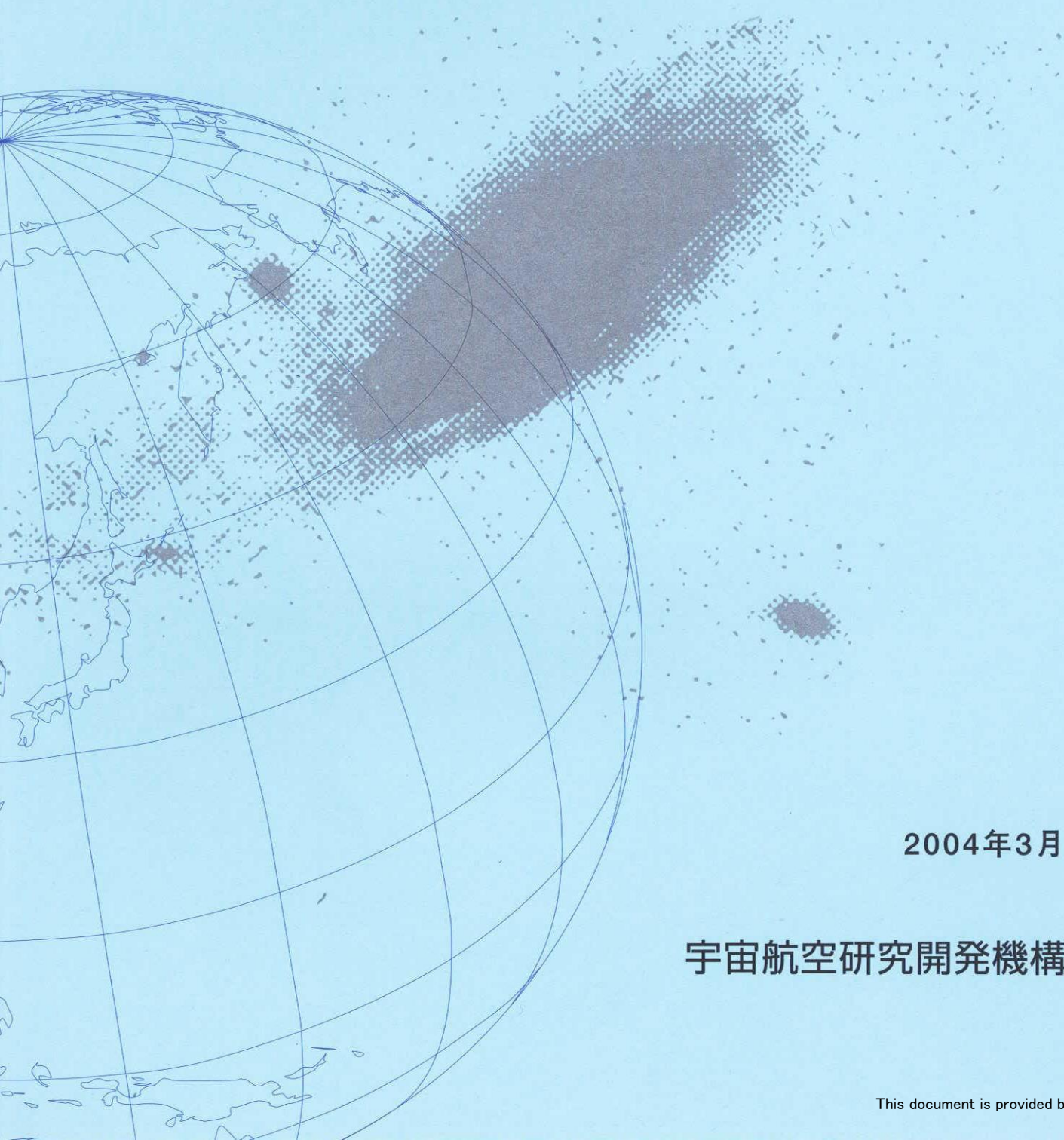


宇宙航空研究開発機構研究開発報告

宇宙用液体潤滑玉軸受の性能とアウトガス特性



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発報告
JAXA Research and Development Report

宇宙用液体潤滑玉軸受の性能とアウトガス特性

Performance of Ball Bearings Having a Retainer Impregnated with
Space Lubricants and Their Outgassing Properties

鈴木 峰男^{*1}、Philippe PRAT^{*2}、松本 康司^{*1}

Mineo SUZUKI, Philippe PRAT, Koji MATSUMOTO

*1: 総合技術研究本部 宇宙先進技術研究グループ
Advanced Space Technology Research Group
Institute of Space Technology and Aeronautics

*2: 元STAフェロー
Former, STA Fellow

2004 年 3 月
March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙用液体潤滑玉軸受の性能とアウトガス特性*

鈴木峰男^{*1}、Philippe PRAT^{*2}、松本康司^{*1}

Performance of Ball Bearings Having a Retainer Impregnated with Space Lubricants and Their Outgassing Properties*

Mineo SUZUKI^{*1}, Philippe PRAT^{*2}
and Koji MATSUMOTO^{*1}

Abstract

Lifetime tests of ball bearings fitted with retainers impregnated with four different oils, three perfluoropolyethers and one synthetic hydrocarbon, were conducted in a vacuum. Outgassing experiments were also carried out with similar impregnated retainers and with a small quantity of oil contained in a stainless steel container, as a function of the temperature. The bearings lubricated with the synthetic hydrocarbon oil showed excellent performance, lifetime of over 10,000 hours and low outgassing characteristics. For the bearings lubricated with perfluoropolyethers, degradation of the oils and frictional torque of the bearings were correlated from analysis of the torque and outgassing data. Outgassing experiments confirmed that the outgassed species formed a “signature” for perfluoropolyethers when they degraded.

Keywords: Space lubricant, outgassing, vacuum, ball bearing, PFPE, MAC

要 旨

3種のフッ素化ポリエーテル油及び1種の合成炭化水素油を含浸した保持器を組み込んだ軸受の寿命試験を真空中で行った。また、これらの潤滑油を含浸させた保持器、及び金属容器に入れた潤滑油からのアウトガスを、温度を変化させて4重極質量分析計を用いて測定した。合成炭化水素油で潤滑された軸受は、10,000時間以上の長寿命を示し、アウトガス特性も良好であった。フッ素化ポリエーテル油で潤滑される軸受は、摩擦トルクの変化と潤滑油の劣化が関連づけられることが、摩擦トルクとアウトガスデータの解析からわかった。アウトガス試験からフッ素化ポリエーテル油が劣化した際には固有のアウトガスが発生することを確認した。

1. はじめに

宇宙用のころがり軸受では、油やグリースを用いる液体潤滑と二硫化モリブデンなどの薄膜により低摩擦を実現する固体潤滑が、使用条件・用途によって使い分けられている。油・グリース潤滑では動圧効果により接触界面に極薄い油膜が形成され、理想的な条件では固体同士の接触が生じないため、長寿命・低摩擦が実現できる。ただし、油は低温になると粘度が大きくなりついには流動性を失ってしまうし、逆に高温では粘度低下と蒸発の問題があり、使用可能な条件はあまり広くない。特に蒸発は宇宙では大きな問題で、分子の平均自由行程が大きいため蒸発した油分子が数十m先の光学機器を汚染する

恐れがあり、油潤滑が忌避される場合も多い。一方、固体潤滑では、低温から高温までかなり広い温度範囲で使用可能であり、また真空中での蒸発の問題はほとんどないが、摩擦しゅう動するため必然的に摩耗が発生し、寿命や摩耗粉の発生が問題となる。

液体潤滑の潤滑特性は、一般に、固体潤滑に比べると遙かに優れており、使用条件に問題がなく、油やグリースの使用が許容される用途では液体潤滑を選択するのがよい。このため、宇宙で実用されている軸受では油やグリース潤滑の比率の方が高く、特に米国では油・グリース潤滑を好んで採用する傾向がある¹⁾。固体潤滑があまり一般的になっていなかった頃から宇宙開発に着手し、宇

* 平成15年6月17日 受付 (received 17 June, 2003)

^{*1} 総合技術研究本部 宇宙先進技術研究グループ

(Advanced Space Technology Research Group, Institute of Space Technology and Aeronautics)

^{*2} 元STA フェロー (Former, STA Fellow)

宙用の液体潤滑に関する膨大なノウハウを蓄積しているためと思われる。

宇宙用の潤滑油・グリース基油としては、古くは低分子量成分をカットし、分子量大きくして低蒸気圧化した高精製鉱油が使われた。その後、極めて蒸気圧が低く、化学的に安定なフッ素化ポリエーテル（PFPE：Perfluoroalkylpolyether）が開発され、これまで長年にわたり宇宙機器の潤滑剤として成功裡に使用されてきた^{2,4)}。例えば、火星探査ローバー（ソジャーナ）の車軸の軸受は、PFPEを基油としたグリース潤滑が採用されている。現時点ではPFPEが宇宙用の潤滑油として最も広く使用されていると思われる。なお、PFPEは地上用としても幅広く利用されており、コンピュータのハードディスク表面にスピコートされる単分子層レベルの潤滑膜や、回転軸の真空シールである磁性流体シールの媒体や軸受の潤滑油に使用されている。

しかし宇宙機器の長寿命化、運転条件の過酷化⁵⁾に伴い、境界潤滑状態での表面化学反応によるPFPEの劣化が問題となった^{4,6,7)}。このため、表面化学反応を抑えるために軸受の玉にTiCコーティングを施すなどの方策がとられてきたが²⁾、より根本的な対策として、PFPEに溶解可能な極圧添加剤の開発^{8,9)}とともに、新しい低蒸気圧潤滑油の開発が大きな課題となった。このような状況を受けて1990年頃に開発されたのがMAC（Multiply-alkylated cyclopentane）^{10,11)}で、既に宇宙用として実用されている（文献上ではPennzane, SHF X-2000, NYE 2001A, TACなど種々の名称で表示されているが、すべて同一の油のようである）。

MACは分子量が910と比較的小さいにもかかわらず、常温での蒸気圧がPFPEと同等かそれ以下の 10^{-10} Pa程度と極めて低い¹²⁾。MACの最大の利点は、金属新生面と表面化学反応を起こさないこと、ハイドロカーボン系であるため従来の添加剤が利用できることである。しかし短所も指摘されている。粘度指数が小さいため低温・高温条件での使用が限られること^{12,13)}、440Cとの濡れ性があり良くないため^{13,14)}、油膜形成能力に問題がある点などである。

MACのトライボロジー特性に関しては、PFPEを上回る良好な特性を示すことが報告されている¹⁵⁻¹⁸⁾。MACにPbまたはSb系の添加剤を加え、境界潤滑状態での摩擦試験により調べた結果では、MACはPFPEに比べ数倍の寿命を示した¹⁵⁾。また、姿勢制御用のフライホイール軸受の潤滑剤として添加剤入りのMACを用いた例¹⁶⁾では、3年近くに及ぶ寿命試験で良好な性能が確認されており、既に人工衛星に搭載され、宇宙での性能が実証されつつあることが報告されている。一方、無添加のMACを用い

たころがり軸受試験でも良好な性能を示すことが報告されている¹⁷⁾。また、ボールねじにMACを適用し、PFPE潤滑、固体潤滑と比較する研究も行われている¹⁸⁾。

今後MACの使用はさらに拡大していくものと思われるが、そこで指摘されている課題が低蒸気圧の添加剤の開発である。MACの潤滑性能を向上させるためには適切な添加剤がきわめて有効であるが、現状では、MACと同程度の低蒸気圧の添加剤はみつかっていない。このため、低蒸気圧というMACの特性を十分に活かした利用が制限されるケースも考えられる。

宇宙用の液体潤滑に関して米国、ヨーロッパでは上述のように活発に研究が進められているが、我が国では摩擦摩耗に関する基礎的な研究を除けば、PFPEやMACを対象とした宇宙用軸受の研究は皆無であった。このような状況を受け、PFPEやMACで潤滑される軸受の性能がどの程度なのか実際に検証すること、その結果を踏まえ液体潤滑の問題点・課題を把握することを本研究の目的とした。

本研究ではPFPE、MACを対象に、金属容器に満たした潤滑油、潤滑油を含浸させた保持器を加熱してアウトガスを測定するとともに、軸受試験を行って摩擦トルク・アウトガスを測定した。これらの結果を踏まえ、軸受の寿命を支配する要因を考察する。研究成果の概要は、既に報告しているが¹⁹⁾、本報告は、その後に得られた軸受の検査結果やQマスの見直しを行った結果を踏まえて、実験結果をまとめたものであり、文献¹⁹⁾より詳細なデータが含まれている。

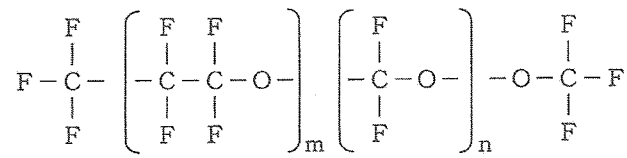
2. 試験潤滑油、試験軸受

試験に使用した潤滑油は、PFPE系油3種とMAC系油1種の計4種である。その分子構造式を図2・1に、主な特性を表2・1に示す。PFPE-Zは既に宇宙用として広く使用されており、宇宙用グリースの基油としても利用されている。宇宙用液体潤滑剤のいわば代表である。より低蒸気圧を目指した潤滑剤がPFPE-Z6である。宇宙用としての実績は聞かないが、蒸気圧など物理的データから考えると、宇宙用として優れた性能を示す可能性がある。PFPE-Dは国産のPFPE系潤滑油で、実験室的にはPEPF-Zよりも良好な性能を示したという報告もあるが²⁰⁾、宇宙用としての実績はない。

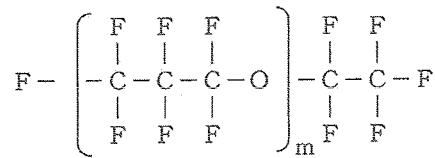
PFPE系油は前節に述べたように、適当な添加剤がない、境界潤滑状態で鉄と化学反応を起こしルイス酸を形成しこれが潤滑油の劣化につながる、などの欠点が指摘されている^{4,6,7)}。MAC系はこの対策として開発された炭化水素系の低蒸気圧合成潤滑剤である。試験したMAC-Aは、添加剤を含まない基油である。

表2-1 試験潤滑油の特性

試料油	PFPE系			MAC系
	PFPE-Z	PFPE-Z6	PFPE-D	MAC-A
平均分子量 (gr/mol)	9500	12800	8400	910
蒸気圧 (20℃)	3.9 10 ⁻¹⁰ Pa	>10 ⁻¹⁰ Pa	6.7 10 ⁻⁹ Pa	1.33 10 ⁻¹⁰ Pa
蒸気圧 (100℃)	1.3 10 ⁻⁶ Pa	3 10 ⁻⁸ Pa	1.3 10 ⁻⁵ Pa	5.3 10 ⁻⁵ Pa (125℃)
流動点	-66℃	-63℃	-53℃	-58.3℃
密度 (20℃)	1841 kg/m ³	1850 kg/m ³	1894 kg/m ³	847 kg/m ³
粘度 (20℃)	0.54 Pa.s	1.11 Pa.s	0.97 Pa.s	0.27 Pa.s



(a)PFPE-Z, PFPE-Z6



(b)PFPE-D

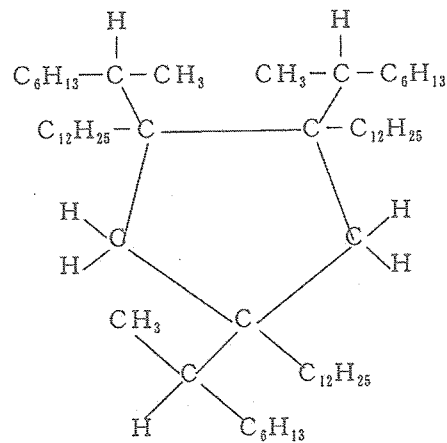


図2-1 試験潤滑油の分子構造

表2-2に試験軸受の諸元を示す。試験軸受は内径20mmのアンギュラ玉軸受(#7204)で、材質は玉・内外輪ともにSUS440Cである。保持器は純ポリイミド製(メルディンM-9000)で、ポリイミドの密度を 1.35 g/cm^3 として算出した気孔率(体積)は23.5%であった。この気

孔へ潤滑油を含浸させ、運転中に徐々に転走面へ潤滑油を供給して軸受を潤滑する。保持器は内輪案内方式とした。ただし、PFPE-Dを含浸させた保持器を用いた2回目の試験(後述の4節の軸受試験番号A-PF-D2)では転動体案内方式の保持器で試験した。

表2-2 試験軸受の諸元

軸受形式	アンギュラ玉軸受
内径×外径×幅(型番)	20mm×47mm×14mm (#7204)
玉径, 玉数	7.93mm(5/16"), 10個
保持器案内方式	内輪案内
玉・内外輪材質	SUS440C
保持器材質	純ポリイミド(メルディンM-9000)
含浸潤滑油	PFPE系: PFPE-Z, PFPE-Z6, PFPE-D MAC系: MAC-A

保持器への潤滑油の含浸は、真空中で保持器を潤滑油に浸漬させて行った。含浸後の保持器は表面が濡れている状態で、PFPE系の潤滑油を含浸させた保持器の最初のロットでは(4節の試験番号B-PF-Z, A-PF-Z6, A-PF-D1)、トリクロロエタンで表面の油を落としてから試験に供した。しかし、PFPE-Dを含浸させた保持器を用いた2回目の試験(試験番号A-PF-D2)、及びMAC系の潤滑油を含浸させた保持器を用いた試験(試験番号B-MAC-A)では、表面が濡れた状態のまま軸受に組み込み試験した。

表2-3に、重量測定から算出した含油率(気孔中に占める油の体積比率)を示した。PFPE系油の含油率は80%前後であり、保持器内部には若干の気孔が残っていることになる。一方、MAC系の潤滑油を含浸させた保持器では含油率は100%を超えていた。保持器材との濡れ性が良く、気孔内部だけでなく、保持器外面にも油が付着したためと思われる。ただし、保持器材の気孔率が23.5%より大きかった可能性もある。この場合、PFPE系油の含油率はさらに低下することになる。

表2-3 保持器への潤滑油の含油率

試料 番号	含油率				備考
	PFPE-Z	PFPE-Z6	PFPE-D	MAC-A	
1	74.1%	78.3%	81.1%	118.9%	軸受試験に使用
2	75.4%	79.2%	79.8%	115.1%	軸受試験に使用
3	77.9%	80.0%	81.5%	---	アウトガス試験に使用

3. アウトガス試験

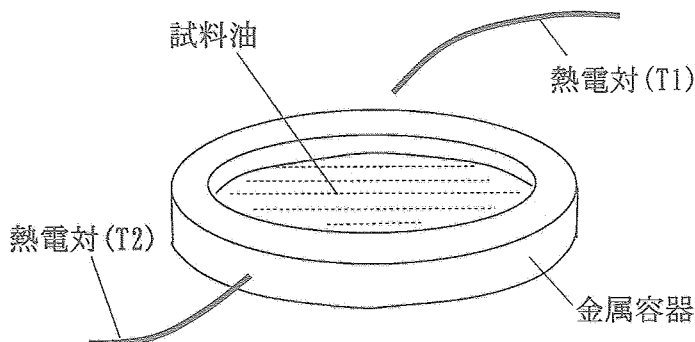
3.1 試験方法

試料油を満たした金属容器、または試料油を含浸させた保持器を真空槽内で加熱し、放出されたガスのマススペクトルを4重極質量分析計(Qマス)を用いて測定した。図3-1に試料の概要、及び温度測定位置を示す。熱電対(T1)は試料の10~20mm上部に浮いた状態でセットし、熱電対(T2)は試料油を満たした金属容器の側面の孔に挿入するか、試料が保持器の場合はポケット部に挿入した銅製の円柱形ブロックにセットした。試料を囲む位置にリボンヒータを設置して加熱を行い、温度はリボンヒータに負荷する電圧で調整した。

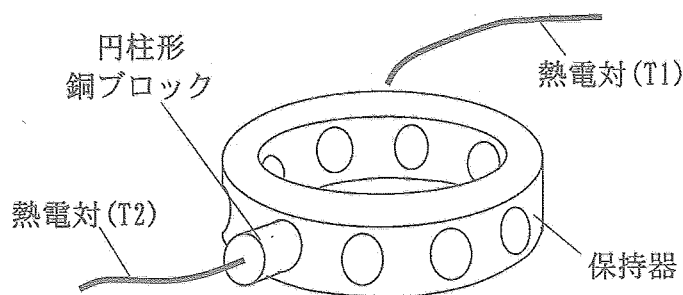
アウトガス量を決定づけるのは油量ではなく、油の自

由表面積である¹³⁾。このため、金属容器内の試料油からのアウトガスを測定する実験では、油含浸保持器からのアウトガスを模擬するため表面積を同一にした。本試験に使用した保持器の表面積は約3400 mm²であるが、保持器のアウトガス実験では図3-1に示したように保持器端面を下に設置しており自由表面積は約3010 mm²へと減少する。本試験では、保持器端面を下に設置した状態と直接比較するため、金属容器の油溜部の直径を62mmとし、含浸保持器の表面積と同じになるようにした。

真空槽は、まずソーブションポンプによって 10^{-1} Pa 台まで、ついでターボ分子ポンプとイオンポンプで 10^{-5} Pa 台まで真空引きした。Qマスによるアウトガス測定は、マスナンバー1~199の範囲を測定した。感度・分解能を



(a) 金属容器内に試料油を入れる



(b) 試料油を含浸させた保持器

図3-1 アウトガスの測定方法

高めるためQマスの走査速度を遅くしており、1サイクルの測定に約5分を要した。このため、アウトガスは約5分間隔で測定した。

アウトガス測定開始後、試料の加熱を開始した。熱電対 (T1) の測定値で約150℃まで昇温させ、その後約45分間150℃を維持した後、ヒータ電源をOFFとし自然降温させた。十分に冷却して常温に戻った後、同様の温度サイクルをもう一度くり返し、アウトガスを測定した。

3.2 試験結果

3.2.1 圧力の変化

試験前の圧力、加熱時の最高圧力、及び最高圧力の試験前圧力に対する比、最大ピークを示した成分とその分圧を表3-1にまとめた。

真空槽及び槽内に設置された部品表面には、相当量の水分が吸着される。加熱するとこれらの表面から水分が放出され、圧力が上昇する。ほとんどのケースで検出さ

れた最大ピークは18(H₂O)であった。

1回目の加熱の際には圧力がかなり上昇した。油含浸保持器の場合の圧力上昇は24～89倍、無含浸保持器でも15倍ときわめて大きい。一方、2回目の加熱では、金属容器に潤滑油を満たした場合の圧力上昇は1.3～2倍、無含浸保持器では2.5倍と小さいのに対し、油含浸保持器になると10～18倍と大きい。この結果は、潤滑油そのもの、及び保持器自体は加熱により容易にガスを放出し尽くすが、油含浸保持器の場合は吸着・吸蔵されたガスが加熱されてもなかなか放出されないことを示している。

保持器に油を含浸する段階で、低真空中あるいは大気中で何がしかの空気がポーラスな材料にトラップされたと思われる。この空気は高真空中で最初の加熱試験の際に放出される。実験では含浸保持器の表面で気泡が形成されることを肉眼で観察できた。大量の気泡が1回目の

表3-1 アウトガス試験における圧力

供試体	加熱回数	試験前 圧力 $\times 10^{-5}$ (Pa)	加熱時の 最大圧力 $\times 10^{-5}$ (Pa)	圧力 増加率 \times	最大ピークの 成分 / 最大分圧 (Pa) <注>
金属容器のみ	1	0.8	20	25	CO ₂ (44) / 1.6×10^{-7}
	2	0.85	1.85	2.2	H ₂ O (18) / 4.8×10^{-8}
PFPE-Z (金属容器内)	1	1.4	4.1	2.9	C ₂ F ₅ (118) / 1.1×10^{-7}
	2	1.4	2.0	1.4	H ₂ O (18) / 5.6×10^{-8}
PFPE-Z6 (金属容器内)	1	2.2	7.0	3.2	H ₂ O (18) / 3.3×10^{-7}
	2	1.4	2.8	2	H ₂ O (18) / 4.8×10^{-8}
PFPE-D (金属容器内)	1	1.8	12.2	6.8	H ₂ O (18) / 7.1×10^{-7}
	2	1.6	2.1	1.3	H ₂ O (18) / 5.4×10^{-8}
MAC-A (金属容器内)	1	2.2	4.4	2	H ₂ O (18) / 8.9×10^{-7}
	2	1.4	2.4	1.7	H ₂ O (18) / 7.3×10^{-8}
保持器のみ	1	3.8	56	15	ClC ₂ H (60) / 1.5×10^{-6}
	2	2.3	57	2.5	ClC ₂ H (60) / 1.1×10^{-7}
PFPE-Z含浸 保持器	1	5.0	120	24	H ₂ O (18) / 1.6×10^{-6}
	2	1.6	22	14	H ₂ O (18) / 2.6×10^{-7}
PFPE-Z6含浸 保持器	1	4.5	400	89	H ₂ O (18) / 1.2×10^{-5}
	2	2.6	26	10	H ₂ O (18) / 4.5×10^{-7}
PFPE-D含浸 保持器	1	4.9	320	65	H ₂ O (18) / 6.0×10^{-6}
	2	1.7	20	12	H ₂ O (18) / 4.0×10^{-7}
MAC-A含浸 保持器	1	3.5	190	55	H ₂ O (18) / 7.0×10^{-6}
	2	3.2	57	18	H ₂ O (18) / 1.0×10^{-6}

加熱で放出されたため、最大圧力は2回目の試験では1回目の加熱試験と比較して1桁ほど減少した。ただし、2回目の試験でも圧力増加率は、金属容器の試験に比べるとかなり大きい。油と金属容器の界面では気泡をトラップする可能性が少ないのに対し、油と保持器の界面では気泡がトラップされやすいためと考えられる。

試験中に検出された最大ピークが18(H₂O)でなかった場合が3ケースみられた。金属容器のみを入れた1回目の加熱時の44(CO₂)、金属容器にPFPE-Zを満たした1回目の加熱時の118 (C₂F₅)、及び保持器のみを加熱した際の60 (ClC₂H) である。

3.2.2 検出されたアウトガス成分

(1) 金属容器のみを入れた場合

アウトガスの基準となるデータを取得するため、まず真空槽自体のアウトガス特性を調べた。金属容器のみを真空槽に入れて測定した結果を図3-2に示す。図の左側に主な検出ピークであるマスナンバー18,28,44のピーク強度、及び温度・圧力の推移を、図の右側には各加熱段

階でのマススペクトルを示す。

1回目の加熱初期に急激な圧力の上昇が認められ、マスナンバー18,28,44、および30以上の範囲で周期的なピークが検出された。これらのピークは、H₂O(18)、CO₂(44)、COまたはN₂(28)であり、残留ガスとして通常検出されるものである。また、他のピークは、マスナンバー12の周期性があり、時間とともに急速に低下・消失していることからCH系のコンタミネーションと考えられる。1回目の加熱初期の最大ピークはCO₂(44)であったが、通常は、2回目の加熱時のようにH₂O(18)が最大ピークを示す。今回、なぜCO₂(44)のピークが急増したのかは不明であるが、ヒータをONにしている期間に特にピークが大きくなっていることから、ヒータからのアウトガスであった可能性がある。

以上の結果から、今回の加熱条件である程度以上の時間が経過すれば、ヒータを含めた真空槽からのアウトガス成分はH₂O(18)、CO₂(44)、COまたはN₂(28)のみであることが確認された。

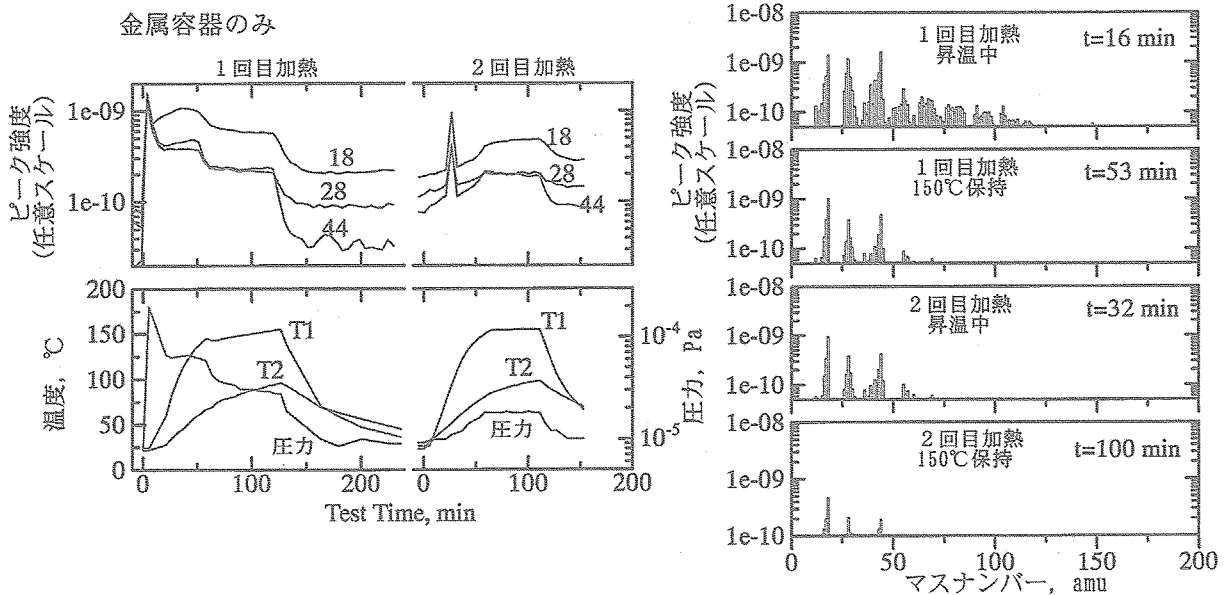


図3-2 アウトガス測定結果 (金属容器のみ)

(2) PFPE系油を金属容器に満たした場合

図3-3～図3-5に、PFPE-Z、PFPE-Z6、PFPE-Dを金属容器に満たして加熱した時の典型的なQマススペクトル、及び主な検出ピークの強度、温度・圧力の時間推移を示す。PFPE系油を加熱すると、真空槽に由来するH₂O(18)やCO₂(44)とは異なるピークが検出された。検出されたピークのマスナンバーは47, 68-69, 96-100, 118-119, 134-135, 162-163, 168-169, 183-185であり、これらは、CFO(47), CF₃(69), C₂F₃O(97), C₂F₄(100), C₂F₅(119), C₂F₅O(135), C₂F₅O₂(163), C₃F₇(169), C₃F₇O(185)に由来するものと推定される。また、このCF系、CFO系のピーク強度の時間推移は類似しており、H₂OやCO₂の推移とは異なっている。このことから、CF系、CFO系のピークは同一のアウトガス発生源、すなわちPFPE系油が分解したガスに由来すると考えられる。

3種の油を比較すると、アウトガス量はPFPE-Z>PFPE-Z6>PFPE-Dの順であった。ただし検出されたピーク位置は類似しており、特にPFPE-ZとPFPE-Z6では各ピークの強度比や時間推移もほとんど同じであった。この2種の油ではCF系、CFO系が同程度のピーク強度を示したが、PFPE-DではCF₃(69), C₂F₅(119)などのCF系に比べ、CFO(47), C₂F₅O(135)などのCFO系のピークが小さいという特徴がみられた。

いずれの場合も、1回目の加熱では多量のアウトガスが発生しており、特にPFPE-Zの場合には試験時間60～90分の間は118のピークがH₂O(18)よりも大きくなった。

ただし、2回目の加熱の際には強度が大幅に低下している。加熱によりPFPE系油が分解するのであれば、2回目の加熱の際にも1回目と同様にアウトガスが発生するはずである。各試料油の100℃の蒸気圧は、PFPE-Zが 1.3×10^{-6} Pa, PFPE-Z6が 3×10^{-8} Pa, PFPE-Dが 1.3×10^{-5} Paである。今回の実験条件は、金属容器に挿入した熱電対で測定した温度が100℃程度、圧力が 10^{-5} Pa台であり、PFPE-Z、PFPE-Z6ではアウトガスがほとんど発生しないはずである。しかし、実験では蒸気圧の高いPFPE-Dが最もアウトガスが少なかった。この結果は、試料油の中に加熱により容易に分解してしまう低分子量成分が含まれていたと考えたと説明がつく。低分子量成分は1回目の加熱で容易に分解・消失してしまい、高分子量成分のみとなった2回目の加熱時にはアウトガスがほとんど発生しない。

今回の実験レベルの緩い条件下では、最初の加熱時のアウトガス特性を支配するのは、油自体の性質よりも低分子量成分の量、すなわち油の精製度である可能性が高い。アウトガス特性がクリティカルな用途では、事前に加熱して低分子量成分を飛ばしてしまう等の対策が有効と思われる。

PFPE-Dの試験では、1回目の加熱の際にH₂O(18), CO₂(44), COまたはN₂(28)の真空槽に由来するピークが他の試験に比べかなり高くなった。この原因は不明であるが、大気中で保管している間に試料油へ水分が入り込んだ可能性も否定できない。試料油がどの程度空気や水

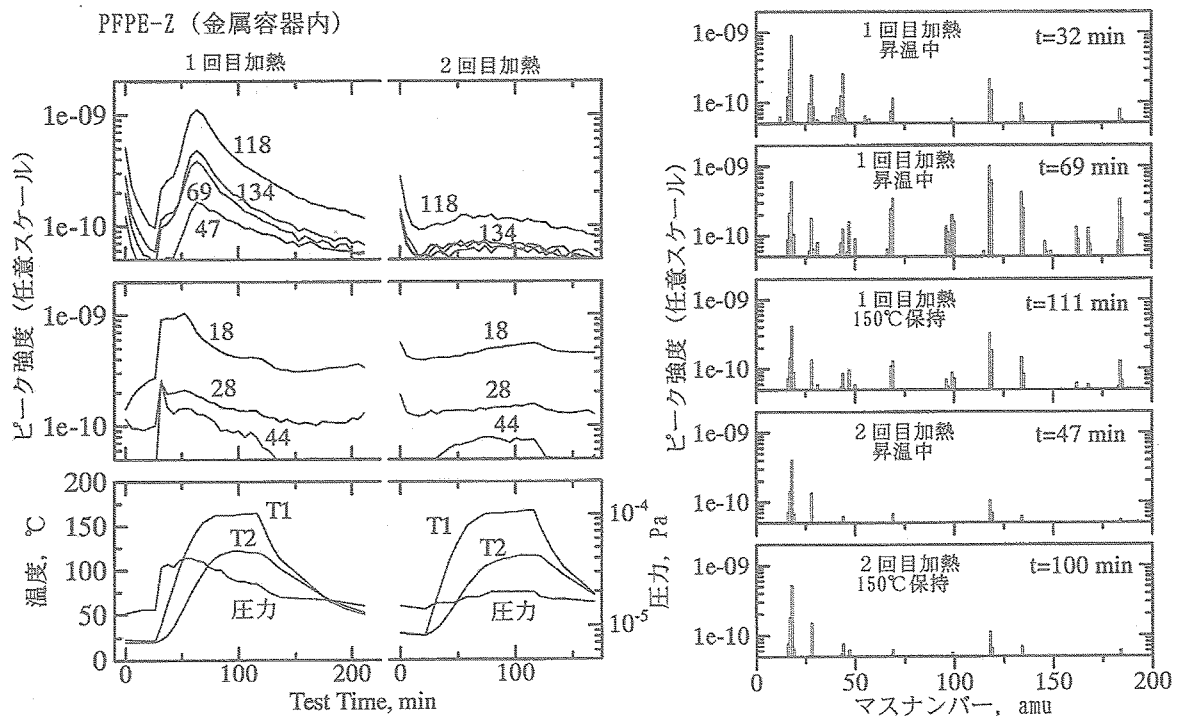


図3-3 アウトガス測定結果 (金属容器内にPEPE-Z油)

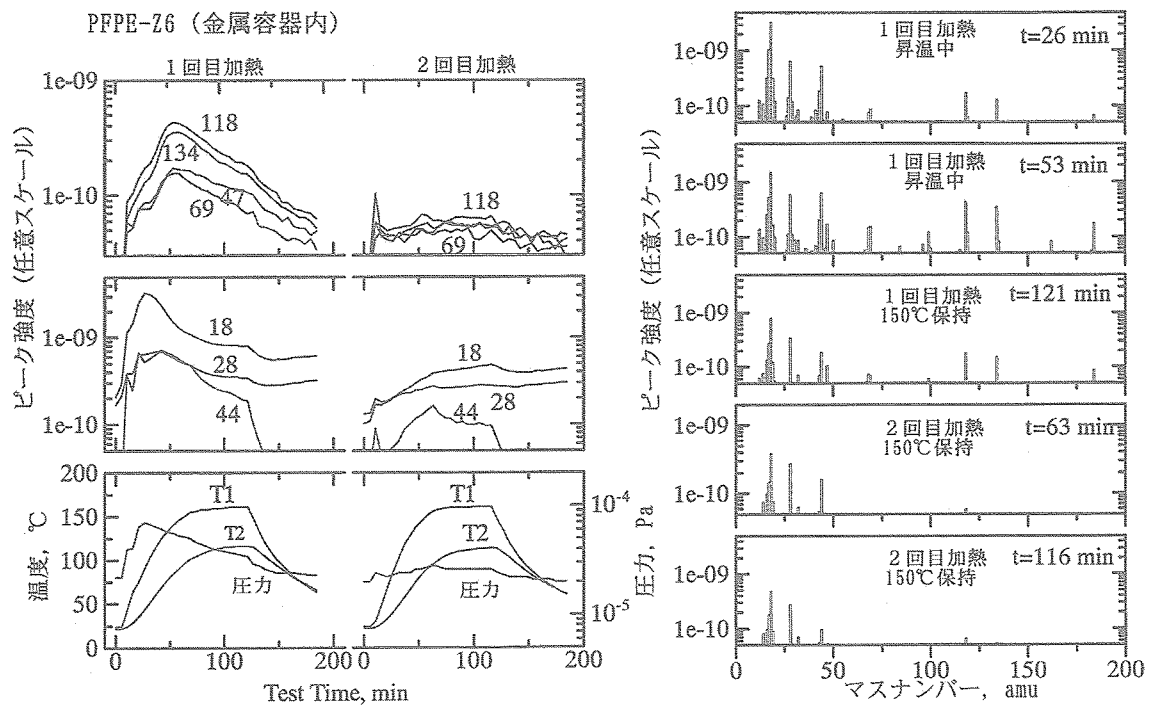


図3-4 アウトガス測定結果 (金属容器内にPEPE-Z6油)

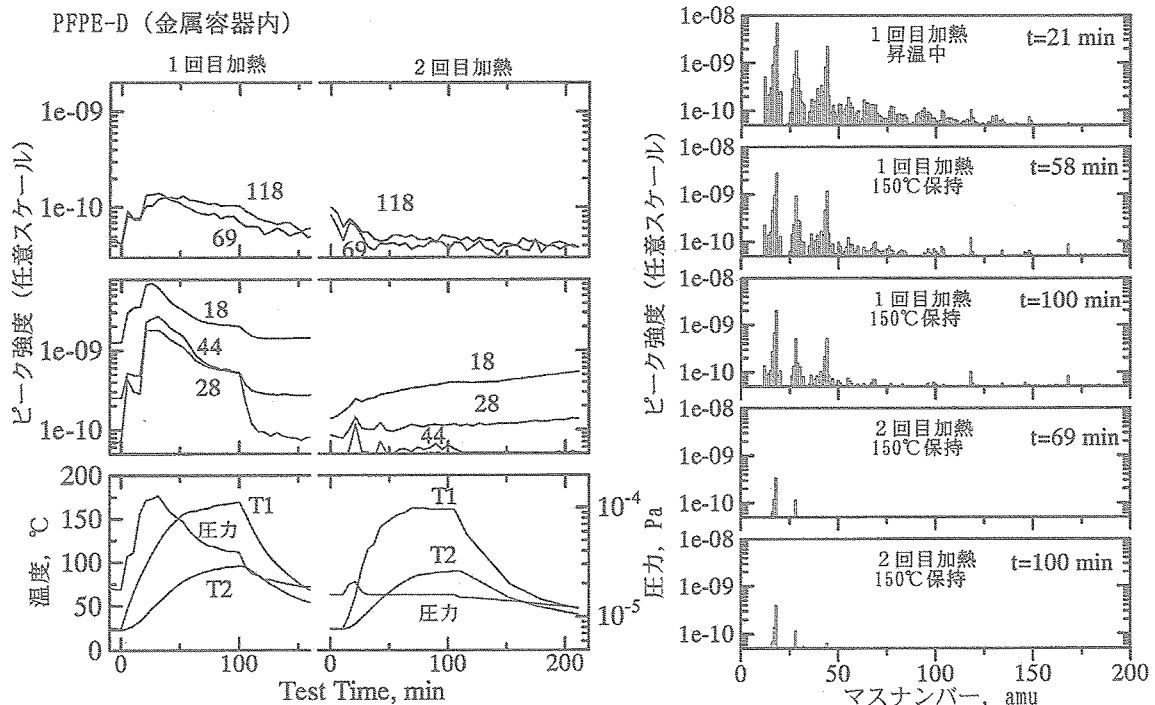


図3-5 アウトガス測定結果 (金属容器内にPEPE-D油)

分を取り込むのかなどのデータがないため、今後、このようなデータを取得しておく必要がある。

(3) MAC-Aを金属容器に満たした場合

図3-6にMAC-Aの実験結果を示す。試料油に由来すると思われるピークは、マスナンバーで55-57, 66-71, 79-85, 94-99, 108-112, 122-127, 137-140などで、CH系のアウトガス特有のマスナンバー12の周期性が認められた。分子量が大きいピークは時間とともに減少していき、2回目加熱の最後には55-57, 71が検出されるピークとして残った。これらのピークは C_4H_9 (57), C_5H_{11} (71)に相当し、CH系コンタミネーションと同じであるが、加熱後も残ったピークであり試料油からのアウトガスと推定される。しかし図2-1に示した分子構造をみると、 C_4H_9 , C_5H_{11} の単位のアシル基グループは存在せず、分子の切れ目は明確ではない。MAC-Aに混入した飽和CH系の不純物が分解して現れたピークであった可能性も否定しきれない。

ただしアウトガス量は、PFPE系で最もアウトガスが少なかったPFPE-Dと同程度であり、MAC-Aのアウトガス特性が良好であることが確認された。

(4) 無含浸保持器の場合

保持器材からのアウトガスを確認するため、油を含浸

していない保持器を真空槽に入れ、加熱してアウトガスを測定した。図3-7に実験結果を示す。保持器に由来すると思われる主なピークはマスナンバーが59-63, 95-97, 83-85, 47-49, 35, 26などで、特に60と95は常に H_2O (18)より大きなピークを示すという結果であった。また、マスナンバー28のピーク強度の推移をみると、35, 47と類似の傾向を示しており、真空槽ではなく保持器に由来するアウトガスであった可能性が高い。

これらのピークは、そのマスナンバーから保持器材のポリイミド($NH(CO)_2$)自体が分解して放出されたとは考えられない。 C_2HCl (60.5), C_2Cl_2 (95), $C_2H_2Cl_2$ (97), CH_2Cl_2 (85), CCl (47.5), Cl (35.5)などClを含むガスに相当すると思われる、洗浄過程で使われた溶剤トリクロエタンが、試験の時にもまだ保持器の気孔内に残っていたことを示唆している。

(5) PFPE系油を含浸させた保持器の場合

図3-8～図3-10にPFPE系油を含浸させた保持器の実験結果を示す。いずれの油を含浸させた場合も、検出されたピークは図3-7の保持器のみの場合と極めて類似しており、金属容器にPFPE系油を入れて加熱した際に検出された118, 134, 69などのアウトガスはほとんど検出されないか、または他のピークに隠れて目立たない。また、マスナンバー47のピークが検出されているが、保

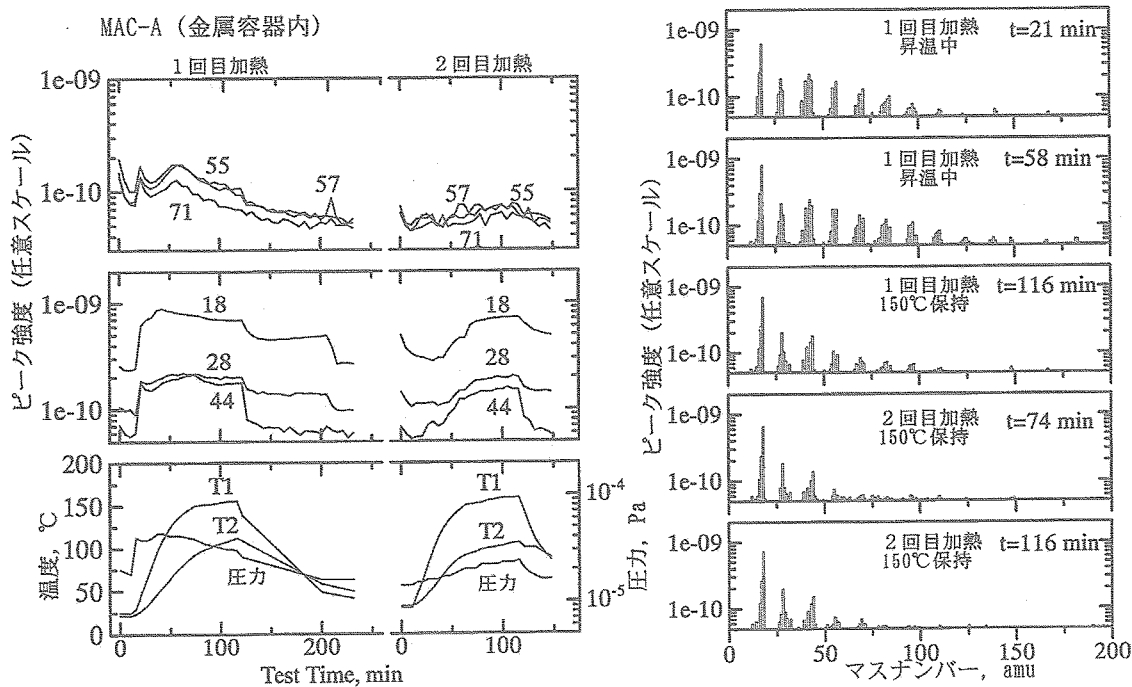


図3-6 アウトガス測定結果 (金属容器内にMAC-A油)

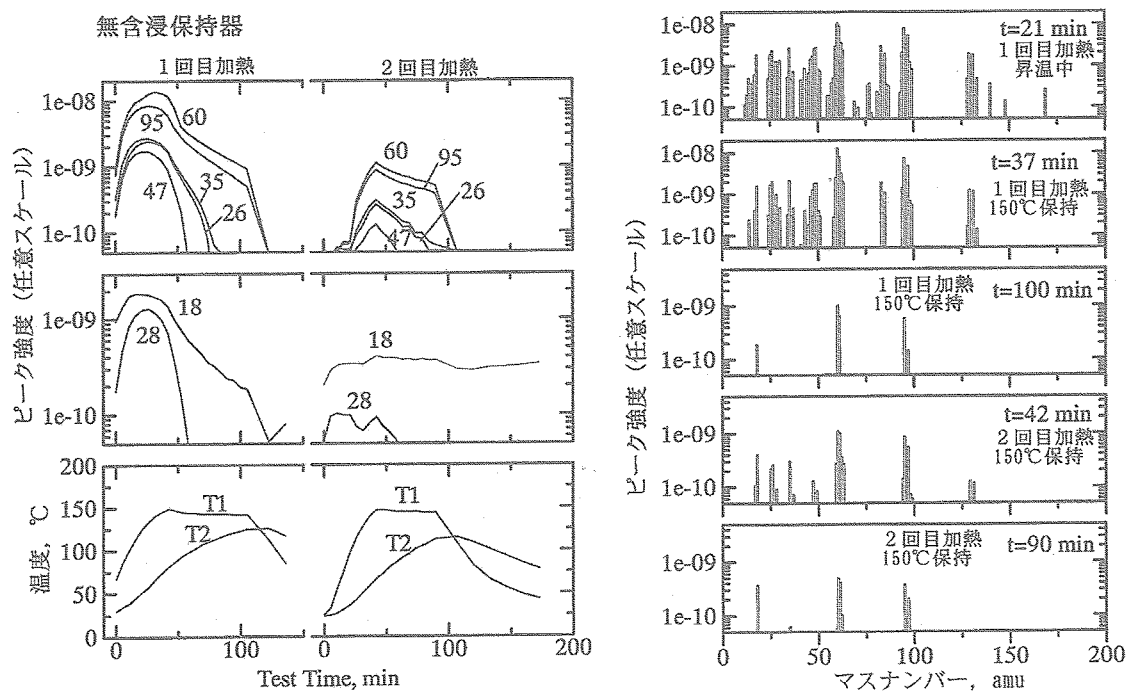


図3-7 アウトガス測定結果 (無含浸保持器)

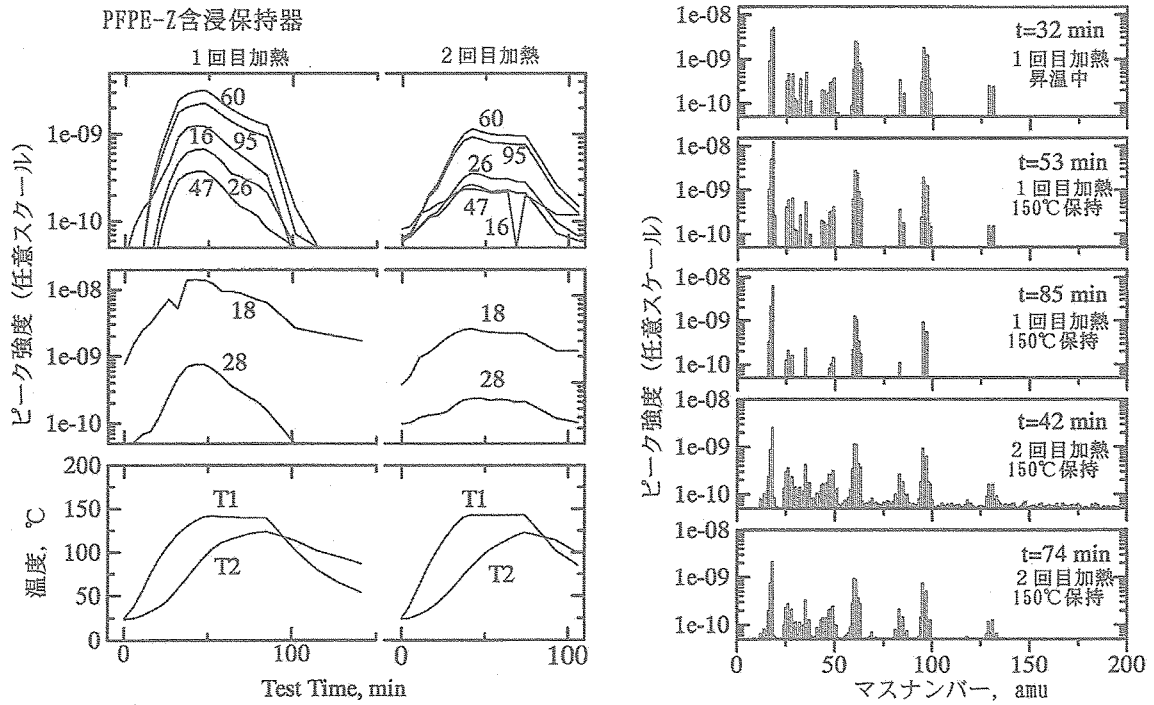


図3-8 アウトガス測定結果 (PEPE-Z油含浸保持器)

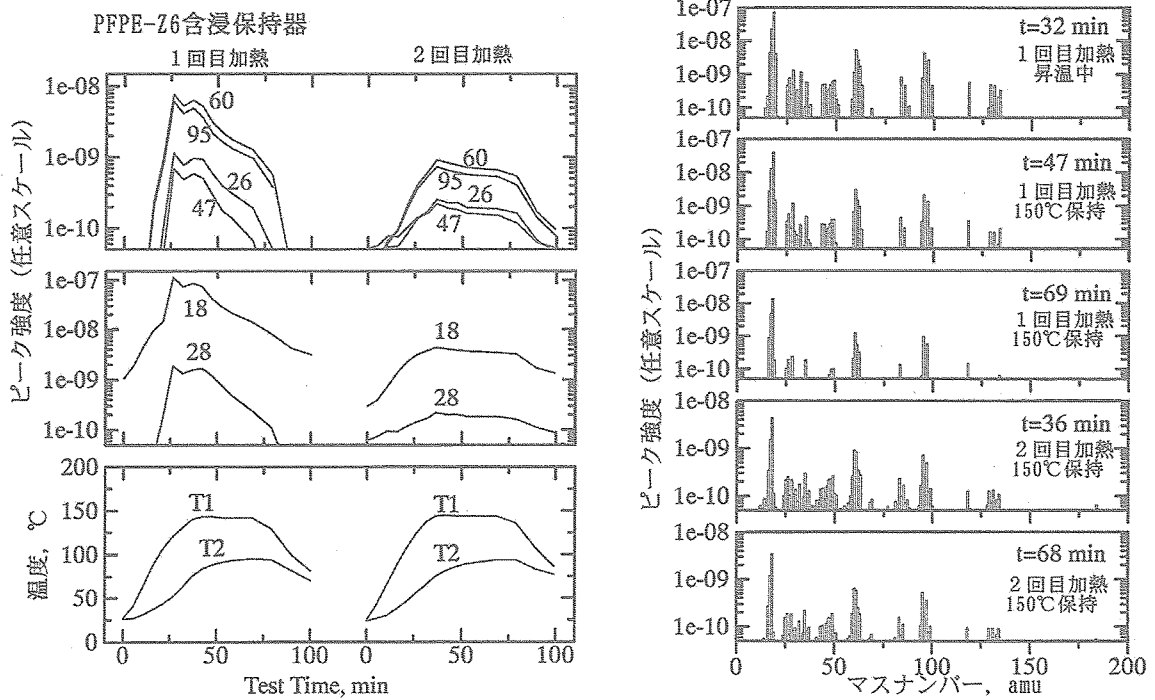


図3-9 アウトガス測定結果 (PEPE-Z6油含浸保持器)

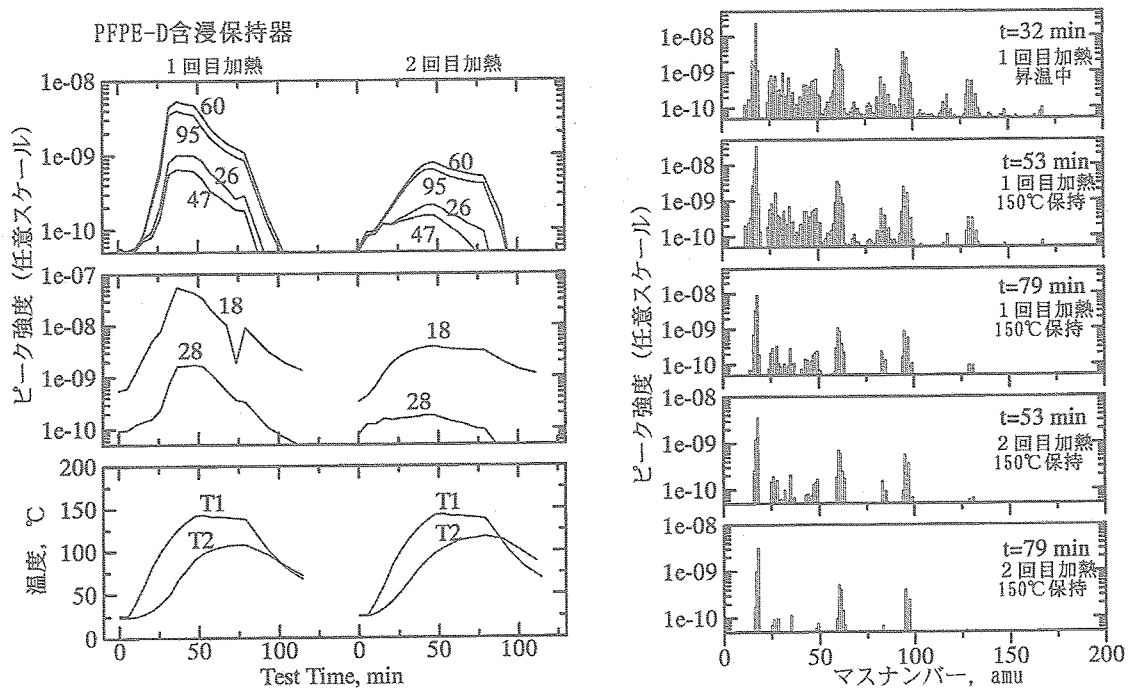


図3-10 アウトガス測定結果 (PFPE-D油含浸保持器)

持器のみを加熱した際にも検出されていること、60や95のピークと推移が類似していることから、PFPE系油からのアウトガスではなく、溶剤に起因するCCl (47.5)のピークである可能性が高い。

この結果は、洗浄過程で使われた溶剤が油を含浸させた後の保持器内に残存していること、その溶剤は加熱すると容易に蒸発することを示している。保持器でPFPE系油に由来するピークがほとんどみられなかった理由は明確ではないが、真空中で油を含浸させており、今回の実験でアウトガスの発生源であった低分子量成分がその際に蒸発・消失していた可能性がある。

(6) MAC-A油を含浸させた保持器の場合

図3-11にMAC-A油を含浸させた保持器の実験結果を示す。1回目の加熱で150℃に達した試験時間48minでは15-185の広い範囲でピークが検出されるとい、他では見られなかった現象が現れた。2回目の加熱ではピークはかなり限定され、真空槽に由来する18,28や、保持器のみの場合に検出された60,95,129など以外では、55,57,184のピークが検出された。55,57はMAC-A油を金属容器に満たした図3-6でも観測されたこと、ピーク強度の推移では184が他と異なった傾向を示しており、これらのピークはMAC-A油に由来する C_4H_7 (55), C_4H_9 (57), $C_{13}H_{28}$ (184)と思われる。

3.2.3 アウトガス試験のまとめ

金属容器に入れた潤滑油、及び保持器に含浸させた潤滑油からのアウトガスを測定することにより、各潤滑油のアウトガスの特徴を見いだすことを試みた。金属容器に潤滑油を入れた場合は、PFPE系油ではCF系、CFO系のピークが認められ、アウトガスに特徴がみられた。これらのガスは、上述したように油に含まれる低分子量成分に起因する可能性は高いが、PFPE系の油を使ったトライボロジー試験で見られるアウトガス成分と一致しており^{6,7,20}、PFPE系油が分解する際に共通して現れるガスと考えられる。また、PFPE-DはCFO系のアウトガスが少ないという、他の2種の油とはやや異なったパターンを示した。分子構造に起因する相違と思われる。一方、MAC油ではCH系のアウトガスが検出されたが、分子構造を考慮するとMAC固有のガスとはいえない。アウトガスから他のCH系の油と区別するのは難しい。

油含浸保持器の場合は、検出されたピークは上述したように洗浄に用いた溶剤に起因すると思われるものが主で、潤滑油自体からのアウトガスはほとんど検出されなかった。このため、保持器に含浸させた場合に各潤滑油のアウトガス特性が変化するのかどうかは確認できなかった。また、加熱中に保持器表面に沸騰したように気泡が現れるのが観察され、ボラスな保持器の空隙内に空気がトラップされていたか、あるいは油中に溶け込んでいたものと推定される。

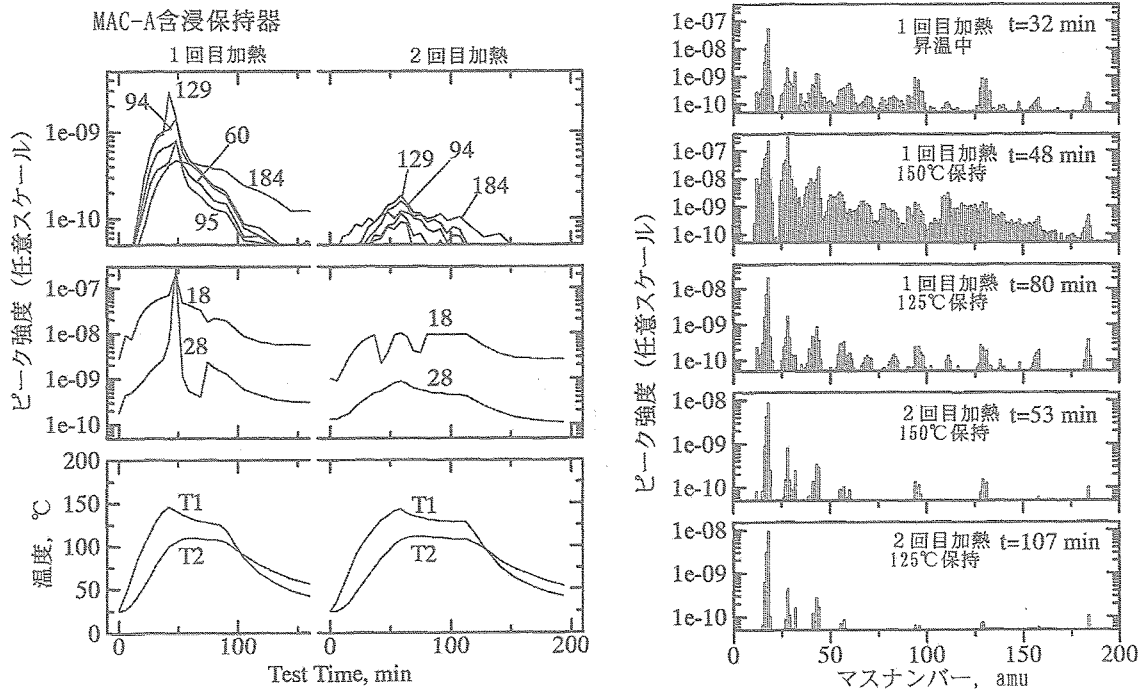


図3-11 アウトガス測定結果 (MAC-A油含浸保持器)

洗浄に使用した溶剤や空気が含まれる保持器を軸受に使用するのは好ましくない。仮にこれらのガスが運転前に蒸発・消失したとしても、ポーラスな保持器に空隙が残り、転走面の油がこの空隙に吸い込まれ、転走面では油量不足で潤滑不良に陥る恐れがある。保持器に潤滑油を含浸することは重要な技術であり、軸受の性能を十分に発揮させるには適切な含浸法の確立が不可欠と思われる。

4. 軸受試験

4.1 軸受試験機、試験条件

図4-1に軸受試験機の概要を示す。2個の試験軸受は、真空槽内の主軸に取り付けられており、外輪側は真空槽に固定されているハウジングに収納されている。2個の軸受間にはコイルばねを設置し、スラスト荷重を試験軸受に負荷した。真空槽内の主軸は、マグネットカップリングを介して大気側の駆動軸により回転駆動される。大気側の駆動軸はベルトを介してモータで駆動した。両軸受の外輪部のハウジングには孔が設けられており、ここにシース型熱電対を挿入して試験軸受の外輪温度を測定した。以下、マグネットカップリングに近い側の試験軸受をリア側軸受、反対側の軸受をフロント側軸受と呼ぶことにする。

マグネットカップリング部では、伝達する駆動トルク

(=試験軸受の摩擦トルク)の大小に応じて、駆動軸と被駆動軸の間にわずかな角度シフトが生じる。この角度シフトを、駆動軸及び被駆動軸に取り付けた鏡がフォトセンサーを通過する際に発生するパルス状信号の時間差から測定し、軸受の摩擦トルクを算定した。従って、測定された摩擦トルクは軸受2個分の和である。

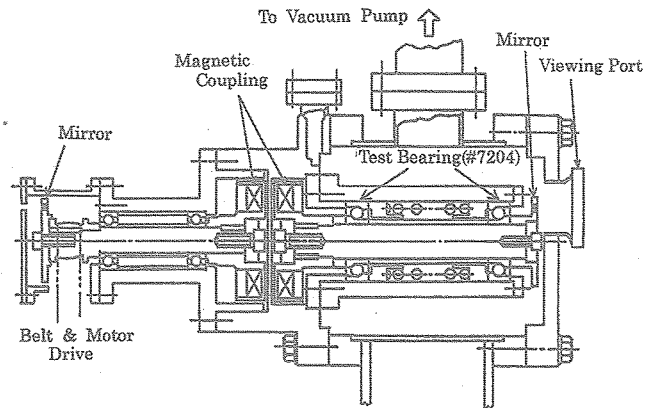


図4-1 軸受試験機

軸受の摩擦トルク測定では、外輪+ハウジングを自由に回転できる構造とし、ひずみゲージを貼ったバネを用いて回転を拘束する方法が広く用いられている。今回の摩擦トルク測定法は、内外輪の固定方法が実機で使用さ

れる状態に近いという利点はあるが、一方、摩擦トルクのゼロ点の検定やトルク校正が難しいという欠点を有する。本試験での摩擦トルク校正では、駆動軸を固定し、被駆動軸に取り付けたトルクアームに重錘を吊すことにより被駆動軸に静止状態で回転トルクを与え、その際の角度シフトを実測した。図4-2は、このような方法で行った校正の一例で、負荷トルクを増加させていった場合、及び減少させていった場合の角度シフトを示したものである。負荷トルクを増やしていく場合、減じていく場合

の角度シフトの差は、試験軸受の摩擦トルクに起因する。摩擦トルクが比較的小さいと思われる未使用軸受を使用した³が、角度シフトには約2度（トルクにして約1N・cm）の比較的大きなヒステリシスが生じた。これは、軸受への負荷が200Nと比較的大きかったためと思われる。ただし、角度シフトと負荷トルクの傾きはほぼ一定であり、角度シフトから軸受の摩擦トルクの大小をほぼ正確に測定できることがわかった。

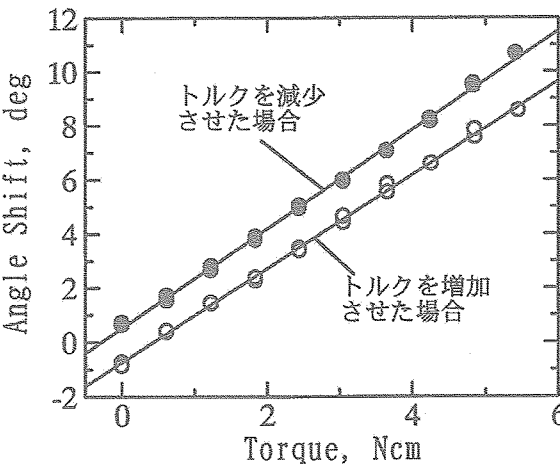


図4-2 トルク校正グラフ

表4-1 試験軸受及び試験条件

	潤滑油	試験軸受S/N	含油量	含油率	試験条件
試験番号	PFPE-Z	フロント：R-28 リア：R-29	23.7 wt% 24.0 wt%	74.1 % 75.4 %	回転数：2000 rpm 荷重：200 N 温度：常温 圧力：10 ⁻⁵ Pa台
A-PF-Z6	PFPE-Z6	フロント：R-24 リア：R-25	24.8 wt% 25.0 wt%	78.3 % 79.2 %	
A-PF-D1	PFPE-D	フロント：R-26 リア：R-27	25.9 wt% 25.6 wt%	81.1 % 79.8 %	
A-PF-D2	PFPE-D (Wet)	フロント：A-2 リア：A-1	--- ---	--- ---	
B-MAC-A	MAC-A (Wet)	フロント：A-11 リア：A-12	18.6 wt% 18.1 wt%	118.9 % 115.1 %	

摩擦トルクのゼロ点は、試験中適宜運転を中断し、手動で駆動軸を回転方向に廻した時に駆動軸と被駆動軸の位相差がなくなるように調整した。すなわち、図4-2でトルクを増加させた場合のトルク0の状態を、角度シフト0に調整したことになる。この方法では、運転に伴い軸受の静止摩擦トルクが大きくなると正確なゼロ点の決定は困難となる。本報告の摩擦トルク値には、このような要因による誤差が含まれることに留意する必要がある。試験では、まず真空槽をソーブションポンプで粗引き

し、ついでイオンポンプとサブリメーションポンプ（チタングッターポンプ）を用いて真空引きした。試験軸受を取り付けた後、真空槽のベーキングを行い、その後十分に圧力が低下し安定するまで真空引きした。ベーキング後の真空引きの期間は、実験準備の都合もあるが、1週間から2ヶ月であった。運転開始前のアウトガス測定では、前節の保持器からのアウトガスにみられた溶剤成分は検出されていない。ベーキング及びその後の長期間の真空引きの間に溶剤成分が蒸発・消失したと考えられ

る。試験開始時の圧力は 10^{-5} Pa台以下であった。

運転条件は、回転速度2000 rpm、荷重200 Nとした。この荷重における内外輪接触部での最大ヘルツ面圧は、外輪接触面で0.71 GPa、内輪接触面で0.76 GPaである。試験は、試験軸受2個分の摩擦トルクが5 N・cmを超えた時点を寿命とし、停止させた。このトルク値は、摩擦係数＝摩擦トルク／荷重／内輪内半径、と定義した場合、摩擦係数0.0125に相当する。

表4-1に軸受試験の一覧を示す。試験には2台の軸受試験機を使用した。試験番号の先頭のA,Bは、試験機の記号である。また、潤滑油の項目中にwetと記されているのは、保持器表面の油を拭き取ることなく濡れた状態のまま軸受に組み込んだことを示している。試験中は、摩擦トルク、軸受外輪温度、及び真空槽の圧力を測定するとともに、適宜4重極質量分析計（Qマス）を用いてアウトガスを測定した。

4.2 試験結果

4.2.1 試験中の摩擦トルク、アウトガス

(1) PFPE-Z含浸保持器を用いた軸受

図4-3は、摩擦トルク、真空圧力、軸受外輪温度の推移を試験時間に対してプロットしたものである。運転時間1,000時間くらいまでは摩擦トルクと真空圧力の上昇が時々認められるものの、全般にトルク、圧力ともに低く安定している。しかし、その後、摩擦トルク、圧力ともに頻繁に上昇する現象がみられるようになった。ただし、運転時間2,000時間付近で時間軸を拡大した図4-4をみると、摩擦トルク、真空圧力は10～20時間間隔で短時間だけ上昇しており、運転中の大部分は図4-3の下限の値を示していたことがわかる。軸受外輪温度が上昇することなく安定していたのは、摩擦トルクが上昇していた時間が短かったためと考えられる。なお、6000時間付近で軸受外輪温度が低下しているが、これは実験室の室温が下がった影響で、軸受の摩擦トルクに起因するものではない。

図4-4に示したように、摩擦トルクと真空圧力が同時に増大するケースが多い。これは、軸受の摩擦面に適切に潤滑油が供給されないため一時的に境界潤滑状態となり、厳しい条件下で潤滑油が分解しアウトガスが発生したためと考えられる。摩擦トルク、真空圧力が比較的短時間で元の低い値に低下したことは、潤滑油が速やかに転走面に再供給されたためと推察される。

運転時間7200時間以降になると摩擦トルク、真空圧力、軸受外輪温度のいずれもが上昇した。回復不能な潤滑不良に陥った可能性が高い。その後、約7800時間で停電のために運転を停止した後、運転を再開しようとしたが、

起動トルクが大きすぎマグネットカップリングがスリップしてしまい運転が再開できなかった。このため、この時点で試験を打ち切った。

図4-5は、運転の各時間におけるアウトガスのQマススペクトルである。運転前は、真空引きされにくいH₂O(マスナンバー18)やH₂(2)、コンタミネーションと思われるCH系の成分(40,57,70,80近辺の連続したピーク)に起因すると思われるピークが主体であるが、運転直後の試験時間0.5時間では、PFPE-Zの分解生成物であるCFO(47)、CF₂O(66)、CF₃(69)、CF₃O(85)、C₂F₃O(97)、C₂F₅(119)、C₂F₅O(135)、C₃F₅O₂(163)、C₃F₇O(185)などのピークが認められた。これらのピークは、試験時間約50時間ではいったん強度は低下するものの、380時間で再び急増し、その後は試験終了に至るまで検出され続けた。また、運転停止後でも強度は低くなるものの、これらのピークが検出された。軸受の運転に伴いこれらの分解生成物が発生したこと、そして真空圧力の増大はこれらアウトガスに起因していることがわかる。

図4-6は、主なアウトガスのピーク強度の推移を試験時間に対してプロットしたものである。図4-6(a)(b)に示したCF系及びCFO系のピーク強度の推移はきわめて類似している。対数でプロットした場合にピーク変化が類似しているということは、成分比が一定であることを意味する。すなわち、アウトガスの量は時間とともに変化した、その成分比はほぼ一定であったことがわかる。一方、図4-6(c)をみると、H₂O(18)が試験時間とともに徐々にピークが減少していくが、O(16)、F(19)、CO(28)、CO₂(44)などのピークは試験中に増減を繰り返し、その変化はCF系、CFO系のピークの推移と類似している。すなわち、検出されたO、CO、CO₂などのピークは、真空槽の残留ガスに起因するのではなく、潤滑油の分解に伴い放出されたガスであることがわかる。

なお、図4-6のピーク強度の変動は、図4-3に示した真空圧力の全般的な推移と対応しない場合がある。Qマス測定は数日から1週間に1回の割合で実施したが、実際のアウトガスは図4-4に示したように数時間～十数時間の単位で変動している。圧力が変動している場合は、変動幅のどの時点でQマス測定を行ったかによりピーク強度が変わるためと考えられる。

(2) PFPE-Z6含浸保持器を用いた軸受

図4-7に摩擦トルク、真空圧力、軸受外輪温度の推移を、図4-8に運転前、運転直後及び試験時間約140時間のQマススペクトル示す。試験初期は摩擦トルクが低く安定していたが、試験時間約170時間頃から摩擦トルク、真空圧力、軸受外輪温度のいずれもが上昇し始め、200

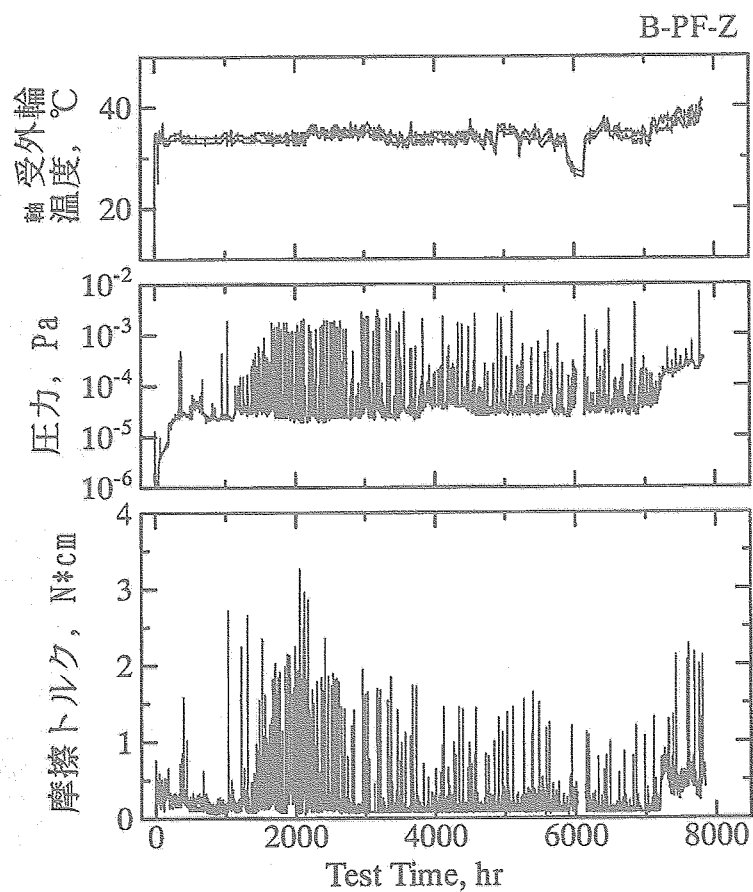


図4-3 軸受試験における各測定値の推移
(PEPE-Z油含浸保持器)

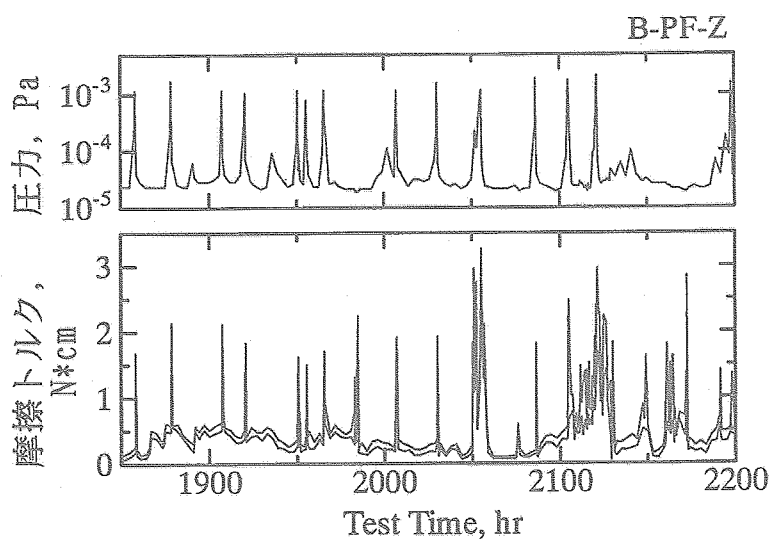


図4-4 時間軸を拡大した時の摩擦トルク, 圧力
(PEPE-Z油含浸保持器)

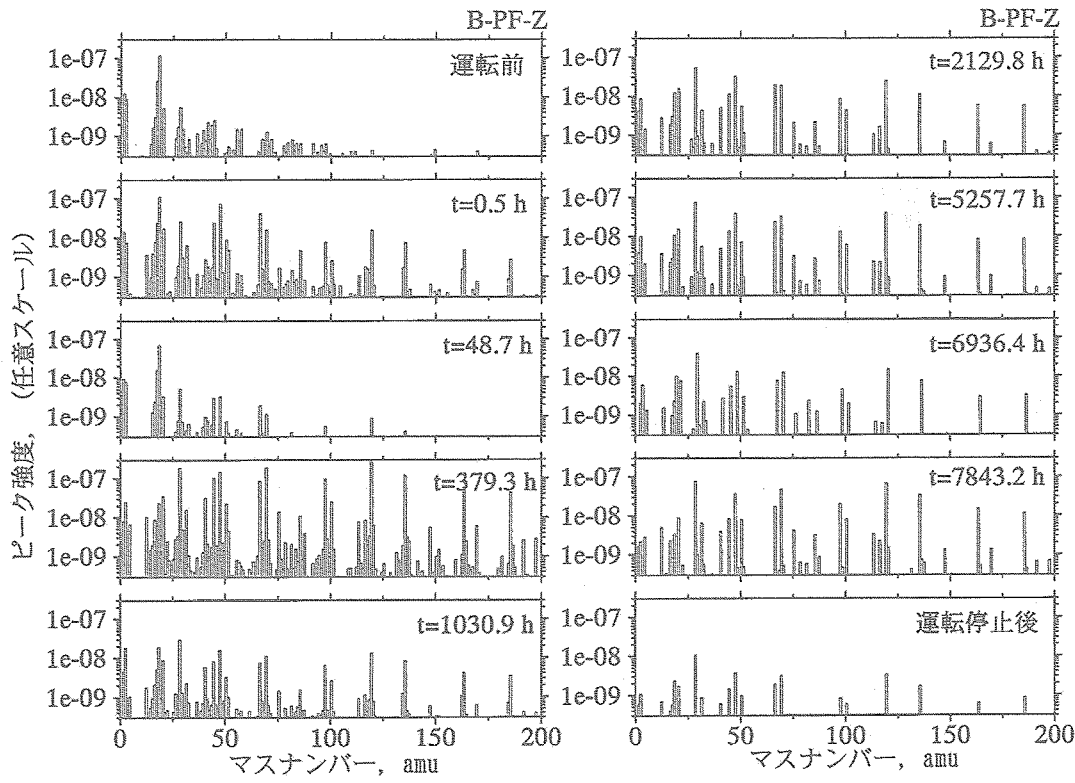


図4-5 軸受試験中のアウトガス (PEPE-Z油含浸保持器)

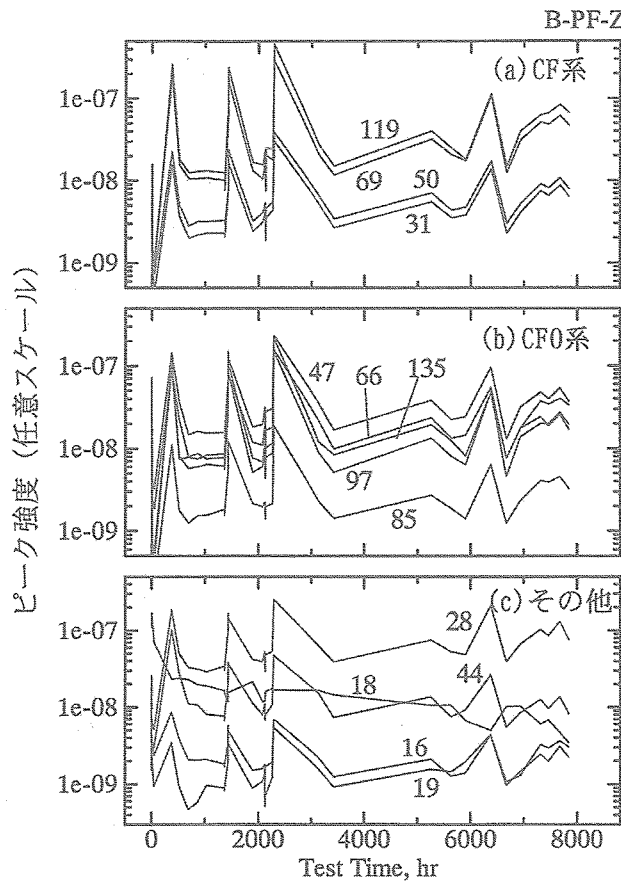


図4-6 軸受試験におけるQマスピークの推移 (PEPE-Z油含浸保持器)

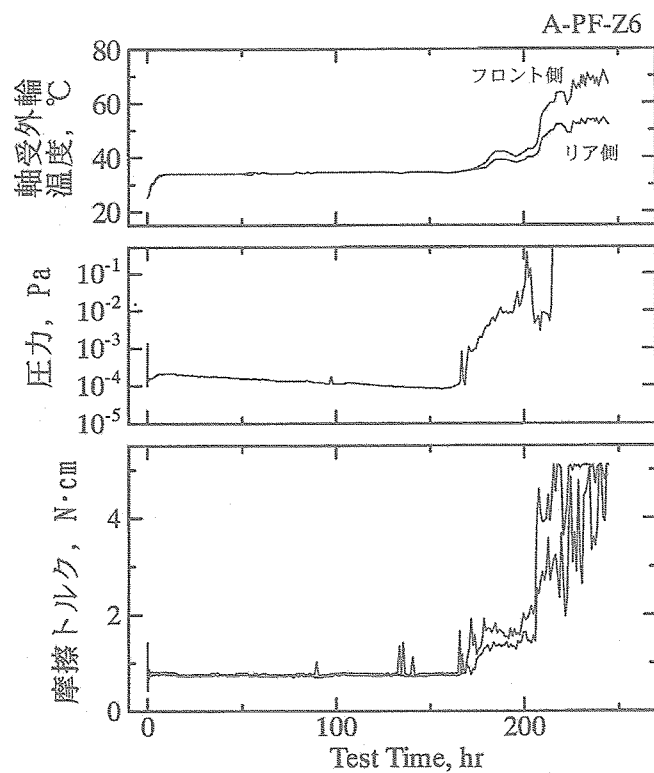


図4-7 軸受試験における各測定値の推移
(PEPE-Z6油含浸保持器)

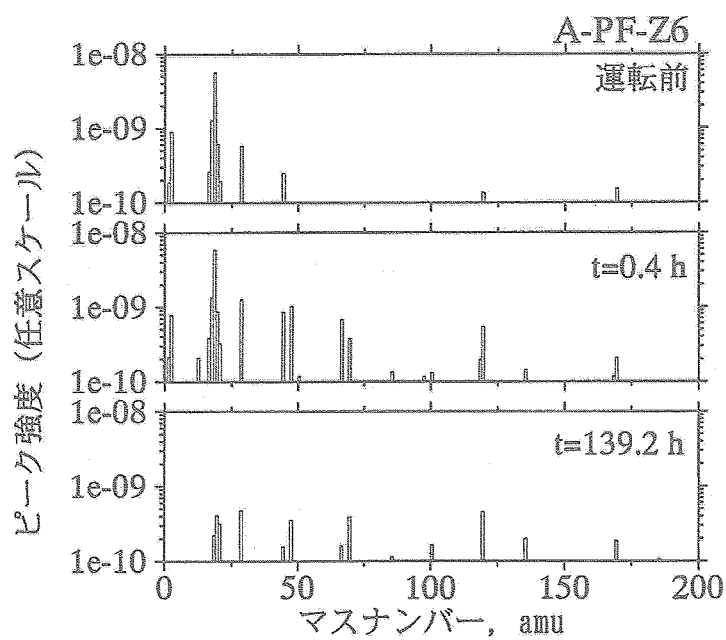


図4-8 軸受試験中のアウトガス (PEPE-Z6油含浸保持器)

時間を越えたあたりで急増し、245時間でトルクリミッターが作動し試験は停止した。軸受外輪温度はフロント側の方が高く、フロント側軸受の損傷が大きいと推定される。

アウトガスは、運転開始直後からCFO (47), CF_3 (69), C_2F_5 (119), C_3F_7 (169)のピークが認められ、潤滑油が分解していたことがわかる。摩擦トルクが安定していた試験時間約140時間では、これらのピーク強度は低下した。その後、短時間で摩擦トルクが増大したため、摩擦トルク、真空圧力が高い時点でのアウトガスデータは取れていない。

今回の試験では、PFPE-Z6含浸保持器の軸受性能は、明らかにPFPE-Zに比べて劣っている、という結果であった。Z6とZの主な違いは、Z6の方が分子量が大きく蒸気圧が低いこと、このため粘度が高いことである。粘度が高いと、保持器の空隙部に充填された潤滑油が外部に供給されにくく、転走面に十分な潤滑油が供給できなかったという可能性も考えられる。良好な潤滑状態を保つには、転走面へ十分な潤滑油をいかに供給するかが重要と思われる。

(3) PFPE-D含浸保持器を用いた軸受

図4-9は、PFPE-D含浸保持器を用いた軸受の試験結果である。摩擦トルクは、PFPE-Z含浸保持器の場合と同様に時々増大する現象がみられ、試験時間が約300時間からは増大した時のトルク値が大きくなった。運転時間が550時間を越えたあたりから摩擦トルクが常時変動するようになり、真空圧力、軸受外輪温度も増大している。約900時間で摩擦トルクが急増したため、試験を打ち切った。

図4-10に、いくつかの試験時間におけるアウトガスのスペクトルを示す。試験開始直後に CF_3 (69), C_2F_5 (119), C_3F_7 (169)のピークが認められたが、強度は小さい。潤滑油に由来するアウトガスはCF系が主で、試験初期からCFO系が検出されたPFPE-Z, Z6の場合とは異なっていた。この特徴は前節のPFPE-Dにみられたアウトガスの特徴と一致する。時々大きな摩擦トルクが観察された試験時間約460時間の場合でも、CF系のピークは多少大きくなったものの、PFPE-Z, Z6に比べると潤滑油に由来するピークは小さい。しかし、摩擦トルクが常時変動を始めた試験時間550時間以降になると、CF系、CFO系のピークが急増し、潤滑油の分解が進んでいることが窺われる。転走面に十分な潤滑油が供給されずに境界潤滑状態になり、摩擦トルク、真空圧力が増大したことを示唆している。摩擦トルクが増大している時はCFO系のピークもCF系と同程度に大きくなっており、油を加熱

した際のアウトガスのパターンとは異なっている。境界潤滑状態でPFPE-D油と軸受の鉄が表面化学反応を起こし、その際にCFO系の分解生成物がガスとして発生したと推測される。PFPE-D油の場合、CFO系ガスの発生の有無で表面化学反応が起こっているかどうかを判定できる可能性がある。

Hayashidaらは真空中で四球摩擦試験を行い、PFPE-DがPFPE-Zに比べて良好な潤滑性能を示し、潤滑油の分解によるアウトガスも少ないことを報告している²⁰⁾。このため、今回の軸受試験でもPFPE-Dの方が良好な性能を示すものと想定したが、PFPE-Zでは約7800時間運転可能であったのに対し、PFPE-Dでは約900時間と正反対の結果となった。PFPE-ZとPFPE-Dの潤滑性能が、軸受試験と四球摩擦試験で相反した理由は不明であるが、軸受では転がり摩擦が主体であるのに対し四球摩擦試験では純すべり摩擦であること、保持器からの油の供給能力が油の種類により異なっていたこと、潤滑油の性質が製造バッチによりかなり異なっていた等の可能性がある。この点については、今後さらに検討が必要である。

これまで述べた一連の試験では、保持器に潤滑油を含浸後、表面の油をトリクロロエタンで除去している。このため、運転前に軸受内に十分な潤滑油量が確保されておらず、保持器から潤滑油が供給されにくい場合には寿命が短くなる可能性もあると考えた。この点を確認するために、PFPE-Dを対象に、表面が潤滑油で濡れた状態のままの保持器を用い、さらに玉・内外輪転走面表面を潤滑油を浸した無塵ワイパーで拭いて表面を濡らした状態とした軸受を用いて試験を行った。

図4-11は、その結果である。摩擦トルク、真空圧力、軸受外輪温度ともに試験時間約600時間から上昇する傾向が見られ、約820時間以降には摩擦トルクが大きく変動し、これに伴い大きな異音が断続的に発生するようになった。なお、約820時間以降に摩擦トルク下限側が低くなったのは、摩擦トルク変動に伴ってマグネットカップリング部で微小な動的スリップが発生したことによる計測上の問題と思われる。1050時間で摩擦トルク、真空圧力、軸受外輪温度のいずれもが急増したため、試験を打ち切った。軸受内には運転前に潤滑油が多めに存在したと思われるが、摩擦トルクが上昇を始める時間は、図4-9の場合とほぼ同様で、表面を潤滑油で濡らした効果は認められなかった。

図4-12に試験中のマススペクトルを、図4-13に主なアウトガスピークの推移を試験時間に対して示す。図4-10と同様に、摩擦トルクが安定していた600時間以前は潤滑油に由来するCF系のピークは小さい。しかし、その後摩擦トルクが上昇するとCF系、CFO系のピークが

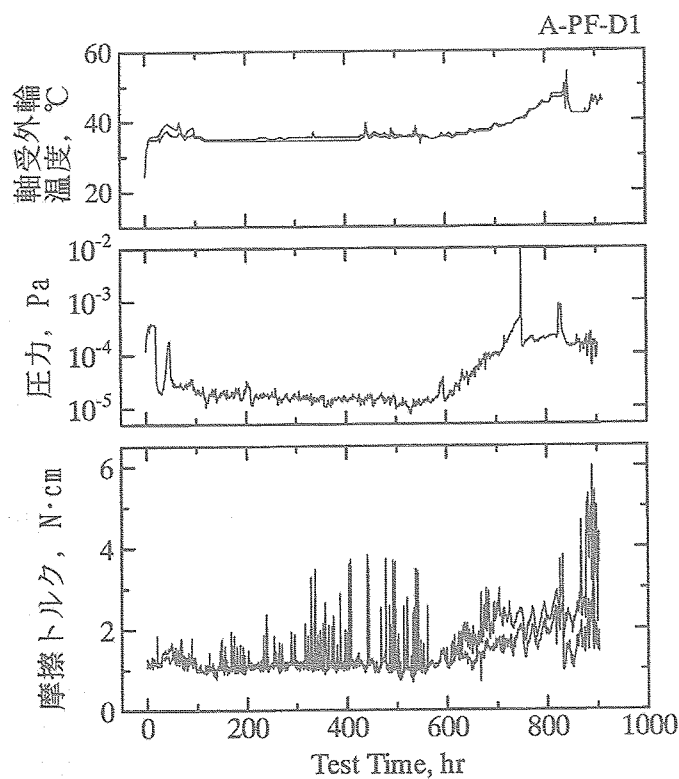


図4-9 軸受試験における各測定値の推移
(PEPE-D油含浸保持器)

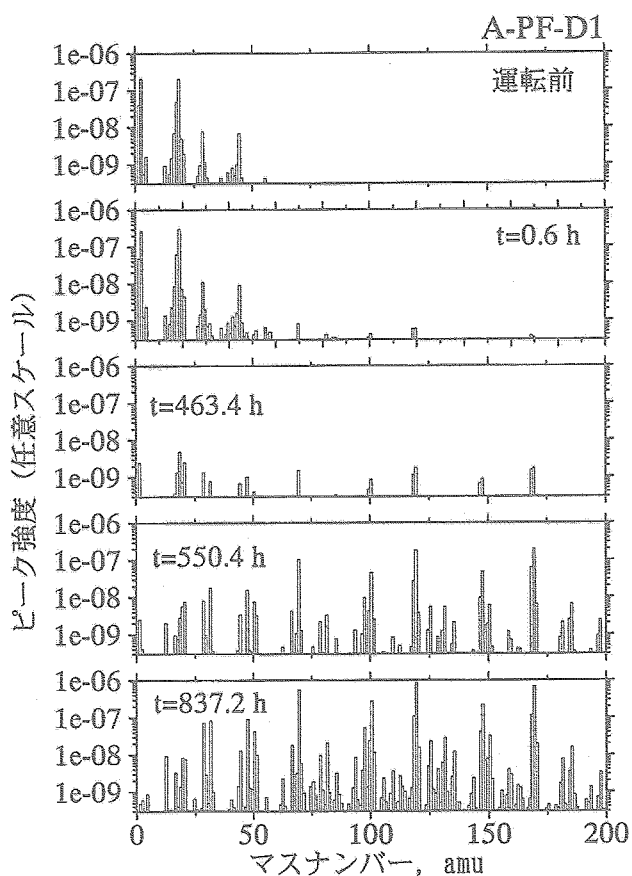


図4-10 軸受試験中のアウトガス (PEPE-D油含浸保持器)

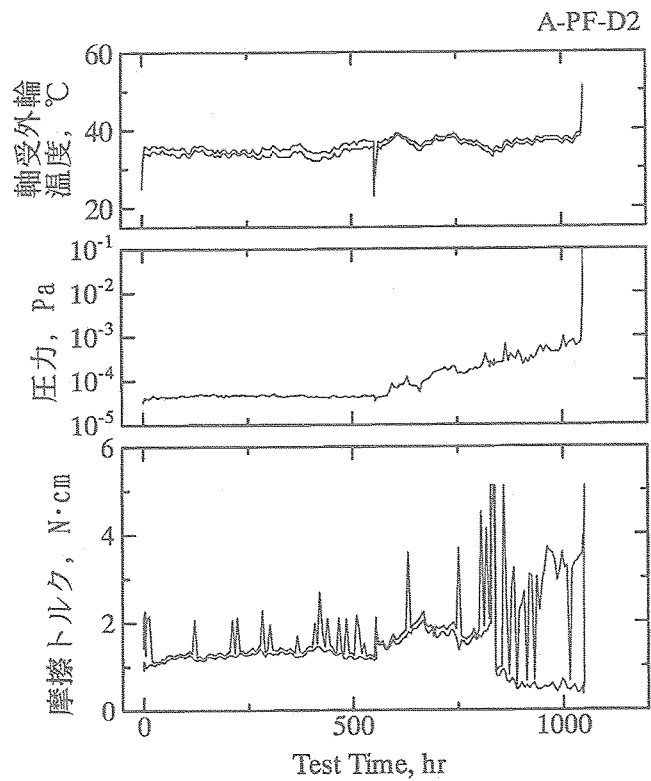


図4-11 軸受試験における各測定値の推移
(PEPE-D油含浸wet保持器)

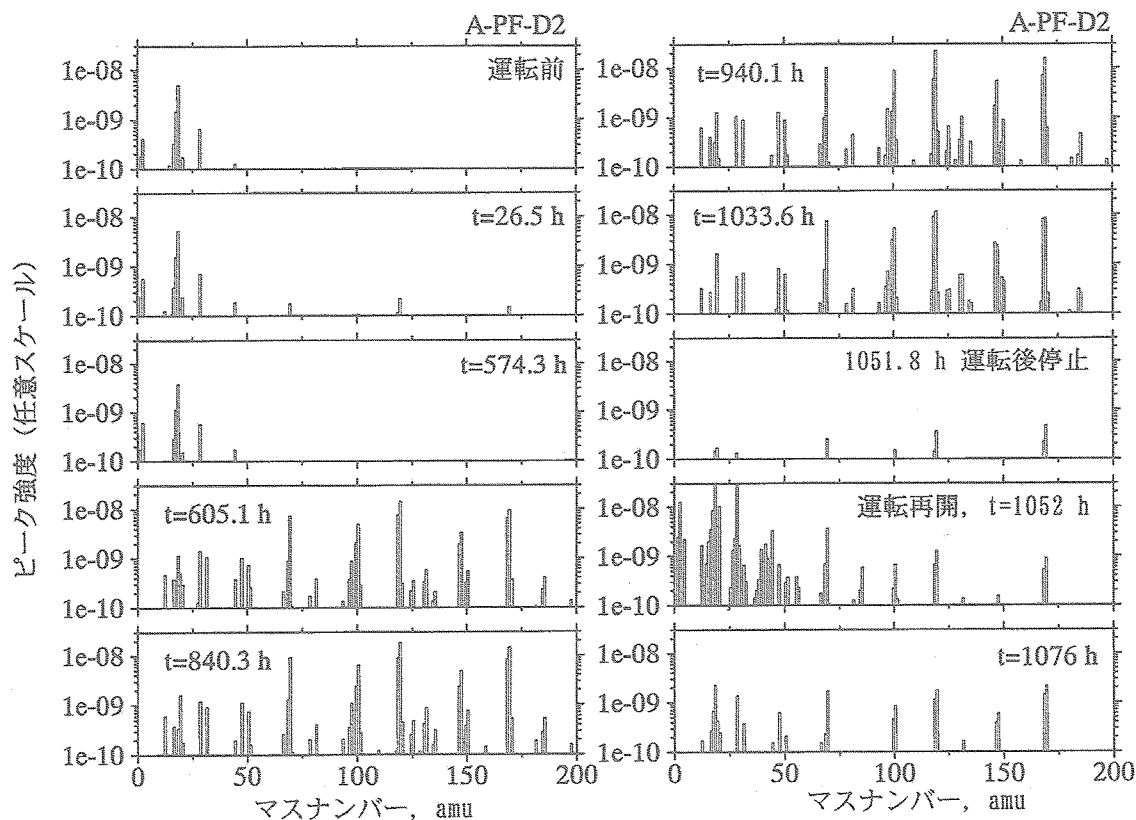


図4-12 軸受試験中のアウトガス (PEPE-D油含浸wet保持器)

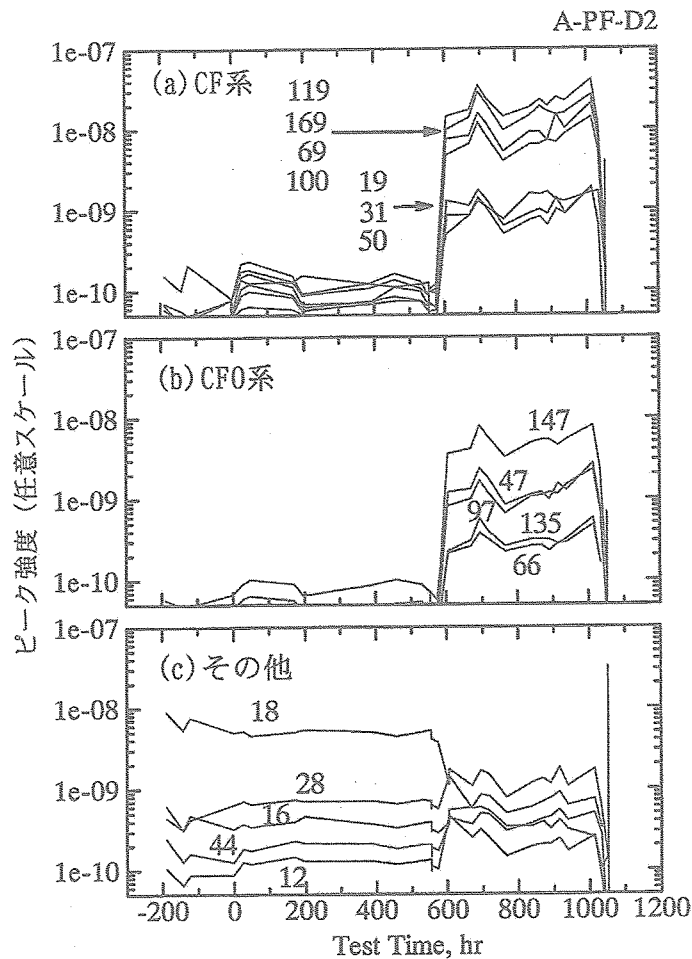


図4-13 軸受試験におけるQマスペークの推移
(PEPE-D油含浸wet保持器)

顕著に現れた。検出されたピーク位置は表面の油を除去した保持器を用いた場合とほぼ同じである。試験時間に対するアウトガスピークの推移から、試験時間600時間以降は、常に潤滑油が分解してCF系、CFO系のアウトガスを発生させたことがわかる。興味深いのは、CF系、CFO系のアウトガスの急増とともに H_2O (18)のピークが減少したことである。分解生成された活性なCF系ガスにより H_2O が分解され、活性なOの供給源となりCFO系のガスが生成された可能性がある。

試験前に保持器表面に多量に潤滑油を存在させても、軸受のトライボロジー特性、アウトガス特性はほとんど変わらないことが確認された。このことは、シールもシールドも持たない本試験軸受の場合は、保持器表面の潤滑油は運転初期に転走面外に排出され、潤滑に寄与しないことを示唆している。

(4) MAC-A含浸保持器を用いた軸受

図4-14は、MAC-Aを含浸した保持器を用いた試験における摩擦トルク、真空圧力、軸受外輪温度の推移を

試験時間に対してプロットしたものである。摩擦トルクは、運転時間約2000時間まではかなり変動したが、それ以降は安定した低トルクを示した。真空圧力は、運転初期は高いもののその後徐々に低下し、1000時間以降は $1 \sim 2 \times 10^{-5}$ Pa程度の低い圧力で安定した。また、軸受外輪温度は、摩擦トルクにほぼ対応した変化を示しているが、約2500時間以後では摩擦トルクが急減したのに対し、軸受外輪温度はそれほど低下していない。摩擦トルクのゼロ点に、4.1項で述べたような誤差があった可能性がある。なお、8000時間付近で軸受外輪温度、真空圧力ともに増加しているのは、実験室の室温上昇によるものである。試験は予定した10,000時間を超えたため、10,099時間で打ち切った。

図4-15は種々の試験時間におけるQマスペクトル、図4-16は主なアウトガスピークの推移を試験時間に対してプロットしたものである。試験を通して、 H_2O (18)が主ピークで、ついで CO (28)、 CO_2 (44)のピークが大きい。前節のアウトガス試験で検出されたマッソンナンバー55, 57, 71, 184などのピークはほとんど認めら

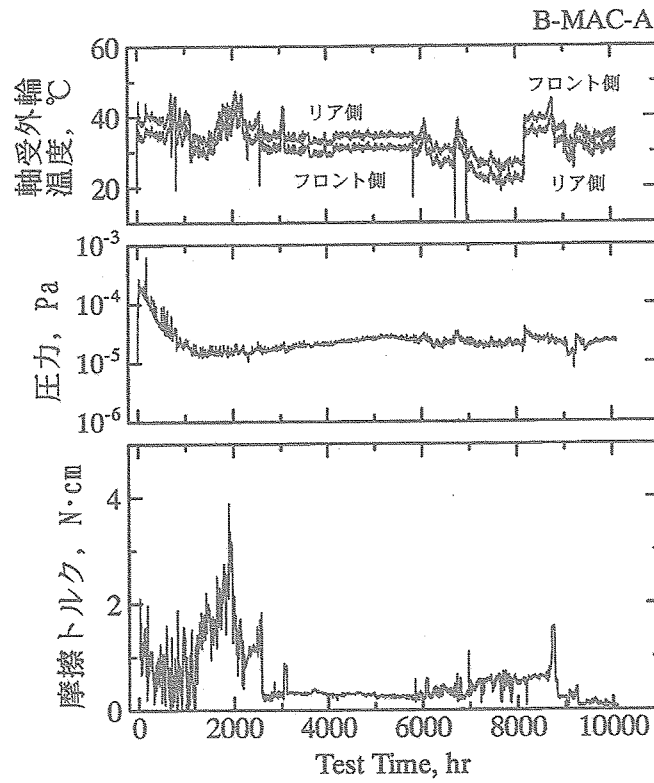


図4-14 軸受試験における各測定値の推移
(MAC-A油含浸wet保持器)

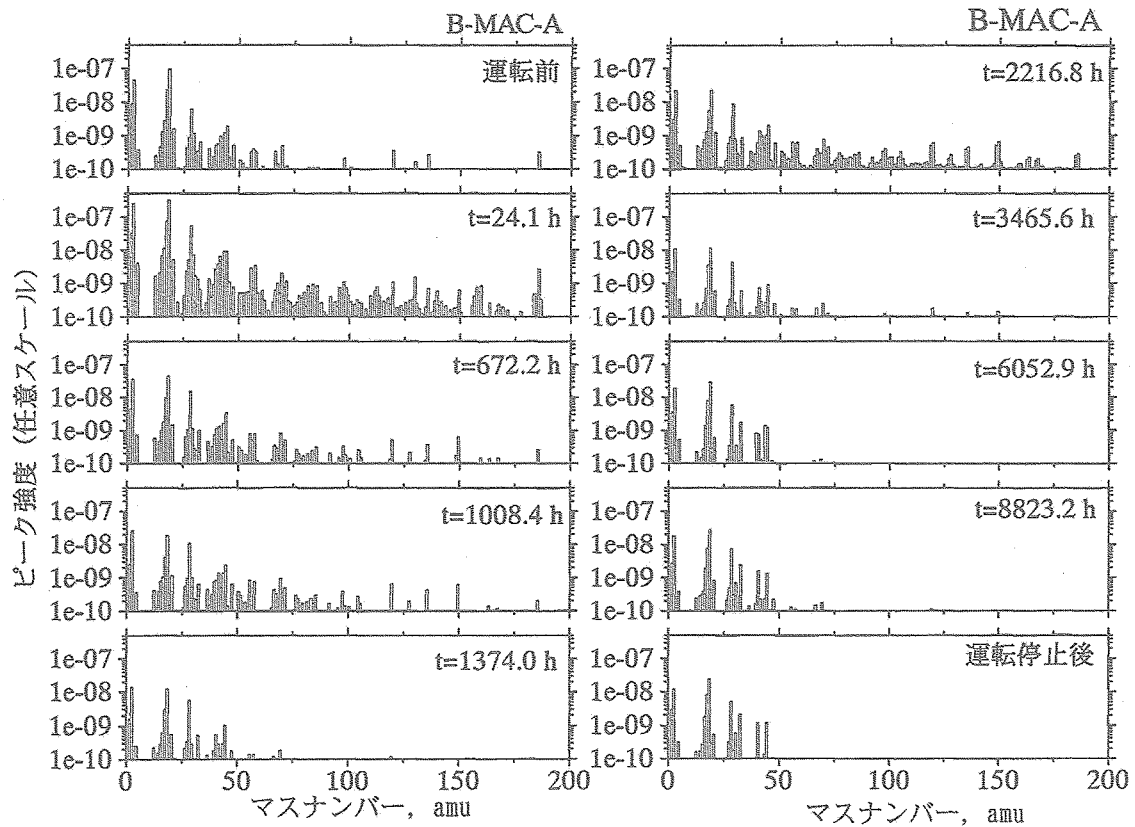


図4-15 軸受試験中のアウトガス (MAC-A油含浸wet保持器)

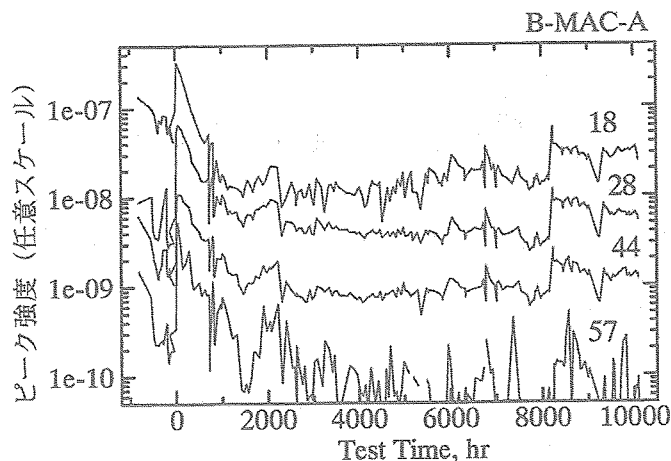


図4-16 軸受試験におけるQマスピークの推移
(MAC-A油含浸wet保持器)

れなかった。これらのピークのうちで最も大きかった57のピークの時間推移をみると、 H_2O (18)に比べて常に2桁以上小さいピークであった。試験中に検出されたガスは真空槽に由来するものばかりで、潤滑油に起因するアウトガスはほとんどなく、MAC-A油は軸受試験においてほとんど分解生成物が発生しないという結果であった。

今回試験した潤滑油の中では、MAC-Aが摩擦トルク、寿命、アウトガス特性のいずれも最も優れているという結果であった。

(5) 固体潤滑軸受との比較

一般に、液体潤滑は高速で長寿命が要求される用途に、固体潤滑は低速でかつそれほど長寿命が要求されない用途に使用されている。図4-17は、今回の試験と固体潤滑軸受を回転数2000rpm、荷重200Nという同一条件で試験した結果を比較したものである。図では時間軸スケール、摩擦トルクのスケールを同一にしてある。固体潤滑軸受は宇宙でも実績のある玉・内外輪に二硫化モリブデン(MoS_2)スパッタリング被膜を施し、PTFE系複合材の保持器を採用したものである。

固体潤滑軸受はきわめて低トルクを示しているが、約1500時間で摩擦トルクが突然上昇し、トルクリミッターが作動して運転が停止した。一方、液体潤滑では摩擦トルクが大きく、PFPE-Z、MAC-A以外では寿命も固体潤滑に及ばないという結果であった。今回の試験結果のみで判断すると、試験した運転条件では、寿命が許容されれば運転停止直前まで摩擦トルクが極めて低く安定した値を示した固体潤滑軸受が望ましく、多少の摩擦トルク変動が許容されれば寿命の長い液体潤滑軸受の方が優れている、ということになる。

液体潤滑の方が摩擦トルクが高かったということは、

液体潤滑では転走面で境界潤滑状態になっていたことを示唆する。PFPE系の油で潤滑した場合に試験初期から油が分解したアウトガスが観測されたことは、この推測を裏付けている。境界潤滑状態にもかかわらず、PFPE-Z、MAC-Aでは寿命が長かったのは、潤滑油が転走面に再供給されるという液体潤滑の利点が発揮されていることを示唆している。寿命の点では液体潤滑の方が優れていることを再確認できた。

しかし、今回の運転条件は油潤滑軸受では厳しい条件とは言えず、それでも境界潤滑状態となったのは、PFPE系油やMAC油の弾性流体潤滑(EHL: Elastohydrodynamic lubrication)条件下での油膜形成能力が一般の潤滑油に比べ劣っていた可能性がある。これらの油の高圧粘度を把握し、EHL条件下での油膜形成状態を検討する必要がある。また、今回の試験は基油で試験したが、今回の結果は、PFPE系油やMAC油ともにより広範な条件で使用するためには、適切な極圧添加剤が必須であることを示唆している。

4.2.2 試験後の軸受検査

試験後の軸受は、回転精度、内外輪・玉の真円度、内外輪の転走面形状(摩耗)を検査するとともに、転走面の付着物、保持器内に残留している油、玉表面などについて、X線光電子分光分析(XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy)、フーリエ赤外分光分析(FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy)、ガスクロマトグラフィー分析を行った。表4-2に、各軸受の回転精度、内外輪・玉の真円度、内外輪の摩耗の検査結果を示す。以下、各軸受毎に検査・分析結果について述べる。

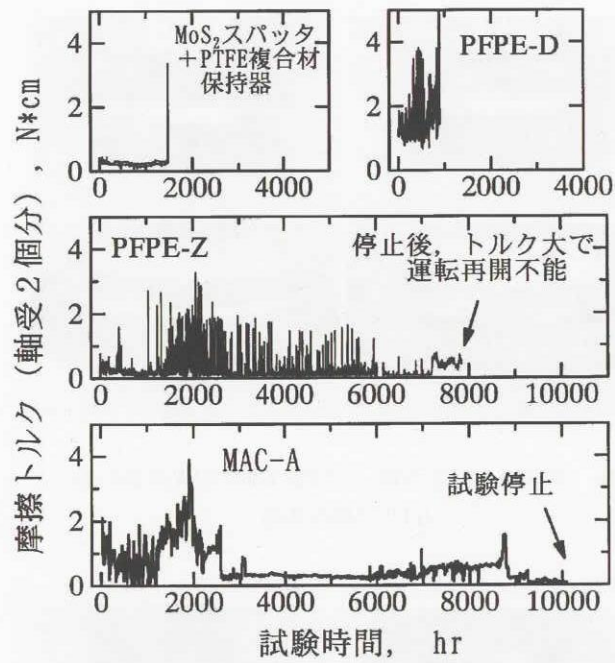


図4-17 固体潤滑軸受と液体潤滑軸受の摩擦トルクの比較

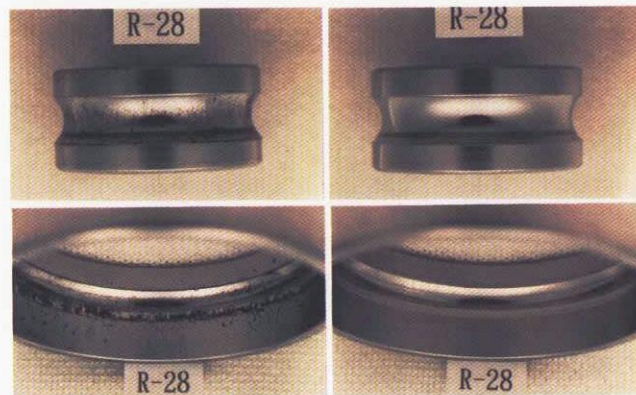


図4-18 試験後の軸受外観 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)

(a)フロント側内外輪

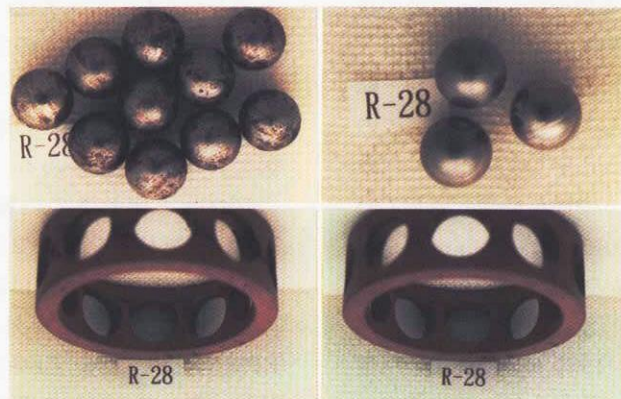


図4-18 試験後の軸受外観 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)

(b)フロント側玉, 保持器

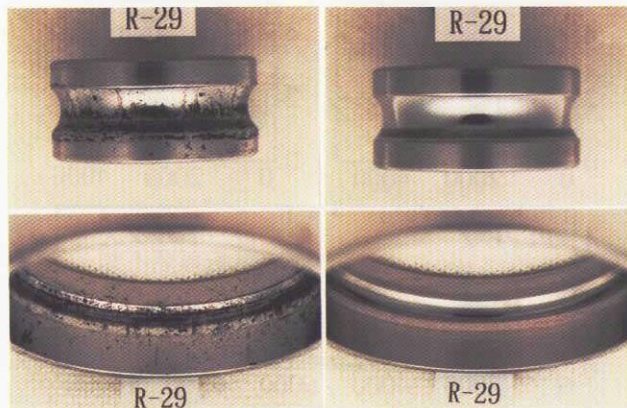


図4-18 試験後の軸受外観 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)

(c) リア側内外輪

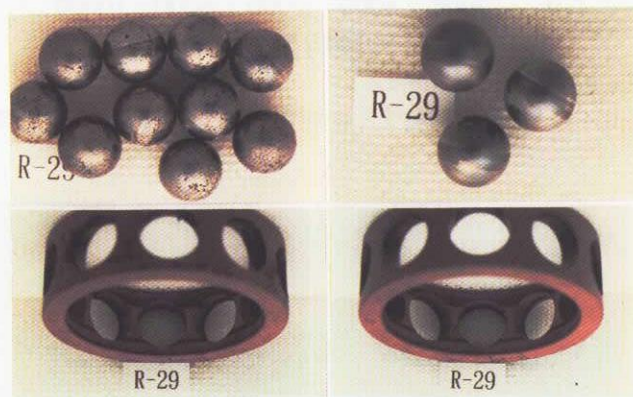


図4-18 試験後の軸受外観 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)

(d) リア側玉, 保持器

(1) PFPE-Z含浸保持器を用いた軸受

図4-18に試験後の軸受の外観を示す。図4-18(a)(b)はフロント側軸受(R-28), (c)(d)はリア側軸受(R-29)で、いずれも左側の写真は軸受を分解したままの状態、右側の写真は表面の付着物を拭き取った後の状態である。フロント側、リア側軸受ともに内外輪、玉、保持器のいずれにも黒色の摩耗粉が多量に認められ、転走面以外の部分にもかなり付着している。しかし、この付着物を拭き取ると、右側の写真に示したように、内外輪・玉の転走面や保持器のしゅう動面がやや変色していたものの、損傷らしい痕跡は認められない。

図4-19は試験後の軸受部品の形状検査結果で、(a)は玉の真円度、(b)は内外輪の真円度、(c)は内外輪転走部のR形状である。図4-19(c)のR形状は、内外輪の軌道面が指定通りのR形状となっている場合に、測定結果が水平になる治具を用いて測定したものである。玉には対向する箇所凹みが認められ、転走部でフロント側は約

0.3 μm 程度、リア側は0.5~0.9 μm の摩耗が生じていた。内外輪軌道面には真円度形状に0.5~1.3 μm の乱れが認められ、軌道面のR形状から0.5 μm 程度摩耗したことがわかる。回転精度は、表4-2に示したように、劣化がみとめられるものの、劣化の程度はわずかであった。この軸受は摩擦トルク過大のため再始動できなかったが、形状検査からは摩擦トルクがそこまで増大するとは想定できず、起動摩擦トルクの増大は、摩耗粉の噛み込みが原因であった可能性がある。

フロント側軸受の内輪表面に付着していた物質のEPMA分析結果を図4-20に、FTIR分析結果を図4-21に示す。図4-21には洗浄した後の保持器、及び比較のためPFPE-Z油の赤外吸収スペクトルも示した。EPMA分析ではFe, Crが検出されており、付着物には内外輪・玉のステンレス鋼に由来する摩耗粉が含まれていることがわかった。なお、図で検出されているAuは分析のためにコーティングした金である。一方、図4-21の

表4-2 試験後の軸受の回転精度，各部品の変円度，摩耗

試験番号 運転時間	潤滑油	軸受位置 軸受S/N	回転精度, μm				変円度, μm			摩耗, μm	
			アキシヤル		ラジアル						
			内輪	外輪	内輪	外輪	内輪	外輪	玉 (3個)	内輪	外輪
B-PF-Z 7848 hr	PFPE-Z	F:R28	4	6	3	5	0.50	0.89	0.28, 0.31, 0.35	0.5	0.4-0.5
		R:R29	6	8	4	6	1.04	1.34	0.50, 0.70, 0.93	<0.1	0.2-0.5
A-PF-Z6 245 hr	Z6	F:R24	6	17	10	11	2.26	4.50	0.98, 1.19, 1.87	25	21
		R:R25	3	3	3	3	0.86	1.39	0.20, 0.31, 1.97	< 0.5	< 1
A-PF-D1 916 hr	PFPE-D	F:R26	3	6	3	4	0.57	1.56	0.15, 0.16, 0.54	0.9	1.5
		R:R27	4	6	4	4	2.22	1.93	0.08, 0.12, 0.23	2.9	2.9
A-PF-D2 1051 hr	PFPE-D (wet)	F::A-2	2	2	1	1	0.25	0.35	0.07, 0.10, 0.16	< 0.1	0.2-0.5
		R::A-1	2	17	1	8	0.70	1.79	0.39, 0.40, 0.49	0.5-0.7	1.1-2.0
B-MAC-A 10099 hr	MAC-A (wet)	F:A-11	3	2	1	1	0.30	0.40	0.07, 0.07, 0.09	0	0
		R:A-12	3	3	1	2	0.25	0.65	0.05, 0.05, 0.09	0	0

赤外吸収スペクトルでは、内輪の付着物と未使用のPFPE-Z油でほぼ同じ位置で吸収が起こっており、付着物にPFPE-Z油が含まれていることがわかった。すなわち、内輪表面の付着物は、摩耗したステンレス鋼粉と潤滑油が混合したものである。また、保持器の赤外吸収スペクトルが未使用のPFPE-Z油とほぼ同じで、PFPE-Z油が劣化しないで残っていることが確認された。

図4-2 2は、玉表面のXPS分析におけるFスペクトルである。Arイオンで90秒ずつエッチングを行いながら深さ方向に分析したものである。図の奥側が最表面で、手前側が内部に相当する。なお、エッチング速度はPTFE膜換算で約0.3nm/secである。最表面ではPFPE油のCF結合のピーク（結合エネルギー約689eV）が検出されたが、90秒エッチングした後では金属ふっ化物（結合エネルギー約685eV）へとピークがシフトしている。このことから、最表面はPFPE油で覆われているが、その下層ではPFPE油と軸受材であるステンレス鋼が化学反応を起こし、金属ふっ化物を形成していたことがわかった。金属ふっ化物層の厚さは、フロント側はエッチング時間で600秒（180nm）、リア側では2700秒（810nm）以上にも達していた。PFPE油は厳しい境界潤滑条件下では鉄と反応しルイス酸(FeF₃)を生成し、そのルイス酸が触媒として作用しPFPE油の分解を促進すると言われている。軸受試験中にPFPE油の分解物のアウトガスが多量に検出されたのは、XPS分析で検出された金属ふっ化物の触媒作用である可能性がある。

(2) PFPE-Z6含浸保持器を用いた軸受

試験後の軸受の外観を図4-2 3に示す。図4-2 3

(a)(b)のフロント側軸受（R-24）では、内外輪、玉、保持器のいずれにも黒色の付着物が多量に認められた。これらの付着物を拭き取ると、図の右側の写真に示すように、内外輪転走面には明確なしゅう動痕が認められ、玉表面は全面がやや褐色を呈していた。一方、図4-2 3(c)のリア側軸受（R-25）の内外輪では、潤滑油と思われる褐色の物質が付着していたが、転走痕もほとんど認められない程度であった。この付着物を拭き取ると、図の右側の写真に示したように、試験前と同様のきれいな金属光沢を示し、損傷も認められなかった。また、図4-2 3(d)に示したように、玉、保持器には付着物がきわめて少ない状態であった。

図4-2 4は、試験後の玉・内外輪の変円度、内外輪転走部のR形状である。フロント側軸受は、玉・内外輪ともに変円度形状に乱れが認められ、R形状から内外輪転走面に20 μm 以上の過大な摩耗が発生していることがわかった。一方、リア側軸受は、玉・内外輪の変円度に摩耗によると思われる形状の乱れがみられたが、R形状では内外輪に摩耗は認められない。

図4-2 5に玉表面のXPS分析結果を示す。両軸受ともに最表面にはPFPE油が存在し、その下に金属ふっ化物層が検出されているが、金属ふっ化物層の厚さ、ピーク強度ともにフロント側軸受がリア側に比べ圧倒的に大きい。

以上の検査結果は、この軸受の試験で摩擦トルクが増したのはフロント側軸受に原因があったことを示している。この結果は、図4-7で軸受外輪温度がフロント側で高かったこととよく対応している。なぜフロント側軸受が選択的に劣化したのか理由は不明であるが、何らか

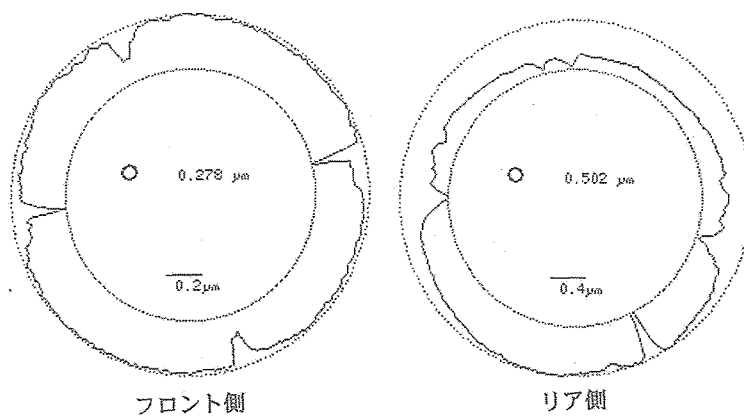


図4-19 軸受の形状検査結果 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)
(a)玉の真円度

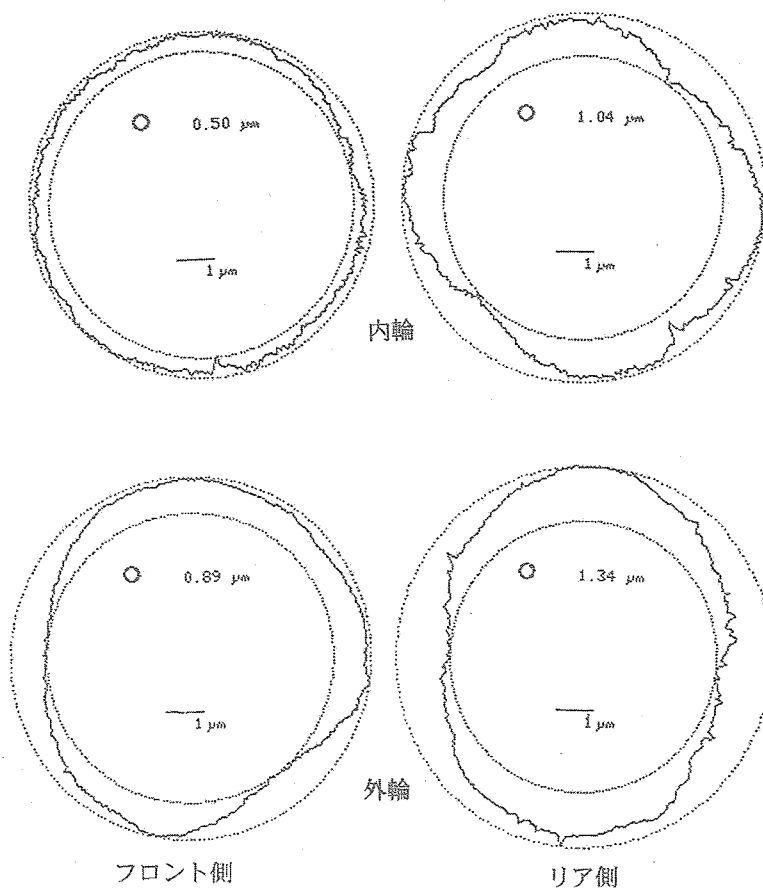


図4-19 軸受の形状検査結果 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)
(b)内外輪の真円度

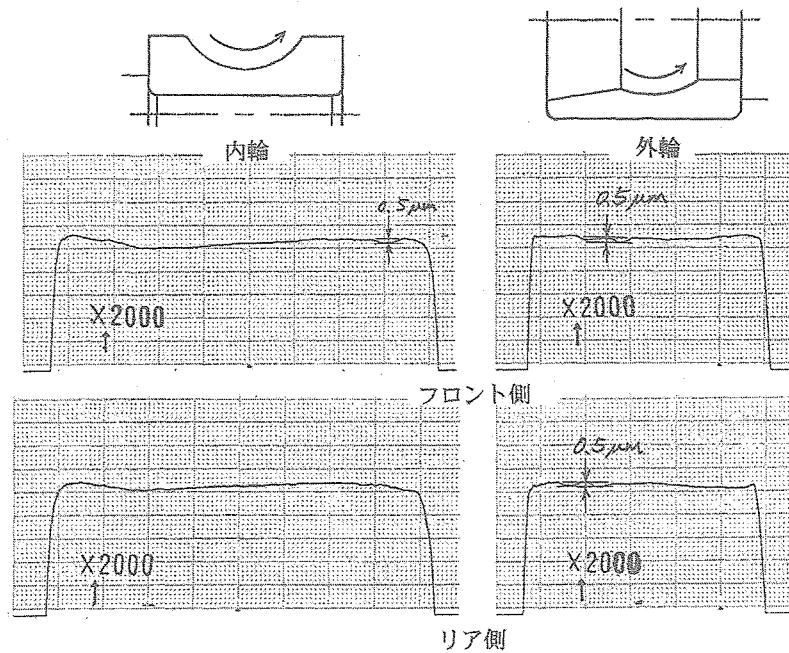


図4-19 軸受の形状検査結果 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)
(c)内外輪のR形状

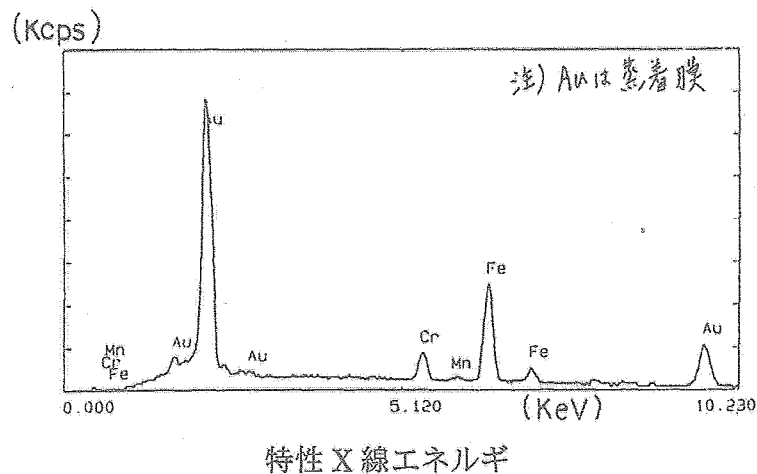


図4-20 軸受付着物のEPMA分析結果
(PEPE-Z油含浸保持器の軸受)

の要因でフロント側軸受では転走面に十分な潤滑油が供給されず、厳しい運転条件でPFPE油の劣化・分解が進み、このため逆にさらに運転条件が厳しくなるという悪循環に陥った可能性がある。一方、リア側軸受に損傷・劣化が少ないのは、運転時間が245時間と短いためと考えられる。

(3) PFPE-D含浸保持器を用いた軸受

図4-26は、保持器表面の油を除去した保持器を組み込んだ軸受試験 (試験番号A-PF-D1) 後の軸受の外観で

ある。フロント側軸受 (R-26) の内外輪、玉、保持器には、いずれにも黒色または茶褐色の付着物が認められた。リア側軸受 (R-27) では付着物はさらに少ない。両軸受ともにこれらの付着物を拭き取ると、目視では試験前と同様のきれいな金属光沢を示し、しゅう動痕がほとんど認められない。

図4-27は、内外輪、玉の転走面の真円度、及び内外輪のR形状である。両軸受ともに玉には摩耗によると思われる2カ所の凹みが認められ、凹み量はフロント側で大きい。内外輪には真円形状の崩れが観察され、リア側

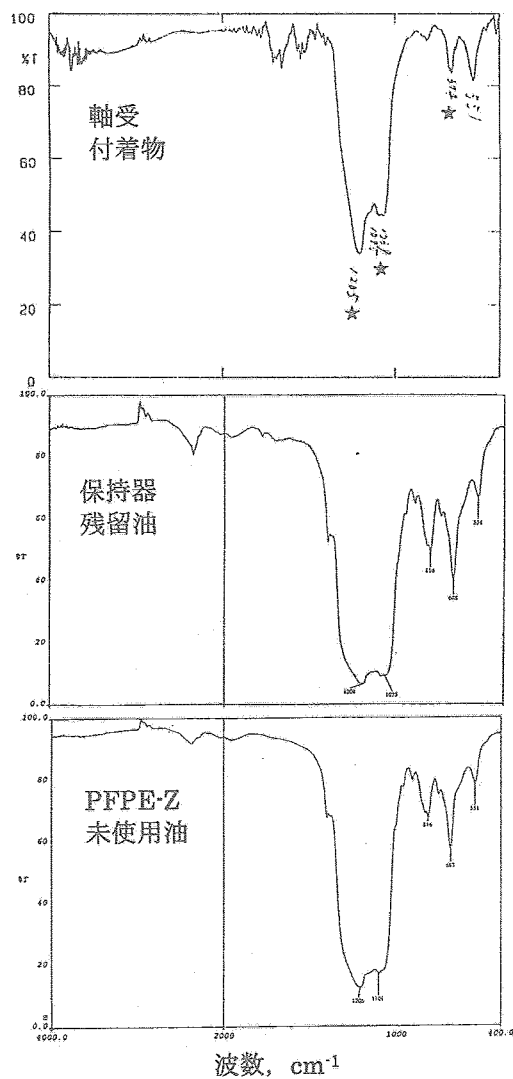


図4-21 軸受付着物, 保持器残留油のFTIR分析結果
(PEPE-Z油含浸保持器の軸受)

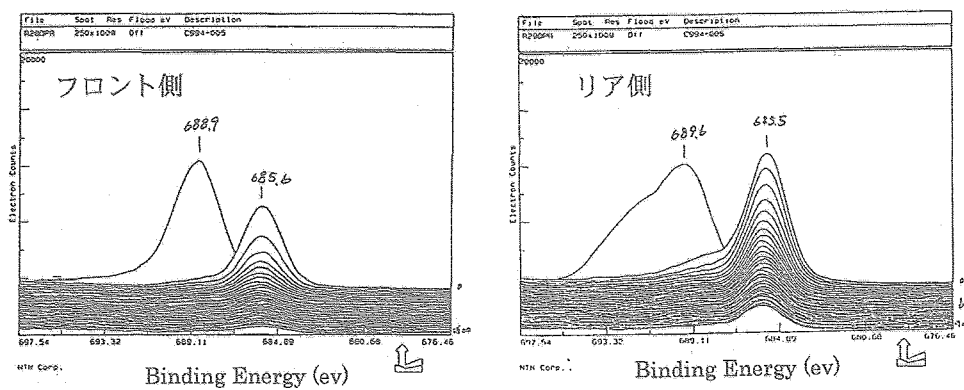


図4-22 玉表面のXPS分析結果 (PEPE-Z油含浸保持器の軸受)

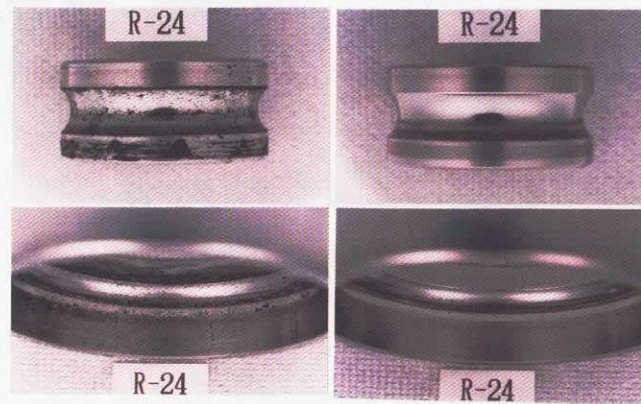


図4-23 試験後の軸受外観 (PEPE-Z6油含浸保持器の軸受)
(a)フロント側内外輪

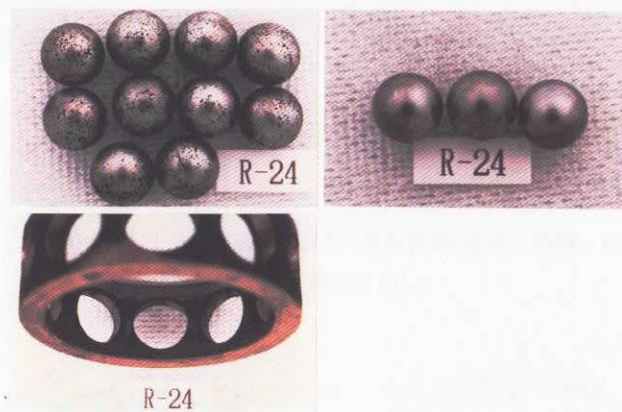


図4-23 試験後の軸受外観 (PEPE-Z6油含浸保持器の軸受)
(b)フロント側玉, 保持器

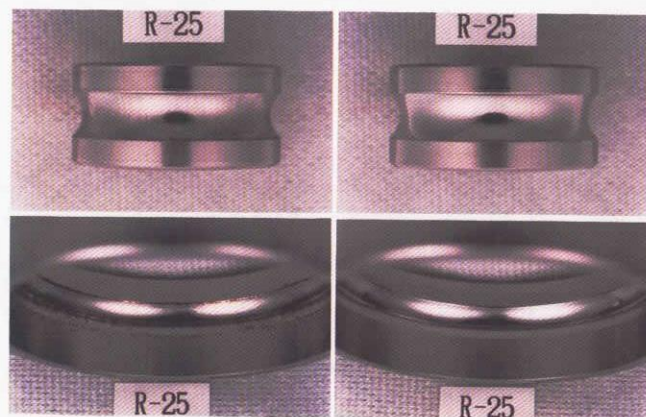


図4-23 試験後の軸受外観 (PEPE-Z6油含浸保持器の軸受)
(c)リア側内外輪

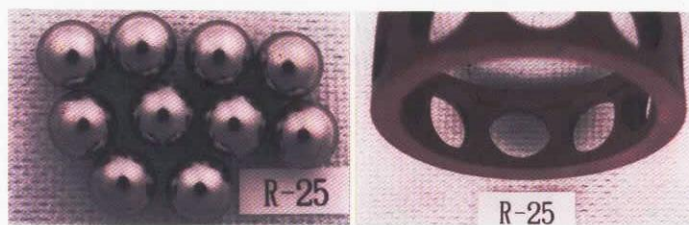


図4-23 試験後の軸受外観（PEPE-Z6油含浸保持器の軸受）

(d) リア側玉, 保持器

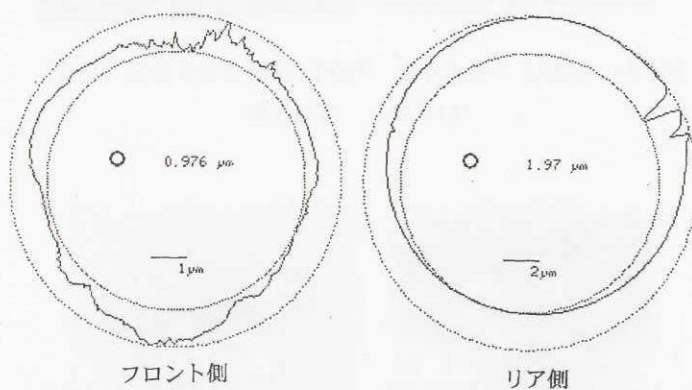


図4-24 軸受の形状検査結果（PEPE-Z6油含浸保持器の軸受）

(a) 玉の真円度

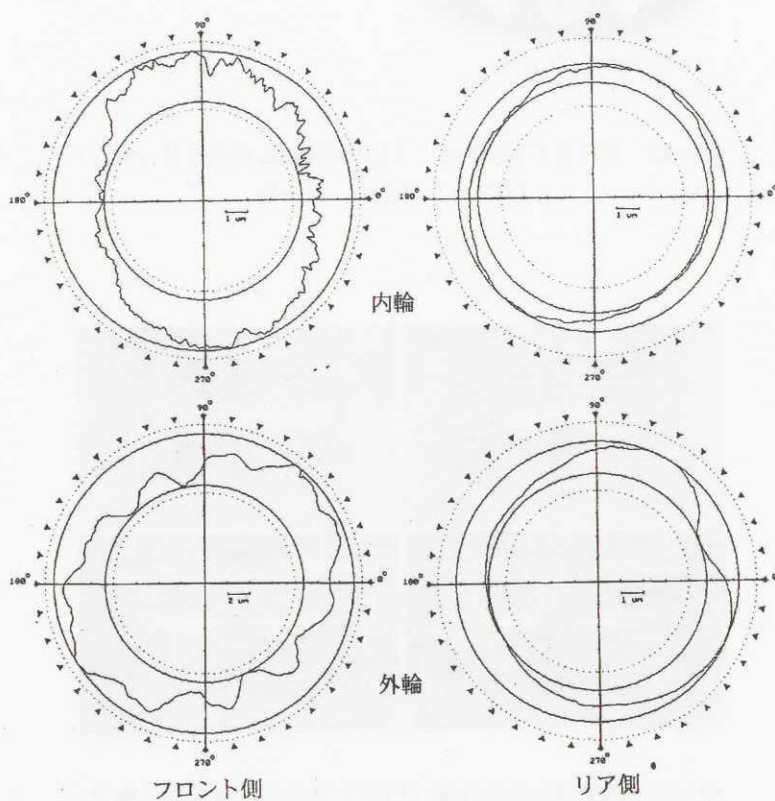


図4-24 軸受の形状検査結果（PEPE-Z6油含浸保持器の軸受）

(b) 内外輪の真円度

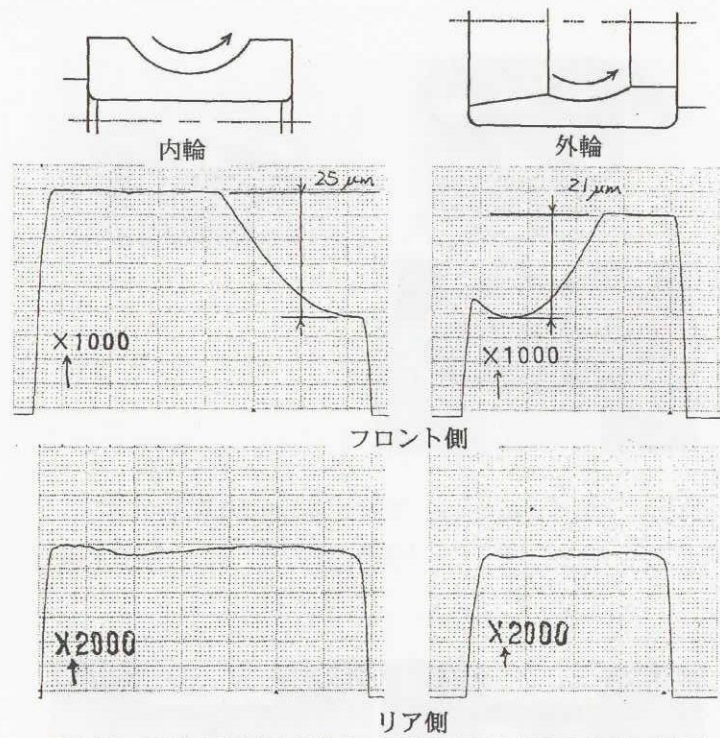


図4-24 軸受の形状検査結果 (PEPE-Z6油含浸保持器の軸受)
(d)内外輪のR形状

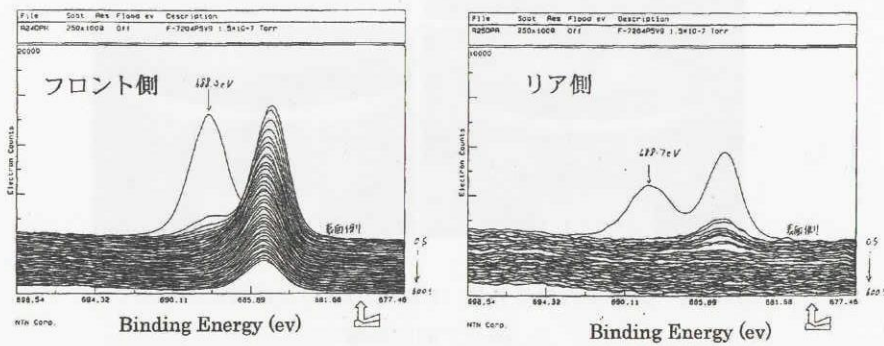


図4-25 玉表面のXPS分析結果 (PEPE-Z6油含浸保持器の軸受)

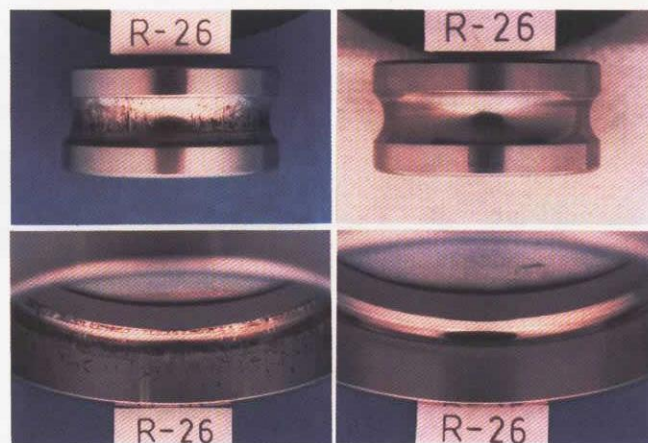


図4-26 試験後の軸受外観 (PEPE-D油含浸保持器の軸受)
(a)フロント側内外輪

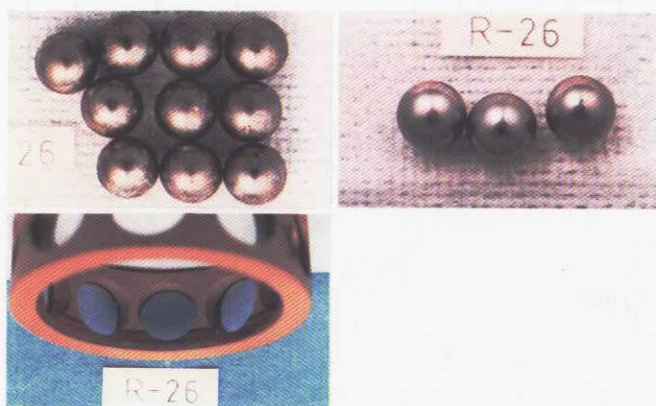


図4-26 試験後の軸受外観（PEPE-D油含浸保持器の軸受）
(b)フロント側玉，保持器

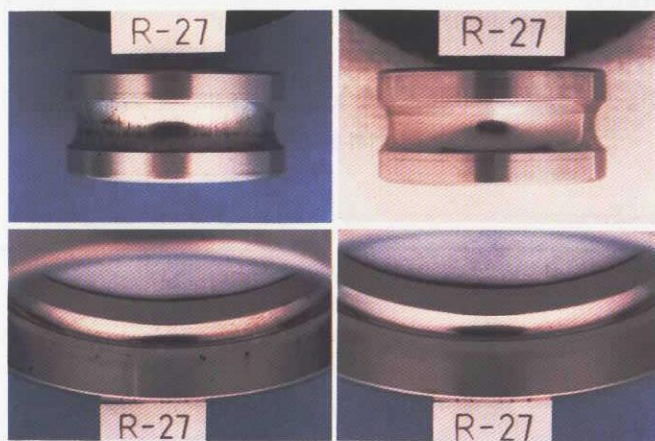


図4-26 試験後の軸受外観（PEPE-D油含浸保持器の軸受）
(c)リア側内外輪



図4-26 試験後の軸受外観（PEPE-D油含浸保持器の軸受）
(d)リア側玉，保持器

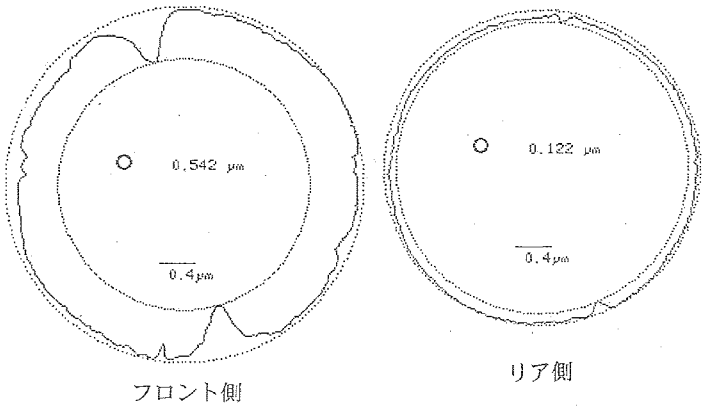


図4-27 軸受の形状検査結果 (PEPE-D油含浸保持器の軸受)
(a)玉の真円度

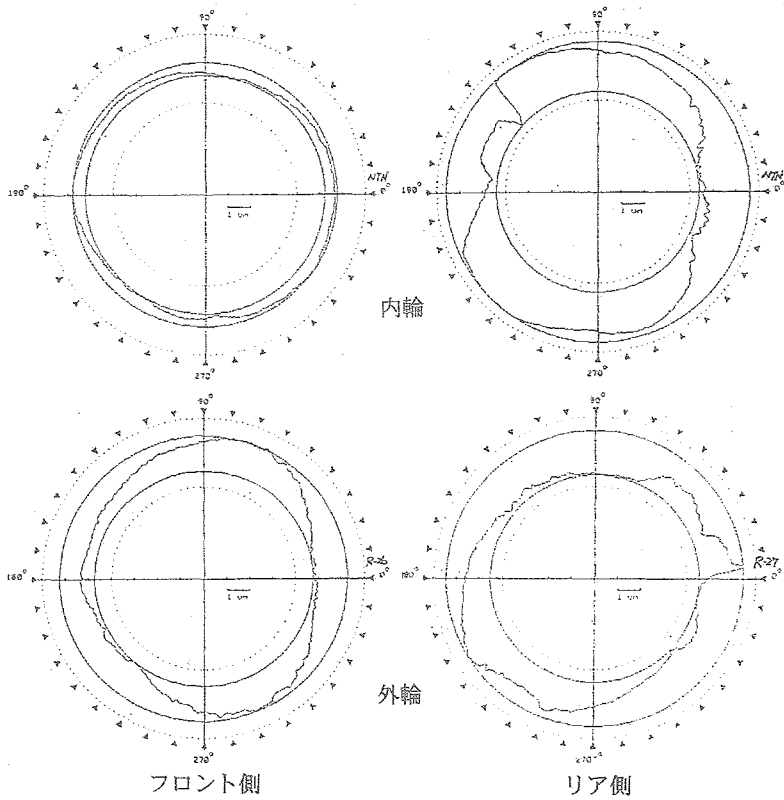


図4-27 軸受の形状検査結果 (PEPE-D油含浸保持器の軸受)
(b)内外輪の真円度

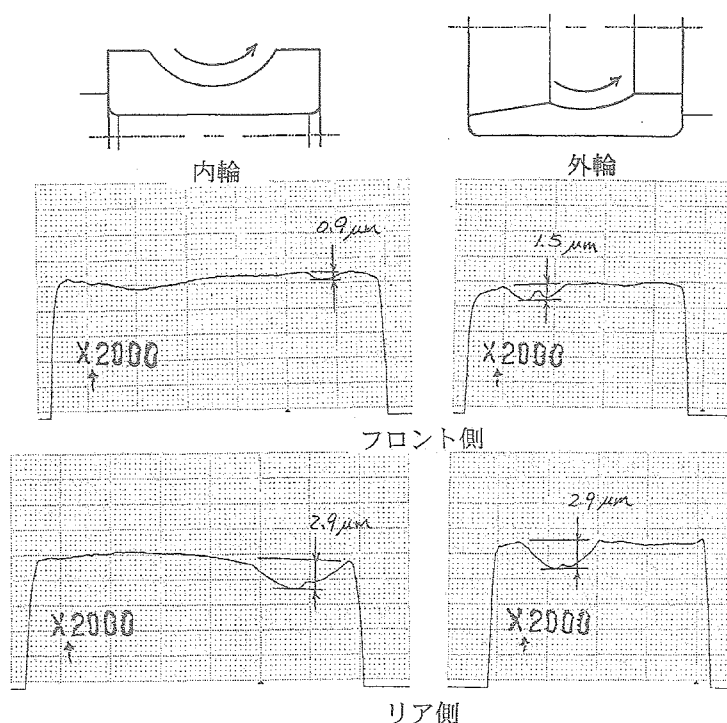


図4-27 軸受の形状検査結果 (PEPE-D油含浸保持器の軸受)

(c)内外輪のR形状

軸受 (R-27) で真円度が大きい。これに対応してR形状では、リア側軸受内外輪に約 $3\mu\text{m}$ の摩耗が認められた。この軸受は916時間運転されており、PFPE-Zで潤滑した軸受と比較すると運転時間が約1/8と大幅に少ないにもかかわらず内外輪の摩耗が進んでいた。

図4-28～図4-32は、表面が油で濡れた状態の保持器を組み込んだ軸受試験 (試験番号A-PF-D2) 後の軸受の検査結果である。図4-28に示した内外輪、玉、保持器は付着物を拭き取る前の外観であるが、いずれの部品も付着物がごくわずかに認められる程度で、きれいな表面状態であった。図4-29に玉・内外輪の真円度、内外輪のR形状を示す。両軸受ともに玉には摩耗による凹みが認められ、リア側の摩耗の方が大きい。内外輪の真円度形状でも特にリア側の外輪で真円からの崩れが大きく、R形状でもリア側の外輪の摩耗が約 $2\mu\text{m}$ とやや大きかった。外輪は回転精度の劣化 (表4-2参照) も認められ、軸受の損傷はリア側の外輪に集中している。この部分で潤滑油不足となり、摩擦トルクの増大、潤滑油の劣化の主たる原因となっていたことが想定される。ただし、図4-11の軸受外輪温度の推移には、フロント側とリア側でほとんど相違は認められず、この程度の摩耗状態の差は外輪温度には反映されないようである。

保持器表面の油を除去した軸受 (図4-26, 27) に比べると、ほぼ同等の試験時間であるが、軸受には付着

物が少なくきれいな外観を示し、全般に軸受の状態は良好である。運転初期に表面に潤滑油を多量に存在させると、寿命増大にはつながらなかったものの、軸受損傷の軽減には効果があったと思われる。

図4-30は、リア側の保持器に残存していた油のFTIR分析結果で、比較のためPFPE-D油のスペクトルも示した。赤外吸収スペクトルが未使用のPFPE-D油とほぼ同じであり、油の劣化は認められない。一方、図4-31はリア側の軸受転走面に残存していた油をガスクロマトグラフィーで分析した結果である。横軸のリテンションタイムが小さい位置にピークが現れており、沸点が低い低分子量成分の分解生成物が含まれていることを示している。図中に挿入したグラフはリテンションタイム約8分の物質のマススペクトルを測定した結果で、118, 147, 168にピークが認められた。これらは C_2F_5 (119), $\text{C}_3\text{F}_5\text{O}$ (147), C_3F_7 (169)に由来すると推定され、転走面では摩擦作用によりPFPE-D油が分解していたことが確認された。これらの分解生成物が試験中にアウトガスとして観測されたことになる。

図4-32は、ボールのXPS分析結果である。最表面では結合エネルギー約689eVの位置にピークが現れ、PFPE油が存在していることが確認された。しかし、その下層ではリア側軸受の玉からは結合エネルギー約685eVの金属ふっ化物の大きなピークが認められたのに対し、フロン

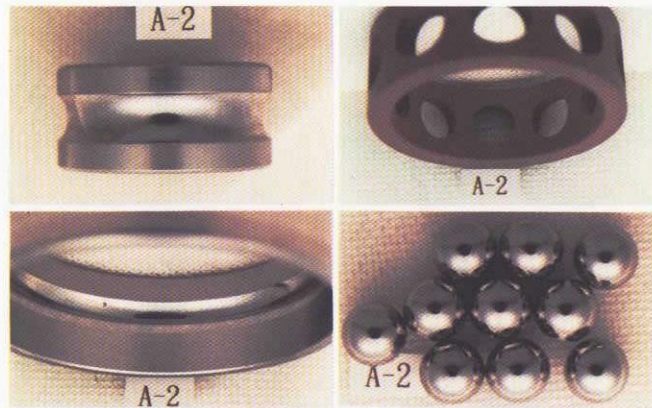


図4-28 試験後の軸受外観 (PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)
(a)フロント側

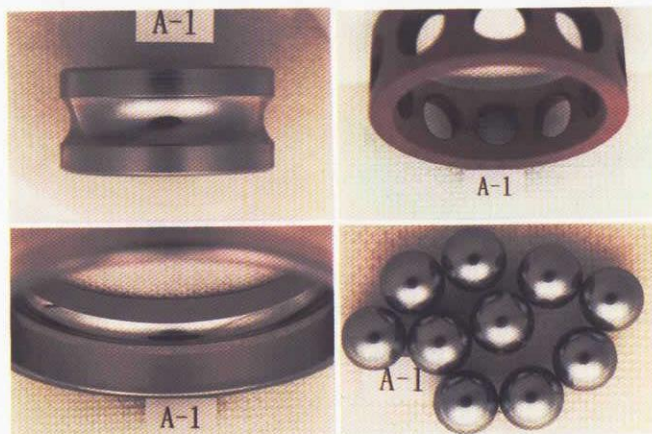


図4-28 試験後の軸受外観 (PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)
(b)リア側

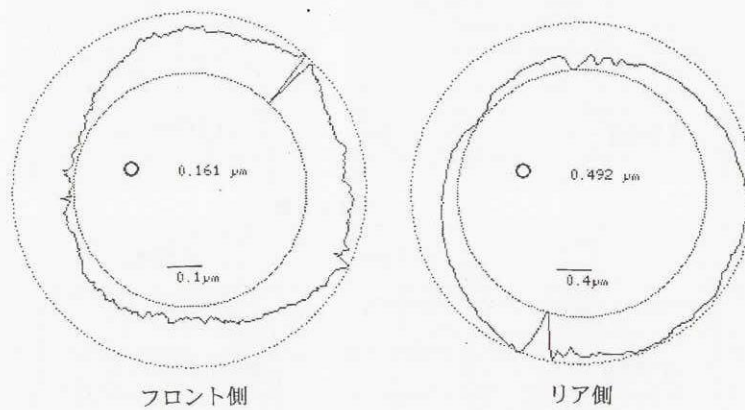


図4-29 軸受の形状検査結果 (PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)
(a)玉の真円度

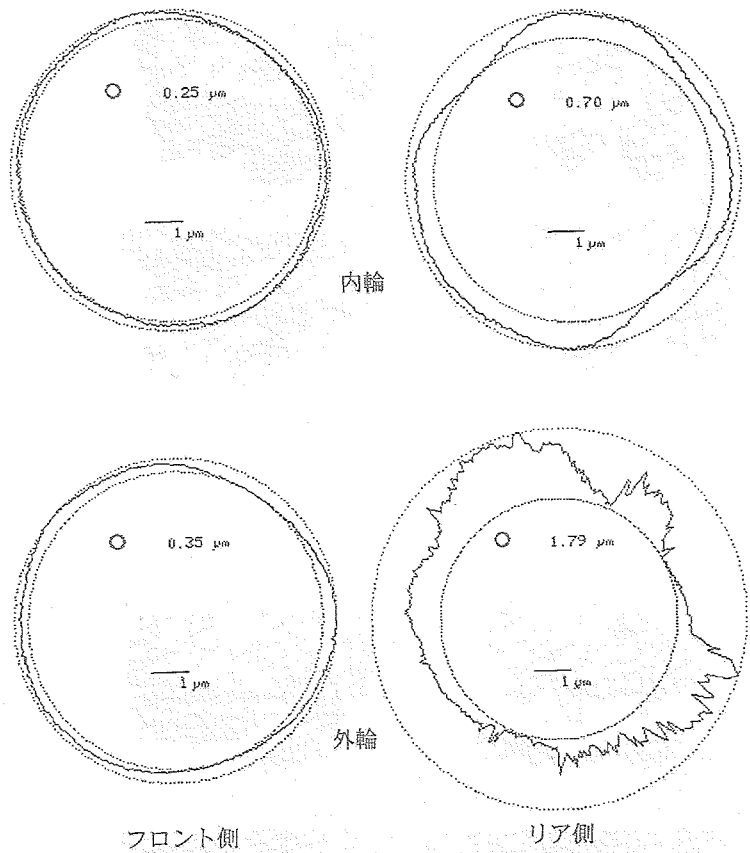


図4-29 軸受の形状検査結果 (PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)
(b)内外輪の真円度

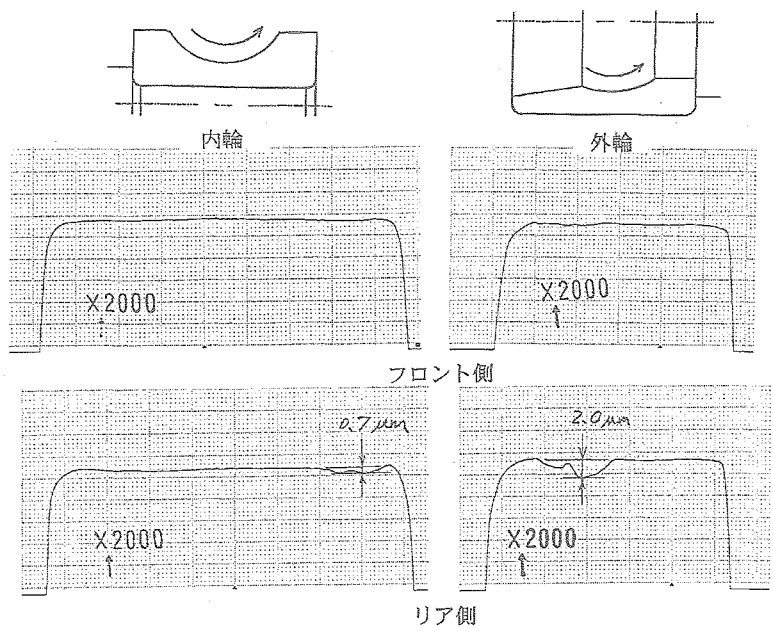


図4-29 軸受の形状検査結果 (PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)
(c)内外輪のR形状

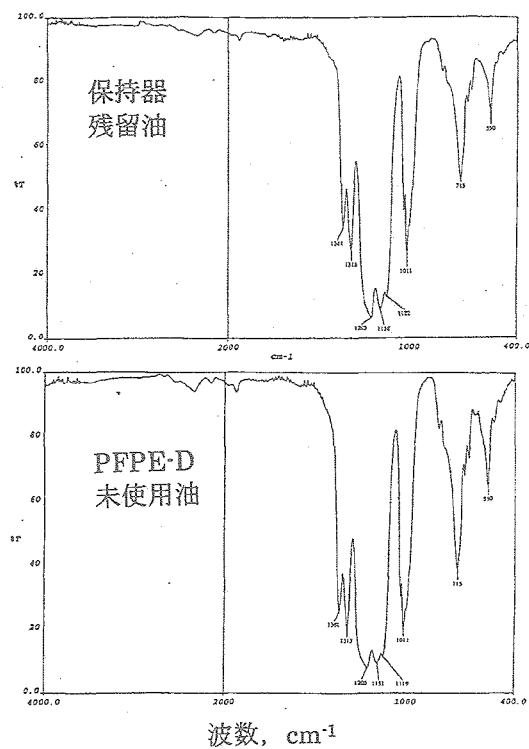


図4-30 保持器残留油のFTIR分析結果
(PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)

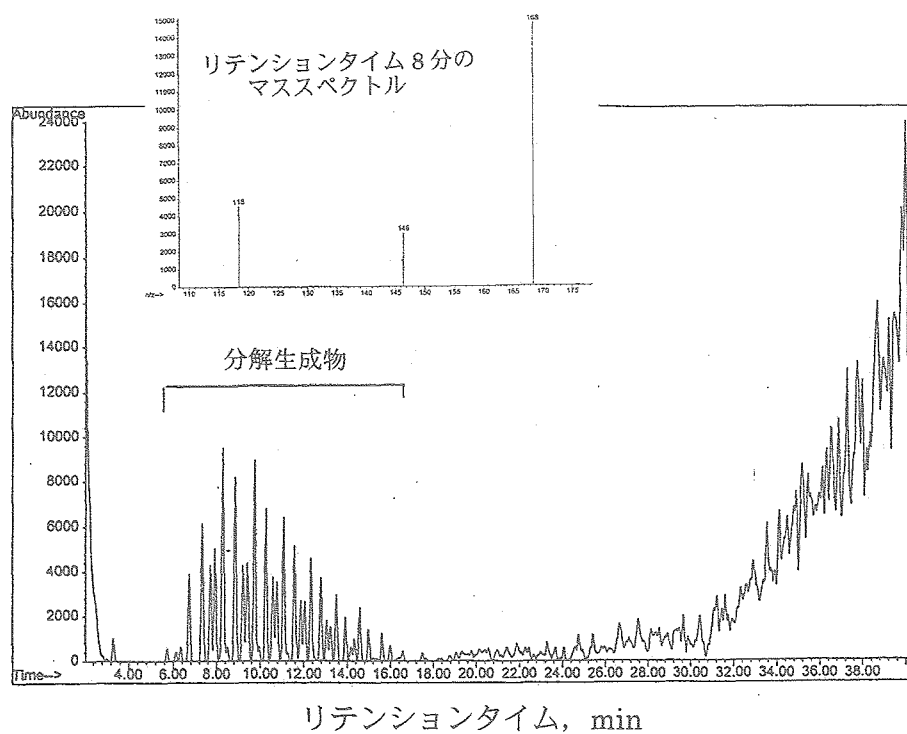


図4-31 転走面残留油のガスクロマトグラフィー分析結果
(PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)

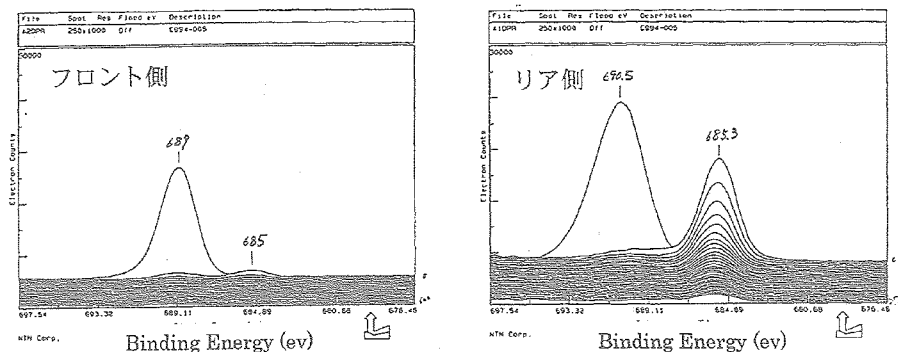


図4-32 玉表面のXPS分析結果 (PEPE-D油含浸wet保持器の軸受)

ト側軸受では金属ふっ化物のピークはきわめて小さく、リア側とは大きな相違がみられた。

これら一連の分析結果は、リア側でPFPE油の劣化が進んでいたことを示している。また、表4-2に示したようにリア側の軸受は摩耗や回転精度の劣化が認められ、PFPE油の劣化により軸受の損傷が大きくなったものと推察される。

(4) MAC-A含浸保持器を用いた軸受

試験後の軸受内外輪、玉、保持器の外観を図4-33に示す。リア側 (A-12) の保持器ポケット部には黒色のしゅう動痕が認められるが、フロント側 (A-11) 保持器ではしゅう動痕もほとんど認められない。内外輪、玉にはリア側、フロント側ともに固形の付着物らしいものはみられず、潤滑油と思われる小さな液滴が観察され、損傷は認められない。図4-34は、玉、内外輪軌道面の真円度、内外輪転走面のR形状である。玉、内外輪ともに真円形状からの崩れは軽微であり、またR形状から摩耗もほとんど認められない。図4-35は、内輪転走面に付着していた油の赤外吸収スペクトルを未使用のMAC-A油を比較した図である。ほとんど同じ位置で吸収が起きており、摩擦を受けたと想定される内輪転走面上の油が劣化していないことが確認された。MAC-A油が劣化していないこと、及び表4-2に示したように回転精度が良好で摩耗もほとんど認められないことから、この軸受はまだ長時間の運転が可能と判断される。

図4-36は、試験後に軸受試験機を分解した際に、2個の軸受外輪を挟み込む形で設置されているハウジング及びハウジング蓋の端面部を撮影した写真である。図4-1に示した試験機の構造から、設計上はどちらかの端面部に外輪端面が接触して軸受・主軸系の軸方向の位置が決められるが、他の端面は軸受には接触しない。図の左側の写真で、液滴がハウジングの奥の端面に点在してい

るのが確認され、右側のハウジング蓋の写真では端面の内径側の面取り部に液滴が点在している。この試験では軸受・主軸系はハウジング蓋の端面で軸方向の位置が決められていたと推定される。観察された液滴は軸受から飛散したMAC-A油と思われ、かなりの量の潤滑油が軸受外に流出していたことがわかる。写真に示した部分以外にもMAC-A油と思われる液滴が付着しているのが確認された。

この軸受では、試験後の保持器の含油量を測定した。試験前に比べ油が残存していた量は、フロント側では86.7%、リア側で84.8%であり、保持器から流出した油量は0.1 cc程度、 $\phi 1$ mmの液滴にすると200個程度と推定された。この量は、ハウジング等に付着していたMAC-A油の液滴にほぼ匹敵すると思われる。すなわち、保持器から流出した油のほとんどが軸受外に流出し、潤滑に寄与する油はきわめて微量であったことを示唆している。それにもかかわらず、この軸受の損傷はきわめて軽微で運転初期を除くと良好な摩擦トルク性能を示した。今回の軸受試験では空孔率の高い保持器材を選定し、かなり多量の油を含浸したが、この実験結果は潤滑に必要な油量はそれほど多くないことを示している。

5. まとめ

代表的な宇宙用液体潤滑剤、及びその候補となる液体潤滑剤のアウトガス特性を調べ、またこれらの潤滑剤を含浸させた保持器を組み込んで軸受試験を行った。得られた知見、及び今後の問題点・課題は以下の通りである。

- (1) MAC-A潤滑の軸受では10,000時間以上の寿命を示したのに対し、試験した3種のPFPE系潤滑油では、最長でもPFPE-Zの約7,800時間、最短はPFPE-Z6の約250時間であった。本実験条件下では、PFPE系潤滑油に比べMAC系潤滑油が良好な特性を示すこと

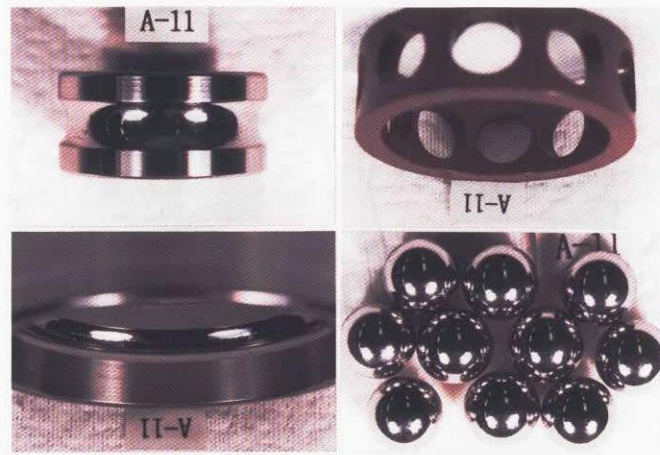


図4-33 試験後の軸受外観 (MAC-A油含浸wet保持器の軸受)
(a)フロント側

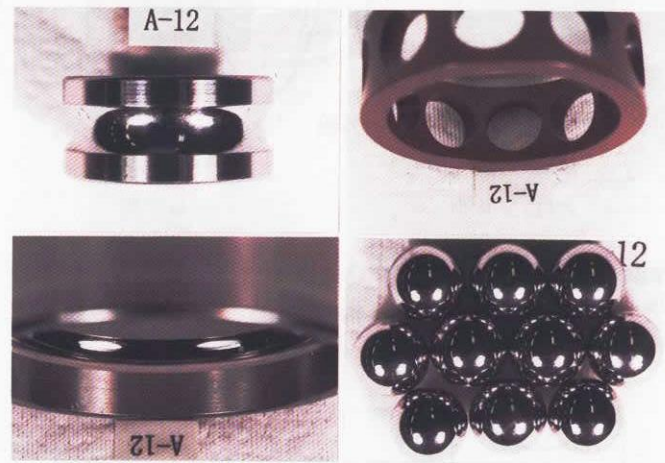


図4-33 試験後の軸受外観 (MAC-A油含浸wet保持器の軸受)
(b)リア側

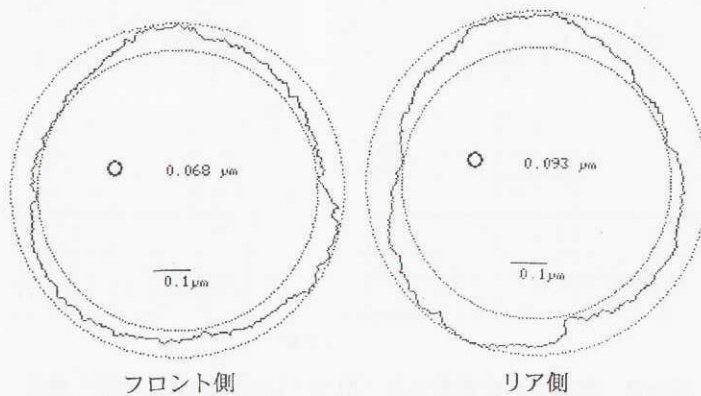


図4-34 軸受の形状検査結果 (MAC-A油含浸wet保持器の軸受)
(a)玉の真円度

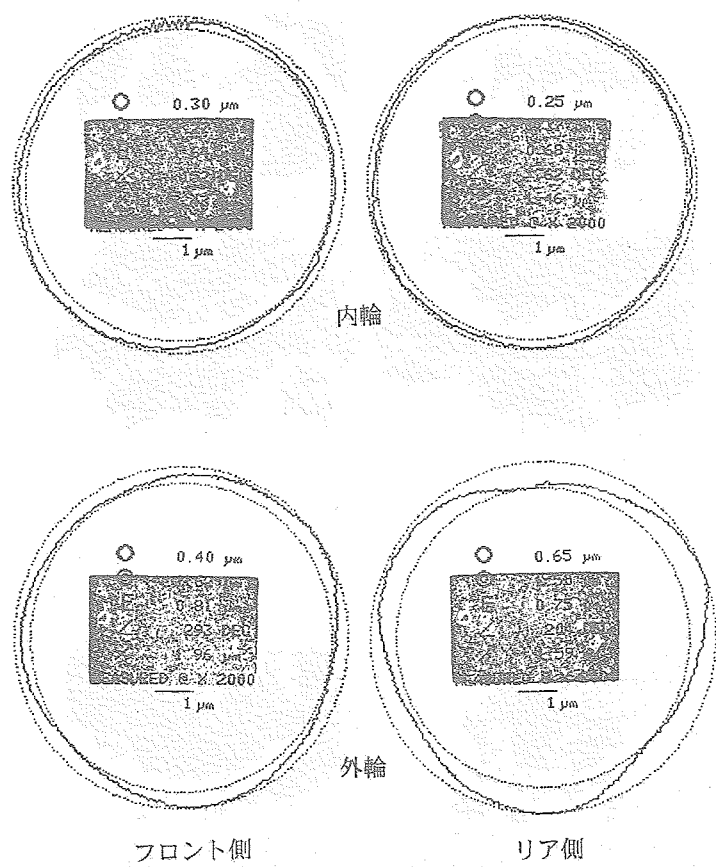


図4-34 軸受の形状検査結果 (MAC-A油含浸wet保持器の軸受)
(b)内外輪の真円度

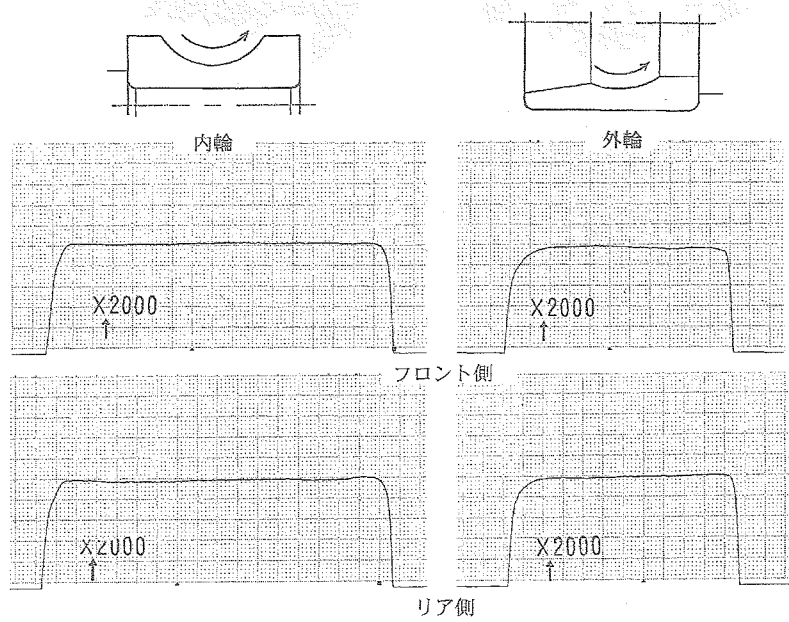


図4-34 軸受の形状検査結果 (MAC-A油含浸wet保持器の軸受)
(c)内外輪のR形状

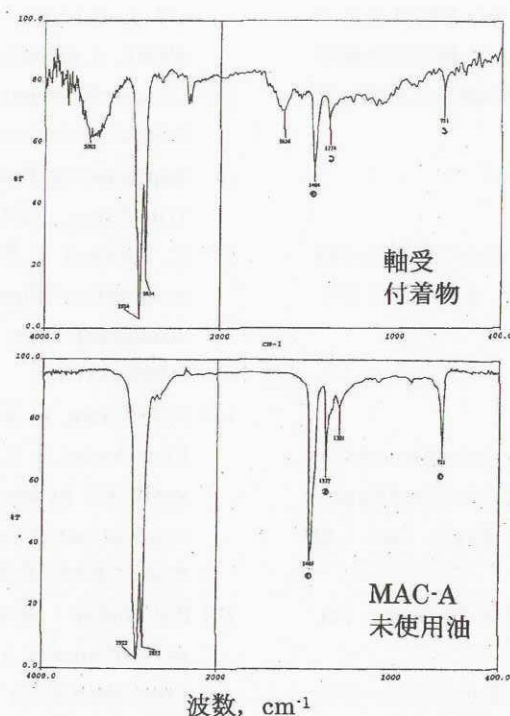


図4-35 軸受付着油のFTIR分析結果 (MAC-A油含浸wet保持器の軸受)

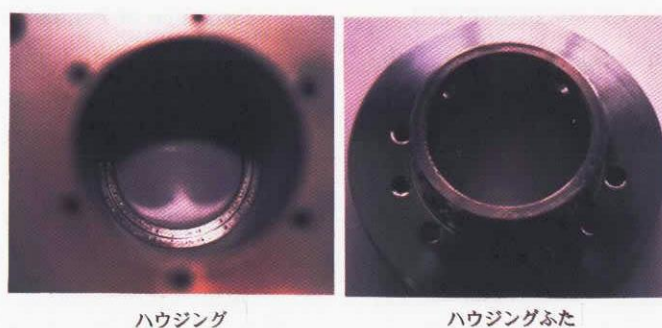


図4-36 試験後の軸受ハウジング外観

が確認された。ただし、MAC-A潤滑では運転初期の摩擦トルク変動がPFPE系潤滑油に比べ大きく、潤滑油が軸受内の必要な部分に行き渡るまで、すなわちなじみ過程に時間を要することがうかがえる。

- (2) PFPE系の潤滑油では、軸受試験初期から潤滑油が分解したと考えられるCF系、CFO系のアウトガスピークが検出された。境界潤滑状態であったと考えられ、その結果、摩擦トルクの変動や転走面の摩耗などが生じたと推定される。境界潤滑状態になると油の劣化が急速に進行し、トライボロジー特性が大幅に劣化することが確認された。実用的には、過酷な運転条件を避けるように使用条件を設定することが重要であろう。

- (3) 境界潤滑状態となった要因は、運転中に潤滑油が転走面の外へ流出し潤滑油不足となったためである可能性が高い。今回の試験では、保持器の含油量を増やしても転走面へ潤滑油が適切に供給されないことを確認できた。油飛散防止のためのシールドや、転走面から潤滑油が表面上を拡散して流れ出す現象（クリープ）を防ぐためのバリアーコーティングを施すなどの対策とともに、保持器への油の含浸法を含め、保持器から転走面に常に潤滑油を供給できる方策を検討する必要がある。
- (4) 今回の試験条件は、油潤滑としてはそれほど過酷とは思われないが、摩擦トルク特性は固体潤滑の方が優れていた。この原因は境界潤滑状態であったため

と思われる。液体潤滑の使用領域を拡大するためには、潤滑油の高圧粘度のデータ取得などEHL条件での潤滑性能の系統的な把握とともに、極圧添加剤や摩擦調整剤など油に適した添加剤の開発が必要と思われる。

謝辞

試験に使用した試験軸受、潤滑油、および試験後の軸受検査は、NTN(株)にお世話になった。末筆ながら厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) P.D. Fleischauer & M.R. Hilton : Assessment of the Tribological Requirements of Advanced Spacecraft Mechanisms, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 140 (1989) 9.
- 2) E.V. Zaretsky : Liquid Lubrication in Space, Tribology International, 23, 2 (1990) 75.
- 3) W.R. ジョーンズ: 宇宙機器用フッ素化ポリエーテルの性状, トライボロジスト, 39, 9 (1994) 752.
- 4) P.L. Conley & J. Bohner : Experience with synthetic fluorinated fluid lubricants, 24th Aerospace Mechanisms Symp., NASA CP-3062 (1990) 213.
- 5) R.L. Fusaro : Lubrication of Space Systems, Lub. Eng., 51, 3 (1995) 182.
- 6) 森誠之: 超高真空中における境界潤滑下の表面反応, トライボロジスト, 36, 3 (1991) 175.
- 7) D.J. Carre : Perfluoropolyalkylether Oil Degradation : Influence of FeF₃ Formation on Steel Surfaces under Boundary Conditions, ASLE Trans., 29,2 (1986) 121.
- 8) W.R. Jones Jr., O.O. Ajayi & L.D. Wedeven : Enhancement of perfluoropolyether boundary lubrication performance, Lub. Eng., 53, 6 (1997) 24.
- 9) M. Masuko, N. Takeshita & H. Okabe : evaluation of Anti-wear performance of PFPE-soluble Additives under Sliding Contact in High Vacuum, Trib. Trans., 38, 3 (1995) 679.
- 10) C. G. Venier & E. W. Casserly : Multiply-alkylated cyclopentanes (MACs): A new class of synthesized hydrocarbon fluids, Lub. Engrs., 47, 7 (1991) 586.
- 11) C. G. Venier, E. W. Casserly & S. Gunsell : Tris (2-octyldodecyl) cyclopentane, a Low Volatility, Wide Luquid-range, Hydrocarbon Fluid, Proc. 8th Int. Colloquim Tribology 2000, Paper 13-1 (1992)
- 12) P. Prat, P. Vergne & J. Sicre : New Results in High Pressure and Low Temperature Rheology of Liquid Lubricants for Space Applications, Trans. ASME, J. of Tribology, 116 (1994) 629.
- 13) J. Sicre, P. Vergne, P. Prat & M. Pochard : New Considerations on Fluid Lubricants for Spacecraft Applications, Proc. sixth Euro. Space Mech. & Trib. Symp., ESA SP-374 (1995) 169.
- 14) M. Pochard, P. Prat, J. Sicre & P. Vergne : Thermocapillary Migration of Lubricants in Space Environment, Proc. 4th Int. Trib. Conf. (Austrib '94), (1994) 437.
- 15) D.J. Carre, C.G. Kalogeras, S.V. Didziulis, P.D. Fleischauer & R. Bauer : Recent experience with synthetic hydrocarbon lubricants for spacecraft applications, Proc. sixth Euro. Space Mech. & Trib. Symp., ESA SP-374 (1995) pp.177-183.
- 16) Bill Bialke : Space-flight experience and life test performance of a synthetic hydrocarbon lubricant, Proc. sixth Euro. Space Mech. & Trib. Symp., ESA SP-374 (1995) pp.285-291.
- 17) S. Gill & R.A. Rowntree : Interim results from ESTL studies on static adhesion and the performance of Pennzane SHF X-2000 in ball bearings, Proc. sixth Euro. Space Mech. & Trib. Symp., ESA SP-374 (1995) pp.279-284
- 18) S. Gill : A Comparison of the Performance of Linear Ballscrew Devices When Lubricated with Dry and Liquid Lubricants in Vacuum, Proc. 7th Euro. Space Mech. & Trib. Symp., ESA SP-410 (1997) 101.
- 19) P. Prat, M. Suzuki & K. Matsumoto: Combined data of lifetime tests and outgassing experiments for liquid lubricated ball bearings, 8th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, ESA SP-438 (1999) p.239.
- 20) K. Hayashida, K. Yamamoto and M. Nishimura: Wear and degradation characteristics of perfluoroalkylpolyethers (PFPEs) in High Vacuum, Trib. Trans., 37,1 (1994) 196.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-03-014

発行日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

