

ISSN 0389-4010  
UDC 621.822.7  
621.89  
669.4  
536.45

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1019

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 アースセンサ用軸受の選択試験

西村 允 ・ 関 勝美 ・ 宮川 行雄

1989年4月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

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 アースセンサ用軸受の選択試験\*

西村 允\*\* 関 勝美\*\* 宮川 行雄\*\*\*

Lubrication Characteristics of Rolling Bearings  
Lubricated by Self-lubricating Composite Retainers  
Part 1—Selection of Bearings for Earth Sensors

Makoto NISHIMURA,  
Katsumi SEKI and Yukio MIYAKAWA

ABSTRACT

More than 90% of rolling bearings for space use are lubricated by solid lubricant films transferred from retainers to balls and races; successful operation of space driving mechanisms depends on the selection of retainer materials made of self-lubricating composites together with the selection of solid lubricant films deposited in advance on the surfaces of balls and races for the initial stage of operation.

The paper describes the process and the results of the selection tests carried out for ball bearings used in the earth sensors which were operated from February 1981 to April 1982 on the Engineering Test Satellite IV. Among 8 candidate materials tested in the form of a retainer, the combination of sputtered MoS<sub>2</sub> films and retainers composed of PTFE, glass fibre and molybdenum showed by far the best tribological response. When applied to angular-contact type ball bearings (#7204), this combination lubricated them for more than 10,000 hours at 2,000 rpm under a thrust load of 50N in 10<sup>-6</sup>Pa. The bearings actually used in flight were lubricated by PTFE coatings and retainers made from PTFE, glass fibre, and lead oxide for fear that an MoS<sub>2</sub> film would be worn off during tests conducted on earth before the launch. Test results indicated this particular combination is more effective in air than in vacuo.

The addition of MoS<sub>2</sub> to the composites did not improve their lubricating ability, suggesting that PTFE performs the main role in transfer film lubrication.

1. はじめに

1954年スプートニク1号の打ち上げ以来、1960年代の試行時代を経て人工衛星の実用化、商用化

は急速に進んだ。今では、衛星による放送、テレビ中継、あるいは天気予報における雲の映像など、人工衛星の利用は日常生活にも入り込んでいる。固体による潤滑法は宇宙開発の進展と軌を一にして、研究開発されてきた。

1960年代と言えば、人工衛星の潤滑不良による事故が多発していた頃である。人工衛星には姿勢

\* 平成元年1月12日受付

\*\* 宇宙研究グループ

\*\*\* 元航空宇宙技術研究所、現法政大学工学部

制御機構、アンテナ駆動機構など各種の駆動機構が搭載されている。初期の衛星駆動機構は主として従来の潤滑油やグリースによって潤滑されていたと思われるが、潤滑油の流出による寿命低下あるいは蒸発による光学機器の汚染などの事故が続出したため<sup>1)</sup>、固体潤滑法の研究開発に巨額の資金が投入された。宇宙開発のその後の順調な足どりは、この研究開発が成功したことを物語っている。とはいえ、固体潤滑法および油、グリース潤滑法を含めて宇宙潤滑技術は完成したものとはいえ、例えば固体潤滑軸受に限っても、気象衛星ひまわり3号の走査鏡支持軸受の回転不良、インド Apple 衛星の太陽電池パドル板展開時の異常などの不具合が、最近でも報告されている。

宇宙において、潤滑剤は次のような地上にない特殊環境にさらされる。

1. 微小重力
2. 真空
3. 広い温度範囲：-100~+150°C
4. 放射線

1.の微小重力という環境は、負荷からみて地上より宇宙を有利にする。軸受、摺動部にかかる荷重としては、不平衡による荷重および予圧(ころがり軸受の場合)のみ考慮すれば良く、地上のように重力による荷重を考慮する必要がないからである。

真空という条件は特に潤滑油やグリースにとっては厳しい条件である。圧力は高度450km(スペースシャトルおよび宇宙ステーションの飛行高度がこの程度である)で $10^{-4}$ から $10^{-6}$ Pa、静止衛星の飛行高度36,000kmで $10^{-9}$ Pa以下である。このため蒸気圧の高い油やグリースを長期間宇宙で使用することは難しい。加えて、レンズや鏡などの光学系を有する機器では、蒸発物による汚染を極度に嫌うという問題もあり、蒸発しやすい潤滑油、グリースの使用は制限される。

3.の広い温度範囲における作動要求も、潤滑油、グリースを宇宙において使用することを躊躇させる原因となる。

4.の放射線としては、太陽風、バンアレン帯からのもの、銀河系中心部から来る GeV の宇宙線

まで色々あるが、これまた潤滑油やグリースの劣化、重合などを誘起する。

以上より、宇宙環境は潤滑油、グリースにとって容易ならぬ環境であることが分かる。これに対して固体潤滑剤はこれらの環境条件で長期間に亘る使用実績がある。いっぽう宇宙ステーション時代をむかえて、宇宙ステーション飛行高度の主要構成気体である原子状酸素が、固体潤滑剤を劣化させる可能性が出てきた。この点は稿を改めて報告する予定である。

人工衛星には数多くの固体潤滑ころがり軸受が使用されており、その90%以上は固体潤滑剤で潤滑されている。例えば、三軸制御型人工衛星では、その数は50個以上にのぼる。1996年以降に打ち上げが予定されている宇宙ステーション日本モジュールには、1,000個以上のころがり軸受が用いられると筆者は推定している。このように、固体潤滑ころがり軸受は宇宙用機械要素のうちでも特に重要な部品である。

現在、宇宙用固体潤滑ころがり軸受は、内外輪、鋼球に付着した固体潤滑膜と自己潤滑性複合材保持器により潤滑されている。

筆者らはころがり軸受潤滑用の固体潤滑膜生成法を研究し、イオンプレATING法による金、銀膜<sup>2)</sup>、鉛膜<sup>3)</sup>、化学反応法による二硫化モリブデン膜<sup>4)</sup>、スパッタリング法による二硫化モリブデン膜<sup>5)</sup>について報告した。これらの被膜で潤滑した総玉形式のころがり軸受は、真空中において $10^8$ 回におよぶ耐久性を有するが<sup>2,3,5)</sup>、これ以上の寿命を期待することはできない。 $10^8$ 回を上回る寿命を要求される場合、保持器を固体潤滑剤を含む材料で作り、保持器から供給される固体潤滑剤で潤滑を持続しなければならない。そのためには自己潤滑性複合材料の研究開発が必要である。

わが国においては、この種の複合材の研究でみるべきものはなかった。1970年代に入って人工衛星用の地球センサーを国産化するに当たり、本方式によるころがり軸受の潤滑技術確立が必要となり、これを契機として、ころがり軸受保持器用自己潤滑性複合材の研究開発およびころがり軸受への応用技術開発が真剣に推進されるようになった。

本報は地球センサー用ころがり軸受保持器の性能試験を皮切りに行われた一連の研究結果について述べる。主な内容は次のとおりである。

1. 地球センサー用ころがり軸受保持器の試験結果
2. 各種高分子系複合材保持器を用いたころがり軸受の諸条件下における潤滑特性
3. 複合材成分の保持器潤滑特性におよぼす影響
4. 新しい複合材の研究開発

以上の研究の成果として、自己潤滑性複合材保持器の摩擦トルク特性、摩耗特性が明らかになるとともに、複合材に添加される固体潤滑剤、添加剤、補強材の役割を明確にした。さらに固体潤滑ころがり軸受の実用限界を求めた。以上の結果に基づいて固体潤滑ころがり軸受はどうあるべきかを論じた。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 ころがり軸受試験機

ころがり軸受試験には、真空用およびガス雰囲気用ころがり軸受試験機を用いた。真空用には、高低温試験用として既報の超高真空軸受試験機<sup>6)</sup>

と、室温試験用に新たに試作した2台の超高真空軸受試験機を使用した。後者の概略を図1に示す。本試験機の特徴は摩擦トルク測定に磁気カップリングの位相差を利用した点にある。すなわち試験軸受をとりつけた主軸の一端に円板状磁石を組み込み、真空槽外部においた相対する磁石でこれを駆動する。真空槽内の磁石は試験軸受の摩擦トルク分だけ位相がずれて回転するから、位相差を測定すれば摩擦トルクを知ることができる。位相差の測定には、軸に取り付けた反射鏡と光センサを用いた。真空排気系には、油を用いないソーブションポンプ、サブリメーションポンプとイオンポンプの組合せを採用した。

ガス雰囲気中の試験に用いた軸受試験機に関しては、次報で述べる。

### 2.2 試験軸受、潤滑法および実験条件

試験軸受としては、アースセンサーに用いたステンレス鋼SUS440C製のアンギュラ玉軸受#7007、BNT007および標準軸受として同じくSUS440C製のアンギュラ玉軸受#7204（接触角：30°）を使用した。また、少数ではあるが、軸受鋼SUJ2製の#7204C（接触角：15°）も使用した。これら軸受

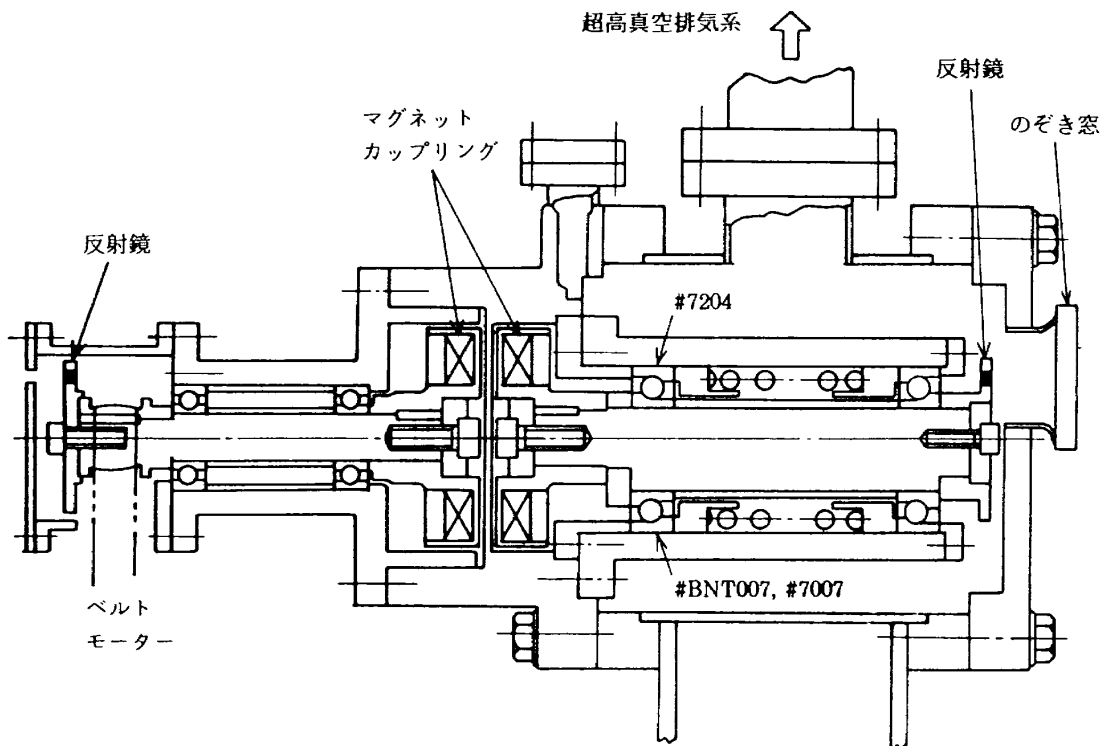


図1 超高真空軸受試験機の概略

の潤滑には、あらかじめ内外輪、鋼球に付着した二硫化モリブデンスパッタ膜あるいはテフロンスプレー膜と、各種高分子系自己潤滑性複合材で製作した保持器を併用した。スパッタリング法による二硫化モリブデン膜付着法および付着膜厚についてはすでに報告した<sup>5)</sup>。一部の実験では金属系複合材保持器も試験した。

実験条件としては、スラスト荷重50N、圧力 $10^{-6}$ Paを共通項とし、回転数のみ300~2,000rpmの間で変化させた。

なお、地球センサに使用された軸受は#7007で、実用条件は回転速度60rpm、スラスト荷重50Nである。

試験した保持器用高分子系複合材の組成を表1に示す。複合材の主成分はPTFEとこれを補強するガラス繊維で、これらに固体潤滑剤を少量添加している。

表1 試験した高分子系複合材の組成

複合材番号	成分
A	PTFE+15%ガラス繊維+酸化鉛
B	PTFE+25%ポリイミド
C	PTFE+20%ガラス繊維+顔料
D	PTFE+15%ガラス繊維+顔料
E	ポリイミド+10%PTFE+10%二硫化モリブデン
F	複合材D+2%二硫化モリブデン
G	PTFE+15%ガラス繊維+モリブデン
H	ポリイミド+30%二硫化モリブデン

### 3. 試験結果

#### 3.1 地球センサ用軸受の試験結果

表1に示した高分子系複合材の中で、NASAでは宇宙用軸受保持器として複合材Aを推奨しており<sup>6)</sup>、総回転数で $1 \times 10^7$ まで使用可能であるとしている。そこでこの複合材を保持器とした軸受を試験した。

図2は保持器に複合材Aを用いたBNT007の真空中、2000rpmにおける運転時間と摩擦トルクの関係である(実際の摩擦トルクは変動しているが、

ここでは大略の値を示した)。2回の実験結果はいずれも16~20時間の短時間で摩擦トルクが急増した。軸受検査結果によれば、回転精度の低下は特に認められなかったが、内外輪の軌道面は約 $1 \mu\text{m}$ 摩耗しており、鋼球の真円度にも崩れが認められた。保持器ポケット穴摩耗深さは最大約 $60 \mu\text{m}$ であった。さらに軸受の保持器案内面には摩擦発熱によると思われる黒化が認められたことから、この保持器は真空中において2000rpmという回転数には耐えられないと判断された。そこで回転数を1000rpmに下げた実験を行ってみた。結果を図3に示す。1000rpmにおいても摩擦トルクは数時間で急速に立ち上がっており、その後も高摩擦トルクを維持することが分かる。

この実験中たまたま真空系の故障で、運転中にイオンポンプが停止した。これにともなって、摩擦トルクは $2 \text{N} \cdot \text{cm}$ から $0.5 \text{N} \cdot \text{cm}$ に急激に低下し、

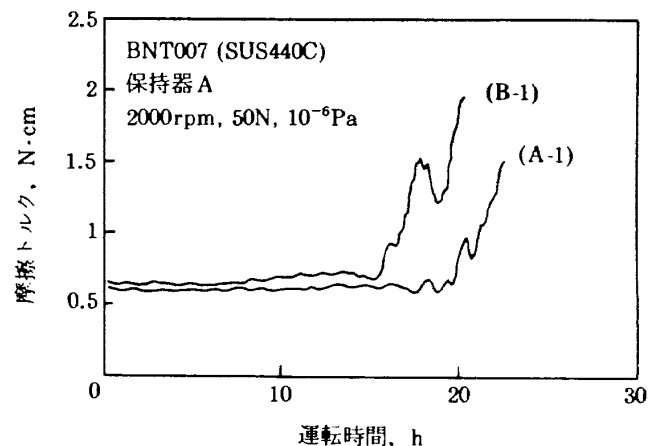


図2 複合材Aを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性(2,000rpm)

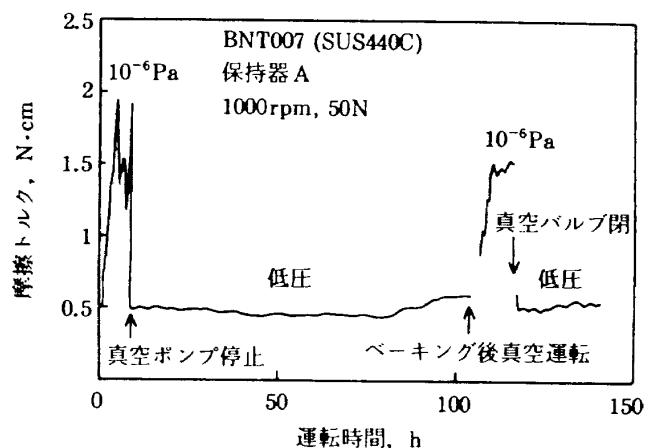


図3 複合材Aを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性(1,000rpm)

トルク変動も小さくなった。約100時間運転後、運転を中止し、ベーキングを行って $10^{-6}$ Paの圧力に下げ実験を再開したところ、摩擦トルクは急増して前の値に戻った。ついで主バルブを閉じて真空槽内圧力を上げると、摩擦トルクは低下した。

この結果は複合材Aの摩擦摩耗が雰囲気圧力の影響を強く受けること、そして真空中よりもむしろ大気中に適していることを示唆する。そこで、真空中運転の後、大気を導入して摩擦トルクの変化を調べた。図4に結果を示す。使用した軸受は#7204C (SUJ2製)である。この場合摩擦トルクは160時間運転後 $2.5\text{N}\cdot\text{cm}$ を越えてスケールアウトしたが、大気を導入すると直ちに $0.5\text{N}\cdot\text{cm}$ に低下し、安定した摩擦特性を示すようになった。このように、複合材Aを保持器に用いた軸受は真空中よりも大気中用に適している。事実、本軸受は大気中、 $2000\text{rpm}$ において $20,000$ 時間以上の運転が可能であった。この結果は次報で報告する。

回転数を下げれば、本軸受を真空中で使用できる可能性がある。図5はBNT007を試験軸受として、同一条件で回転数を $300\text{rpm}$ まで下げた結果である。真空中では $300\text{rpm}$ においても摩擦トルク、トルク変動が大きく、最大トルクは $2\text{N}\cdot\text{cm}$ を越えることもあった。240時間(総回転数： $4.32 \times 10^6$ 回)運転後の内外輪のラジアル振れは約10ミクロン、アキシアル振れは約50ミクロンであった。内外輪軌道面の母線形状を図6に示す。母線は共に保持器からの固体潤滑剤の付着によると思われる盛り上がり呈している。いっぽう鋼球の

真円度には異常が認められないことから、固体潤滑剤は保持器から鋼球へ支障なく転移し、良好な潤滑状態を維持できたと推定される。結局、固体潤滑ころがり軸受を低摩擦で長寿命化するには、保持器から転走面への転移膜生成を過不足なく制御することが必要である。

回転数をさらに $200\text{rpm}$ に下げると、摩擦トルクは時として $0.5 \sim 1.5\text{N}\cdot\text{cm}$ に上昇することもあったがおおむね $0.1 \sim 0.5\text{N}\cdot\text{cm}$ の摩擦トルクで終始し、 $1459$ 時間の運転を終ることができた。

以上より、複合材Aは高速においては真空中よりも大気中の運転に適しているが、低速では真空中で使うことが可能である。地球センサは試験した最低回転数 $200\text{rpm}$ の $1/3$ 以下の $60\text{rpm}$ で運転されること、および米国における実績を考慮して、本複合材を保持器としたころがり軸受が地球センサに採用された。池内らによれば、この地球センサは技術試験衛星ETS-V型に搭載され、 $1981$ 年2月より $5000$ 時間以上の宇宙における運転に成功した<sup>7)</sup>。

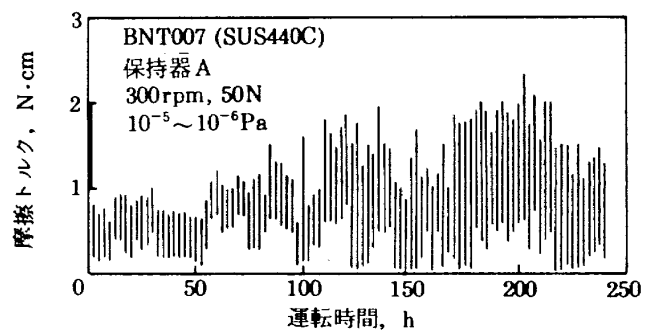


図5 複合材Aを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 ( $300\text{rpm}$ )

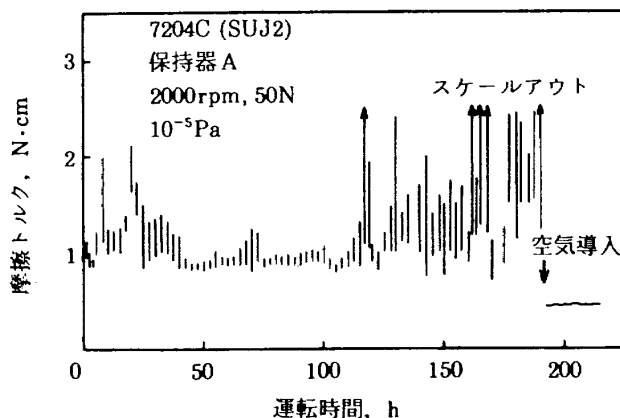


図4 複合材Aを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (空気導入効果)

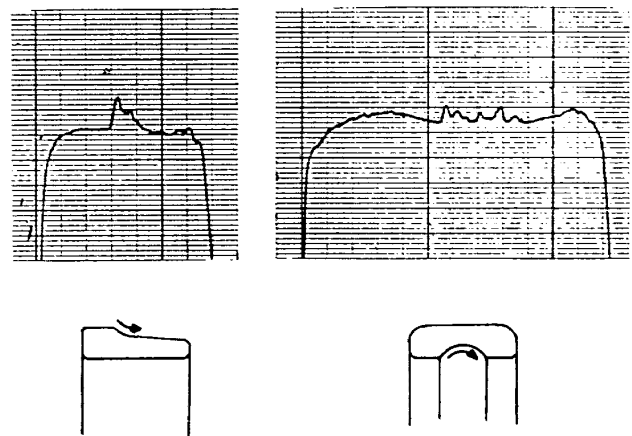


図6 内外輪に転移した固体潤滑膜

### 3.2 各種高分子系複合材保持器の試験結果

複合材Aを用いた軸受は真空中、低速において長時間使用することが一応可能であるが、トルク変動が若干残る。また将来予想される衛星搭載機器の高速化に対処することは難しい。このため、試験軸受として入手しやすいアンギュラ玉軸受#7204を用い、スラスト荷重50N、回転数2000rpmで真空中において長時間運転することができる保持器材の研究開発を試みた。

#### 3.2.1 高分子系複合材B

この複合材はガラス繊維、PTFEにポリイミドを添加し、高温強度の改善を狙ったものである。図7は本複合材保持器を用いた軸受の試験結果である。本軸受は複合材Aよりもやや良好な特性を示すが、26時間の運転を経たあたりから摩擦トルクの上昇と変動が大きくなった。48時間の運転で早くも保持器の摩耗を生じており、2000rpmでは使用に耐えないことが明かとなった。

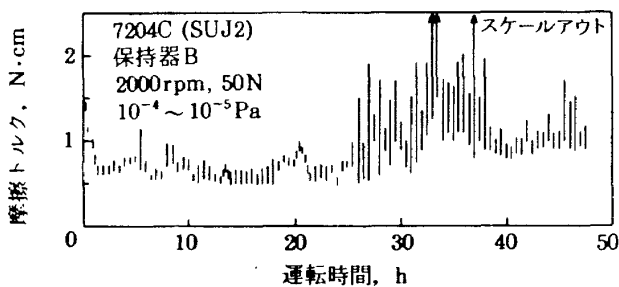


図7 複合材Bを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性

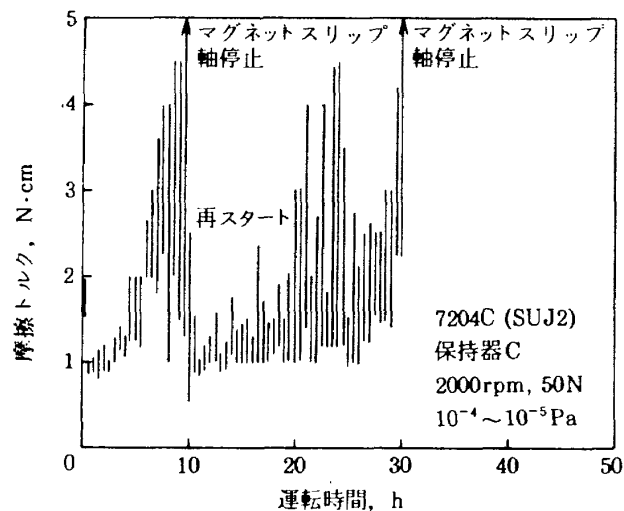


図8 複合材Cを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性

#### 3.2.2 高分子系複合材C

この複合材は液体酸素、液体水素という超低温流体中で、 $dn$ 値150万近くまで軸受保持器として試験され、良好な成績をおさめているものである。試験結果を図8に示す。回転数2,000rpmで運転開始後摩擦トルクは約 $0.9\text{N}\cdot\text{cm}$ より次第に上昇し、10時間後 $5\text{N}\cdot\text{cm}$ を越えてマグネットカップリングのスリップを生じた。再スタート後も摩擦トルクの絶対値および変動幅は大きく、30時間の運転後再びマグネットカップリングのスリップがあり、運転を停止した。回転数2,000rpmで短時間運転の後1,000rpmに回転数を下げて運転した結果を図9に示す。運転開始後、短時間で $2.5\text{N}\cdot\text{cm}$ まで上がった摩擦トルクは、回転数を下げると $1.3\text{N}\cdot\text{cm}$ まで低下するが、1.5時間運転の後上昇して $3\text{N}\cdot\text{cm}$ を越える(図は平均摩擦トルクを示す)。摩擦トルクはその後低下したが、 $2.5\text{N}\cdot\text{cm}$ 程度にとどまるため、6.5時間の運転で実験を中止した。

回転数をさらに下げた結果が図10、図11である。図10では回転数を300rpmより400、600rpmと上

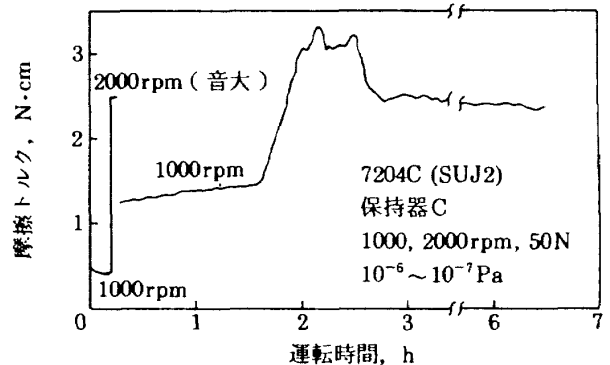


図9 複合材Cを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (1,000rpm)

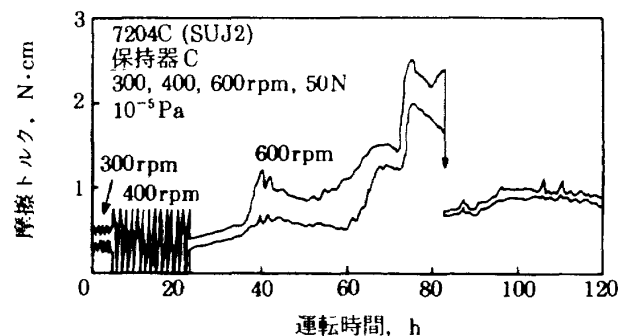


図10 複合材Cを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (300~600rpm)

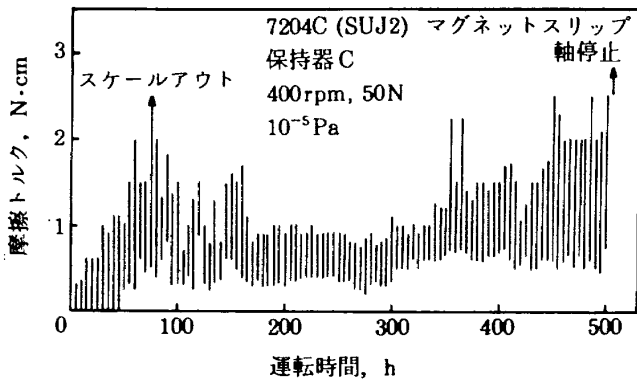


図11 複合材Cを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (400rpm)

げているが、摩擦トルクは600rpmにおいて2.5N・cmまで上昇している。その後摩擦トルクは0.8N・cmまで低下するものの、トルク変動が残るため運転を中止した。

400rpmで長時間運転した結果が図11である。摩擦トルクは70時間後に2.5N・cmを越えたが、その後安定した。しかしながら、350時間を越える頃から次第に上昇し、500時間の運転後マグネットスリップを生じた。以上の結果より本複合材も真空軸受保持器として適していないと判断した。

### 3.2.3 高分子複合材D

複合材D保持器の摩擦トルク特性の推移を図12に示す。全体として、トルク特性は複合材Cに類似している。摩擦トルクは運転当初より1N・cmを越え、20時間を過ぎる頃から2N・cmをオーバーするようになった。保持器の摩耗粉が摩擦トルクに影響しているのではないかと考え、95時間運転後試験軸受を取り出し転走面を観察したが、摩耗粉は少なかった。軸受を超音波洗浄して摩耗粉を除去し再度運転を試みたが、かえって摩擦トルクは増大した。したがって記録された高い摩擦トルクは摩耗粉の影響ではない。加えて、本複合材保持器は運転中の圧力を $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Paに保つことが困難であった。以上より複合材Dは本質的に真空用軸受保持器に向かないと判断した。

### 3.2.4 高分子複合材E

複合材Cが超低温では優れた潤滑性を有するのに真空中では極めて悪いということは、真空中においては対流による摩擦熱の除去がなく、接触部

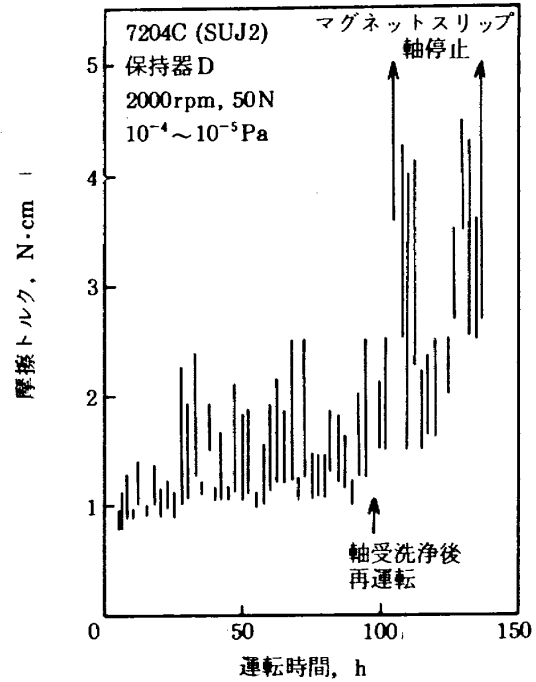


図12 複合材Dを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性

が高温になってPTFEが潤滑性を失うためとも考えられる。このため、耐熱性においてPTFEよりも優れているポリイミドを添加した複合材Eを試験した。図13がその結果である。本複合材保持器の摩擦トルクはいままで述べてきた複合材のそれらと変わらなかったが、ガス放出が著しかった。すなわち、真空槽圧力は当初より $4.5 \times 10^{-5}$ Paと高かったが、さらに運転開始と共に上昇し、 $1.3 \times 10^{-3}$ Paに達した。ついでチタンサブリーションポンプを作動させて圧力を $4.1 \times 10^{-5}$ Paに下げても時間と共に圧力は上昇し、運転を始めてから8.8時間後にイオンポンプの作動範囲を越えた。そして10.4時間後にマグネットカップリングのスリップを生じた。回転数を1,500rpmに下げても $5.8 \times 10^{-5}$ Paにおいて再度運転してみたが、マグネットカップリングがずれることが分かった。このように本複合材は摩擦トルクの大きさもさることながら、ガス放出が他より格段に多く真空用として使用に耐えないことが明かとなった。



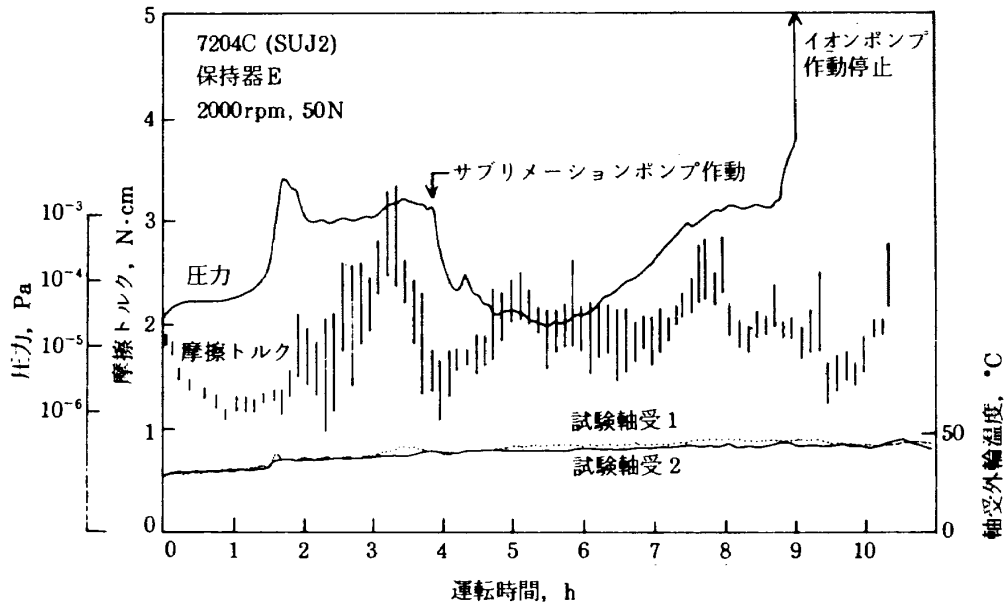


図13 複合材Eを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性

### 3.3 高分子複合材と二硫化モリブデン膜との併用

これまで試験した保持器はいずれも2,000rpmにおいてたかだか100~200時間の運転しか許容できなかった。これは、初期の回転を助けるため転走面に付着したPTFEスプレー膜の寿命が短く、保持器からの転移膜潤滑へスムーズに移行できなかったためであるとも考えられる。そこで、真空中において優れた摩擦摩耗特性を示す二硫化モリブデンを鋼球、内外輪の転走面にスパッタリング法により付着し、スタート時の運転を円滑に行うと共に二硫化モリブデン膜による潤滑を長時間行うことにより、保持器からの転移膜形成が順調に行えるように配慮した。

#### 3.3.1 高分子複合材DとMoS<sub>2</sub>膜の併用

複合材Dを保持器とした時の結果を図14に示す。約550時間までは摩擦トルクは0.5N·cmと低く安定しており、変動幅も小さく、運転中の圧力も10<sup>-7</sup>Paを維持した。摩擦トルクはその後ときどき上昇し変動すると共に、圧力も10<sup>-6</sup>Paに低下した。870時間より圧力は10<sup>-5</sup>Paに低下してトルクはさらに上昇し、スケールアウトした。しかしながら、図9と比較して二硫化モリブデン膜との併用効果は明白である。

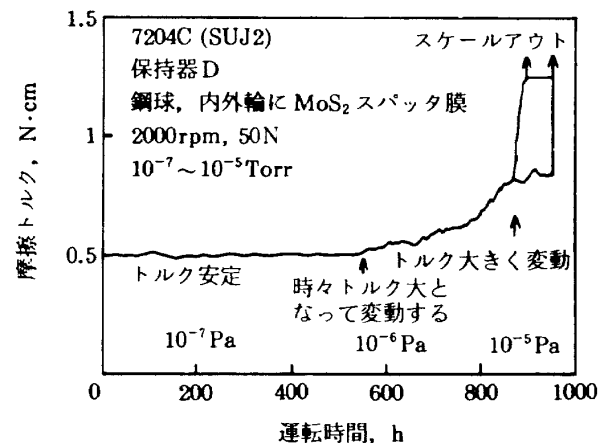


図14 複合材Dを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (MoS<sub>2</sub>膜との併用効果)

#### 3.3.2 高分子複合材F (複合材D+2%二硫化モリブデン) とMoS<sub>2</sub>膜の併用

二硫化モリブデン膜が軸受寿命を著しく改善するとすれば、保持器材に二硫化モリブデンを添加すればより一層の寿命延長を期待できるであろう。図15は複合材F (複合材Dに二硫化モリブデンを2%添加したもの)の結果で、図12と比較して摩擦特性は向上している。しかしながら二硫化モリブデンの添加効果は予期したほどではなく、550時間を越えた辺りからトルク変動が生じ、約1,000時間で一時的にトルクが急上昇している。後に示すように、複合材に添加された二硫化モリ

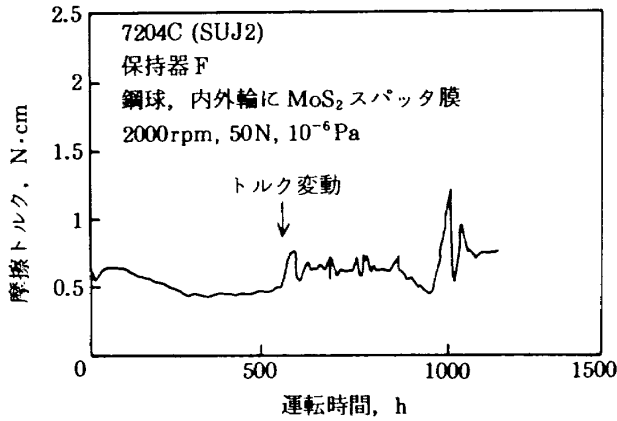


図15 複合材Fを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (MoS<sub>2</sub>膜との併用効果)

ブデンは潤滑剤としては機能しないようである。

### 3.3.3 高分子複合材GとMoS<sub>2</sub>膜の併用

この複合材は金属モリブデンを含有している。これで作った保持器と内外輪、鋼球に付着した二硫化モリブデンスパッタ膜との組合せは、摩擦トルクが0.4~0.75N·cmと低く、変動も少なく、5653時間 (総回転数:  $6.78 \times 10^8$  回) 運転後も安定した摩擦特性を示した (図16)。この実験はここで打ち切り、試験軸受を変えて10,018時間 (総回転数:  $1.2 \times 10^9$  回) の運転を行ってみたが、結果は同様で摩擦トルクは0.75N·cmを越えることは

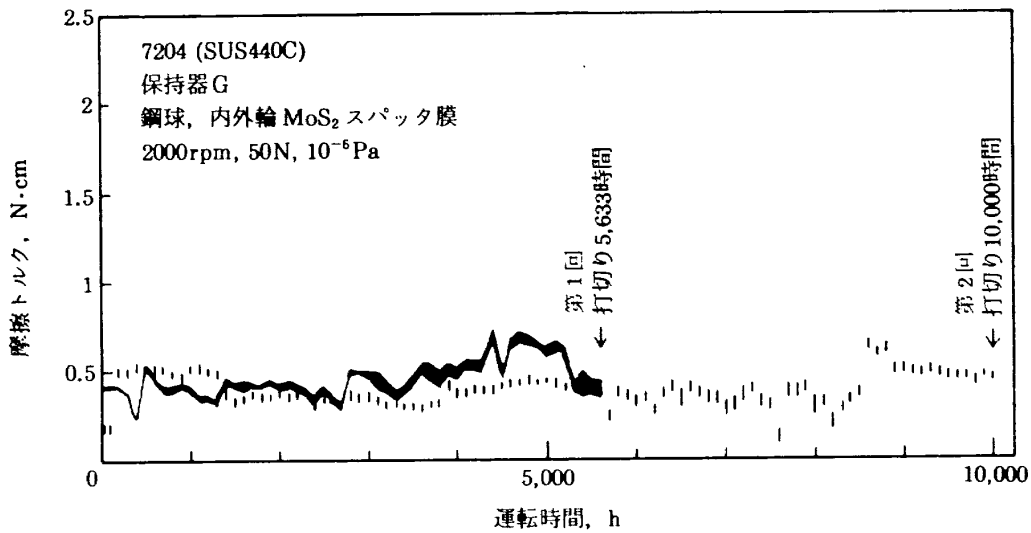


図16 複合材Gを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (MoS<sub>2</sub>膜との併用効果)

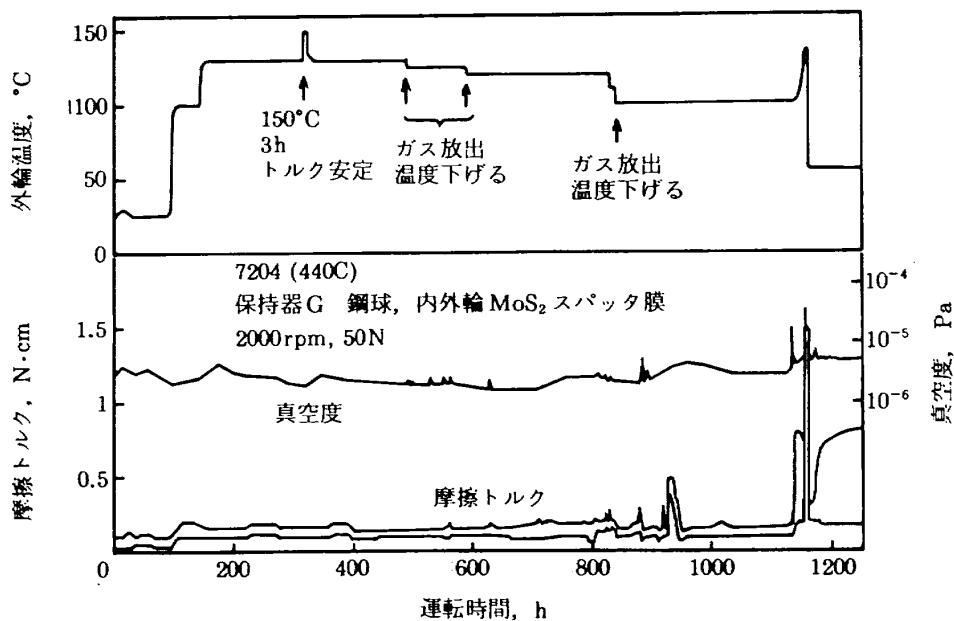


図17 複合材Gを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性 (100~150°C, MoS<sub>2</sub>との併用効果)

なく、真空度は終始 $10^{-6}$ Paを維持した。なお軸受外輪温度は室温より $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 高い値を維持した。

実験後の保持器ポケット穴の摩耗量は5653時間運転後で最大深さが $14\sim 19\mu\text{m}$ と $20\sim 26\mu\text{m}$ であり、10,018時間運転後では両試験軸受とも $10\sim 15\mu\text{m}$ であった。このように長時間運転したほうの保持器がむしろ摩耗していない理由、および摩耗の詳細については別途報告する予定である。

この複合材の真空中における昇温試験結果を図17に示す。 $130^{\circ}\text{C}$ において500時間近くまで低摩擦トルクを維持するが、ガス放出による真空度低下が観察されたので、試験温度を少し下げた。100時間運転したところでまたガス放出があったので、温度を低下した。このようにして $100^{\circ}\text{C}$ まで温度を低下したが、900時間を過ぎたところで摩擦トルクの上昇があり、さらに1100時間をすぎると、温度を室温まで低下したにも関わらず摩擦トルクの急上昇があり、実験を打ち切った。この結果から、本複合材の上限使用温度は $100^{\circ}\text{C}$ 前後とみられる。ただし実験条件が2000rpmと比較的高い回転数で行われたので、回転数を下げればより高温でも使用可能と考えられる。

### 3.3.4 高分子複合材Hと $\text{MoS}_2$ 膜の併用

PTFE系複合材は真空中において2000rpmという回転数下では $100^{\circ}\text{C}$ 程度の温度までしか使用できないことが明かとなった。より高温で使う用途にはPTFE系よりもポリイミド系に可能性がある。図18にポリイミドに二硫化モリブデンを添加した複合材H保持器の試験結果を示す。この保持器は室温でも摩擦トルクが比較的高く、約3000時間の

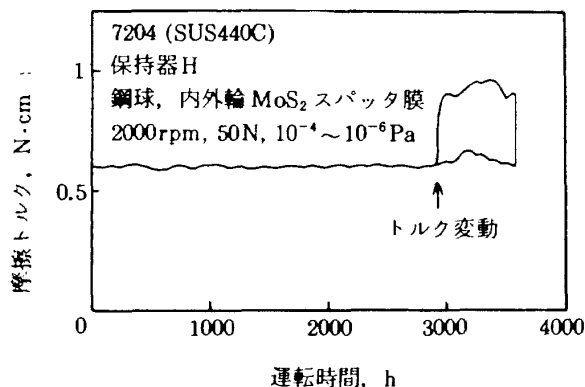


図18 複合材Hを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性（ $\text{MoS}_2$ 膜との併用効果）

運転でトルク変動が非常に大きくなった。本複合材には二硫化モリブデンを25%添加している。しかしながら二硫化モリブデンが転走面に転移して潤滑に寄与した兆候はなかった。このことから、高分子系複合材に二硫化モリブデンを添加しても、必ずしも潤滑特性を向上させることはないと考えられる。

### 3.3.5 高分子複合材G（ $\text{MoS}_2$ 膜の併用効果）

今まで試験してきた複合材のうちでは、複合材Gと $\text{MoS}_2$ スパッタ膜の組合せが最も長寿命であった。この組合せから $\text{MoS}_2$ 膜を取り除き、複合材保持器Gのみで潤滑するとどうなるかを調べた。

図19に示すように、複合材G保持器のみでは潤滑

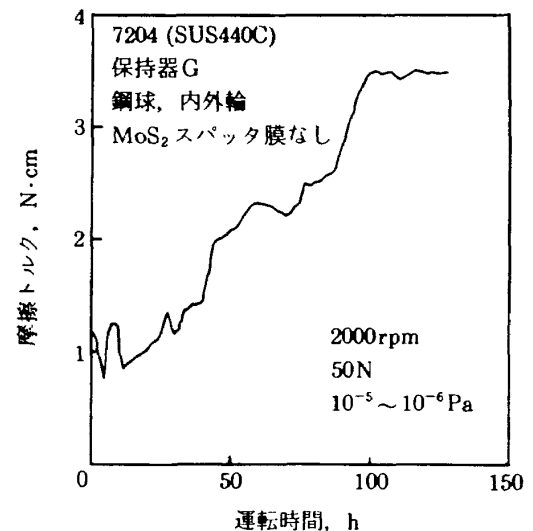


図19 複合材Gを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性（ $\text{MoS}_2$ 膜なし）

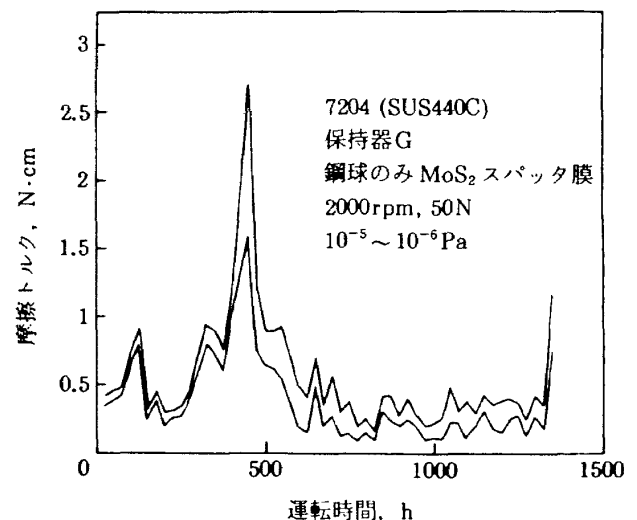


図20 複合材Gを保持器に用いた玉軸受の潤滑特性（鋼球のみ $\text{MoS}_2$ 膜付着）

滑性は非常に悪く、運転時間の増加と共に摩擦トルクは急上昇している。

それではボールのみ二硫化モリブデンをつけた場合はどうであろうか(図20)。この場合には摩擦トルクが上がりかけても再び低下し、まったく二硫化モリブデン膜のない場合のように短時間で潤滑不能になることはなかった。しかしながら、トルク変動とそれに連動するガス放出は途切れることはなく、本保持器を用いる場合、MoS<sub>2</sub>スパッタ膜との併用が不可欠であることが分かった。

#### 4. おわりに

宇宙用固体潤滑ころがり軸受を長寿命化するため、各種高分子複合材を保持器とした軸受を真空中において試験し、次の結果を得た。

1. 宇宙で使用された実績があり、NASAより宇宙用として推奨されている複合材Aを用いた軸受は、真空中において摩擦トルクが高く、トルク変動も大きい。いっぽう大気中においては、本軸受は摩擦トルクが低く変動幅も小さいことから、大気用に適している。

2. 初期潤滑膜としてMoS<sub>2</sub>スパッタ膜はPTFEスプレー膜よりもはるかに優れている。

3. 試験した複合材保持器のうち、摩擦トルク、トルク変動、耐久性の点で最も優れていたのは、モリブデンとPTFEを主成分とする複合材G保持器を二硫化モリブデンスパッタ膜と組み合わせた場合であり、10,000時間(総回転数:  $1.2 \times 10^9$ 回)を支障なく運転できた。なお二硫化モリブデン膜無しでは、本複合材も潤滑性を失う。

4. 真空中、回転数2000rpmにおいて複合材保持器Gの使用上限温度は約100°Cである。

5. 複合材に添加された二硫化モリブデンは必ずしも潤滑剤として有効であるとは限らない。

#### 5. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々のご援助を頂いた。とりわけ、軸受摩擦トルク測定に用いた時間差アンプの回路検討では数理解析部・磯部俊夫氏、配線に関しては宇宙研究グループ・岡本修氏に御教示頂いた。保持器の試作についてはNTN・ルーロン工業(株)に尽力して頂いた。さらに軸受形状の計測については、NTN東洋ベアリング工業(株)に御助力頂いた。深く感謝する次第である。

#### 文 献

- 1) NASA SP-8063, Lubrication, Friction, and Wear (1971) 47.
- 2) 宮川行雄, 西村 允, 野坂正隆: イオンプレーティング法による金, 銀膜の摩擦摩耗特性に関する研究, 航技研報告 TR-505. (1977).
- 3) 宮川行雄, 西村 允, 野坂正隆: イオンプレーティング鉛膜の潤滑特性, 潤滑 31, 12 (1986) 889.
- 4) 西村 允, 野坂正隆, 宮川行雄, 坂本 潤: 化学反応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-568 (1979).
- 5) 西村 允, 野坂正隆, 鈴木峰男, 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).
- 6) Space Materials Handbook, NASA SP-3025 (1966) S-107.
- 7) 池内正躬, 鈴木崇弘, 若林靖史, 村上 力, 狼 嘉彰, 木田 隆: 人工衛星による固体潤滑軸受の性能試験結果, 潤滑, 28, 9 (1983) 649.

---

## 航空宇宙技術研究所報告1019号

平成元年4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

---

**Printed in Japan**