真空用ころがり軸受の諸問題

西 村 允*

(昭和60年1月17日受理)

Some Problems on Rolling Bearings for Use in a Vacuum

Makoto NISHIMURA

(National Aerospace Laboratory Jindaiji-higashi-Machi 7-44-1, Chofu, Tokyo)

(Received January 17, 1985)

1. はじめに

真空工業が順調に発展している有様は年々厚くなる本誌に象徴されるが、それにともなって真空中で作動する機械類も増加しており、潤滑上のトラブル発生を耳にすることも多くなった。いっぽう真空中で運動する機器としては先輩格の、人工衛星など宇宙飛翔体においては、潤滑上の問題は90%片づいたと言われている¹⁾。宇宙における潤滑上の成果を利用しない手はない、と言うのが筆者に表題が与えられた経緯であろう。

そこで、摩擦、摩耗、潤滑の諸問題を生業とするトライボロジストから見て真空という特殊環境は他の雰囲気中とどう違うか、という辺りから話を始めよう。

2. 真空中における金属の摩擦

潤滑膜が破断して摺動面同士が直接接触すると、表面損傷を生じ、はなはだしい場合には焼付きに至る。この現象が同種金属の場合に顕著なのは周知のとおりである。そこで、軸と軸受には異種金属の組合せを選ぶ。すべり軸受の場合、軸を鋼としたら軸受を黄銅とするのはその類いである。

同種金属の場合でも、実は、空気中の酸素が焼付きを防ぐのに大きな役割を果している。空気中においては、金属は酸素によって“潤滑”されているのである。酸素の潤滑作用を如実に示す Buckley の研究を紹介する²⁾。彼は超高真空装置を用いて純鉄の表面をイオンボンパ-

ドその他の手段で清浄にしたのち、微量の酸素を真空槽内に導入し、鉄表面に酸素吸着層を生成させた。そして酸素吸着量と、同じ純鉄でその上を摩擦した時の摩擦係数との関係を求めた。図1に結果を示す。無垢の鉄同士を摩擦した場合、摩擦係数は3.0にも達するが、酸素を導入すると摩擦係数はドラスチックに低下し、吸着層の表面被覆率が0.25すなわち75%は裸の金属が露出しているのに摩擦係数は1.6に下っている。ここで述べている吸着層が単分子層であることを考えると、いかに微量の酸素が摩擦に影響するかが理解されよう。逆に見れば、空気中では金属表面上の酸化層や不可避の汚染物が摩擦低下や焼付き防止に役立っている。真空中ではこれらの保護層が失われるため、金属同士の摩擦係数は極めて高い値に達し、とも金でなくとも焼付く可能性がある。

以上はすべり摩擦の話であったが、ころがり摩擦ではどうであろうか。図2は 10^{-5} Pa 中において軸受鋼で作られたφ50円板同士を純ころがり状態³⁾からスリップ率を変えてころがり—すべり状態を発生させた時の摩擦係数とスリップ率の関係である³⁾。スリップ率を少くして純ころがりに近づけるほど、摩擦係数が低下することが分る。この結果から、摩擦から見れば真空中においても、ころがり軸受はすべり軸受よりも有利であると言える。とはいえ真空中では酸化膜のような保護膜がないた

注：純ころがり状態とは二個の円板を接触させ、同一回転数で回転させた場合を言う。回転方向は互に逆である。これに対してころがり—すべり状態とは一方の円板の回転数 N_1 に対して他方の円板の回転数 N_2 を減じていった場合で、円板はすべりながら回転する。スリップ率 S は、 $S = (N_1 - N_2 / N_1) \times 100\%$ で定義する。 N_2 が0になればスリップ率100%で純すべり摩擦状態となる。

* 航空宇宙技術研究所 (調布市深大寺東町 7-44-1)

図1 純鉄同士の摩擦における酸素への表面露出量と摩擦係数、酸素吸着量の関係²⁾

め、金属同士の直接接触が発生すると図1のような高い摩擦係数を示すと同時に表面損傷しやすい。したがって真空用ころがり軸受においては、大気用以上に潤滑膜の破断が起きないように注意する必要がある。

3. 真空用ころがり軸受

真空用ころがり軸受としては転動体に鋼球を使った玉軸受が主で、ローラタイプはあまり使われない。理由は円筒端面の潤滑が厄介なためと、宇宙では無重力で荷重が小さく、大荷重向きのローラ軸受を使う必要がなかったためであろう。もっともスペースステーションが現実化すると、宇宙でも大規模構造物を動かすためローラ軸受が要求される可能性はある。

真空用ころがり軸受には潤滑方式を油、固体潤滑剤のいずれにする場合にもアンギュラタイプのものが用いられるが、深みぞタイプのものが使用される場合もある。アンギュラ玉軸受が使われる理由は、この種の軸受が強度のとれる一体構造の保持器を使用するためである。油潤滑の場合、保持器は多孔性の高分子材料で作り、油を真空含浸する。固体潤滑の場合、固体潤滑剤を含有する自己潤滑性複合材で保持器を製作する。これらの材料はいずれも強度が高いとは言えないので、一体構造保持器の使えるアンギュラ玉軸受のほうが組立て保持器を用い

図2 軸受鋼を真空中においてころがりすべり摩擦した時のすべり率を摩擦係数の関係³⁾

図3 宇宙用玉軸受周りの設計例⁴⁾
(油貯めとラビリンスに注目)

る深みぞ玉軸受よりも都合がよい。

軸受精度としてはP4以上、軸受すきまはC4以上のものが使用される。軸受すきまを大きくするのは、真空中では対流熱伝達による摩擦熱除去がなく、摩擦部が温度上昇しやすいためである。

図3に宇宙用油潤滑ころがり軸受周りの設計例を示す⁴⁾。

油やグリースによる潤滑では軸受自体に何ら手を加える必要はないが、固体潤滑剤でころがり軸受を潤滑する場合には、固体潤滑被膜をあらかじめ鋼球表面、内外輪転走面表面に付着しなければならない。用いられる固体潤滑剤は二硫化モリブデン、銀、鉛、PTFE(商品名: テフロン)などで、膜厚は厚くとも1 μ mである。このわずか1 μ mの固体潤滑膜のみでも超高真空中では総回転数で10⁷回の耐久性がある。

さらに耐久性を延ばすために、保持器を固体潤滑剤入りの材料で製作する。図4にこの方法による潤滑膜形成の原理を示す。保持器ポケット穴内面と鋼球がすべり摩擦をすると、保持器に含有された固体潤滑剤が鋼球表面に付着し、さらに内外輪転走面に転移し被膜を作る。初期に存在していた固体潤滑膜が摩耗しつくした後は、転移膜により潤滑を持続するのである。保持器から固体

図4 保持器からの潤滑剤の転移

図5 真空中5時間放置後の90タービン油のくりかえし摩擦特性と雰囲気

潤滑剤がどんどんとれてしまえば寿命に達するから、この方法による軸受の耐久性はそう良くないように見える。しかしながら、後述するように本法により1790 rpmの回転数で超高真空中10万時間におよぶ連続運転に成功している例もある。

ここで軸受鋼に触れておこう。通常のころがり軸受は高炭素クロム鋼SUJ2で製作されている。潤滑油やグリースを潤滑剤に用いる場合にはこれで支障ないが、問題は固体潤滑剤を使う場合である。SUJ2は非常に錆びやすいので、大気⇄真空中を繰返す真空装置ではSUJ2では使えず、ステンレス鋼SUS440Cを用いなければならない。油やグリースと異なり固体潤滑剤には防錆性はないからである。

4. 真空用潤滑剤

真空中ころがり軸受用潤滑剤には潤滑油、グリースなど液体潤滑剤と二硫化モリブデン、銀など固体潤滑剤が用いられることはすでに述べた。

潤滑油、グリースは固体潤滑剤のような特別な前処理もいらず、手軽に使える点で固体潤滑剤より優れている。さらに摩擦熱の除去、振動や騒音の減衰でも本質的に固体潤滑剤に勝る。したがって油潤滑ですませられる箇所は極力潤滑油、グリースを使用すべきであろう。それではその辺にころがっている潤滑油を真空装置に使えるかということ、そうはいかない。

図6 90タービン油およびステアリン酸添加油の耐荷重能⁶⁾

第一に通常の潤滑油は蒸気圧が高く、蒸発しやすいことである。油蒸気で汚染されてもかまわない真空装置を除いて使えるものではない。

第二に鉱油系潤滑油の潤滑特性は真空中において著しく低下することである。図5は純銅同士を90タービン油で潤滑しながら、雰囲気を実験一空気と連続的に変えた時の摩擦係数の変化を示す⁵⁾。摩擦係数は大気中で低く真空中で高く、しかもその変化は可逆的である。この結果から、大気中の酸素が90タービン油の潤滑性向上に寄与していることが分かる。

軸受鋼同士を試料とした場合はどうか。図6は同じ90タービン油を用い、耐荷重能を調べた結果である。⁶⁾ 乾燥空気中では荷重を増加するにつれて摩耗径が徐々に増加するが、荷重140 kgf以上になると摩耗径は急増している。これより、90タービン油の空気中における耐荷重能の限界値は130 kgfである。いっぽう真空中およびアルゴンガス中においては、わずか20 kgfの荷重から摩耗径の増加が始まる。これらの雰囲気中での90タービン油の耐荷重能は15 kgfで、空気中のおよそ1/9しかない。

酸素のない雰囲気中における鉱油系潤滑油の耐荷重能低下は、極圧添加剤を添加することによって補うことができる。例えばりん化トリクレシル（TCP）やジアルキルジチオリン酸亜鉛は無酸素雰囲気中でも極圧膜を生成する能力があるから、これらの極圧添加剤を添加した潤滑油を使用すればよい⁷⁾。

さらに合成油⁸⁾の中には、ふっ化シリコン油のように真空中でも耐荷重能を失わないものや、パーフロポリ

図7 各種潤滑油の温度—粘度特性⁸⁾

エーテル (PFPE) のような蒸気が 10^{-9} Pa という低い値を持つものもある。特にフォンブリン Z-25 (イタリアモンテフロロ社製、日本モンテジソン社より市販) という PFPE は超高真空中でも使える潤滑油として著名であり、ヨーロッパ宇宙機構より宇宙用に推しようされている。以下、この合成油とこれを基油としたグリースを紹介する。この合成油は CF_2 の鎖の所々に O を入れた構造の、分子量 10,000 という巨大分子により構成される。本油の粘度—温度線図を図 7 に示す⁸⁾。パーフロロポリエーテル油 (PFPE) はシリコン油と並んで温度に対する粘度変化が他の油より小さく、温度安定性が高いことが分かる。

対流熱伝達による熱除去のない真空中においては摩擦部が温度上昇しやすいため、温度安定性は真空用潤滑剤に要求される重要な特性である。蒸気圧はどうであろうか。カタログ値では 20°C において 7×10^{-10} Pa、 93°C において 3×10^{-7} Pa であり、温度が上がっても低い蒸気圧を維持する、とはいえ、摩擦を受けると巨大分子が切断され蒸発しやすくなると予想されるので、実用に際しては摩擦部が温度上昇しないよう配慮すべきであろう。軸受部の水冷を積極的に行うのもその一つである。この PFPE を基油としたグリースが米国 Bray Oil 社から発売

されており、NASA におけるグリース性能試験においても好成績を取めた。NASA では 340 組 680 ケの玉軸受を用いて 33 種のグリースの真空中潤滑性能試験を行った⁹⁾。この試験は真空中において 38°C 、 93.3°C の連続運転試験、低温スタート試験、室温スタートストップの繰返し試験、重量損失測定を含むぼう大なものであるが、この中で平均して良かったのが PFPE グリースである。中でも Bray Oil 社の Micronic 803 と 3L-38RP が良く、これらは続いて行われた真空中 5 年間連続運転試験に他の二種のグリースとともに採用された。ちなみに他の二つとは航空機用高温グリース Aeroshell 5 と真空用シリコングリース G-351 である。5 年試験の結果は入手していないが、中間発表では、室温においては 3L-38RP が良く、高温では Aeroshell 5 が良好なようである。

真空用潤滑油としてはフォンブリン Z-25、グリースでは 3L-38RP が良いことが分ったが、値段が高いという欠点もある。油による真空槽内汚染が問題とならなければ、真空用シリコングリースや鉱油+ジオアルキルジチオリン酸亜鉛あるいはふっ化シリコン油を使うのが良い。

数ある固体潤滑剤のうちで真空用に実用されているのは、二硫化モリブデン (MoS_2)、二硫化タングステン (WS_2)、PTFE (商品名、テフロン)、金、銀、鉛である。グラファイトは特殊な場合を除いて使用できない。その理由は、グラファイトは吸着するガスによって潤滑作用を行っており、吸着ガスがなくなる真空中では摩擦

注：鉱油は石油を精製して作製する。これに対して合成油は石油をガス化して一たん成分を分解したのち、希望の物理的・化学的性質を有する化学構造物に合成したものを言う。したがって合成油は組成や分子量を揃えることができる。大きな分子量の分子を揃えると、蒸気圧の低い合成油が出来あがる。

図8 各種固体潤滑剤の真空中における使用可能温度範囲（鉄系材料を用いた場合）

摩耗が著しく悪化するためである。これらの固体潤滑剤の真空中における実用可能温度範囲を図8にあげる。ただし本図は摩擦熱発生量の少ない、マイルドな条件下でのものであることをお断りしておく。

使用可能な温度範囲のもっとも広い固体潤滑剤は二硫化モリブデンで、 -196°C から 650°C まで使用できる。筆者らが高周波スパッタリング法で付着した MoS_2 膜を液体窒素中で試験した結果によると、摩擦係数は $0.02\sim 0.04$ と低いが耐久性は室温時の数分の一に低下した。したがって -200°C 程度までは寿命は低下するものの MoS_2 は使用可能である。高温側では真空中における MoS_2 の分解、蒸発が 930°C まで認められなかったという報告がNASAから出ている。これからすれば MoS_2 は少なくとも 900°C までは使用できそうであるが、すべり摩擦特性では $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ から摩擦係数の上昇が観察されることから¹⁰⁾、たかだか 650°C が MoS_2 の使用上限温度であろう。なお WS_2 は MoS_2 よりも高温まで実用できる。

PTFEは真空用ころがり軸受保持器にもっとも多く使

われている潤滑剤である。PTFEの特徴は超低温においても潤滑性を失わないことで、事実、液体水素を燃料とするロケットエンジンのポンプ軸受潤滑にはPTFEを主成分とする保持器が用いられる。いっぽう高温特性は軟化による限界があり、真空中では 150°C 程度である。高分子材料でこれ以上の温度に使える材料にはポリイミド、ポリイミドアミドがある。ポリイミドは大気中でも 350°C まで使用可能であるが、室温では潤滑性が悪く 50°C 以上にならないと摩擦係数が低下しない。これに対してポリイミドアミドは室温から 250°C まで使うことができる。

今まで述べてきた固体潤滑剤はいずれも化合物であり、製品によって多少物理的、化学的性質が異なる。クリチカルな条件下での実用に踏切の場合、リスクを伴うことは否定できない。特に清浄な雰囲気を要求される場合には脱ガス測定等の確認試験が必要である。これに対して軟金属は単一元素であり、純度の保証されたものを容易に入手できるため、真空中でのガス放出による汚染をきらう用途に向いている。

金膜で潤滑したころがり軸受は銀と異なり大気中でも使えるというメリットがあるが、真空中では耐久性の点で銀膜潤滑軸受よりもはるかに劣る。したがって空気—真空の両雰囲気中で使うことを要求される軸受の潤滑剤に適している。ただし潤滑膜としては必ずしも安定ではなく、再現性に問題が残る¹²⁾。金膜のもう一つの問題点は鉄と相互拡散をすることで、このため真空中において 200°C までしか使えない。より高温で使用するためには中間に拡散防止層を付着しなければならない。モリブデンを拡散防止層にすると 600°C まで金膜を使用できることが覆本らによって報告されている¹³⁾。

銀膜は古くからころがり軸受の潤滑に用いられてき

表1 潤滑油・グリースと固体潤滑剤の長所、短所の比較

潤滑油・グリース	固体潤滑剤
<p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 使用法が簡単である ○ 油膜が破断しても自己回復する ○ 摩擦熱除去作用あり ○ 振動、騒音が少ない ○ 高速回転が可能 ○ トルク変動が小さい <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 使用温度範囲がせまい ○ 周囲を汚染しやすい ○ 高速回転では水冷が必要である ○ 低速回転に向かない 	<p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 油の使えない高温あるいは低温で使用できる ○ 周囲の汚染が少ない ○ 経時変化が少ない ○ 低速回転に向く <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 使用法が難しい ○ 摩擦部の温度が上りやすい ○ 振動や騒音が出やすい ○ 摩耗粉がでる ○ トルク変動が比較的大きい

た。当時は電気めっきやタンブリングによって銀膜を付着したが、現在では付着強度、膜の純度の点で優れているイオンプレーティング法が専ら使われている。銀の利点は鉄との拡散せず500°C以上までそのまま使用できること、真空中で長時間、安定して潤滑性を維持することである。いっぽう空気中においては酸化により急速に潤滑性を失なう。そのため真空専用の潤滑剤である。

金、銀に共通した、余り知られていないメリットはこの両者に導電性があることである。これらの被膜は潤滑用のみならず、信号伝達などスリップリングの代用にもなる。

鉛の高温側での潤滑能力は制限されるものの、PTFEと同じく超低温においても低摩擦である。ただし鉛を超低温ころがり軸受に実用した例は報告されていない。鉛は低速回転するころがり軸受に用いられると真価を発揮する。これは鉛のそ性流動しやすい性質によると思われる。低摩擦速度下では、鉛は固体というよりはむしろ流体的に挙動するのであろう。事実、1/90 rpm という超低速で超高真空中において 4.6×10^4 時間運転した例が報告されている⁽⁴⁾。

ここで真空ころがり軸受潤滑剤としての潤滑油、グリースと団体潤滑剤の長所、短所をまとめて示す(表1)。両者には一長一短があるから、目的に応じて使い分けられるべきであろう。

5. 真空用ころがり軸受の性能と実用例

5.1 油およびグリース潤滑軸受

油潤滑ころがり軸受はグリース潤滑軸受よりも摩擦トルクが小さいという利点があるが、長期運転をするためには油貯めを必要とする。油蒸発分子による真空槽内汚染をある程度覚悟しなければならないなどの欠点もある。汚染を少なくするためには、潤滑油が表面を伝わって広がらないようにするとともに、ラビリンスを設けて油蒸気が真空槽内にもれるのを極力防止する。油貯めおよびラビリンスの設計例を図3に示す。

表面に沿った潤滑油の流出防止法としてはふっ素系の拡散防止剤を軸受周りに塗布する方法がある。筆者の経験では、フォンブリン Z-25 に対して市販の拡散防止剤(住友 3 M 製、Fluorad C-721)は 10^{-4} Pa, 80°C においても拡散防止効果があった。ただしふっ素系拡散防止剤は鉱油に対しては効果があるが、フォンブリンのようなふっ素系潤滑油に対しては効果がうすいとの説もあり、今後の検討が必要である。

このほかの拡散防止法としては炭化チタンコーティングやメカニカルな方法がある。後者は鋭いエッジ部があると油はクリープしないという物理現象を利用するもの

である。

油を含浸させる保持器にはフェノール樹脂、ナイロンなどが用いられ、案内方式は玉案内か内輪案内が多い。

さらに積極的に油蒸気汚染を防ぐ方法として、軸受室を独立させて別の排気系で排気するやり方がある。この場合、パイプを軸受室から主真空室に突きだし、その中を主軸が貫通する。主軸とパイプのすき間は0.1~0.2 mm 長さは50~100 mm とする。この方法では主軸が長くなるという欠点はあるが、油汚染をあまり気にしないで油潤滑のメリットを生かせる。回転数としては最高4000 rpm で数万時間支障なく運転した経験を筆者らは持っている。

真空用グリースとしては前述 Bray Oil 社のほかに、モンテフロ社の Y シリーズ、ダウコーニング社の FS 3451 などがあるが、宇宙での実績はいま一つのである。その理由としてはロット差が大きいこと、増ちよう剤の宇宙における挙動が予測できないこと、などが挙げられる。もっとも地上ではこれらの点は特に問題とするにあたらないように思える。ロット差にしても人工衛星+ロケットの代金総計300億円が軸受1コに背負いかぶさってきてはじめて問題となる類いの話であろう。

5.2 固体潤滑軸受

ころがり軸受を固体潤滑するもっとも単純なやり方は MoS₂ 粉末をころがり軸受にすりこむ方法である。すなわち MoS₂ 粉末をアルコール等の溶剤にまぜて軸受転送面に流しこみ、外輪をモーターで回転させて MoS₂ の被膜を転走面上に形成させる。この際注意すべきことは過剰な粉末を転走面に残しておかないことで、被膜が形成されたのち、エアガンで余分な粉末を吹きとばす必要がある。さもないと粉末が鋼球と内外輪間にかみこんで軸受が回らなくなることがある。被膜が形成されたかどうかは軸受が円滑に回転するか否かで判断する。

この簡便法によるころがり軸受潤滑は信頼性に問題があることは言うまでもないが、案外使えるものである。長期間安定した性能を求める場合には、固体潤滑膜と複合材保持器の併用を行う。薄膜の付着法には、①二硫化モリブデン、PTFE の場合、スパッタリング法、②金、銀、鉛など軟金属の場合イオンプレーティング法が用いられる。膜厚はいずれもただだか1 μm である。

固体潤滑膜のみで潤滑したころがり軸受の耐久性を図9に示す。軸受は内径20 mm のアンギュラ玉軸受で、保持器付き(保持器は SUS 440C で案内面に固体潤滑剤付着)と注のあるもの以外は、いわゆる総玉軸受(玉と内外輪だけで保持器は使わない)である。真空度 10^{-6} Pa 中回転数2000~4000 rpm でどのころがり軸受も1000 時間以上の耐久性がある。中でも MoS₂ スパッタ膜軸受

図9 固体潤滑ころがり軸受の真空中における耐久性¹⁵⁾

図10 固体潤滑ころがり軸受の真空中における摩擦トルクと回転数¹⁶⁾

図11 PTFE系固体潤滑玉軸受の耐荷重能

は摩擦トルク、騒音の点で銀、鉛軸受より良く、スラスト荷重を2kgfから20kgfにしても寿命低下が少ない。これはMoS₂の耐荷重能がすぐれていることを示す¹⁵⁾。

薄膜潤滑玉軸受を長寿命化するには固体潤滑剤入りの材料で作った保持器と組合せるとよい。特にMoS₂スパッタ膜とガラス繊維+PTFE+MoS₂複合材保持器の組合せは米国系の人工衛星の大半で使われており、実績がある。いっぽうヨーロッパ系の人工衛星では鉛膜と鉛—青銅保持器の組合せが用いられ、低速ころがり軸受とし

て長期間運転に成功している。

筆者らはガラス繊維+PTFE系保持器(商品名ルーロンE)とMoS₂とで潤滑した軸受(#7204)で、2000rpmにおいて1万時間の運転を支障なく行った¹⁶⁾。さらに200rpm、45rpmにおいても7000時間の運転を消化し、なお運転続行中である。図10に本軸受の回転数—摩擦トルク特性を示す。

図12 ルーロンE保持器付き玉軸受の温度—摩擦トルク特性（真空中、100～150°C）¹⁷⁾

以上より PTFE 系保持器を用いたころがり軸受は超高真空中において長期連続運転が可能であるが、欠点もある。第一に耐荷重能が低いことである。図11は PTFE 系保持器付き玉軸受の最大等価ラジアル荷重¹⁶⁾と軸受内径の関係である。PTFE 系玉軸受の耐荷重能は油潤滑（ただし大気中）した同じ玉軸受の基本動定格荷重の数%しかない。スラスト荷重およびラジアル荷重について基本動定格荷重のそれぞれ10%、50%まで許容できるとの説もあるが¹⁷⁾、長寿命を期待する場合には荷重を低目におさえた方がよい。

第二に耐熱性がないことである。図12はルーロンE保持器付き玉軸受の 10^{-6} Pa中における温度—摩擦トルク特性である¹⁶⁾。運転開始300時間程度では温度を150°Cまであげても滑らかに回転する。これは MoS₂ スパッタ膜がまだ効果を保っているためである。600時間以上運転すると時としてガス放出が観察されるようになる。恐らく PTFE が摩擦熱により分解するのであろう。この結果から PTFE 系保持器の耐熱性は回転数2000 rpm において、100～130°Cと思われる。もちろん回転数を下げればより高温でも使用可能であるが、それでも150°C前後が限界であらう。

より高温で使用できる保持器に銀系と固体潤滑剤—金属系がある。銀系保持器付き玉軸受はスイスの Hinterman らによって開発されたもので、銀—インジウム合金製と銀めつき鋼製とがある¹⁸⁾。このうち注目されるのは後者で、彼らは内径6ミリの玉軸受を3000 rpm、450°Cという条件下で運転し、2000時間以上の連続回転に成功した。

この軸受は内外輪が TiC コーティングした鋼製で、

注：ころがり軸受に加わる荷重は軸方向のスラスト荷重 F_s と半径方向のラジアル荷重 F_r がある。この両荷重が加わった場合、スラスト荷重をラジアル荷重に換算して等価ラジアル荷重として扱うと便利である。PTFE 系保持器の場合、等価ラジアル荷重 F_{re} は、Stevens らによれば¹⁷⁾

$$F_{re} = (2.0 \sim 3.8) \times F_s + F_r$$

であらわれる。

図13 固体潤滑ころがり軸受の軽受径と回転数の関係

ボールは WC 製にやはり TiC コーティングをしているというユニークなものである。真空高温用ころがり軸受の一つのあり方として今後が期待される。

固体潤滑剤—金属系複合材は MoS₂、WS₂ などの固体潤滑剤と Ta、Mo、Cu などの金属とをホットプレスにより焼結して製作する。この成形体自体はじん性に欠けるきらいがあるため、金属系保持器のポケット穴に複合材をはめこんで潤滑作用を行わせる。定用例には Ta 20% + MoS₂ 80% や 52.9% WS + 11.76% Co + 35.3% Ag などがある。McConell によれば、内径20ミリの玉軸受にこの保持器を用いスラスト荷重2～3 kgf、回転数1790 rpm で40000～60000時間以上の運転に成功している¹⁹⁾。これらの玉軸受はその後にも運転を続行しており、積算回転数は 10^{10} 回に達したと伝えられる。

固体潤滑剤—金属複合材はその製法から高温用に適していると思われる。大気中高温用ころがり軸受として軍用に盛んに試験されている。この種のころがり軸受が真空中、高温で使えない訳はない。今後研究する余地は充

分にある。

最後に固体潤滑軸受の軸受径一回転数の関係を示す(図13)。引用したデータは真空中数千時間以上(黒印は1万時間以上)の試験あるいは実績のあるものである。軸受径にもよるが、固体潤滑ころがり軸受は回転数において0.01 rpm から8000 rpm までカバーできると言える。

6. おわりに

宇宙用ころがり軸受は油潤滑、固体潤滑ともに宇宙において5年以上の運転実績を有するものがざらにあり、現在各国で研究中の軸受は10～15年の耐久性を持たせることを目標にしている。

ひるがえって我が国における宇宙用ころがり軸受の研究開発は今だに研究室規模を脱していない。今後この方面の研究に力が注がれることを望むとともに、その成果が他の産業分野に波及することを期待したい。

〔文 献〕

- 1) 木村好次：スペーストライボロジ研究会予稿(東大宇宙航空研究所，昭53) 13.
- 2) D. H. Buckley: NASA SP-277 (1971) 125.
- 3) 宮川行雄ほか：日本潤滑学会北陸大会予稿(昭59) 237.
- 4) D. Binge and R. Treadwell: ESA SP-111 (1975) 83.
- 5) 西村允，松本豊：航空宇宙技術研究所報告 TR-348 (1974) 12.
- 6) 文献5)の P20.
- 7) 西村允，松本豊，航空宇宙技術研究所報告 TR-468 (1976).
- 8) モンテジソン社資料
- 9) E. L. McMurtrey: NASA TM-78232 (1979).
- 10) W. A. Brainard: NASA TN D-5141 (1969).
- 11) Y. Enomoto, et al.: IPAT Proceedings (1979) 29.
- 12) 宮川行雄ほか：潤滑，23, 2 (1978) 154.
- 13) A. Contaldo: J. Sci. Inst., (1965) 1510.
- 14) P. J. O'Donnell: ESA CR-830 (1977).
- 15) 宮川行雄：ソリドルブ리케이션研究討論会予稿，日本潤滑学会(昭54) 87.
- 16) 宮川行雄ほか：日本潤滑学会東北大会予稿(昭57)
- 17) K. T. Stevens and M. J. Todd: Tribology Int., Dec. (1982) 293.
- 18) H. Gass and H. E. Hintermann: ESA SP111 (1975) 282.
- 19) B. D. McConnell and K. R. Mecklenburg: Lubric. Eng., 33, 10 (1977) 544.