

NAL TM-622

ISSN 0452-2982  
UDC 621.892.7/.9  
621.822.7  
621.178.16  
678.6/.8

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-622

ころがり軸受保持器用自己潤滑性高分子複合材の  
すべり摩擦試験

西村 允

1990年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# ころがり軸受保持器用自己軸滑性高分子複合材の

## すべり摩擦試験\*

西村 允\*\*

### 1. はじめに

人工衛星に搭載される宇宙機器の駆動系には、多くの場合、固体潤滑剤で潤滑したころがり軸受が用いられる。固体潤滑剤の使用法は軸受に要求される総回転数によって異なる。一方向回転の場合、総回転数が $10^7$ 回程度まではころがり軸受の内外輪、鋼球の転走面にあらかじめ付着した固体潤滑膜のみによって潤滑する事が出来る<sup>1, 2)</sup>。しかしながら、 $10^8$ 回以上の耐久性を要求される場合あるいは使用条件がきびしい場合には、潤滑法を固体潤滑膜と自己潤滑性複合材保持器の併用に変えなければならない。固体潤滑膜が摩耗し尽くしたのちは、保持器から供給される固体潤滑剤で潤滑するのである。したがって保持器材料の選択が本方法の成否の鍵を握る。

このような複合材で実用されているものは金属系と高分子系の二種類に分けられる。金属系複合材は金属と固体潤滑剤を高温高圧下で焼結して製作する。この種の複合材は高温に耐えることができ、耐摩耗性も高い。なかにはころがり軸受保持器に利用して総回転数 $10^9$ 回以上を記録した例も報告されている<sup>3)</sup>。しかしながら金属系複合材は靱性が低く、量産出来ないためコストが高いなどの欠点もある。打ち上げ時の振動を考慮すると、靱性の低さは問題である。

高分子系複合材はこれらの諸点で金属系複合材に優る。欠点は耐熱性が低いことであるが、宇宙では高温にさらされることが少ないから、大きな問題とはならない。このような理由から宇宙用ころがり軸受保持器には高分子系複合材が用いられてきた。

現在米国においては、ポリテトラフルオロエチレン

(以下 PTFE と略す)系高分子複合材と二硫化モリブデンスパッタ膜の併用が宇宙用ころがり軸受潤滑法の主流となっている。いっぽう我が国においては、この種の研究はほとんどないといつてよい状態にある。

さきに述べたように、固体潤滑ころがり軸受は固体潤滑膜と自己潤滑性複合材保持器とを併用して潤滑する。筆者らは、まず、固体潤滑膜について研究し、金、銀、鉛膜<sup>4)</sup>、PTFE膜<sup>5)</sup>、二硫化モリブデン膜<sup>6, 7)</sup>のすべり摩擦特性を調べ、真空中においては二硫化モリブデンスパッタ膜の潤滑特性がもっとも優れていることを明らかにした。続いてPTFE膜、二硫化モリブデンスパッタ膜と高分子複合材保持器を用いた各種ころがり軸受を真空中で試験し、二硫化モリブデンスパッタ膜とPTFE系複合材保持器による潤滑が低摩擦、長寿命を与え、2,000 rpmにおいて10,000時間以上の運転が可能であることを明らかにした<sup>8)</sup>。

長寿命を狙う場合、固体潤滑ころがり軸受の潤滑特性は保持器からの潤滑剤の供給をいかにコントロールするかによって定まる。保持器が摩耗しなければ、固体潤滑剤の転走面への供給が不十分となり潤滑不良に陥るし、摩耗が多すぎれば摩耗粉によるトルク変動、振動の発生、さらに摩耗粉の咬み込みによる運転停止もありうる。そのため保持器は、まず、適度に摩耗する事が要求される。つぎに摩耗粉が鋼球表面に付着する事が要求される。鋼球表面に付着しなければ摩耗粉が潤滑を必要とする転走面に行くことはなく、潤滑剤として機能しないからである。さらに保持器に含まれる潤滑剤以外の成分—補強材、添加剤—が潤滑に悪影響を与えないことが要求される。

本研究は保持器用高分子複合材の潤滑性能向上を目的として行ったもので、これらの問題点のうち特

\* 平成2年6月6日受付

\*\* 宇宙研究グループ

に摩耗量に重点をおいて調べた。まず、実用されている保持器のすべり摩擦による摩擦特性および摩擦速度を調べた。それらを基準として、新たに試作した複合材でこれらに近い摩擦摩耗特性を有するものがあるか、その高温潤滑特性はどうかを追求した。

## 2. 実験装置, 試験片, 手順

本研究の目的は新しい保持器用高分子複合材の探索にある。その第一歩として既存の保持器用複合材の摩耗量を調べた。固体潤滑ころがり軸受は玉案内もしくは内輪案内形式で用いられる。この両者は一長一短あるが、ともにボールポケットから鋼球へすべり摩擦によって固体潤滑剤が供給されることにかわりはない。

そこで、ピン/円板型すべり摩擦試験機を用いて既存の保持器の摩耗量を大気中において荷重1N、摩擦速度0.2~2.5 m/s、温度 室温~250℃の各条件下で調べた。相手材にはSUS440C製の直径5/16インチの鋼球を使用し、実際の保持器(アンギュラ玉軸受 # 7204 用)の端面を摩擦した。試験した保持器材の組成を表1に示す。A~Eは、PTFE とガラス繊維を主成分とし固体潤滑剤、金属、金属化合物を添加したもので、宇宙あるいは真空中で実績あるものもしくは同等品である。F~Iはポリイミドを主成分としており、F以外は試作品である。

実験方法は次のとおりである。

① 試験片を摩擦試験機に取り付け、0.2 m/s で

摩擦する。摩擦係数が一定となるまで約10分間摩擦し、ついで摩擦速度を0.5 m/s にあげ摩擦係数が安定するまで繰り返し摩擦を行う。以下同様にして摩擦速度を1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m/s と上昇させる。最後に0.2 m/s で再度実験する。

② ①を室温, 50℃, 100℃, 150℃, 200℃, 250℃ において繰り返す。ただし, PTFE系複合材は150℃で実験を中止したものもある。

③ 実験終了後, 円板摩耗こを表面粗さ計で測定し, 摩耗断面積を求める。これを摩擦回数で割って単位摩擦回数あたりの摩耗量(面積)を得る。

同様の手法で新しい保持器用候補材の摩擦試験を行った。候補材は直径43ミリ厚さ8ミリの円板に仕上げてある。摩擦試験で実物保持器と異なる点は摩擦速度を段階的に2.5 m/s まで上げてから再び段階的に0.2 m/s まで下げていったことと、各温度ごとに摩擦半径を変えて新たに実験を行ったことの二点である。試作した複合材の組成を表2に示す。

表2 試作した保持器用候補材の組成

(GF: ガラス繊維, 005は米国製市販品)

001	PTFE75%+GF25%
002	PTFE55%+GF25%+MoS <sub>2</sub> 20%
003	PTFE65%+GF25%+MoS <sub>2</sub> 10%
004	PTFE70%+GF25%+MoS <sub>2</sub> 5%
005	PTFE+GF+MoS <sub>2</sub> +α
006	PTFE55%+GF25%+グラファイト20%
007	PTFE60%+GF25%+グラファイト15%
008	PTFE65%+GF25%+グラファイト10%
009	PTFE50%+GF25%+Ag25%
010	PTFE50%+GF25%+Mo25%
011	PTFE50%+GF25%+W25%
012	PTFE90%+ポリ- <i>p</i> -フェニレンテレフタルアミド10%
013	ポリオキシベンゾイル80%+PTFE20%
014	ポリアミドイミド48%+ポリエーテルイミド32%+MoS <sub>2</sub> 20%
015	ポリアミドイミド48%+ポリエーテルイミド32%+PTFE16%+MoS <sub>2</sub> 4%
016	ポリアミドイミド48%+ポリエーテルイミド32%+PTFE20%

表1 すべり摩擦試験を行った保持器の組織

保持器名	組成
A	PTFE+ガラス繊維+MoS <sub>2</sub>
B	PTFE+ガラス繊維+MoS <sub>2</sub> +α
C	PTFE+ガラス繊維+Mo
D	PTFE+ガラス繊維+Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
E	PTFE+ガラス繊維+CdS
F	PTFE+20~30%ポリイミド
G	ポリイミド+MoS <sub>2</sub>
H	ポリイミド+15%MoS <sub>2</sub>
I	ポリイミド+30%MoS <sub>2</sub>

保持器用候補材の実験では、一つの摩擦速度でおよそ14分間摩擦実験を行った。したがって一回の摩擦試験における総摩擦回数は約 $1.15 \times 10^5$ 回である。このうち1.5 m/s以上の摩擦速度で試験した摩擦回数は約 $8.5 \times 10^4$ 回である。これは総摩擦回数の74%に相当する。後述するように高分子複合材の摩耗は温度が上昇すると増加することを考慮すれば、本実験結果は主として高速度領域における摩耗量を示すとみてよい。

### 3. 実験遂行上の問題点

本研究を遂行するにあつて実験手法の問題点は二つある。第一は接触条件の問題で、ピンを鋼球、円板を複合材として、ポケット穴内面と鋼球のすべり摩擦状態を模擬出来るかどうかあげられる。第二は材料の異方性で、摩擦面として保持器端面を用いることの妥当性がある。

本研究においては実際の保持器をも摩擦試験片(円板)として使用しており、鋼球と同材料をピンに用いている。すなわちピン頂部は常に摩擦を受けているが、円板の摩擦部は間欠的に摩擦される。これに対処してころがり軸受では、保持器ポケット穴の中で鋼球は回転しているから、鋼球上の一点は保持器と間欠的に接触していることになる。保持器は特定部がいつも鋼球とすべり接触するとみられる。(ポケット穴と鋼球の間にあるクリアランスのため、厳密には、保持器も間欠的な摩擦を受けている)。この関係をピン/円板に当てはめると、ピンを複合材とし円板を鋼球材とするほうが実情に近いと考えられる。しかしながら本研究では、実用されている保持器の摩擦摩耗特性を基準として、新しい保持器候補材を評価することを目的としたため、ピンを鋼球とし、保持器自体あるいは高分子複合材を円板とした。その結果本研究の目的は複合材のすべり摩擦特性および摩耗速度を調べることに限定され、固体潤滑ころがり軸受で問題となる固体潤滑剤の鋼球への転移膜生成を取り上げるにはいたらなかった。この点については別途報告する予定である。

第二の問題点は、素材の異方性である。保持器材はガラス繊維で強化している。周知のように、繊維強化複合材は方向性をもっている。摩擦試験を行っ

た保持器端面ところがり軸受において実際に摩擦を受けるポケット穴内面では、繊維の並び方が異なるはずである。そこで繊維強化複合材(ガラス繊維)の異方性がその摩擦摩耗にどう影響するかを調べた。原材料は円柱形をしており、保持器は円柱を輪切りにして作る。図1にその様子を模式的に示す。円柱端面では、多くのガラス繊維がそれらの円柱面を円柱端面に平行にランダムに分布しているが、円筒面ではガラス繊維の端面が比較的多く露出するとみられる。円板試験片は図のように切り出して使用した。試験片A、Bとも円筒端面を摩擦面として使った。したがってAは保持器の端面を模擬し、Bはポケット穴を模擬する。

摩擦試験結果を図2に示す。試験条件は摩擦速度: 1.7 m/s, 荷重: 2 N, 大気中(温度: 16~17.5°C, 湿度: 15~20%)である。摩擦開始より50万回の繰り返し回数で摩擦を終了するまで、両者の摩擦係数の差はきわめて少ない。ピンおよび円板摩耗この光学顕微鏡写真を図3に示す。摩耗この中および外観の違いは少ない。円板摩耗この断面を摩擦回数で除した円板材除去速度も、試験片A:  $4.7 \times 10^{-9}$  mm<sup>3</sup>/回に対して試験片B:  $4.6 \times$

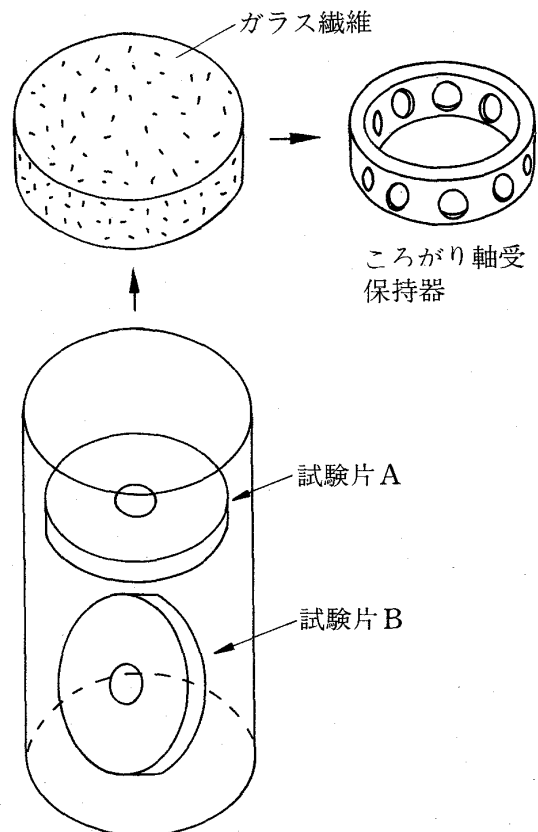


図1 保持器および摩擦試験片の切り出し方

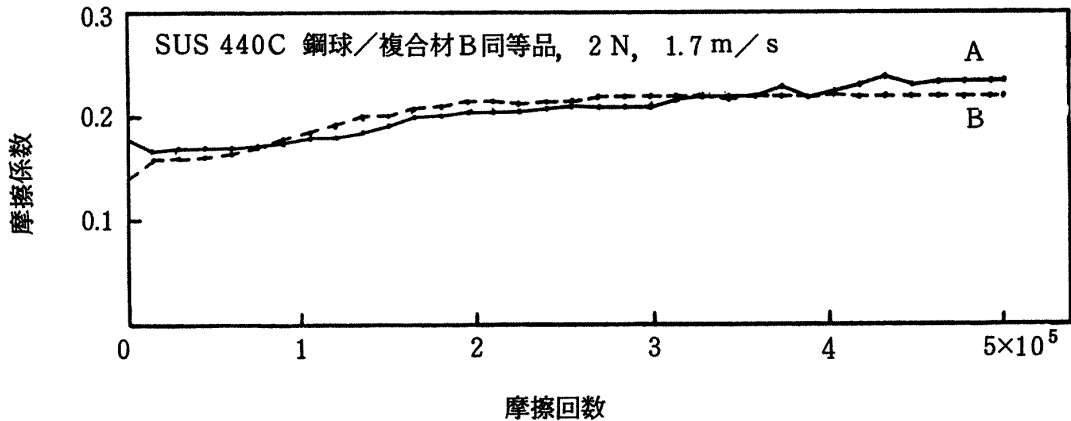


図2 摩擦試験片AおよびBの摩擦特性

$10^{-9}$   $\mu\text{m}/\text{回}$ で、AとBの差はなかった。

さらに摩擦回数を10倍の500万回にした場合にも、摩擦摩耗の相違は少ないことが分かった。

500万回摩擦後のピンおよび円板の摩耗こんを図4に示す。試験片Aの複合材除去速度は  $7.1 \times 10^{-10}$   $\mu\text{m}/\text{回}$ であり、試験片Bの  $4.9 \times 10^{-10}$   $\mu\text{m}/\text{回}$ と同程度であった。

この結果より、本実験で用いたガラス繊維強化複合材の摩擦摩耗特性は、本実験条件下において、強化繊維の方向に依存しないといえる。このような結果が得られた原因は、繊維の配向性が予想したよりも小さかったことにある。円柱端面表面の二次電子像を図5に示す。酸素エッチングによりPTFEを除去した表面にはガラス繊維のみ露出しているが、ガラス繊維の配向性は明確でない。



図5 試験片A表面の電子顕微鏡写真  
(酸素エッチングでPTFE除去)

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 実用されている保持器の摩擦摩耗

新しい保持器材料を研究開発する前に、現在実用されている保持器の摩擦摩耗特性がどの程度であるかを知る必要がある。そこで実物保持器を用いてすべり摩擦による摩擦摩耗特性を求めた。試験した保持器はPTFE系5種、PTFE + ポリイミド2種、ポリイミド系2種の計9種である。

PTFE系保持器はすべて実用されているもので、PTFEに補強材としてガラス繊維を添加しさらにプラス $\alpha$ している。なかには $\alpha$ の中身が不明なものもある。ただし、本実験において主として取り上げたPTFE系保持器の場合、PTFEが潤滑作用を行い、添加物はPTFEの摩耗速度をコントロールするに過ぎないといわれている。もしそうならば、PTFEの潤滑作用を妨げない限り添加材はなんでもよいことになる。事実、補強材を除くと保持器の70%以上をPTFEが占める事からも、PTFEが潤滑の主役を演じていることがうかがえるのである。この点については後述する。

摩擦特性を図6～14に、摩耗速度を表3に示す。

PTFE系複合材A～Eの摩擦特性(図6～10)を見ると、添加物が硫化物、酸化物、金属モリブデン、その他とバラエティに富んでいるにも関わらず、モリブデン添加、150℃試験の場合を除いて摩擦係数は0.1～0.2を維持し、添加物、摩擦速度、温度の影響はきわめて少ないことが分かる。この結果は摩擦の主体をなすものがPTFEであることを示

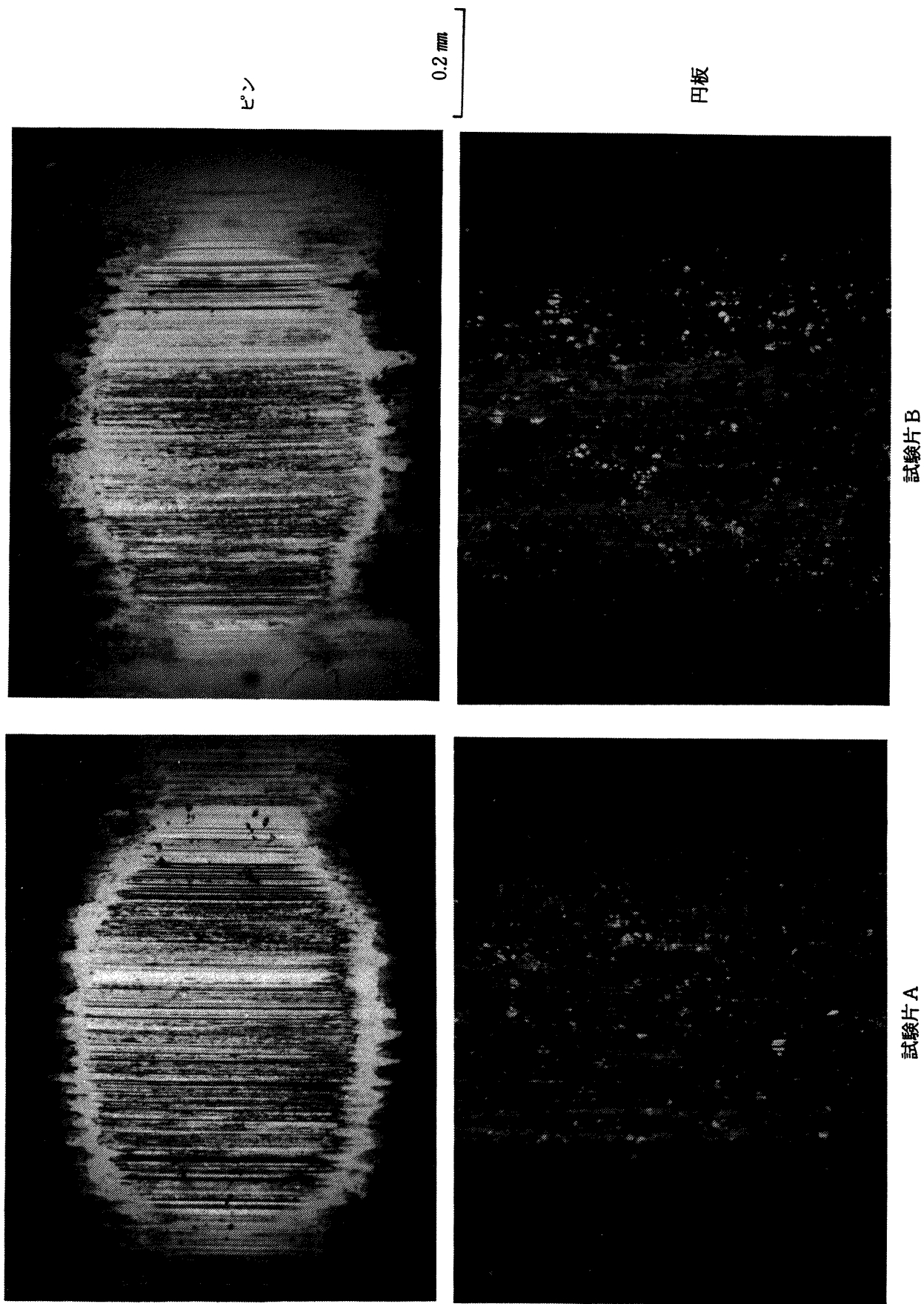


図3 試験片AおよびBの摩擦消耗こんく（大気中，室温，50万回摩擦後）

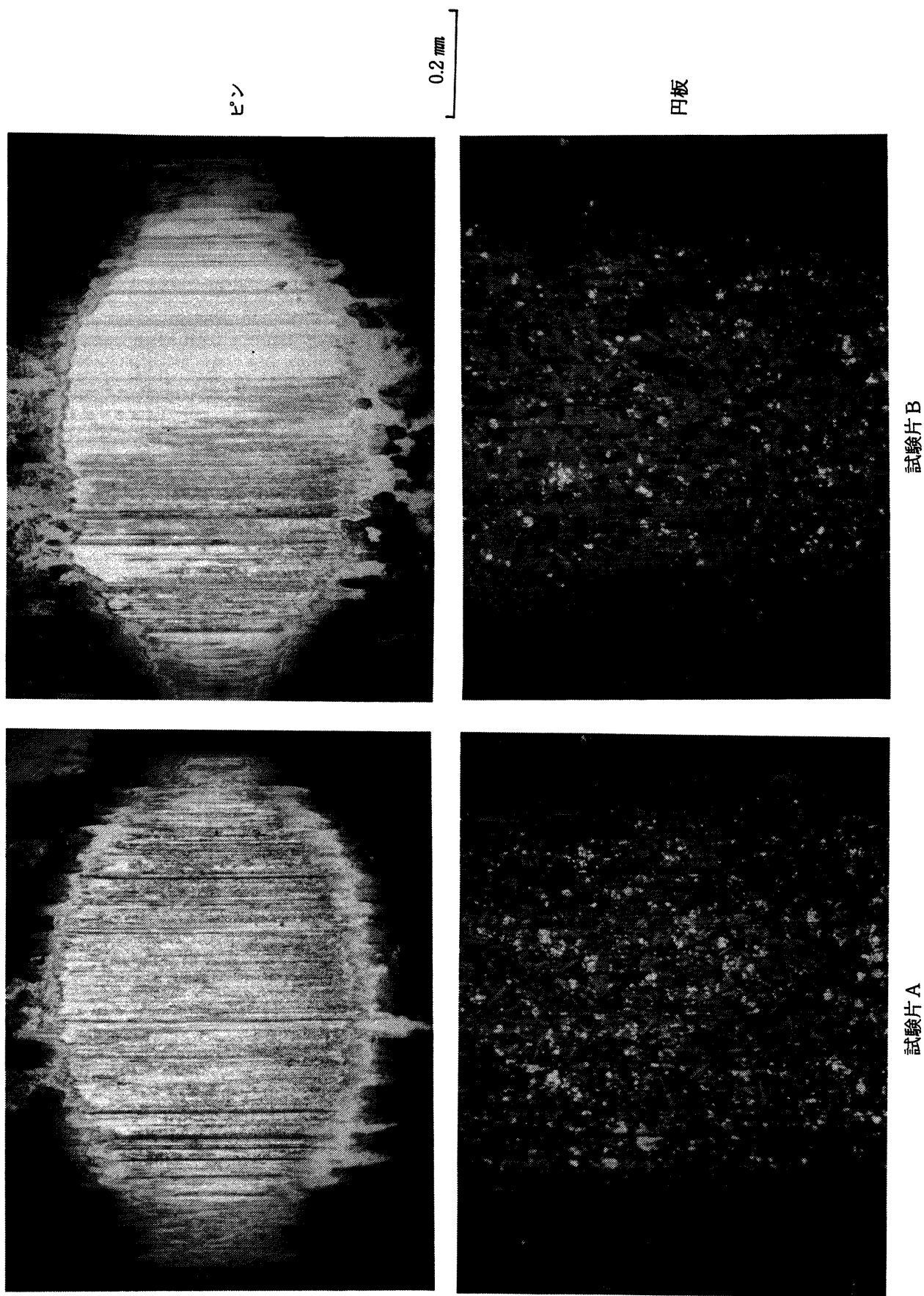


図 4 試験片 A および B の摩擦こんく（大気中，室温，500 万回摩擦後）

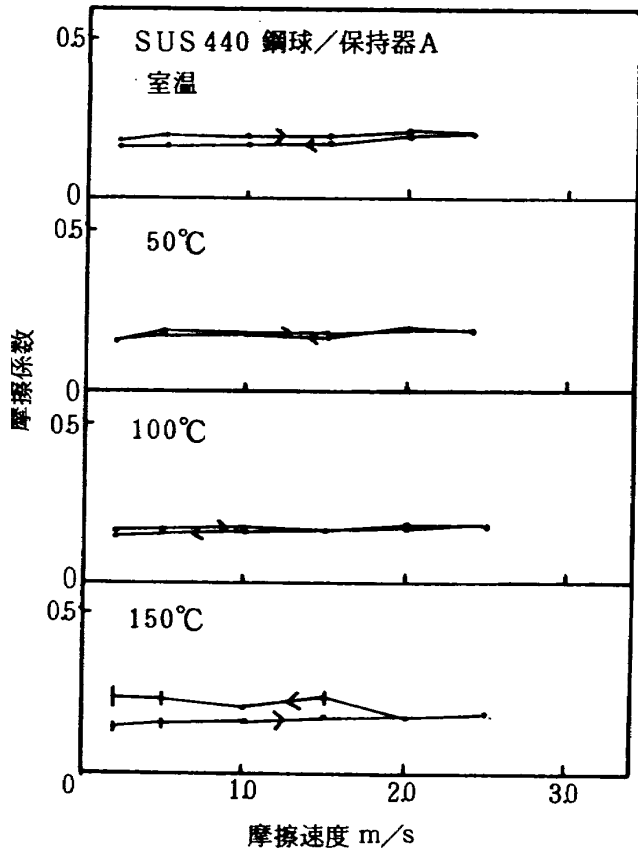


図6 保持器A ( PTFE+GF+MoS<sub>2</sub> ) の摩擦係数と温度

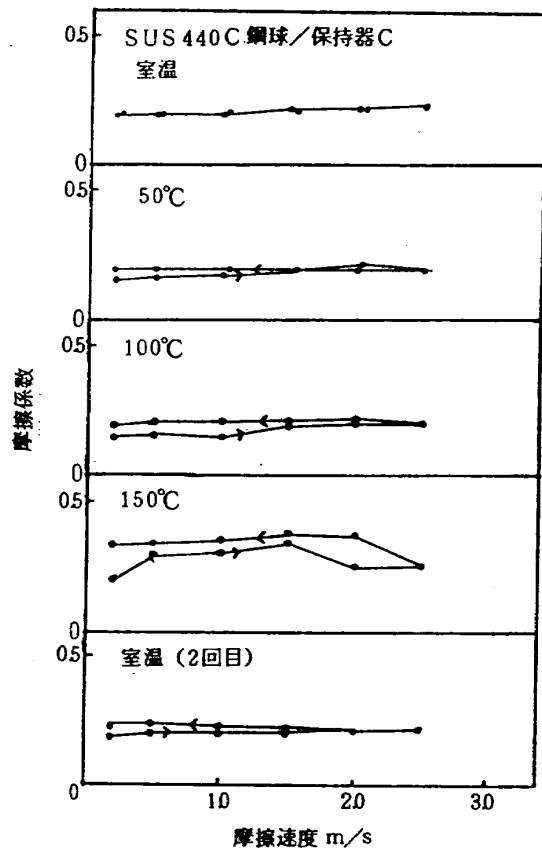


図8 保持器C ( PTFE+GF+Mo ) の摩擦係数と温度

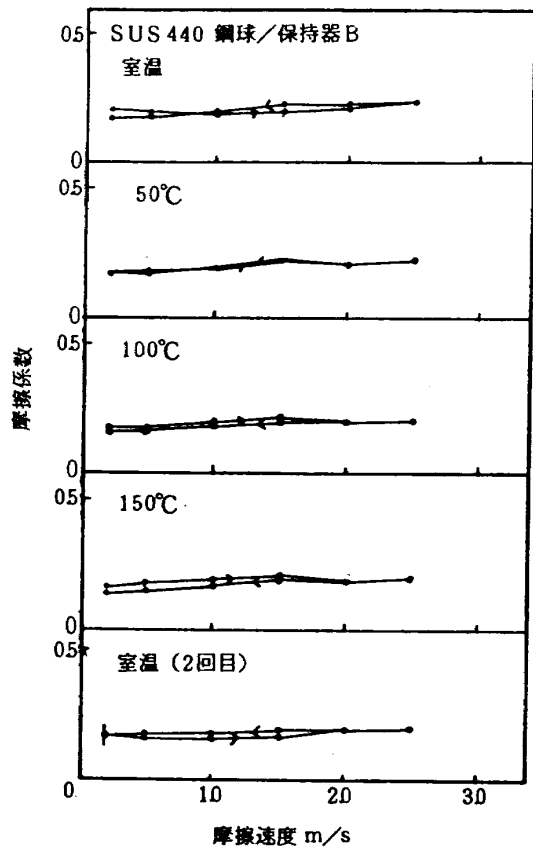


図7 保持器B ( PTFE+GF+MoS<sub>2</sub>+α ) の摩擦係数と温度

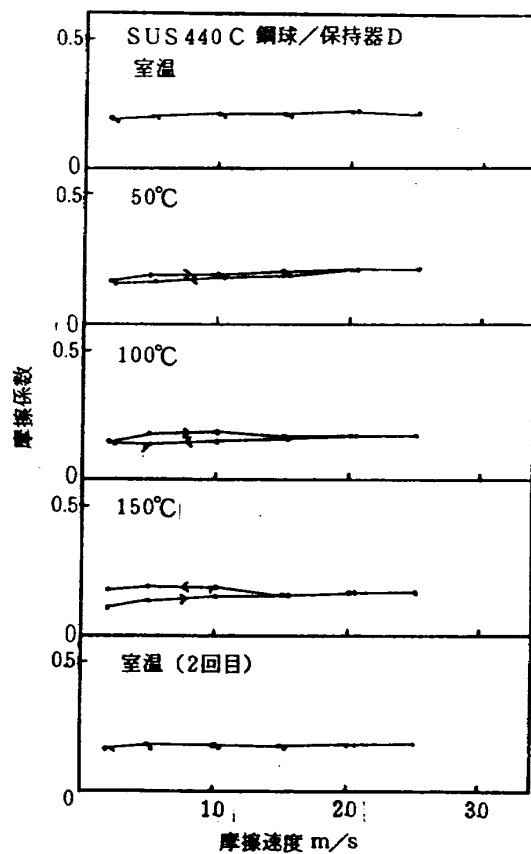


図9 保持器D ( PTFE+GF+Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ) の摩擦係数と温度



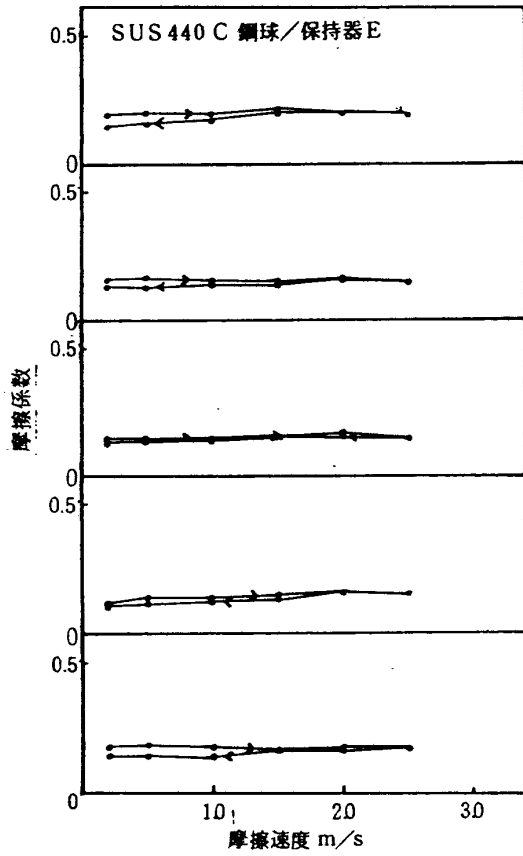


図10 保持器E (PTFE+GF+CdS) の摩擦係数と温度

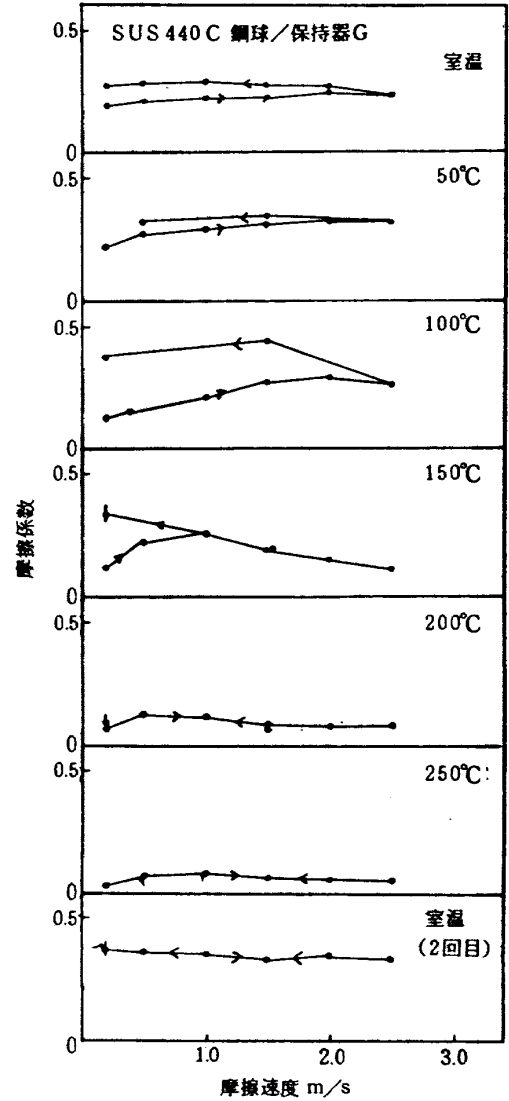


図12 保持器G (ポリイミド+α) の摩擦係数と温度

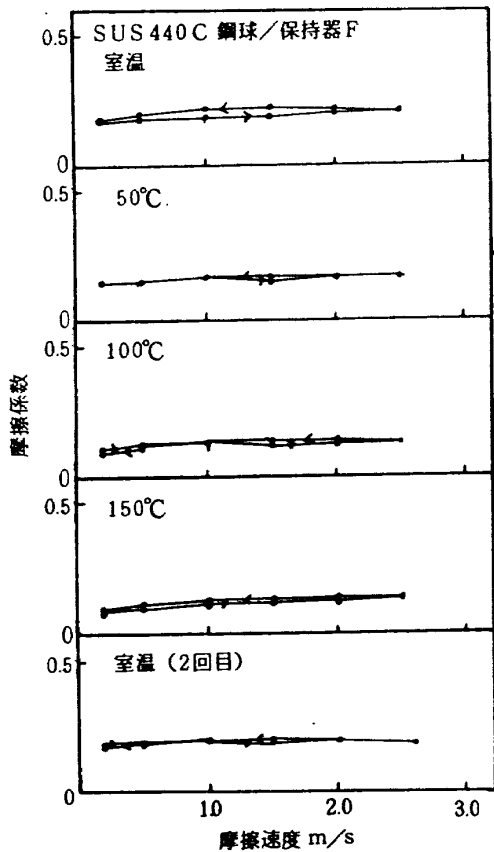


図11 保持器F (PTFE+ポリイミド) の摩擦係数と温度

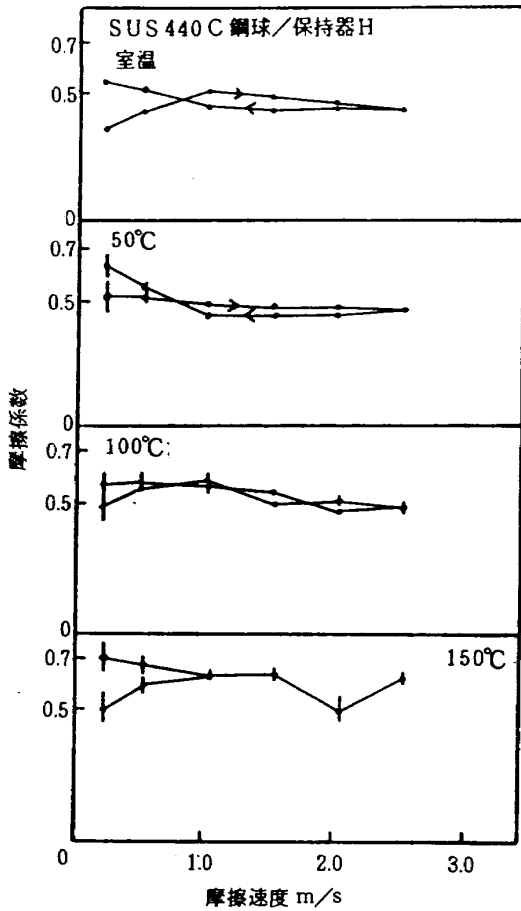


図13-1 保持器H (ポリイミド+MoS<sub>2</sub>15%)の摩擦係数と温度

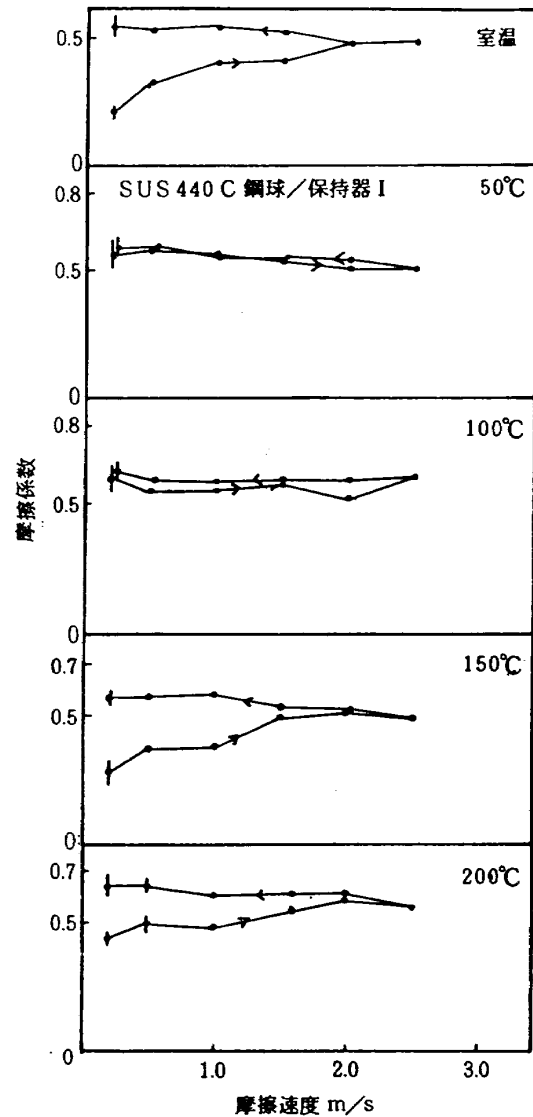


図14-1 保持器I (ポリイミド+MoS<sub>2</sub>30%)の摩擦係数と温度

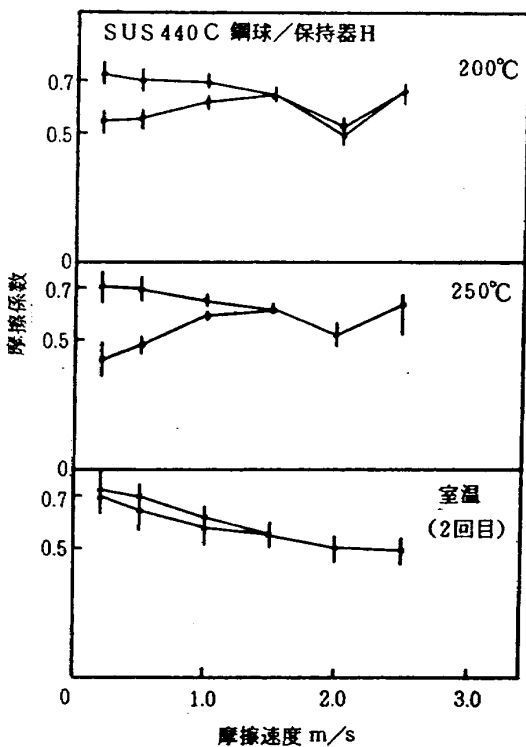


図13-2 保持器H (ポリイミド+MoS<sub>2</sub>15%)の摩擦係数と温度

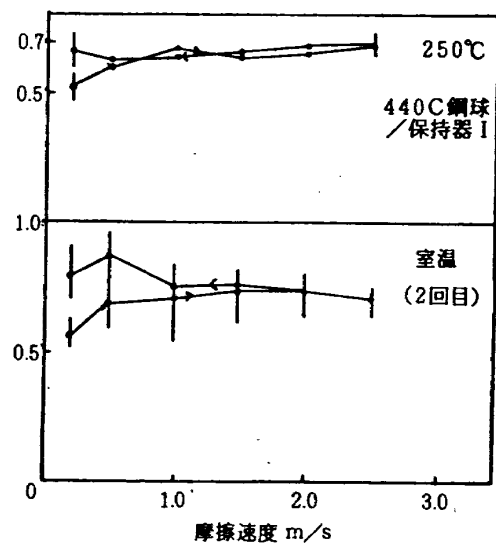


図14-2 保持器I (ポリイミド+MoS<sub>2</sub>30%)の摩擦係数と温度

表3 現在用いられている保持器および試作した保持器の摩耗速度

A～Fは実用品

G～Iは試作品

番号	保持器組成	除去面積 * 1 mm <sup>2</sup> /回	試験温度 °C
A	PTFE + GF + MoS <sub>2</sub>	$4.2 \times 10^{-8}$	RT ~ 150
B	PTFE + GF + MoS <sub>2</sub> + $\alpha$	$8.5 \times 10^{-8}$	RT ~ 150
C	PTFE + GF + Mo	$1.3 \times 10^{-7}$	RT ~ 150
D	PTFE + GF + Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$4.0 \times 10^{-8}$	RT ~ 150
E	PTFE + GF + CbS	$3.3 \times 10^{-8}$	RT ~ 150
F	PTFE + 20 ~ 30 ポリイミド	$3.3 \times 10^{-8}$	RT ~ 150
G	PTFE + ポリイミド + MoS <sub>2</sub>	$< 10^{-9}$	RT ~ 250
H	ポリイミド + 15% MoS <sub>2</sub>	$< 8.6 \times 10^{-9}$	RT ~ 200
I	ポリイミド + 30% MoS <sub>2</sub>	$8.4 \times 10^{-9}$	RT ~ 200

大気中, 室温, IN, 0.2 ~ 2.5 m/s

相手材: SUS 440C 5/16 インチ径球

GF: ガラス繊維

\*: 3回測定値の平均

唆するものである。さらに表3に示された摩耗速度においても, PTFE系実用保持器の摩擦一回当りの断面除去面積は比較的限られた $3 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>/回の範囲内にあり, 上記を裏づけている。

ポリイミド系保持器(F~I)のうちでも, PTFEを添加したFはPTFE系保持器と同等の摩擦摩耗特性を有する。添加されたPTFEによる潤滑効果と考えられる。同じくPTFEを添加した保持器Gは200および250°Cにおいて0.1以下という低い摩擦係数を広い速度範囲に亘って維持するが, 150°C以下では速度を上げた場合と下げた場合で異なる摩擦特性を示し, 一定しない。これがPTFE以外に添加されている二硫化モリブデンの効果であるかどうかは不明である。PTFEを添加していないポリイミド系保持器(H, I)は室温から250°Cまで摩擦係数が0.5以上という高い値を示す。15~30%という大量添加にもかかわらず, 二硫化モリブデンは潤滑に寄与しない。全体として本実験に用いたポリイミド系複合材は高摩擦低摩耗であるから, むしろトラクションドライブ材料あるいはブレーキ材料に向いていると思われる。

ポリイミド含有保持器のなかでは, 実用されているF(PTFE+ポリイミド)が $3 \times 10^{-8}$  mm<sup>2</sup>/回の摩耗速度で上の摩耗速度範囲に入っている。この場合潤滑作用がPTFE主体であるとすれば, 当然の結果と思われる。試作品はすべて $10^{-9}$  mm<sup>2</sup>/回台ないしそれ以下の摩耗速度であった。これらの試作品を保持器に用いた軸受は短時間の運転で焼き付いた。この事実は,

① 二硫化モリブデンを単に添加しても転移膜を形成せず, 潤滑に寄与しないこと, ②二硫化モリブデン添加量を増加すると摩耗速度が増加することより, 二硫化モリブデン添加の作用が摩擦特性向上にあるのではなく, 摩耗量の調節にあること, を示唆するものである。なお, 軸受試験結果の詳細は別途報告する予定である。

要約すると, 現在用いられているPTFE系保持器は, 大気中, 高速条件下において0.1~0.2の摩擦係数および $3 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>/回の摩耗速度を有する。添加剤の役割は摩擦摩耗の低減よりは摩耗速度の調節にある。

表4 高分子複合材すべり摩擦試験結果（大気中, 1N, 相手材 SUS440C 5/16"ボール, 0.2 → 0.5 → 1.0 → 1.5 → 2.0 → 2.5 → 2.0 → 1.5 → 1.0 → 0.5 → 0.2 m/s）  
（GF：ガラス繊維）

No.	組成	室温		100℃		150℃		200℃		250℃		300℃	
		摩擦速度 mm/回	μ	摩擦速度 mm/回	μ	摩擦速度 mm/回	μ	摩擦速度 mm/回	μ	摩擦速度 mm/回	μ	摩擦速度 mm/回	μ
001	75%PTFE+25%GF	1.03×10 <sup>-7</sup>	0.16	1.39×10 <sup>-7</sup>	0.13	1.69×10 <sup>-7</sup>	0.14	1.16×10 <sup>-7</sup>	0.10	3.60×10 <sup>-7</sup>	0.09	6.53×10 <sup>-7</sup>	0.08
002	55%PTFE+25%GF+20%MoS <sub>2</sub>	9.18×10 <sup>-8</sup>	0.17	1.27×10 <sup>-7</sup>	0.18	2.15×10 <sup>-7</sup>	0.16	3.40×10 <sup>-7</sup>	0.17				
003	65%PTFE+25%GF+10%MoS <sub>2</sub>	5.85×10 <sup>-8</sup>	0.16	9.65×10 <sup>-8</sup>	0.15	1.14×10 <sup>-7</sup>	0.15	8.94×10 <sup>-8</sup>	0.16	1.78×10 <sup>-7</sup>	0.13		
004	70%PTFE+25%GF+5%MoS <sub>2</sub>	3.52×10 <sup>-8</sup>	0.16	4.87×10 <sup>-8</sup>	0.14	5.38×10 <sup>-8</sup>	0.14	6.20×10 <sup>-8</sup>	0.16				
005	PTFE+GF+MoS <sub>2</sub> （米国製）	4.83×10 <sup>-8</sup>	0.18	4.91×10 <sup>-8</sup>	0.18	1.27×10 <sup>-7</sup>	0.16	1.59×10 <sup>-7</sup>	0.17				
006	55%PTFE+25%GF+20%グラファイト	7.30×10 <sup>-8</sup>	0.21	1.17×10 <sup>-7</sup>	0.18	1.14×10 <sup>-7</sup>	0.20	1.63×10 <sup>-7</sup>	0.15	1.96×10 <sup>-7</sup>	0.17	4.30×10 <sup>-7</sup>	0.17
007	60%PTFE+25%GF+15%グラファイト	1.46×10 <sup>-8</sup>	0.16	2.99×10 <sup>-8</sup>	0.16	4.48×10 <sup>-8</sup>	0.17	8.6×10 <sup>-8</sup>	0.19	1.76×10 <sup>-7</sup>	0.17		
008	65%PTFE+25%GF+10%グラファイト	2.02×10 <sup>-8</sup>	0.17	2.48×10 <sup>-8</sup>	0.19	5.40×10 <sup>-8</sup>	0.20	4.0×10 <sup>-8</sup>	0.16	2.21×10 <sup>-7</sup>	0.16		
009	50%PTFE+25%GF+25%Ag	3.52×10 <sup>-8</sup>	0.20	3.76×10 <sup>-8</sup>	0.19	3.45×10 <sup>-8</sup>	0.19	1.43×10 <sup>-7</sup>	0.16				
010	50%PTFE+25%GF+25%Mo	3.09×10 <sup>-8</sup>	0.16	6.9×10 <sup>-8</sup>	0.20	9.94×10 <sup>-8</sup>	0.22	9.06×10 <sup>-8</sup>	0.21				
011	50%PTFE+25%GF+25%W	1.29×10 <sup>-7</sup>	0.18	2.67×10 <sup>-7</sup>	0.15	3.06×10 <sup>-7</sup>	0.13	1.44×10 <sup>-7</sup>	0.12	2.17×10 <sup>-7</sup>	0.10	4.68×10 <sup>-7</sup>	0.09
012	90%PTFE+10%ポリ-P-フェニレンテトラフルオリド	9.23×10 <sup>-8</sup>	0.19	1.73×10 <sup>-7</sup>	0.15	2.72×10 <sup>-7</sup>	0.16	1.15×10 <sup>-7</sup>	0.14	2.62×10 <sup>-7</sup>	0.14		
013	20%PTFE+80%ポリオキシベンゾイル	10 <sup>-9</sup> 以下	0.21	2.52×10 <sup>-9</sup>	0.18	10 <sup>-9</sup> 以下	0.10	6.40×10 <sup>-9</sup>	0.12	1.49×10 <sup>-8</sup>	0.10		
014	48%ポリアミドイミド+32%ポリエーテルイミド+20%MoS <sub>2</sub>	2.09×10 <sup>-7</sup>	0.32	3.03×10 <sup>-7</sup>	0.32	2.66×10 <sup>-7</sup>	0.28	10 <sup>-6</sup> 以上	0.29				
015	48%ポリアミドイミド+32%ポリエーテルイミド+16%PTFE+4%MoS <sub>2</sub>	4.11×10 <sup>-9</sup>	0.14	2.47×10 <sup>-9</sup>	0.13	8.32×10 <sup>-9</sup>	0.12	変形					
016	48%ポリアミドイミド+32%ポリエーテルイミド+20%PTFE	1.90×10 <sup>-8</sup>	0.15	3.29×10 <sup>-8</sup>	0.14	6.8×10 <sup>-9</sup>	0.13	変形	0.09				

4.2 試作した保持器用材料の摩耗速度

実用されている保持器の摩耗速度が分かったので、これを基準に用い、試作した 15 種類の複合材の摩耗速度と比較した。試作した複合材は次のように分類される。

- a. 001 ~ PTFE + ガラス繊維
- b. 002 ~ 005 001 に二硫化モリブデンを添加したもの。  
ただし 005 は米国製で市販品。
- c. 006 ~ 008 001 にグラファイトを添加したもの。
- d. 009 ~ 011 001 に金属を添加したもの。
- e. 012 ~ 016 「PTFE + ガラス繊維」以外の新材料。

温度特性を明確にするため、試作品の摩耗速度を室温および 100℃ 以上 50℃ おきに測定した。結果を表 4 に示す。以下、上記の種別毎に結果を述べる。

a. PTFE + ガラス繊維

添加剤の効果を知るには、基準として無添加複合材の摩擦摩耗を知らなければならない。本複合材はこのために試作した。摩擦係数および摩耗速度の温度特性を図 15 に点線で示す。温度上昇とともに摩擦係数は室温時の 0.16 から次第に低下して 300℃ では 0.08 に達する。ここでは示していないが、摩

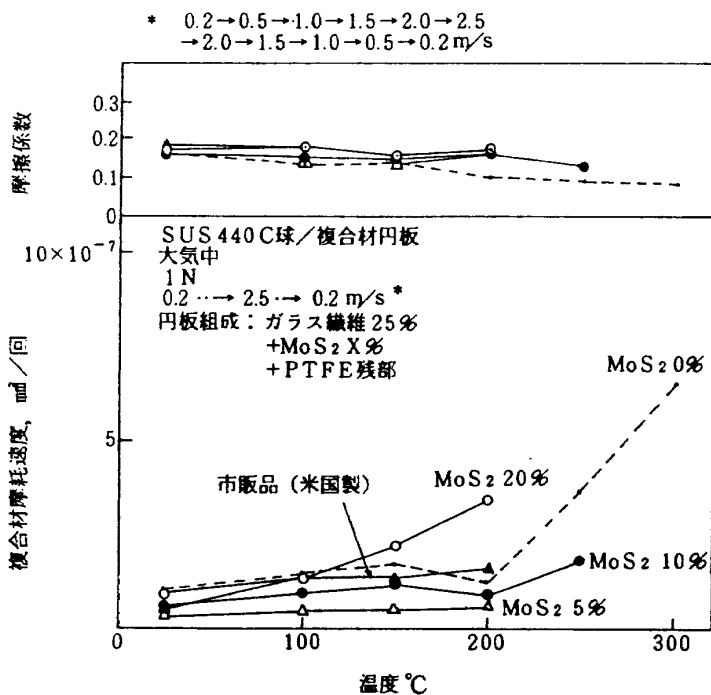


図 15 PTFE系複合材の摩擦摩耗に対する MoS<sub>2</sub> の添加効果

擦係数の速度依存性は小さい。これに対して摩耗速度は 200℃ で最小となってから急上昇する。室温から 200℃ までの摩耗速度はほぼ一定しており、 $1.03 \sim 1.69 \times 10^{-7}$  μm/回の範囲にある。この値は実用保持器摩耗速度の上限に相当する。

b. a に二硫化モリブデンを添加したもの

a に二硫化モリブデンを 5 ~ 20% 添加した複合材の摩擦摩耗特性を図 15 に示す。摩擦特性は 150℃ まで無添加材より若干高い程度であるが、200℃ 以上では明らかに無添加材を上回るようになる。摩耗速度は 5 および 10% 添加時には無添加材よりも全温度範囲において減少するが、20% 添加すると逆転して無添加時より増加する。いいかえれば、摩耗を最小にする二硫化モリブデン添加量が存在する。また二硫化モリブデン添加量を変えることにより摩耗速度を制御することが可能である。

摩擦係数は温度および添加量の影響を受けず、250℃ までほぼ 0.15 であった。

なお米国製市販品はこれらと類似した摩擦摩耗特性を有していた。摩耗速度は 10% 添加品よりも多く 20% 添加品よりも少なかった。

c. a にグラファイトを添加したもの

a にグラファイトを 10 ~ 20% 添加した複合材の摩擦摩耗特性を図 16 に示す。摩耗速度は 200℃ までほぼ一定であるが、200℃ を越えると 20%

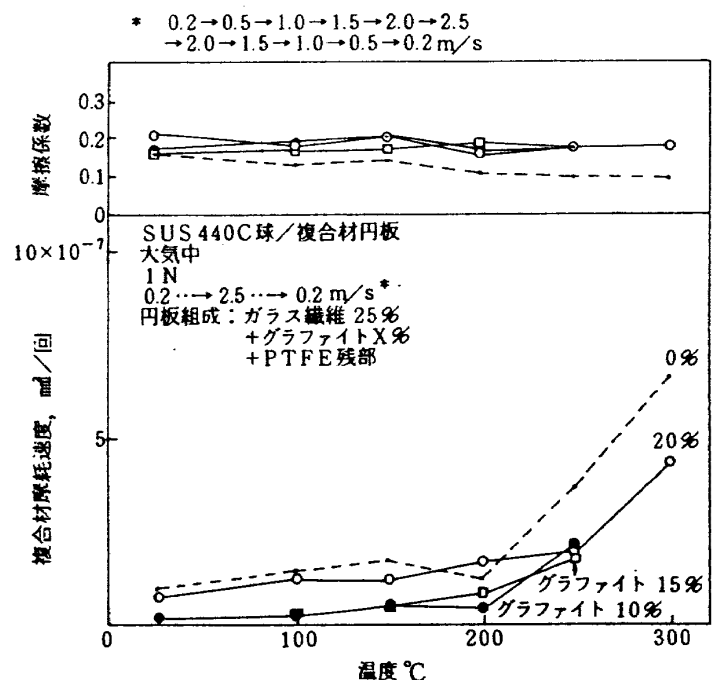


図 16 PTFE系複合材の摩擦摩耗に対する グラファイトの添加効果

の添加の場合を除いて急増する。これに対して摩擦係数の温度による変化は少なく、300℃まで約0.18を維持する。無添加時を除いて添加量の摩擦係数におよぼす影響は少ない。二硫化モリブデン添加時と同様に摩耗速度はある添加量で最小となる。最小摩耗速度は二硫化モリブデンを添加した場合より少なく、 $2\sim 5 \times 10^{-8}$  mm<sup>2</sup>/回である。

二硫化モリブデンおよびグラファイトの添加量と摩擦速度の関係を図17に比較した。二硫化モリブデンの場合室温～200℃において摩耗速度を最小にする添加量は5～10%である。いっぽうグラファイトでは、摩耗最小となる添加量は10～15%である。これらの値を体積パーセントに換算すると、二硫化モリブデンの場合2.5～5%、グラファイトの場合10～15%で最小摩耗を与えることになる。

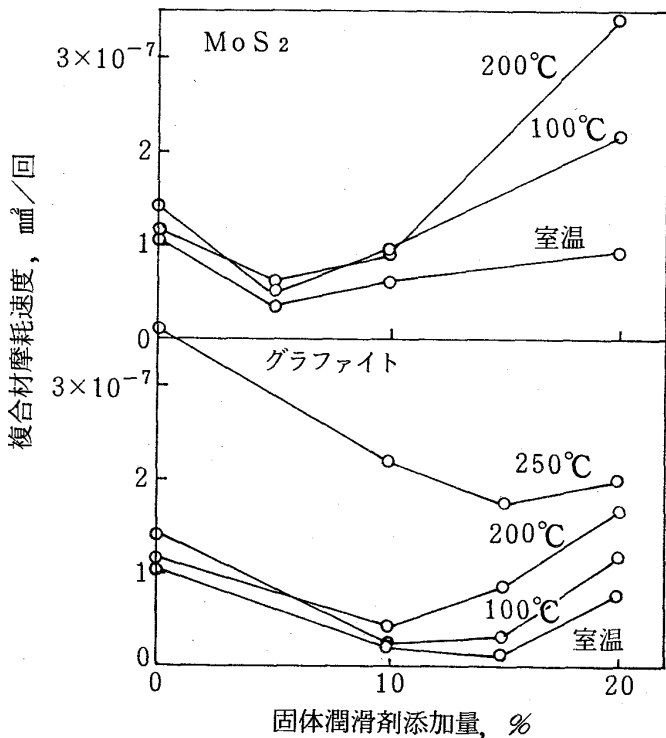


図17 複合材摩耗速度と固体潤滑剤添加量の関係

d. aに金属を添加したもの

モリブデン、タングステン、銀をそれぞれ25%添加した複合材の摩擦摩耗特性を図18に示す。モリブデン、銀を添加した複合材はすでに述べた複合材とほぼ同様の摩擦摩耗特性を示すが、タングステンのみ異なる。摩擦特性は無添加時とほとんど同じで、温度とともに漸減する。これに対して摩耗速

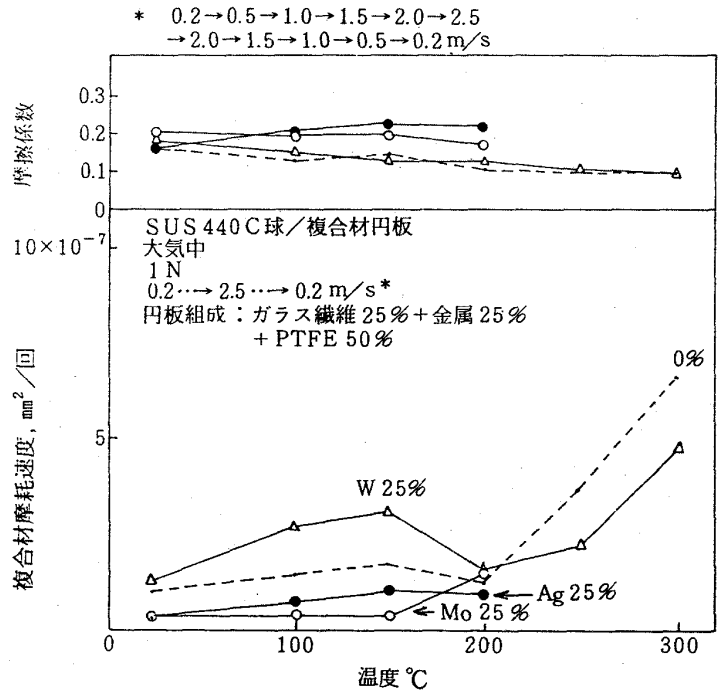


図18 PTFE系複合材の摩擦摩耗に対する金属の添加効果

度は無添加時よりかなり多くなる。摩擦については、タングステンの比重が他の添加剤よりも大きいので添加物の体積が小さくなり、摩擦係数に添加の影響が現れにくくなったことによると思われる。

摩耗が増加した原因は不明であるが、W添加による摩耗速度の変化が図17の二硫化モリブデンあるいはグラファイトと異なり、より低い添加量側に摩耗速度の最小値がかたよっているためかもしれない。

e. PTFE+ガラス繊維以外の新材料

試作した新材料はポリ-P-フェニレンテレフタルアミド繊維で補強したPTFE、ポリオキシベンゾイル+PTFE、それにポリアミドイミド+ポリエーテルイミド+二硫化モリブデン3種類である。PTFE+ポリ-P-フェニレンテレフタルアミド繊維の摩擦係数および摩耗速度は実用保持器と同程度であるが、相手材を損傷させるため保持器には使用できない。図19に室温で摩擦試験したのちのピン摩耗こんを示す。ピン表面に観察される縦傷は強化繊維によると考えられる。

ポリオキシベンゾイル+PTFEは250℃まで摩耗が10<sup>-9</sup>台あるいはそれ以下で少なすぎるため、保持器への適用は難しい。

ポリアミドイミド系は二硫化モリブデンを20%添加したものを除いて摩耗量が少なく保持器には不

適であると判断した。二硫化モリブデンを 20% 添加したものは 150℃まで摩耗速度が  $2 \sim 3 \times 10^{-7}$  台であり(表 4), どの温度においてもピンに転移膜を作る。一例を図 20 に示す。これらを考慮すると保持器として試験する価値はあると考えられる。ただし, 200℃で熱変形しており, 耐熱性の点で PTFE 系の従来品に劣ることが分かった。

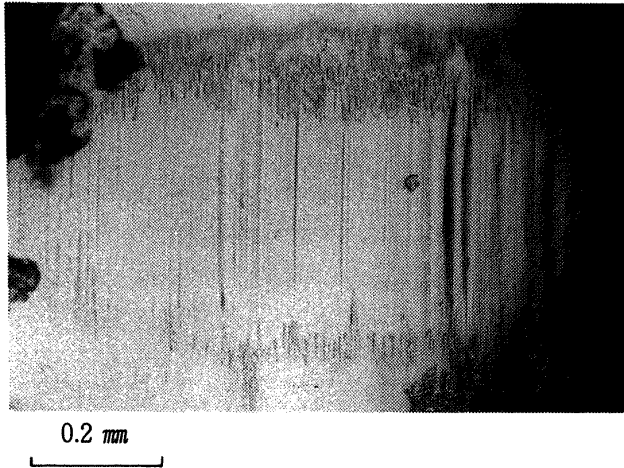


図 19 複合材(ポリ-P-フェニレンテレフタルアミド 10%+PTFE)を室温で摩擦した後のピン摩耗こん

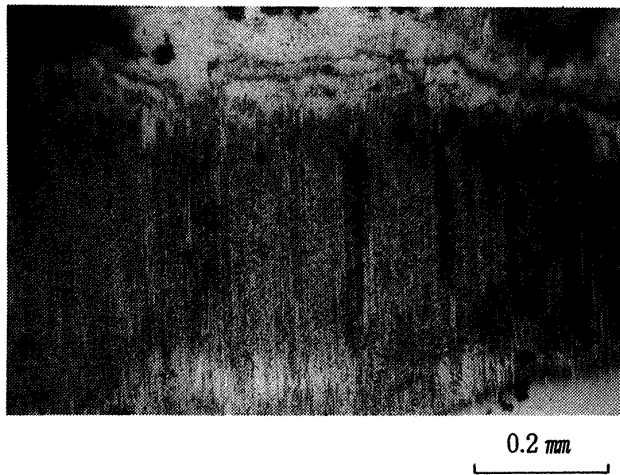


図 20 ピン上に生成された転移膜(複合材: 48%ポリアミドイミド+32%ポリエーテルイミド+20%MoS<sub>2</sub>, 室温で摩擦)

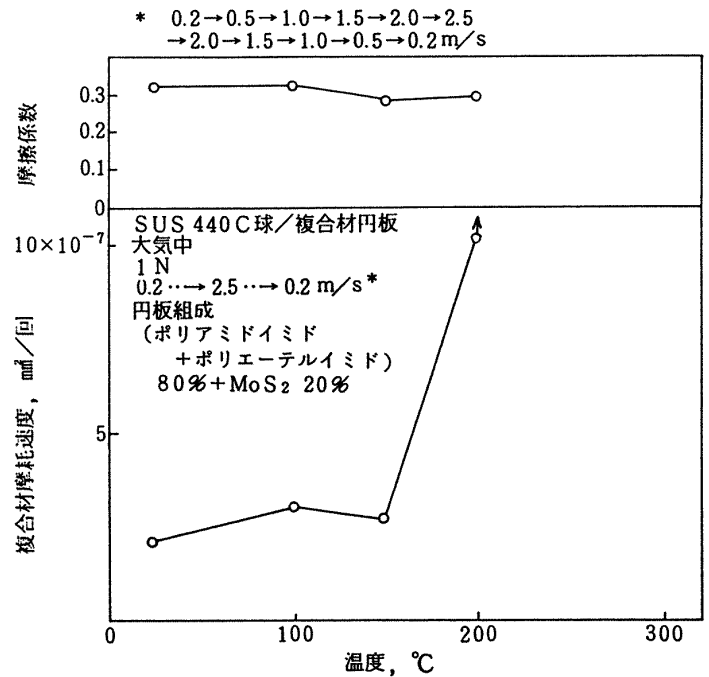


図 21 ポリアミドイミド系新材料の摩擦摩耗に対する MoS<sub>2</sub> 添加効果

### 5. 結 論

固体潤滑ころがり軸受の保持器に用いる新しい自己潤滑性複合材を研究開発するために, 16 種類の高分子複合材を試作し, その摩擦摩耗特性を実用されている保持器のそれらと比較した。得られた結果を以下に要約する。

1. 荷重: 1 N, 速度: 0.1 ~ 2.5 m/s, 温度: 室温 ~ 150℃, 大気中において, 実用されている高分子系複合材保持器の摩擦係数は 0.1 ~ 0.2 であり, 摩耗速度は  $3 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>/回であった。
2. 保持器材の主成分が PTFE であり, 添加物が金属, 金属酸化物, 固体潤滑剤とバラエティに富むこと, および上記のように摩擦係数, 摩耗速度が比較的狭い範囲にあることを考えると, 潤滑の主体は PTFE であると推定される。試作した保持器候補材の摩擦試験結果もこれを支持している。
3. 保持器候補材の摩耗速度を最小にする二硫化モリブデンあるいはグラファイトの添加量が存在する。いいかえれば, 添加量を変えることにより, 摩耗速度をコントロールすることが可能である。
4. 試作した保持器候補材のうち, PTFE 代替品として可能性を秘めているものは, ポリアミドイミド 48% + ポリエーテルイミド 32% + 二硫化モリ

ブデン 20%のみであった。

## 6. 謝 辞

本研究に用いた高分子複合材の多くはNTNルーロン工業㈱より提供された。同社およびご助言を頂いた竹内定男同社材料開発課長に感謝する。なお本研究は法政大学学生 伊谷晴治, 岩本晃二, 高野正寿, 谷川英樹の諸氏にご協力を願った。合わせて感謝する次第である。

## 文 献

1. 宮川行雄, 西村允, 野坂正隆, 宮脇雄三: イオンプレーティング金, 銀膜の摩擦, 摩耗特性に関する研究, 航技研報告, TR-505(1977)。
2. 西村允, 野坂正隆, 鈴木峰男, 関勝美, 宮川行雄: 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, 航技研報告TR-903(1986)。
3. R. I. Christy: Dry Lubrication for Rolling Element Spacecraft Parts, *Tribochemistry Int.*, Oct. (1982) 265。
4. 宮川行雄, 西村允, 関勝美: イオンプレーティング鉛膜によるころがり軸受の潤滑, 潤滑, 31巻, 12号(1986) 889, 896。
5. M. Nishimura, M. Watanabe & R. Yoshimura: Friction and Wear of Sputtered PTFE Films, *Proc. Int. Symposium on Tribochemistry Chinese Academy of Science* (1989) 213。
6. M. Nishimura, Y. Miyakawa, H. Furukawa, E. Hikima, S. Maekawa & M. Watanabe: A SEM Built-in Friction Tester and Its Application to Observing the Friction Process of Solid Lubricant Films, *ASLE Proceedings ASLE SP-14(1984)50*。
7. 文献 2。
8. 西村允, 関勝美, 宮川行雄: 自己潤滑性複合材保持器を用いた固体潤滑ころがり軸受の潤滑特性に関する研究 第一報 アースセンサー用軸受の選択試験, 航技研報告 TR-1019(1989)。



---

## 航空宇宙技術研究所資料622号

平成2年6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7-44-1  
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182  
印刷所 株式会社実業公報社  
東京都千代田区九段南4-2-12

---

