

精密機能機械要素としての軸受

—セラミック転がり軸受の高温への応用と高温固体潤滑—

Rolling Bearing as an Accurate and Functional Machine Element

…Application of ceramic bearing to high temperature and high temperature solid lubrication

キーワード

転がり軸受, 高温, 固体潤滑剤, セラミック軸受

機械技術研究所 極限技術部 精密機構研究室
吉岡武雄

1. はじめに

セラミックス製の転がり軸受は鋼製の軸受と同等の精度で製作・使用されており、精密な機能部品としての役割を果たしている。さらに、セラミック軸受は耐熱性や化学安定性、低密度、非磁性、絶縁性などの点で鋼製軸受より優れており、これらの特徴を活用した用途が拡大しつつある。たとえば、セラミック軸受が工作機械のスピンデルで既に実用化されており、スピンデルの高速化にセラミックスの低密度が、焼付き異常の抑制に化学安定性が活かされている。電食が問題となる用途ではセラミック軸受の絶縁性が注目されている。

機械技術研究所では、通産省が1981年に「次世代産業基盤技術研究開発制度」を創設し、「ファインセラミックス」を主要テーマの一つとする機運のなかで1980年にセラミック転がり軸受の研究を開始した¹⁾。当時、国内ではセラミック材料を製造する会社が多くなく、軸受材料として評価するためのセラミックスの入手もままならず、入手できても常圧焼結材のみであった。その後、ホットプレス材やHIP材が製造されるようになり、当所の材料評価で窒化けい素が最適のセラミック材料であることが確認された。

材料評価が一段落した1985年から、セラミック軸受の高温への応用に関する研究をスタートさせた。最初は、「省エネルギー技術研究開発（ムーンライト計画）」の「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムの研究開発」のなかで500℃までを、現在も続いている「産業技術研究開発制度」の「超音速輸送機用推進システム（HST）」では900℃までを目標に研究を展開している。一連の研究にお

いて、(株)不二越をはじめ軸受メーカーとの共同研究や技術指導を通じて協力を得てきた。本稿では、主として後者のプロジェクトに関連した共同研究における成果、セラミック軸受用高温固体潤滑剤の開発について述べる。

2. 高温固体潤滑について

HSTプロジェクトは、現在、飛行速度マッハ3までのターボジェットエンジンとマッハ3以上のラムジェットエンジンを組み合わせたコンバインドサイクルエンジンの開発を進めている。このエンジンの中では、たとえばターボジェットエンジンからラムジェットエンジンに切り換える際エンジンに取り込み、排出する空気の流路を変えるためにインテークやノズルの開閉が行われる。開閉機構の支点には回転軸や揺動軸があり、それらを支持するために軸受が組み込まれる。軸受は空冷されてもその温度が400℃以上になると予測されている。軸受材料としてのセラミックスは900℃程度まで使用できるが、潤滑剤なしでは軸受はその性能を発揮できない。現状の高温用合成潤滑油やグリースはこの温度領域で使用できない。そこで、高温固体潤滑剤の開発が重要な研究課題となっている。

固体潤滑剤²⁾とは、固体でありながら相対運動をする二面間にあつて摩擦係数が小さいなどの潤滑作用をする物質である。大気中でよく用いられるものにPTFEやMoS₂、黒鉛、PbOなどがあるが、常温から900℃までの温度範囲で摩擦係数が安定して小さいものはない。

固体潤滑剤の開発にあたっては、潤滑法を考慮に入れることが大切である。固体潤滑法には、被膜法

や移着法、供給法などがあり、用途によって使い分けがされている。被膜法は軸受の相對運動をする面に蒸着法やスパッタリング法などによって潤滑膜を形成する。優れた被膜法が開発され、強固な膜が形成されるようになってきているが、潤滑膜が摩耗すると潤滑効果が喪失する。潤滑膜の摩耗に対処する方法として移着法がしばしば用いられる。この場合、転がり軸受の保持器が固体潤滑剤を含む材料で製作され、転動体が保持器ポケット面と滑り接触する際に潤滑剤を転動体表面に移し、さらに転動体表面から軌道面に供給する。したがって、保持器が多少摩耗しても潤滑剤を供給できるメリットがある。しかし、移着法では、薄くて一様でかつ付着力に優れた膜の形成が要求される。一方、潤滑剤のパウダーを気体をキャリアにして供給する方法もある。この場合、固体潤滑剤の供給装置や回収装置などが必要になる。

本研究では、耐久性に優れた移着法を念頭に固体潤滑剤の開発研究を進めている。

これまでの大気中、高温用固体潤滑剤の開発状況を概観してみよう。

M.B.Peterson^{3, 4)}は、 $\text{Cu}(\text{ReO}_4)_2$ と $\text{Co}(\text{ReO}_4)_2$ のRe系複合酸化物を研究し、前者が $510\sim 730^\circ\text{C}$ で、後者が $620\sim 820^\circ\text{C}$ で潤滑特性が良好なことを報告している。H. E. Sloney^{5, 6)}は、 $\text{CaF}_2 + \text{BaF}_2$ 系固体潤滑剤を試作し、Agを添加することによって常温から 900°C までの広い温度範囲で摩擦係数を0.3程度に低下させている。河村⁷⁾は高効率エンジンの開発を目的に Si_3N_4 に対する固体潤滑剤として CaF_2 の応用を試み、 800°C までは温度が高いほど摩擦・摩耗特性が向上したと述べている。K.M.Taylor⁸⁾は、 N_2 ガスをキャリアーに固体潤滑剤の二硫化モリブデンを転がり軸受に供給し、 540°C と 816°C で試験を行っている。

3. 機械技術研究所における 高温固体潤滑剤の研究

転がり軸受用固体潤滑剤の開発では、移着潤滑法を想定しているので摩擦特性だけでなく、摩耗特性や移着特性にも注目して評価を行っている。

試作した固体潤滑剤の評価には次の装置を使用している。

図1は広い温度範囲にわたって固体潤滑剤の摩擦係数を測定できる往復動型高温摩擦試験機⁹⁾である。試験片は直方体で、材質がセラミックスまたは耐熱鋼である。評価の対象となる固体潤滑膜を試験片の摩擦面に形成する。摩擦の相手は、セラミックス製のピンやボール、ブロックなどである。試験片は高周波誘導加熱により所定の温度に制御される。摩擦

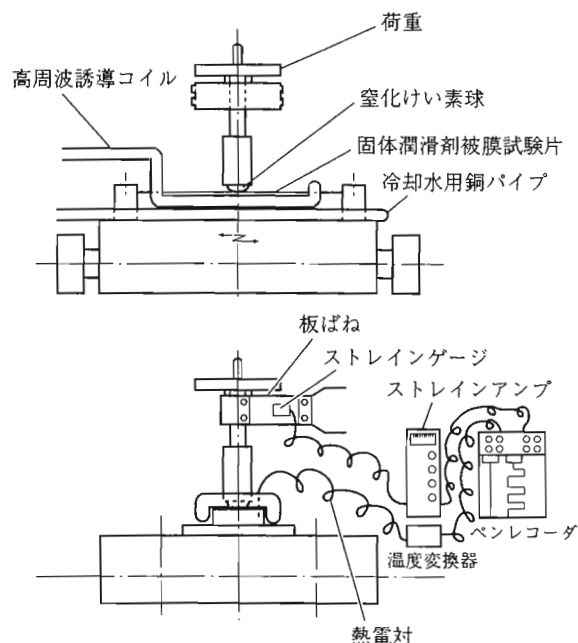


図1 往復動型高温摩擦試験機

係数は、一定の荷重のもとで往復の滑り運動に際して発生する摩擦力から求められる。

往復動型高温摩擦試験機で評価され、摩擦特性に優れた固体潤滑剤が次に示す装置で更に評価される。

図2と図3は、転がり軸受用固体潤滑剤の評価に使用した保持器材料評価試験装置¹⁰⁾と高温軸受性能評価装置¹¹⁾である。保持器材料評価試験装置は転がり軸受の接触機構を模擬したもので、保持器材試験片と上部試験片（軸受の転動体に相当）は滑り接触を、上部試験片と下部試験片（軸受の軌道輪に相当）は転がり接触をする。保持器材試験片は耐熱鋼表面に固体潤滑膜を形成したものかあるいは固体潤滑剤を含む材料から作られている。上部試験片と下部試験片は窒化けい素製の円筒で、上部試験片は軸方向にも曲率を持っている。保持器材試験片と上部試験片の接触面ならびに上部試験片と下部試験片の接触面にはそれぞれ保持器荷重ならびに転動体荷重が加えられる。すべての試験片が電気炉の中で一定の温度に保持される。固体潤滑剤の摩擦特性と摩耗特性は保持器材試験片と上部試験片の滑り接触で生じる摩擦力と摩耗量から求められる。固体潤滑剤の移着特性は上・下部試験片間の転がり接触で生じる振動から評価され、さらに、試験後に試験片の接触面を光学顕微鏡や電子顕微鏡を用いて観測し、摩耗特性と合わせて詳細に調査される。

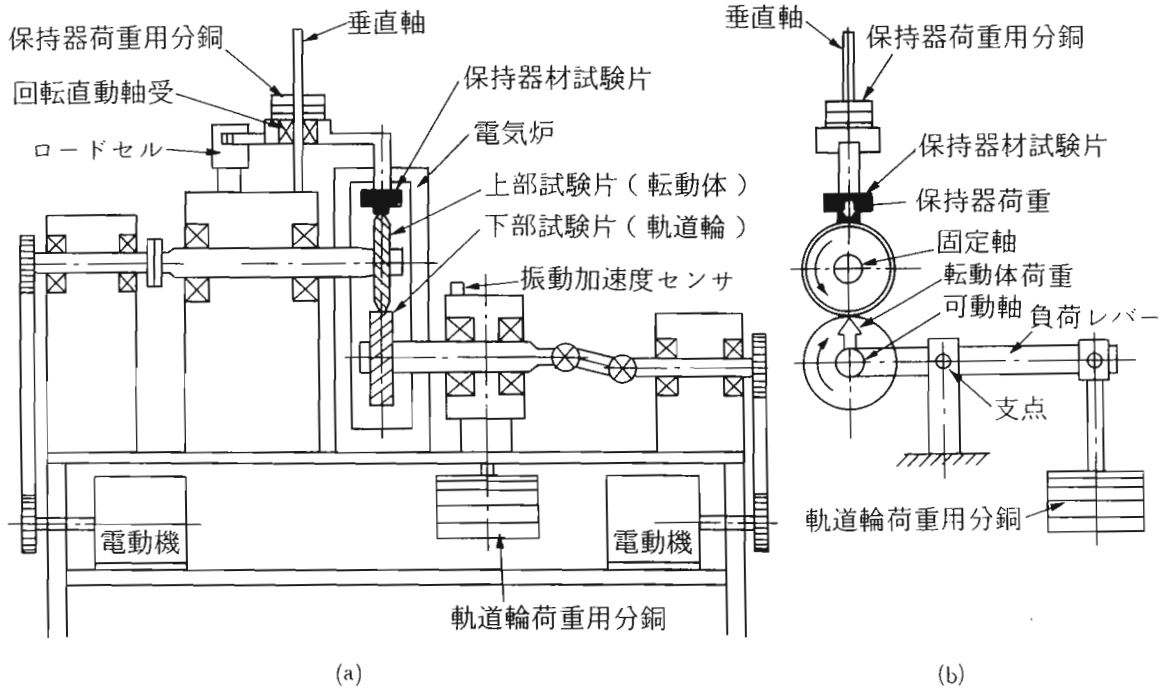


図2 保持器材料評価試験装置

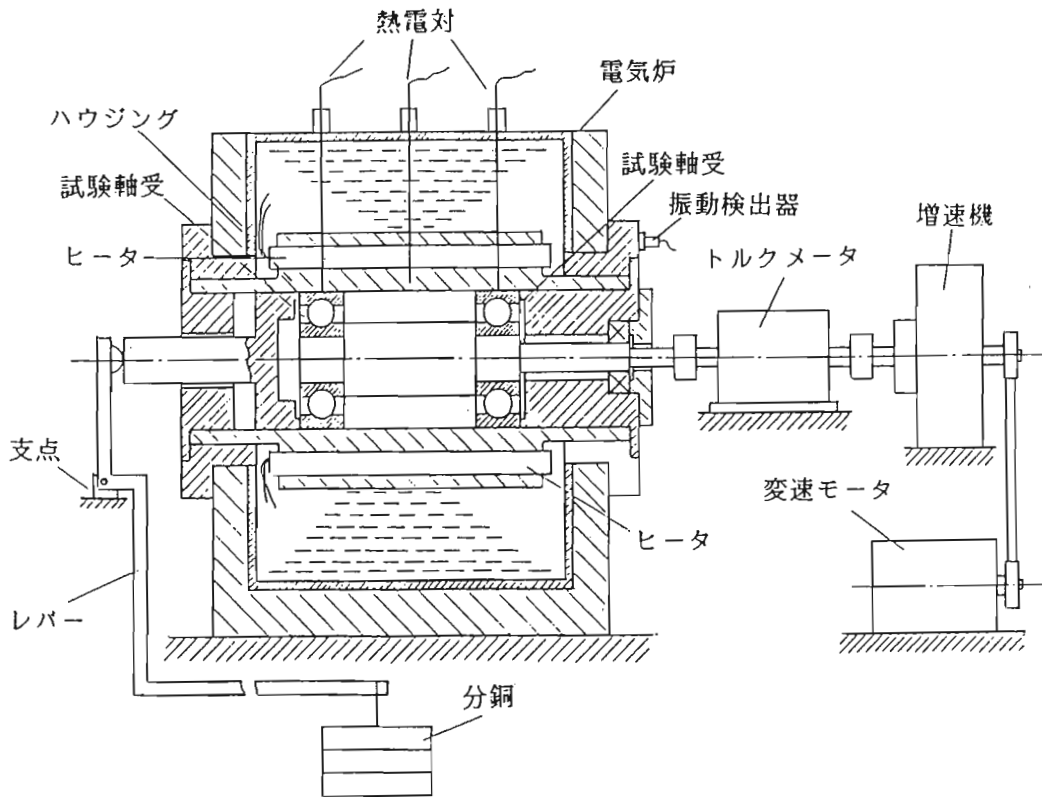


図3 高温軸受性能評価装置

保持器材料評価試験で良好と評価された固体潤滑剤は、保持器として製作され、試験軸受の窒化けい素製アンギュラー玉軸受に組み組み込んで、図3の高温軸受性能評価装置で評価される。2個の試験軸受を電気炉の中に正面組合せで組み込み、アキシャル荷重を加えて運転し、運転中の回転トルクと振動を測定して摩擦特性や移着特性が判定される。実験後に、試験軸受を分解して転動体表面や軌道面、保持器ポケット面を観測し、摩耗特性や移着特性について詳細な評価が実施される。

以下に、試作・評価したふっ化物系固体潤滑剤について述べる。

Slincy⁶⁾は、図4に示す大気中900℃まで使用できるふっ化物系の高温転がり軸受用固体潤滑剤を開発している。これは、CaF₂+BaF₂+Agを溶射または焼結したものである。常温から900℃までの摩擦係数が0.3程度でかつその変動幅も小さい。2.7m/sまでの滑り速度においても摩擦係数がほぼ0.3で安定していた。

Slincyの固体潤滑剤を追試する目的で、20wt%CaF₂+30wt%BaF₂+50wt%Ag（以下、CBAと呼ぶ）を作成し、NiCoCrAlYをバインダーとして耐熱鋼のインコネルの表面に減圧溶射し、潤滑膜の摩擦特性を調べた¹⁰⁾。高温往復動型摩擦試験機を用いて摩擦係数の温度依存性を測定した結果を図5に示す。摩擦係数が降温過程の400~600℃において0.3以下になっただけである。

ふっ化物系固体潤滑剤の摩擦特性の温度依存性を改善する目的で、20wt%CaF₂+30wt%BaF₂に50wt%のCr₂O₃を添加して潤滑剤（以下、CBCrと呼ぶ）を生成し、摩擦係数を測定した。その結果が図6である。昇温過程の500℃以下と降温過程の200℃以下で摩擦係数が0.4を越えているが、昇温過程の600~900℃ならびに降温過程900~300℃の温度領域でそれが0.3以下になっている。40wt%CaF₂+60wt%BaF₂

（以下、CBと呼ぶ）の摩擦係数が常温から900℃の温度範囲で0.3~0.6にあって、昇温過程の800℃と降温過程の500℃だけでそれが0.3となり、他の大部分の温度領域では0.4以上となっていたことと比較すると、Cr₂O₃の添加がCBの潤滑効果に有効に作用したことが明らかになった。そこで、Cr₂O₃そのもの（以下、Crと呼ぶ）の摩擦特性も調べた。しかし、同じ温度範囲で摩擦係数は0.35~0.5にあって、Crの摩擦特性が優れてはいなかった。

次に、CBCrの低温側の摩擦係数を低下させるために、Slincyが試みたと同じようにAgを添加した。図7の通り添加量を25wtと33wtと増加すると500℃以下の一部の温度範囲で摩擦特性が改善されたが、700℃以上ではかえって摩擦係数が増加した¹²⁾。

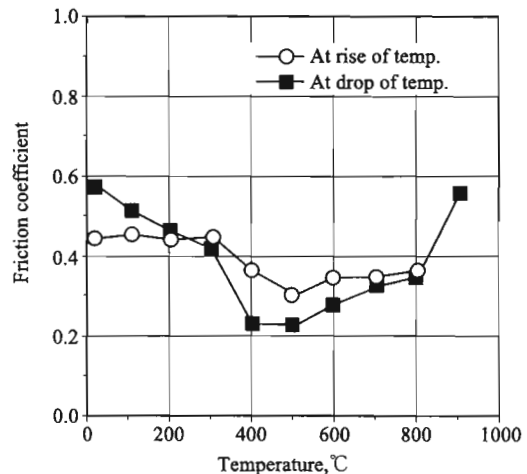


図5 20wt%CaF₂+30wt%BaF₂+50wt%Agの摩擦特性

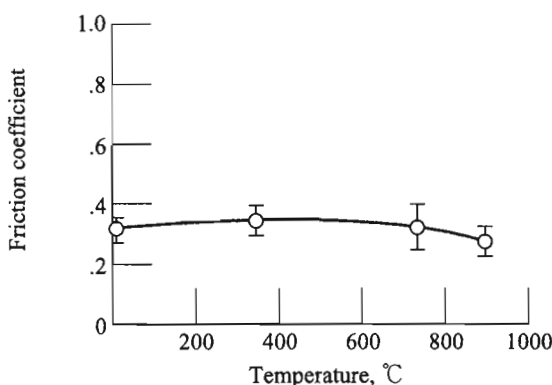


図4 CaF₂+BaF₂+Agの摩擦特性

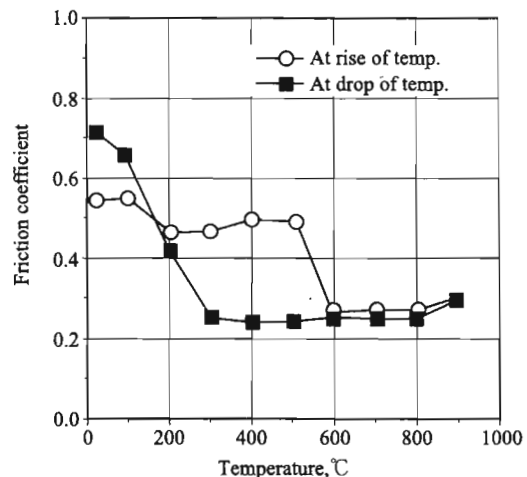


図6 20wt%CaF₂+30wt%BaF₂+50wt%Cr₂O₃の摩擦特性

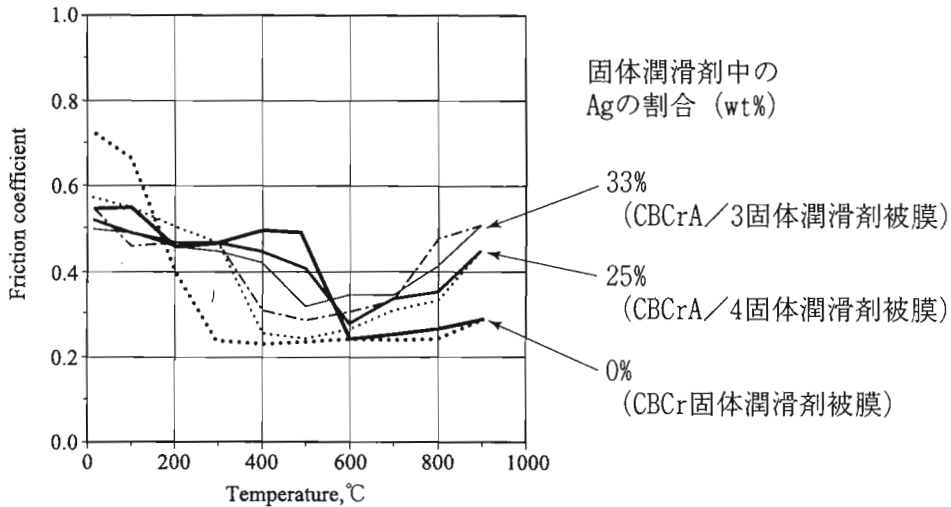


図7 20wt%CaF₂+30wt%BaF₂+50wt%Cr₂O₃にAgを添加した場合の摩擦特性
 図中の実線は昇温時, 点線は降温時を示す

一方, CBCrの摩擦面をX線回折で観測したところ, BaCrO₄が存在していた。そこで, CaF₂の潤滑効果への影響を明かにする目的で, CaF₂を除いた50wt%BaF₂+50wt%Cr₂O₃の潤滑膜(以下, BCrと呼ぶ)を生成し, 摩擦特性を調べた。摩擦係数は常温から900℃の温度範囲で0.3~0.7にあって, CBCrよりは大きかった。この結果から, CaF₂が摩擦特性になんらかの寄与をしていると考えられる。

セラミック軸受を高温に应用する際の潤滑剤としてCBCrを使用する目的で, その摩擦特性や摩耗特性, 移着特性を保持器材料評価試験装置を用いて調べた。大気中800℃, 滑り速度2.2m/sにおける摩擦係数と振動の経時変化を潤滑膜の付いていないインコネルやCr, CBと比較して図8と図9に示す。

図8から, CBCrの摩擦係数は時間の経過とともに増加傾向にあるが0.1と小さく, CrとCBがインコネルと同程度の摩擦係数を示すのと比べてCBCrの摩擦特性が優れていることがわかる。また, 800℃のみであるが, CBCrの摩擦係数が図4のSlincyのもの1/3になっている。なお, 時間に対して摩擦係数の増加傾向が認められたのは, 0.3mmの厚さの溶射膜が摩耗し, 母材のインコネルとの接触が徐々に増えたためと考えられる。

図9は, 保持器材料評価試験装置の上・下部試験片の接触面における振動で, CBCrはインコネルと並んで最も小さく, CrやCBより移着特性に優れていることを示している。なぜなら, 潤滑膜が移着しないために試験片が摩耗したり, 移着しても大きい潤滑粒子が不均一に分布する場合には振動が大きくなり, 摩擦特性に優れた一様な移着膜が形成される場合には振動が小さくなるからである。下部試験片の転がり接触面を電子顕微鏡で観察したところ

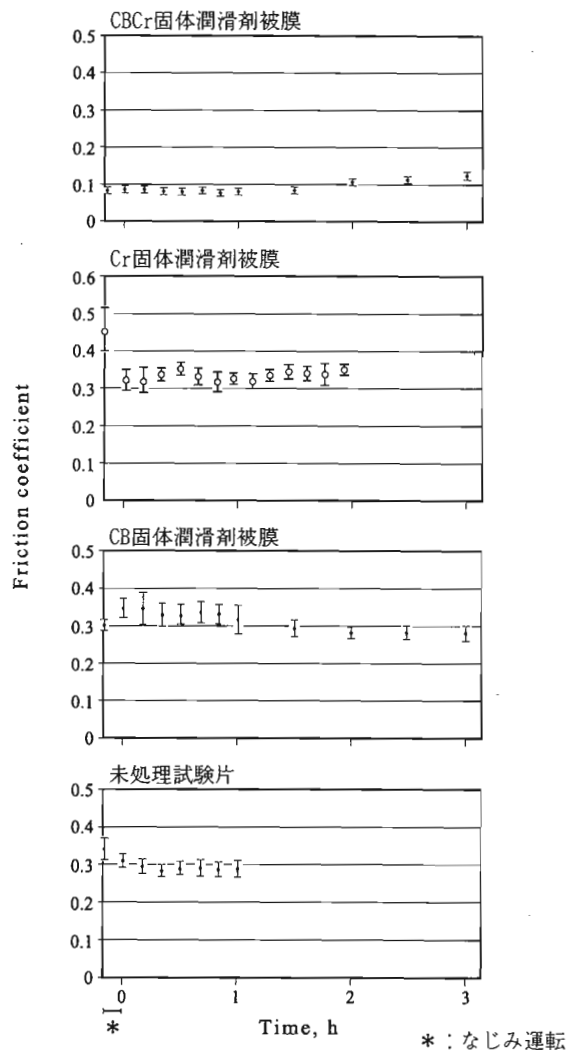


図8 摩擦係数の経時記録

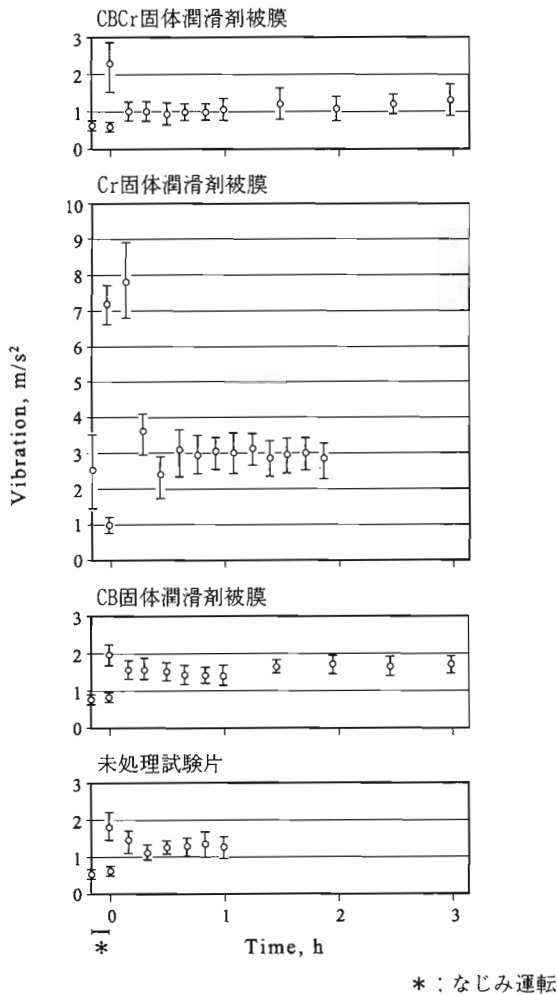


図9 振動の経時記録

移着膜が形成されていることが確認された。さらに、移着膜のEPMA分析結果は、膜中に元素のCr, O, CaならびにBaが存在することを明かにした。

セラミック製アンギュラー玉軸受7204の保持器のポケット面にCBCrを溶射し、軸受に組み込み、高温軸受性能評価装置を用いて軸受温度700℃、内輪の回転速度1000~8000rpmで摩擦トルクと振動を

測定し、固体潤滑剤を溶射していない保持器を組み込んだ軸受と比較した¹³⁾。保持器をSUS材で製作したために溶射の際の熱変形等が大きく、摩擦特性や摩耗特性の測定値が大きく変動して正しい評価ができなかった。移着特性に関しては、試験軸受の玉や軌道の表面に移着膜が形成されていることが確認された。

4. まとめ

常温から900℃まで使用できる固体潤滑剤としてふっ化物系のものを試作し、評価を行った。300℃以上の温度領域では摩擦係数が0.3以下となったが、それより低い温度では未だ満足できる性能を示していない。現在、この改良を進めると同時に新しい系の固体潤滑剤の開発に向けても努力を注いでいる。

文献

- 1) 吉岡武雄; 工業技術, 37(1), p.37(1996).
- 2) 松永正久, 津谷裕子; 固体潤滑ハンドブック, 幸書房, (1978).
- 3) M.B.Peterson, S.Z.Li, X.X.Jiang, S.J.Calabrese; Proc. 16th Leeds-Lyon Symposium, (1989).
- 4) M.B.Peterson, S.J.Calabrese, S.Z.Li, X.X.Jiang; Proc. of the International Symposium on Tribology, Beijing, China, p.336(1993).
- 5) H.E.Sliney; Tribology Int., Oct. p.303(1983).
- 6) H.E.Sliney; DOE/NASA/50162-4,(1990).
- 7) 河村英男, 北英紀; トライボロジスト, 37(4), p.327(1992).
- 8) K.M.Taylor, L.B.Sibley, J.C.Lawrence; Wear, 6, p.226(1963).
- 9) 梅田一徳; トライボロジスト, 40(2), p.145(1995).
- 10) 新関心, 吉岡武雄, 水谷八郎, 豊田泰, 橋本孝信; トライボロジスト, 40(12), p.1037(1995).
- 11) 竹林博明, 吉岡武雄, 唯根勉; トライボロジスト, 38(10), p.935(1993).
- 12) 豊田泰, 吉岡武雄, 梅田一徳, 新関心, 兼子敏昭, 板倉孝志; トライボロジスト, 41(2), p.146(1996).
- 13) 板倉孝志, 吉岡武雄, 梅田一徳, 新関心, 豊田泰, 兼子敏昭; 機械技術研究所所報, 49(3), p.107(1995).



吉岡 武雄

1939年富山県生まれ。'63年富山大学文理学部卒業。同年通商産業省工業技術院機械技術研究所(当時、機械試験)入所。'91年博士(工学)。現在、極限技術部精密機構研究室長。