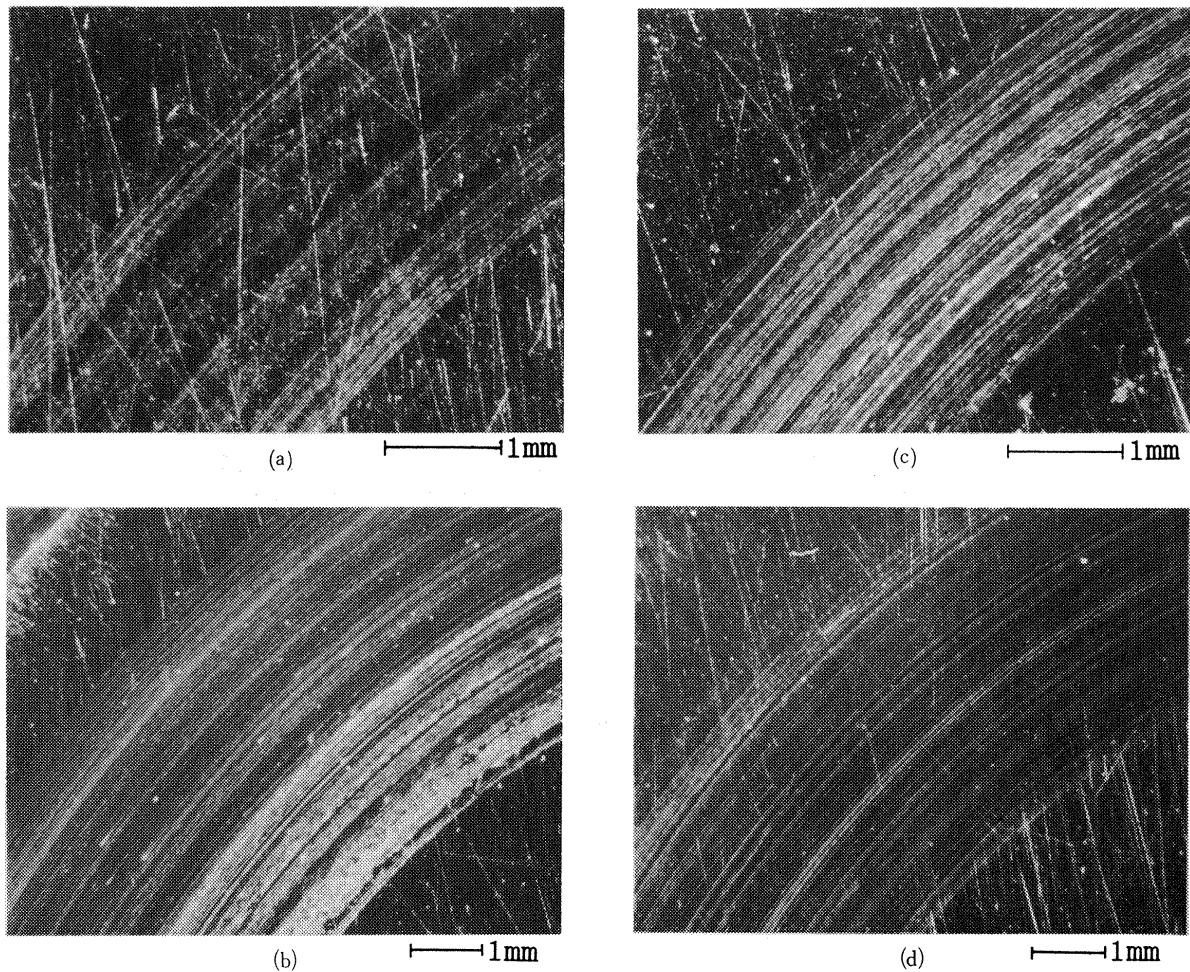


図15 試験後 M-50ディスク摩耗痕 ピン: MoS₂ + MoO₂ + Nb + 5% SUS
 (a) 常温試験後, (b) 200°C試験後, (c) 300°C試験後, (d) 400°C試験後

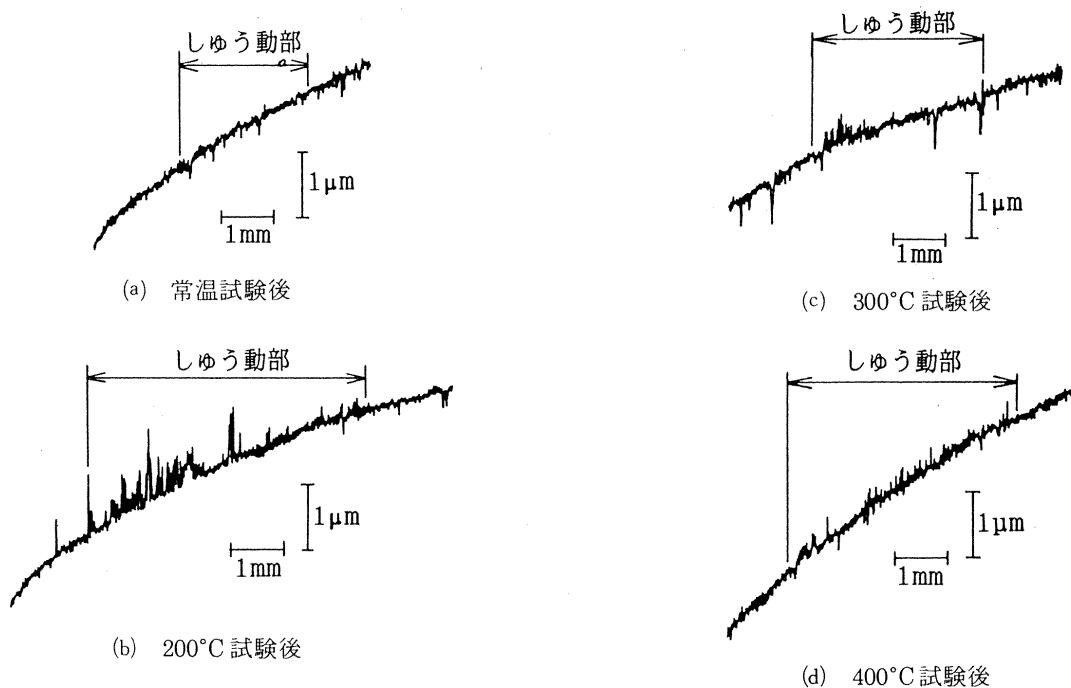


図16 試験後 M-50ディスク摩耗痕の表面あらさ
 ピン: MoS₂ + MoO₂ + Nb + 5% SUS

良好である。M-50ディスクが相手材の場合、試験した温度範囲ではSUS304を添加するメリットはあまり認められない。

図15にSUS304を5%添加した複合材と摩擦させたM-50ディスクのしゅう動痕の外観を、図16にしゅう動部の表面あらさを示す。常温試験後のディスク表面はしゅう動痕がわずかに認められる程度で、しゅう動痕内部には研磨傷も残っている。また、400°C試験後のディスクでも、しゅう動痕は常温の場合よりはかなりはっきりしているが、それでもしゅう動痕内部には研磨傷が認められる。これらのしゅう動痕は、図16(a), (d)の表面あらさからディスクの摩耗痕ではなく、表面に形成された転移膜であることがわかる。このことは、後述するXPSの結果からも確認された。一方、200°C試験後のディスクではしゅう動部に比較的厚い転移膜が形成されており、研磨傷は転移膜に覆われて見えなくなっている。比較的厚い転移膜であることは、図16(b)の表面あらさからもみてとれる。300°C試験後のディス

クにも、膜厚は図16(c)からみられるように200°Cの場合に比べると薄いが他の温度よりは厚い転移膜が形成されている。これらの試験温度でピンの摩耗量が多くなったことを図10に示したが、これはディスク上に厚い転移膜が形成されたためと推定される。

図17, 18はM-50ディスクのしゅう動部のXPS分析結果で、図17にMo-3dスペクトルを、図18にFe-2pスペクトルを示した。いづれもArエッティングにより深さ方向分析を行なっている。図17に示したように、未使用ディスクからもM-50に含まれているMoに由来するピークが現れているが、試験後のディスクからはこれよりはるかに大きなMoピークが検出されており、いづれの試験温度でも転移膜が形成されていることが確認できる。常温の場合にはややピークが低く、転移膜が密でないことをうかがわせる。一方、図18(c)に示した300°C試験後のディスクのFeスペクトルでは、710eV付近にピークが認められた。同じ位置のピークは200°C試験後のディスクからも検出されており、

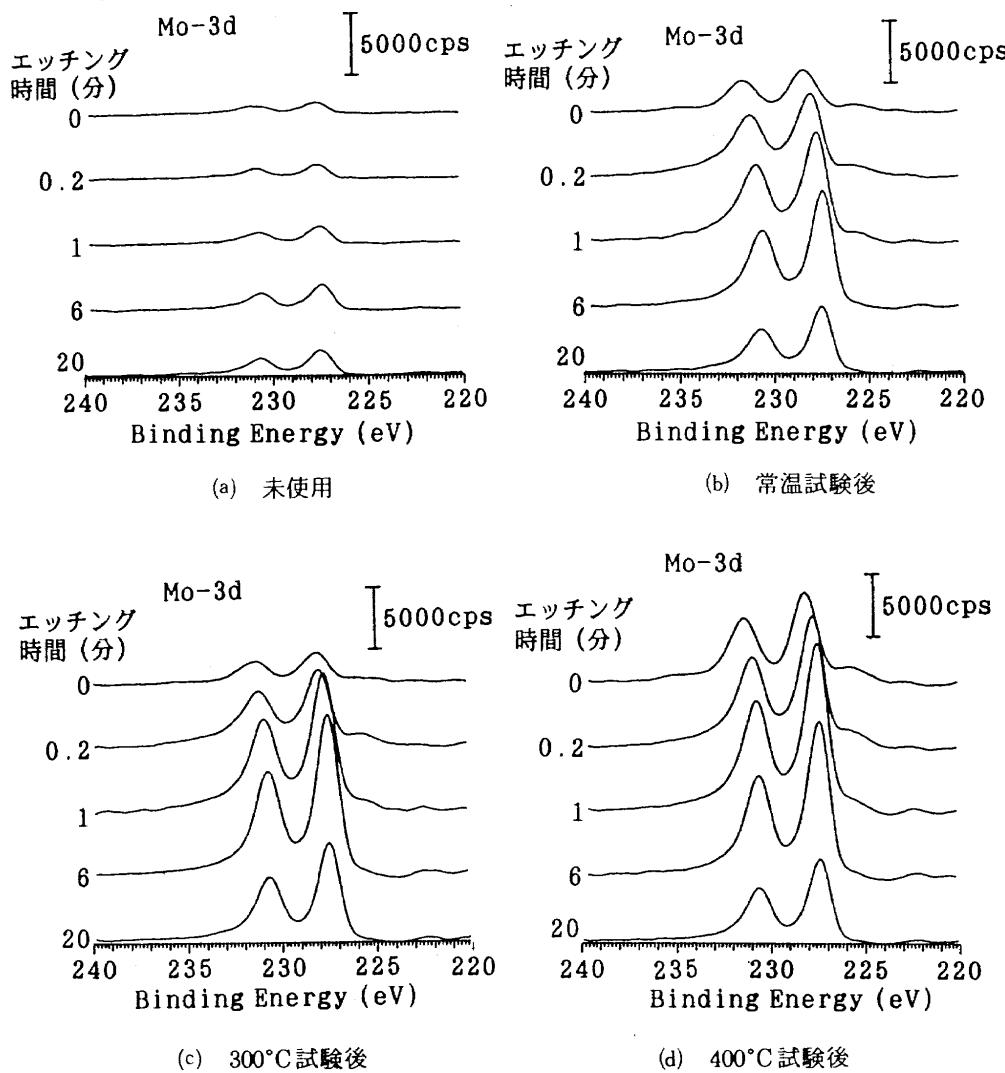


図17 M-50ディスクのXPS分析結果
Mo-3dスペクトル、ピン: $\text{MoS}_2 + \text{MoO}_3 + \text{Nb} + 5\% \text{ SUS}$

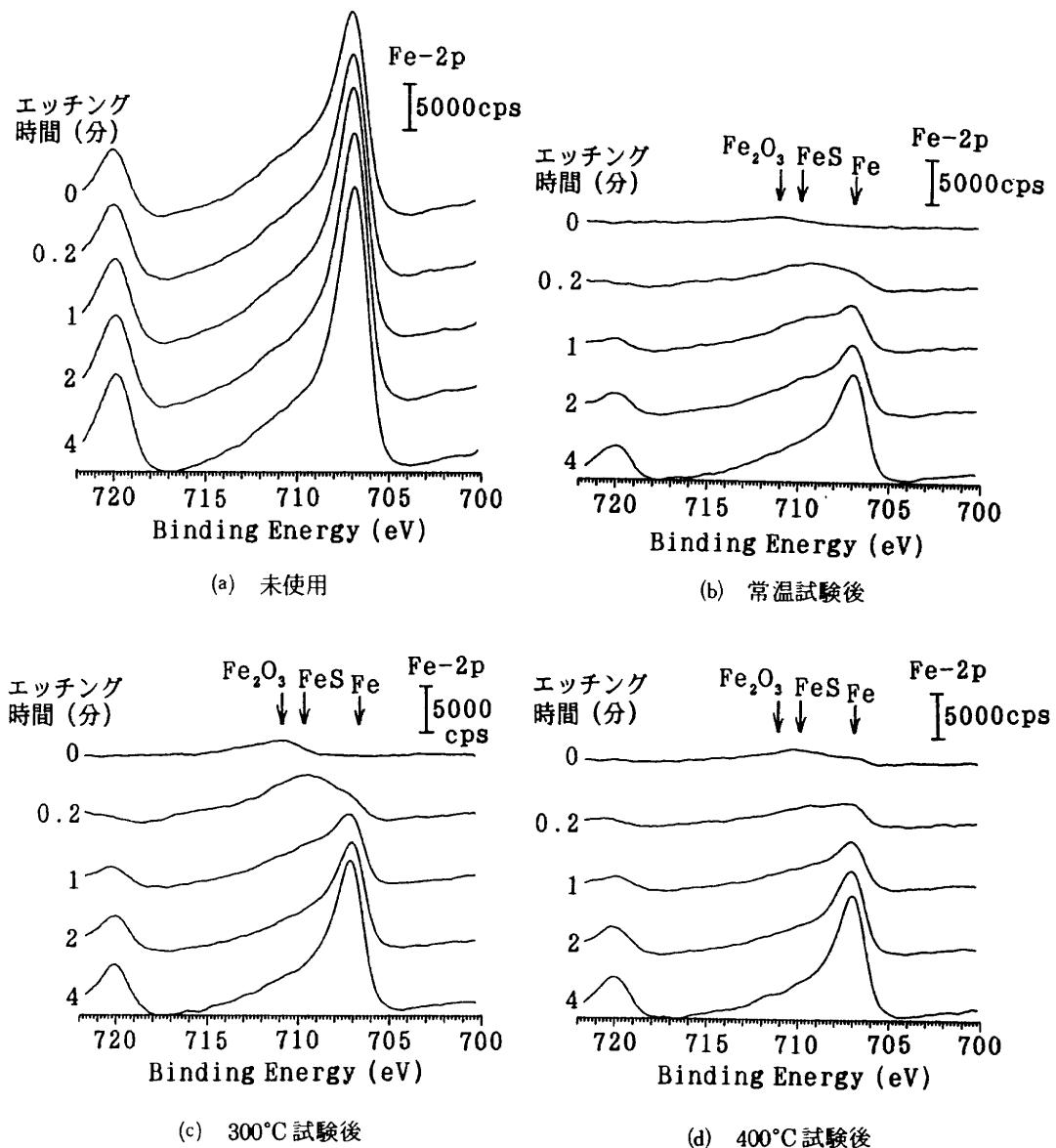


図18 M-50ディスクのXPS分析結果
Fe-2pスペクトル, ピン: MoS₂+MoO₂+Nb+5% SUS

また、わずかながらではあるが図18(b)の常温試験後、(d)の400°C試験後のディスクからも検出されている。このピーク位置は鉄の硫化物とほぼ一致しており、ディスクのFeとピンのMoS₂が反応を起こしていたことを示唆している。温度が高い400°Cの方が300°Cよりこのピークが低い理由は不明だが、図10に示したように300°の試験の方がピンの摩耗が2倍以上多かったことと関連しているものと思われる。

図19に複合材ピンのXPSのFeスペクトルを示す。図19(a)は、SUS304を添加していないピンをM-50に対して常温で摩擦させた後のピン表面の分析結果である。この場合にはピークは検出されていない。これに対して、図19(b)はSUS304を添加していないピンを用いた400°C試験後の場合であるが、Feのピークとともにわずかながら鉄の硫化物のピークも検出された。このことは、試験温度が高くな

るとディスク材料がピン側へ移着することを示している。図19(c)は、SUS304を5%添加したピンをM-50に対して400°Cで摩擦させた場合である。鉄の硫化物が検出されており、Feのピークがやや大きい以外は(b)のSUS304無添加の場合とはほぼ同じスペクトルが得られた。図19(c)のピークにはピンに添加したSUS304に起因するものも含まれている。しかし、図19(d)に示したSUS304を5%添加したピンをSi₃N₄に対して450°Cで摩擦させた場合と比較すると、(d)では鉄の硫化物のピークは検出されておらず、(c)で検出された鉄の硫化物のピークは、ピンに含有されるSUS304とMoS₂が反応して生成されたものでなく、ピンと相手材M-50との反応で生成されたものと推定できる。また、(d)のFeピークはピンに添加したSUS304によるものであるが、(c)のFeピークの方がはるかに大きく、(c)のFeピークにはピンの中のSUS304に起因するピークだけでなく、ディス

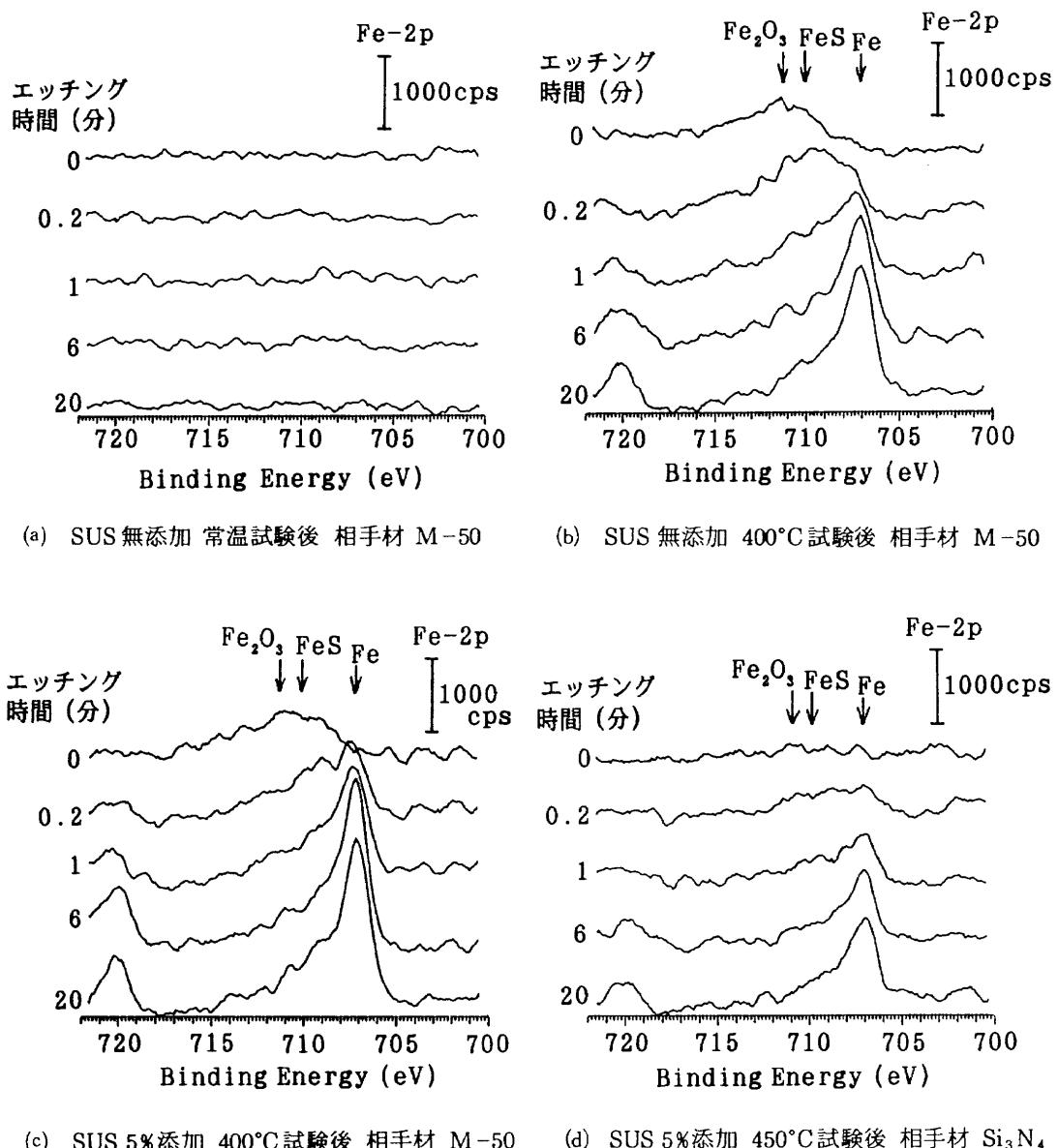


図19 ピン摩擦部のXPS分析結果
Fe-2pスペクトル

ク材がピンへ移着したため生じたピークも含まれていたと推定される。以上の結果は、高温になると複合材のMoS₂とディスクのFeが反応して硫化鉄が生成され、同時にディスク材がピン側へ移着したこと示唆している。

前報¹⁾のすべり軸受試験では、複合材のすべり軸受がSUS304製の軸を大きく摩耗させ、いわば複合材が鋼を“食う”現象が起ったが、M-50をディスクに用いた摩擦試験では、上述したようにM-50ディスクには摩耗はほとんど認められず、比較的良好なトライボロジー特性を示した。また、図18、19で示したように、相手材がM-50ディスクの場合でも、すべり軸受試験と同様に鉄の硫化物が生成されていた。このことは、鉄の硫化物の存在がSUS304製の軸に大きな摩耗が生じた直接の原因ではないことを意味する。それでは、SUS304が大きく摩耗した原因は何か

のか？ M-50以外にもこの複合材に“食われない”鋼はあるのか？ このような疑問を解明するため、数種の鋼についてさらに摩擦試験を行なった。なお、Si₃N₄相手でホットプレス圧力40MPaの方が良好な結果が得られたため、以下の試験ではすべて40MPaでホットプレスした試料を使用した。

3.2 相手材がSUS304の場合

試作した複合材がSUS304鋼を“食う”のはすべり軸受試験という試験コンフィグレーション固有のものなのか、それともピン／ディスク試験でもやはりSUS304鋼を“食う”のかを確認するため、すべり軸受と同じSUS304無添加複合材ピン／SUS304ディスクの組合せとし、450°Cで摩擦試験を行なった。

表 6 相手材が SUS304 ステンレス鋼の場合の試験結果

試験タイプ	ピン／ディスク摩擦試験		すべり軸受試験	
試験片材料	ピン: 80%MoS ₂ +10%MoO ₃ +10%Nb ディスク: SUS304		軸受: 80%MoS ₂ +10%MoO ₃ +10%Nb 軸: SUS304	
試験条件	真空中、450°C 10N, 0.33m/s (200 rpm), 8h		真空中、450°C 1.2 N, 0.05m/s (120 rpm), 972h	
摩擦係数	0.12~0.19		-----	
比摩耗量, mm ³ /N·mm	複合材ピン 1.4×10^{-7}	304ディスク 4.25×10^{-8}	複合材軸受 (重量増加)	304軸 $0.6 \sim 1.5 \times 10^{-8}$

注: 複合材ピン, 複合材軸受とともにホットプレス条件は温度 1500°C, 圧力 40 MPa

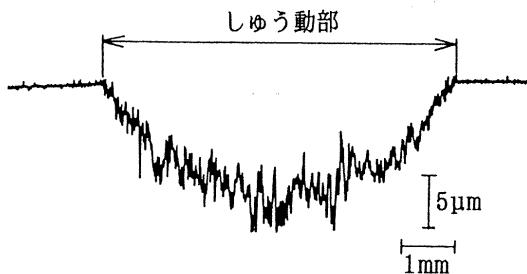


図20 450°C 試験後の SUS304 ディスク摩擦痕の表面あらさ

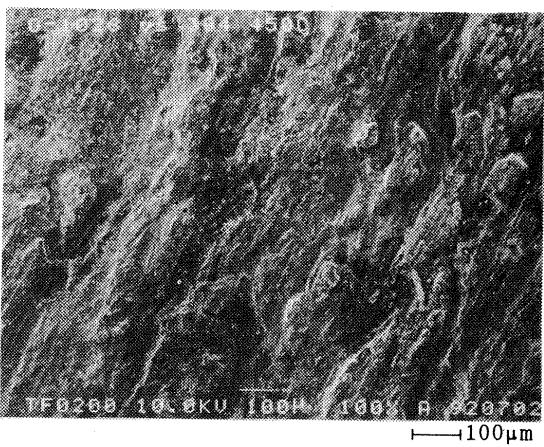
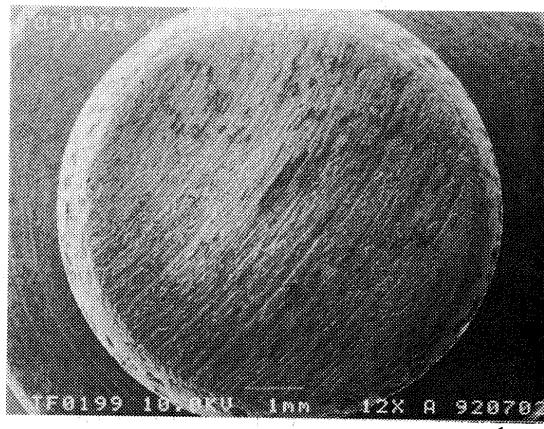


図20に試験後の SUS304 ディスク しゅう動部の表面あらさを、また表 6 には試験結果をすべり軸受試験と比較して示す。図20に示したように、SUS304 ディスクは約 10 μm と大きく摩耗しており、またしゅう動部の表面もかなり荒れている。SUS304 の比摩耗量はすべり軸受試験、ピン / ディスク試験とともに $10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{mm}$ 台であり比較的よく一致した。この結果は、SUS304 に大きな摩耗が生じたのは、軸受試験、ピン / ディスク試験という試験コンフィグレーションの差によるのではなく、別の同一の理由によるものであることを示唆する。ただし、複合材軸受では重量が増加したのに対し、複合材ピンが激しく摩耗した点は異なっている。軸受の場合には、摩耗粉が摩擦系外に排出されにくく軸受に埋め込まれたためであろう。この複合材が鋼を“食う”性質があるのではなく、特定の試験コンフィグレーションの場合に鋼を“食う”形になるものと思われる。

試験後のピンの外観を図21、ディスク外観を図22に示す。ピン表面は、しゅう動方向に粗い条痕がみられ、凹凸もかなり大きい。ディスク側の方も、図22(a)に示したように摩擦方向に深い筋がみられ、アブレッシブな粒子により削り

図21 SUS304 ディスクと摩擦させたピンの表面
ピン: MoS₂+MoO₃+Nb, 試験温度 450°C

取られたような様相を呈している。図22(a)中心部の白くなった切り口のような部分を拡大したのが図22(b)である。無数の粒がみられるが、図 5 や図 11 のピンの写真と比較すると、これらはピンから移着した複合材であることがわかる。また、しゅう動痕の一部には、図22(c)のように複合材から

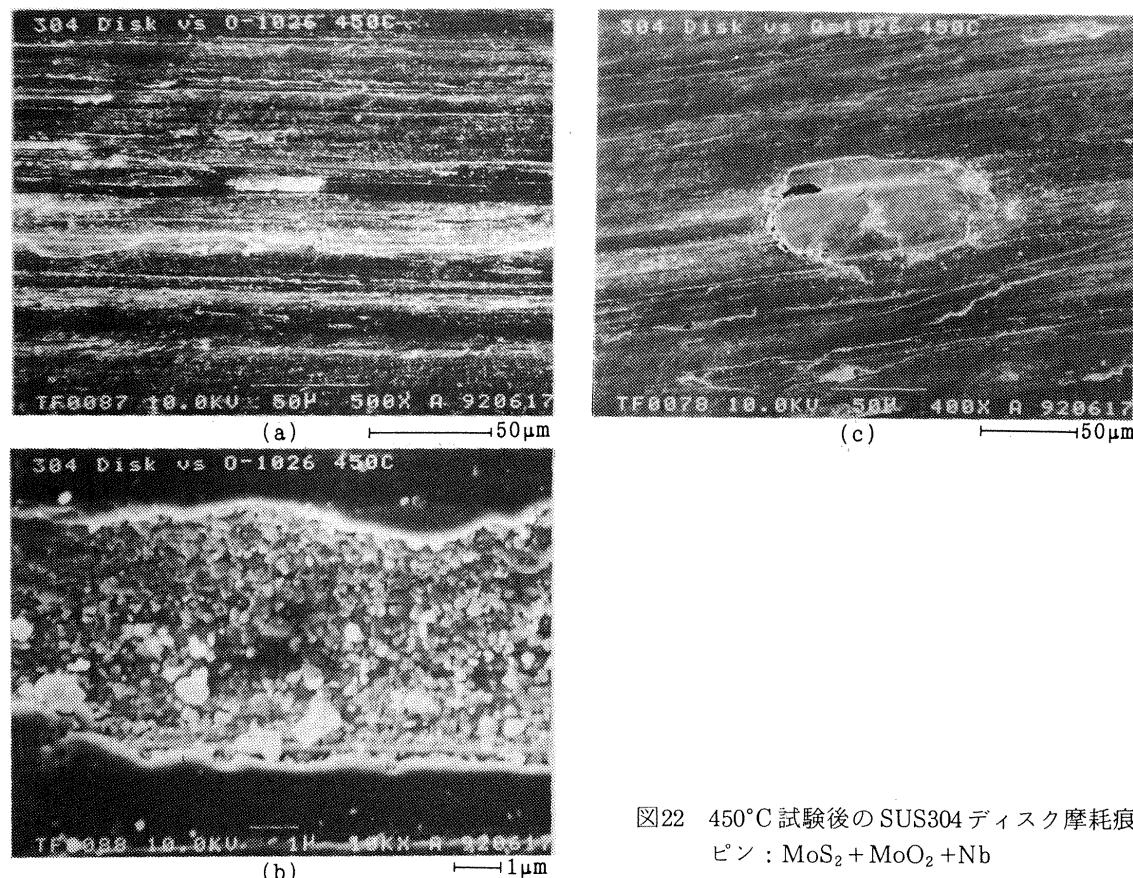


図22 450°C試験後のSUS304ディスク摩耗痕
ピン: MoS₂+MoO₂+Nb

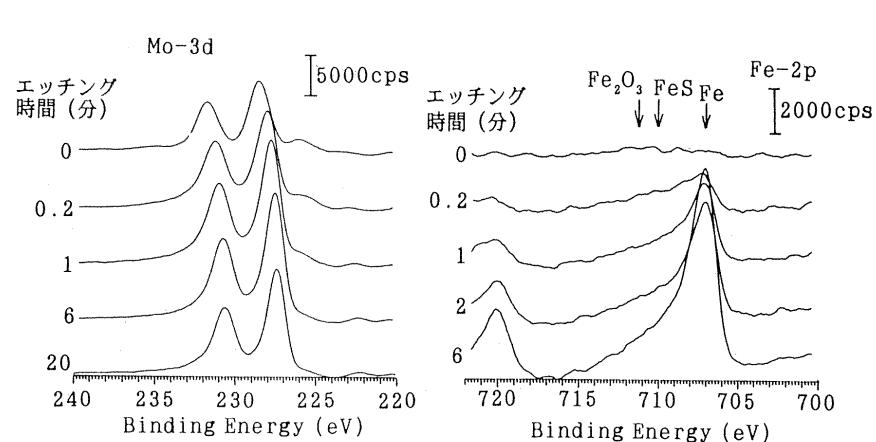
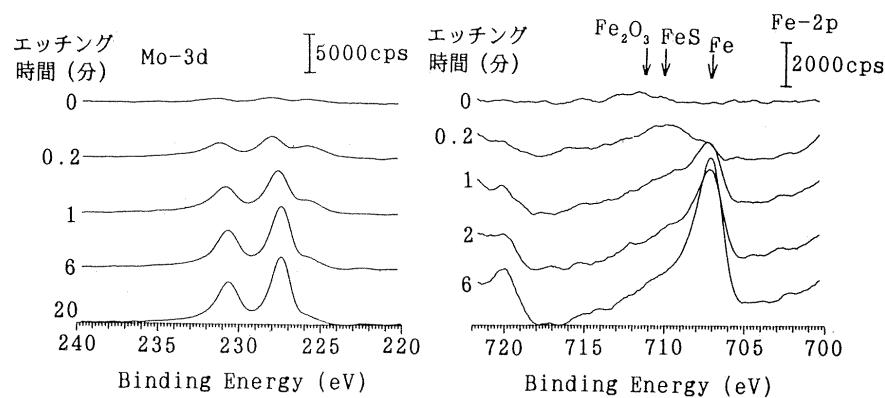


図23 軸受試験と摩擦試験のSUS304表面のXPS分析結果の比較

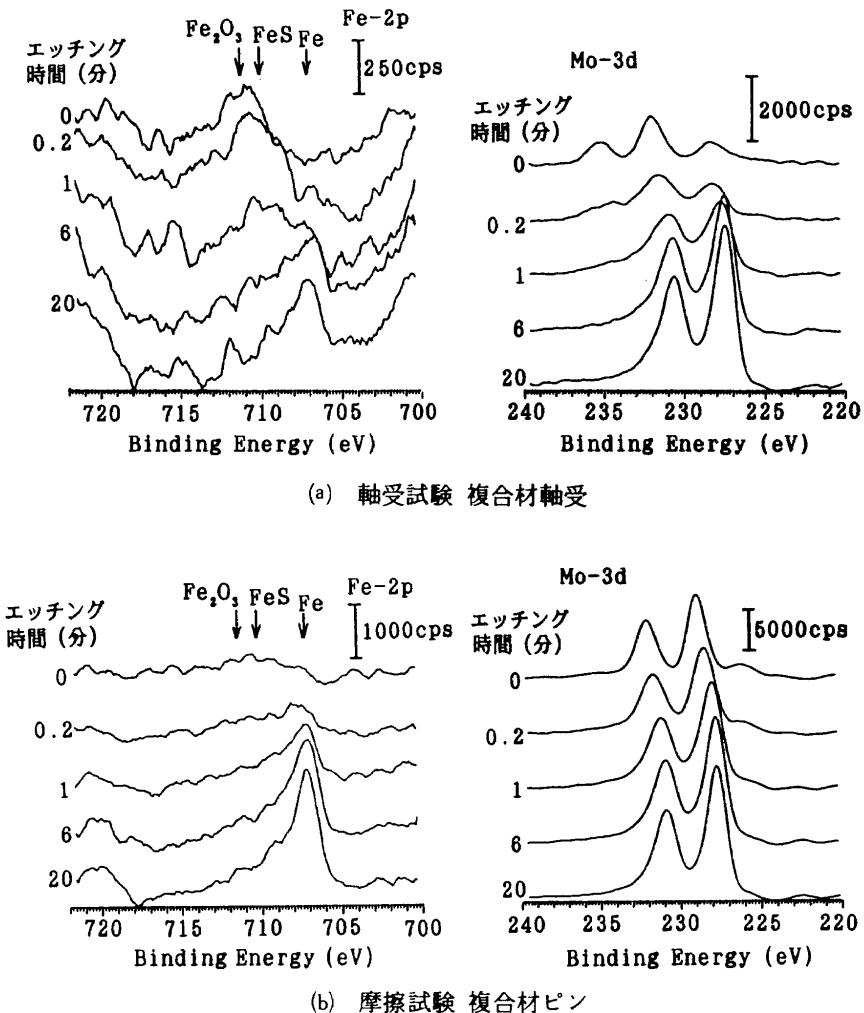


図24 軸受試験と摩擦試験の複合材のXPS分析結果の比較

なる摩耗粉がSUS304ディスクに傷をつけながら摩擦され最終的に停留したと思われる場合も観察された。

図23はSUS304ディスクと前報のすべり軸受試験に使用したSUS304軸の表面のXPS分析結果を比較したものである。Moスペクトルは、図23(a)の軸受試験に比べて、(b)の摩擦試験の方がピークが大きく、複合材の転移量は摩擦試験の方が多かったと思われる。Feスペクトルをみると、(a)の軸受試験では明らかに鉄の硫化物の位置にピークが現れているが、(b)の摩擦試験ではほとんどピークが認められない。図24には、複合材ピンとすべり軸受試験の複合材軸受のXPS分析結果を示す。複合材の場合も鉄の硫化物は軸受には明らかに検出されているが、ピン表面ではあまりピークがはっきりしない。一方、Moスペクトルでは、(a)の複合材軸受の場合は表面層では高エネルギー側にシフトしており、何らかの化学的な変化が生じているようである。

表7に試験後の摩擦痕の硬さを測定した結果を、M-50ディスクの場合と比較して示す。SUS304の場合、試験後の摩擦痕内は未しゅう動部よりもやや硬くなっている。摩擦に伴う変形により加工硬化を起こしたものと推測される。脱落した摩耗粉はさらに変形が進んでいると考えられるた

表7 試験後相手ディスクの硬さ
(ディスク材料: M-50, SUS304)

ディスク	硬さ: HV	
	摺動部	非摺動部
M-50 未使用	-----	880-950
M-50 400°C 試験後	820-840	850-890
SUS304 450°C 試験後	380-480	320-360

*測定荷重: 200gf、保持時間: 30sec

め、バルクよりもかなり硬く從ってアブレッシブであった可能性は十分ある。また、複合材にはアブレッシブといわれているMoO₂が含まれており、ピンの摩耗が進めばアブレッシブな摩耗粉の供給源となり得ると思われる。これらのこと、及び図22に示した摩耗痕の様相を考慮すると、SUS304の過大な摩耗は摩耗粉のアブレッシブな作用によって引き起こされたと考えられる。前報のすべり軸受試験では、SUS304製の軸の摩耗は300°Cまでは比較的少なく450°Cで急増した¹⁾。これは、アブレッシブな摩耗粉の生

成が温度に依存していることを示している。

一方、M-50の場合、400°Cで8時間も試験したにもかかわらず、硬度低下はわずかであった。また、図15、16に示したようにM-50ディスク表面には転移膜が形成されており、生成される摩耗粉には硬いM-50は含まれていなかったと考えられる。このため、摩耗粉のアブレッシブ作用はほとんど問題にならず、これがM-50とSUS304ディスクの摩耗量の違いになって現われたと考えることができる。

3.3 相手材がSK-3及びSKD-11の場合

上述した試験で相手材として用いたM-50とSUS304では、表7に示したように硬さもだいぶ異なっている。トライポロジー特性には相手材の種類（鋼種）と硬さのどちらの方が大きく影響するのだろうか？これを調べるために、SK-3、SKD-11の2種の工具鋼を選び、焼入れをしていないディスク、焼入したディスクの両者について450°Cで試験を行なった。試験に用いた複合材はSUS304を5%添加したものである。

試験結果をSUS304及びM-50の場合と比較して図25に示す。また、試験後のディスクしゅう動部の表面あらさを図26に、硬さを表8に示す。ディスク材が焼入れしていない場合は、SUS304を含めいづれの鋼でもピン・ディスクとともに摩耗がかなり多く、摩擦係数も高い。試験後のディスクしゅう動部はかなり荒れており、また表8に示したようにしゅう動部の方がやや硬くなっていた。前節で述べた相手材がSUS304の場合と同様に、アブレッシブな摩耗粉により摩耗したものと推測される。焼入れしていないディスク材の場合は鋼種にかかわらず、トライポロジー特性は悪い。

一方、焼入れしたディスクの場合は、焼入なしの場合と

比べると摩擦係数は同様に高いものの、摩耗はピン・ディスクともにかなり低下した。SK-3では図26に示したようにしゅう動部がかなり荒れており摩耗もみられたが、SKD-11ディスクでは転移膜が形成されており良好な耐摩耗性

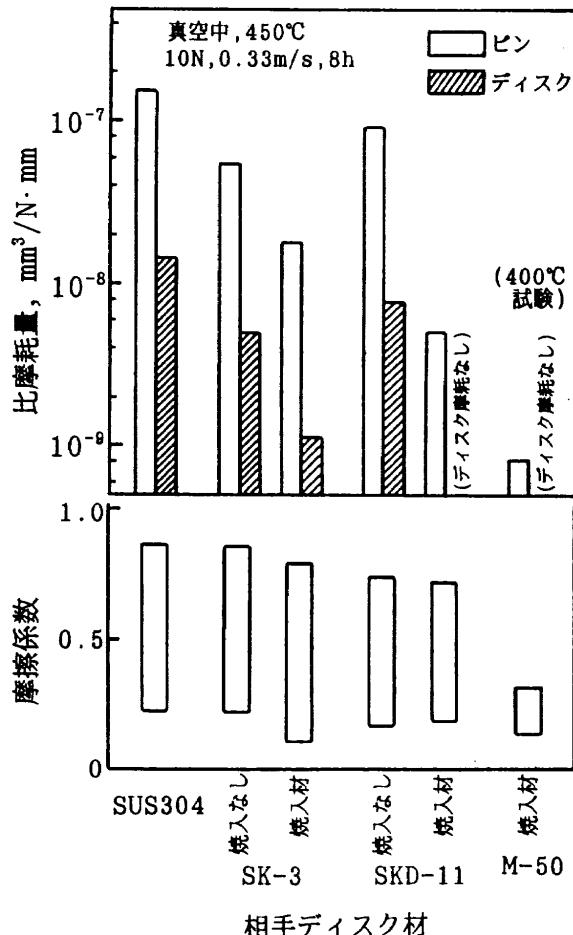


図25 相手材がSK-3、SKD-11の場合の摩擦試験結果
試験温度：450°C

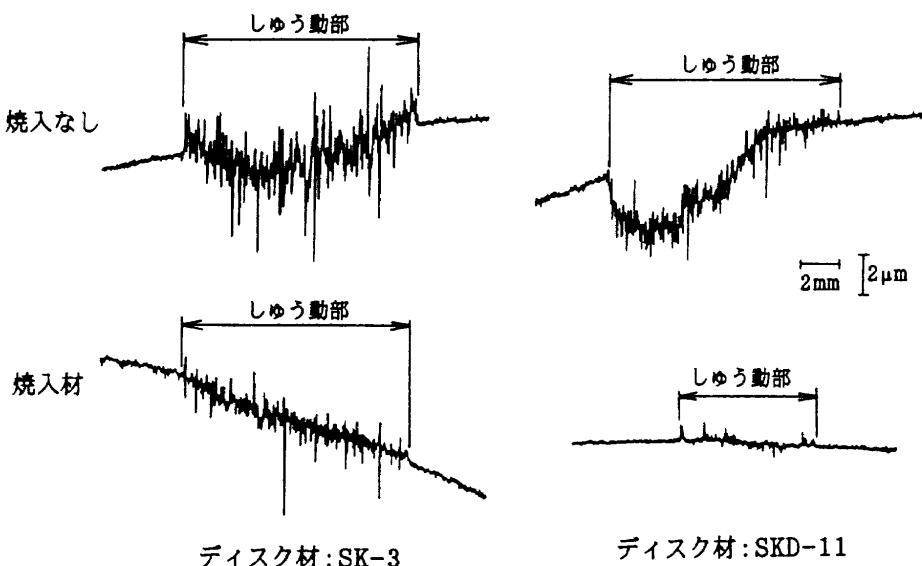


図26 450°C試験後のSK-3、SKD-11ディスク摩耗痕の表面あらさ
試験温度：450°C

表8 試験後相手ディスクの硬さ
(ディスク材料: SK-3, SKD-11)

ディスク	硬さ [*] Hv	
	摺動部	非摺動部
SK-3 450°C 試験後 焼入れなし 焼入れ材	300-370 490-560	230-240 580-620
SKD-11 450°C 試験後 焼入れなし 焼入れ材	290-330 690-770	290-310 740-800

*測定荷重: 200gf、保持時間: 30sec

を示した。ディスクに摩耗がみられなかった鋼は、試験した範囲では焼入されたSKD-11とM-50のみであり、この両者にMoの成分として含まれていることは興味深い。

図27は、ピンおよびディスクの比摩耗量を未しゅう動部の硬さに対してプロットしたものである。硬さが高いほどピン・ディスクともに摩耗が少なくなっている。耐摩耗性は鋼が硬いほど良好であった。ただし、摩耗がなかった場合には転移膜も形成されており、ディスク材の硬さだけが摩耗低下の要因とは考えにくい。

3.4 最適相手材の検討

前節までに述べた結果から、試作した複合材に適した相手材を推測してみよう。まず、第1に要求されることは十分に硬い表面をもっていることである。試験した範囲では、鋼種によらず焼入されていない鋼は大きく摩耗しており、また焼入されている場合でも硬さがHv=600程度のSK-3では摩耗が生じた。摩耗が生じないためにはSKD-11のHv=770程度の硬さが必要であった。

この理由は次のように推測できる。この複合材はバルクとしては柔らかいが、図5にみられるように種々の粒子が含まれており、粒子レベルでみるとかなり硬いものも含まれている。硬さ測定の際には、小さな硬い粒子が柔らかいMoS₂に埋め込まれてしまうために見掛け上は硬さが低くなるということは十分あり得ることと思われる。ある硬さ以上の相手材でなければ、この硬い粒子がアブレッシブ的に作用して相手材を摩耗させ、そして摩耗した相手材の摩耗粉により、今度は(バルクとしての)複合材と相手材のものも摩耗するのではないだろうか。焼入されていない材料の場合、相手材から出てくる摩耗粉は加工硬化を受けているのでバルク材よりも硬くなり、アブレッシブ作用が高くなり摩耗も多くなる。相手材がSUS304などで温度が高くなると急激に摩耗が増えた理由は、推測の域を出ないが、複合材中の硬い粒子がバルクから遊離しやすくなるためではないだろうか。

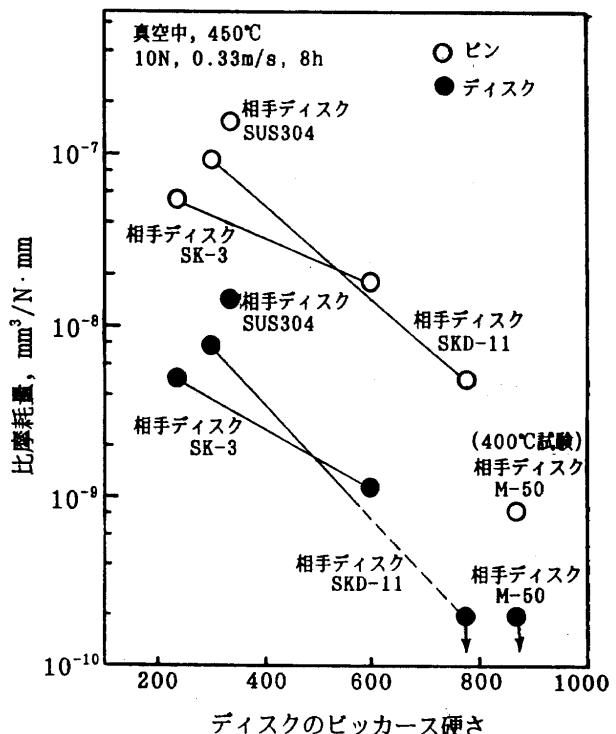


図27 ピン・ディスクの比摩耗量とディスクの硬さ
相手ディスク材: SUS304, SK-3, SKD-11, M-50

相手材の性質として次に要求されることは、良好な転移膜が強固に付着することである。きわめて良好なトライボロジー特性を示したSi₃N₄ディスクの場合には、図11に示したように、相手材表面には薄く、しかも密な転移膜が形成されていた。同様の転移膜は、相手材の材質を問わず、常温下で良好なトライボロジー特性を示した場合にしばしば見られたものであった。

薄い転移膜が形成されるためには、MoS₂などが移着した後、摩擦によって薄く引き延ばされる必要がある。試作した複合材はアブレッシブといわれているMoO₂が含まれているにもかかわらず良好なトライボロジー特性を示した。MoO₂などの硬い粒子が転移膜を薄く引き延ばす際に有効に働くのではないだろうか。また、これらの粒子には転移膜が過度に厚くなるのを防ぐ役割があるかもしれない。

転移膜が強固に下地に付着するためには、機械的な作用だけでなく化学的な結合も関与すると考えた方が自然である。例えばMoS₂スパッタ膜を鋼に付着させた試料の鋼とMoS₂膜の界面には、Fe-Mo-S結合が存在していたという報告⁵⁾もある。本実験のM-50ディスクでは転移膜と同時に鉄の硫化物(Moも含んだ硫化物であるかもしれない)が検出されており、転移膜の付着性向上に寄与していた可能性がある。Si₃N₄ディスクの場合にはXPS分析からは硫化物のようなものは検出されなかったが、SUS304を5%添加した複合材の方がトライボロジー特性は良好であり、ホットプレスの際に生成されたFeMo₂S₄が転移膜の付着性向上に寄与した可能性がある。

最後に、相手材との摩擦面のコンフィギュレーションも重要であることを指摘したい。すべり軸受試験では鋼製の軸が摩擦し、生成された摩耗粉が複合材軸受に埋め込まれたが、ピン／ディスク摩擦試験では複合材ピンにも多量の摩耗が生じた。これは、摩擦系外に摩耗粉が排出されやすいかどうかという摩擦面のコンフィギュレーションの相違によって、複合材の摩耗が大きく影響を受けたためと考えられる。すなわち、この複合材のトライボロジー特性が摩耗粉の挙動に大きく依存することを示唆している。

前述した推測のように、複合材に含まれる硬い粒子が遊離してアブレッシブな摩耗粉となり、これが高温下で相手材の摩耗が急増する引き金であったとすれば、このような摩耗粉を摩擦系外に容易に排除できる摩擦面形状を採用すれば耐摩耗性は改善されると思われる。この意味では、すべり軸受のような conformity の高い摩擦面は不利である。相手面に摩耗粉排出用の溝を設けるなどの工夫がトライボロジー特性の向上に有効な可能性がある。摩耗粉の挙動も考慮して、摩擦部の形状を選定することが最良のトライボロジー特性を得るためにには必要であろう。

4. まとめ

MoS_2 , MoO_2 , Nb から成る自己潤滑性複合材料、及びこれに SUS304 を添加した複合材料を、相手材を変えて真空中、 450°C までの高温下で摩擦試験した結果、以下の結論が得られた。

- (1) MoS_2 , MoO_2 , Nb から成る自己潤滑性複合材料、及びこれに SUS304 を添加した複合材料は、相手材が Si_3N_4 の場合、真空中、 450°C までの高温下できわめて良好なトライボロジー特性を示した。また、相手材が M-50 の場合でも優れた特性を示した。
- (2) SUS304 を添加した複合材は無添加の場合に比べ強度が向上するとともに、相手材が Si_3N_4 の場合にはトライボロジー特性も改善された。
- (3) 相手材が SUS304、焼入れしていない SK-3 や SKD-11 などのように硬度が低い場合には、 450°C の高温下では複合材だけでなく相手材にも多量の摩耗が発生した。相手材を硬くすることにより、摩耗量は大幅に低下した。
- (4) 複合材の摩耗特性は、摩擦面のコンフィギュレーションに大きく依存する。摩擦面内の摩耗粉の挙動が摩耗特性に影響を与えるためと考えられる。

以上の結果から、表面が硬く、かつ薄い転移膜が強固に付着する相手材が試作した複合材に適していると推測した。また、摩耗粉の挙動を考慮した摩擦面コンフィギュレーションの選定が重要であることを指摘した。

試作した複合材は、適した相手材と組合わせることによりきわめて良好なトライボロジー特性を発揮すると期待さ

れ、今後、高温・真空中での用途に有望である。

参考文献

- 1) 鈴木峰男、西村 允；ホットプレス法で作成した自己潤滑性複合材料のトライボロジー特性に関する研究、航技研報告 TR-1160 (1992).
- 2) 松永正久監修、津谷裕子編集；固体潤滑ハンドブック、幸書房 (1978), p.540.
- 3) 金属学会編；金属便覧 (1960), p.567.
- 4) Properties of molybdenum dioxide, AMAX Chemical data series bulletin Cbd-1A (1960).
- 5) E. W. Roberts ; Space and vacuum tribology, Proc. Eurotrib'89 Helsinki, p.21.

付録 ピンが片当たりした場合の 摩耗の算出法

図A-1にピンが片当たりして摩耗した場合の表面あらさ計での測定例を示す。図A-2はこれをモデル化したもので、図中斜線で示してあるのが摩耗した部分である。

まず、摩耗した部分の中に微少な厚さ dh をもつ層（図中の黒い部分）を考え、この体積 dV を算出する。この部分の平面図が図A-2(c)である。この平面内における摩耗幅を b 、ピン半径を R とすれば、 dV は以下のようなになる。

$$dV = \int_{R-b}^R (R^2 - X^2)^{1/2} dx dh$$

$$= R^2 \left(\theta - \frac{\sin \theta}{2} \right) dh$$

ここで、 $\theta = \theta(h)$ は図A-1(c)に示すようにX軸から計った摩耗部分の角度であり、 $\cos \theta = (R - b)/R$ の関係がある。

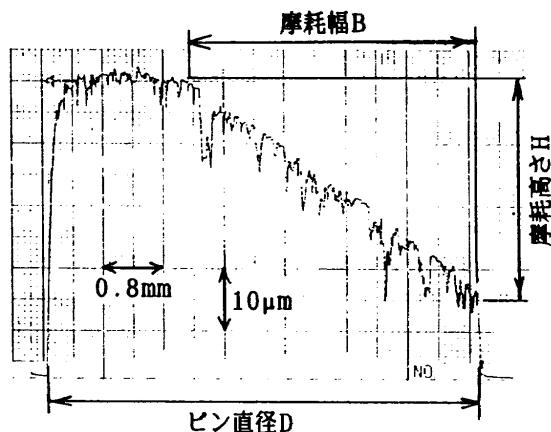
全摩耗体積は、 dV を $h=0 \sim H$ にわたって積分すれば得られ、

$$V = \int_0^H R^2 \left(\theta - \frac{\sin \theta}{2} \right) dh$$

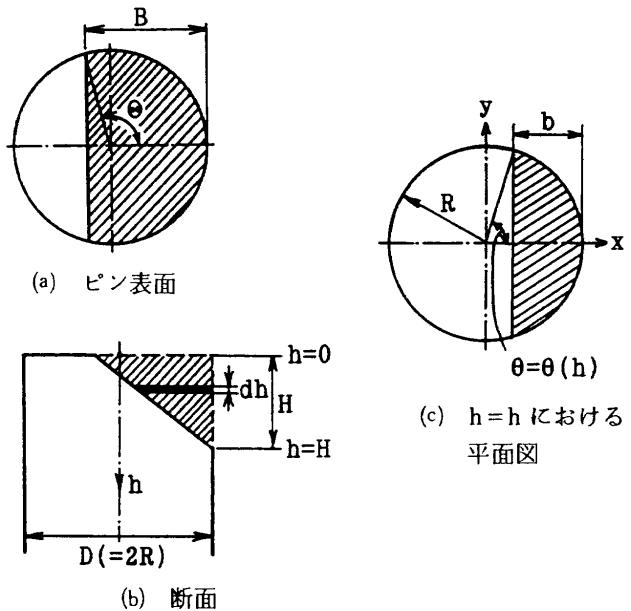
$h = (H/B) \cdot b$ であるから、 $h = (H/B) \cdot R (1 - \cos \theta)$ となり、これを用いると、

$$V = (H/B) \cdot R^3 \left(\sin \theta - \theta \cdot \cos \theta - \frac{\sin^3 \theta}{3} \right)$$

となる。ここで、 θ は図A-2(a)に示すようにピン表面におけるX軸から計った摩耗部分の角度であり、 $\cos \theta = (R - b)/R$ の関係を用いて、 R 、 B から計算できる。従って、図A-1の測定結果から、摩耗幅 B 、摩耗高さ H 、ピン直径 D を読みとり、上の式を用いればピン摩耗を算出することができる。



図A-1 片当たりしたピンの表面あらさ測定例



図A-2 モデル化した片当たりピン

航空宇宙技術研究所報告1192号

平成5年2月発行

発行所 航空宇宙技術研究所

東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1

電話三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182

印刷所 株式会社 三興印刷

東京都新宿区西早稲田2-1-18
