

機構部品の研究

Research on Mechanical Parts

油潤滑軸受のトライボロジー特性に関する研究

Study on Tribological Characteristics of Oil-Lubricated Bearings

マテリアル・機構技術グループ 今川 吉郎 佐々木 彰 宮馬 浩 小原 新吾 田中 康夫
システム誘導技術グループ 市川 信一郎 井澤 克彦

Mechanical and Materials Engineering Group

Kichiro Imagawa, Akira Sasaki, Hiroshi Miyaba, Shingo Obara and Yasuo Tanaka

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

Shinichiro Ichikawa and Katsuhiko Izawa

Abstract

This paper describes three topics for the study on oil-lubricated ball bearings and a space lubricant. Firstly, in-situ measurement of oil film thickness during bearing operation was achieved by LIF method. The film thickness on the raceway was decreased by continuous ball passing, and, finally, very thin film of just $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ contributed to bearing lubrication. Secondly, a clouding phenomenon of MAC oil by UV and low-temperature exposure was investigated. Combination of antioxidants and extreme-pressure additives affected the color stability of MAC. Lastly, we studied the influence of oil-wettability on bearing performance using contact electric resistance method. It was confirmed that the dewetted bearing could form sufficient EHL film and operate under hydrodynamic lubrication.

1. はじめに

油潤滑の特長は、摺動するすきまに油膜が形成される状態（流体潤滑状態）において、0.001近傍の低摩擦が得られ、摩耗も極めて少なくなることにある。これらの特長から、宇宙分野においてもホイールやジャイロなどの精密かつ長寿命を要求される軸受などに適用されている。

ホイール・ジャイロ用軸受と一般産業用軸受との最大の相違点は、前者が後者に比較して極めて少ない油量で潤滑性能を維持しなければならない点にある。ホイール・ジャイロ用軸受の油量は、摩擦損失と寿命とのバランスを考慮して設定されるが、給油された油のうちのどの程度が玉と転走面との潤滑に寄与しているかが明らかになっていないため、多数の試験評価が必要となっている。さらには、転がり軸受の摩擦トルク上昇に関する不具合解析においても、原因が油量不足と推測されても、その測定法がないために実験的な検証は多くの場合不可能である。このように、限られた油量で長寿命・高精度が要求される宇宙用転がり軸受に対しては、運転中の軸受内部の油分布状態に関する知見と、潤滑メカニズムの解明が強く求められている。

宇宙用の潤滑油については、1970年代から使用されてきたフッ素系合成油 PFPE（Perfluoropolyethers）や鉱油に代わり、1995年ごろより炭化水素系合成油 MAC（Multiply-Alkylated Cyclopentane）が急速に採用されてきており、大きな変革の時期を迎えている¹。MACは、低蒸気圧でかつ添加剤を溶解可能な油であり、PFPEと鉱油の特長を併せ持つ潤滑油といえる。真空中での優れた摩擦・摩耗特性は平成14年度の本研究においても明らかになっており、今後の国産ホイール、減速歯車、角度検出器に対してはMACまたはこれを基油としたグリースを適用していく予定である。しかし、MACについては、最近のホイールの開発過程において、油の白濁化や軸受球の表面が油をはじく現象（Dewetting）など、従来の油では経験していない現象が観察されている。MACの採用にあたっては、最適な添加剤を選択するとともに、MACに特徴的な現象について、解決または潤滑特性に影響を与えないことの確認が必要である。

本研究は、主に国産ホイールの開発及び信頼性向上に寄与するため、転がり軸受内部の油の挙

動や潤滑メカニズムを明らかにすること、並びに、MAC を中心とした宇宙用潤滑油に関する摩擦・摩耗特性や濡れ性等の諸特性を取得・蓄積していくことを目的としており、東京工業大学大学院理工学研究科中原綱光教授及び益子正文教授との共同研究のもと平成14年度より実施しているものである。

2. 研究の概要

平成15年度は以下の項目について研究を行った。

(1) アンギュラ玉軸受の油膜厚さに関するその場計測

(共同研究「宇宙用油潤滑軸受の評価技術の研究」成果：東工大中原研究室)

蛍光剤を溶解した潤滑油にレーザを照射させてその発光量を測定する LIF 法 (Laser Induced Fluorescence 法、レーザ誘起蛍光法) を適用することにより、回転中のアンギュラ玉軸受の転走面油膜厚さを、およそ $0.1\mu\text{m}$ の精度で測定することが可能となった。鉱油を使用した試験の結果、転走面上に常時存在する油膜の厚さは $0.1\mu\text{m}$ オーダであり、極めて薄い状態となっている可能性が高いことが明らかとなった。

(2) MAC の変色に対する原因究明と対策

(共同研究「宇宙用潤滑油のトライボロジー特性に関する研究」成果：東工大益子研究室)

炭化水素系合成油が紫外線または低温環境において変色するという課題に対し、原因の究明と対策の提案を行った。紫外線による変色の原因はアミン系酸化防止剤の添加であり、一方、低温での変色は、硫黄を含む酸化防止剤とリン酸エステル系極圧添加剤が共存するためであることがわかった。以上の対策として、新たなフェノール系酸化防止剤を選定し、変色防止に有効であることを確認した。本成果は、開発中の国産ホイールの潤滑油に反映された。

(3) MAC の Dewetting 現象の軸受に対する影響

ホイール用軸受に Dewetting が発生した場合でも、玉／内外輪間に油膜が形成されているかを、軸受内外輪間の接触電圧を計測することにより確かめた。その結果、ホイールの最大加減速条件においても、Dewetting を発生している軸受は流体潤滑膜を形成することが確認された。さらに、濡れ状態にある軸受 (Wetting 軸受) と比較した場合、Dewetting 軸受が玉／内外輪間の油膜形成に与える影響は小さいことが明らかとなった。

3. 成果の概要

(1) アンギュラ玉軸受の油膜厚さに関するその場計測

回転中にある玉軸受の転走面上の油膜厚さを知ることは、摩擦トルクと寿命とをバランスした最適油量を決定する上で有効であり、また、軸受の数値シミュレーションの精度を著しく向上させることができる。平成14年度の研究においては、構造が比較的単純なスラスト玉軸受に対し、LIF 法を適用することにより、その場油膜厚さ計測が可能であることを示した。平成15年度は、ホイールにも使用される構造が複雑なアンギュラ玉軸受を対象とし、この軸受が微量油量で潤滑された場合の油膜厚さ計測を試みた。

(a) 油膜厚さの計測法

LIF 法はレーザを用いて蛍光物質を励起し、その蛍光強度からレーザ照射範囲内に存在する蛍光物質の量を測定する手法である。アンギュラ玉軸受に対する LIF 法を用いた油膜厚さ計測系を Fig.1-1 に示す。蛍光剤を含んだ油膜にレーザ光を照射すると油膜厚さに応じた強度の蛍光を発することから、この蛍光の強度を測定することで油膜厚さを求めることができる。なお、油膜厚さと蛍光強さとの較正は、静止状態にある軸受外輪を利用し、より分解能が高い白色干渉法を適用することにより行った。

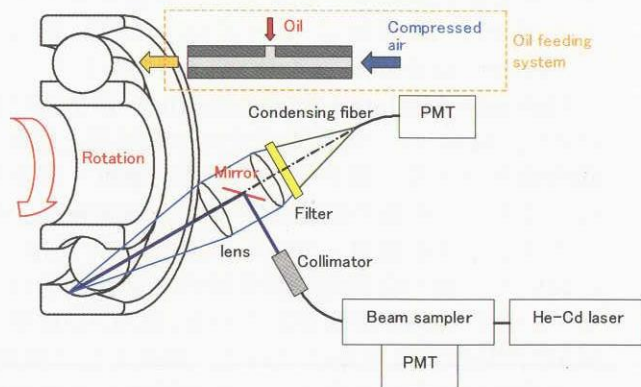


Fig.1-1 LIF measuring system for angular contact ball bearing

(b) 供試軸受及び試験条件

供試軸受は内径 40 mm×外径 80 mm、接触角 30°のアンギュラ玉軸受であり、アキシヤル予圧は 450N とした。潤滑油は鉱油（動粘度 20.49 mm²/s @40℃）を用い、蛍光剤としてクマリン 6 を濃度 7×10^{-4} mol/l で溶解させた。試験中は、オイルエア方式による 0.05ml/h の微量油量での給油を行った。

(c) 実験結果

内輪回転速度 500r/min における計測例を Fig.1-2 に示す。左縦軸の「fluorescence」の出力が油膜厚さに対応し、電圧の高い部分が外輪転走面上の油膜からの蛍光を捕らえた部分である。一方電圧の低い部分は玉の通過にさえぎられて蛍光が観察できなかった部分である。転走面上の油膜厚さは玉の近くを除いてほぼ一定になっていることがわかる。

Fig.1-3 に、内輪回転速度 500r/min でのオイルエア給油状態及び給油停止後の油膜厚さを示す。給油中の油膜厚さは 0.1~0.2 μm 程度の間で大きく変動している。一方、給油停止後は 0.1 μm 前後で微動しており、4 時間以上経過してもほぼ同様な油膜厚さを維持していることがわかる。

内輪回転速度に対する油膜厚さを Fig.1-4 に示す。この計測は、給油停止後の定常的な油膜厚さを表しており、1 条件に対し 6 回以上計測を行っている。油膜厚さは、回転速度とともに増加し、250~1000r/min の範囲ではおよそ 0.1~0.25 μm となっていることがわかる。この油膜厚さは、玉/内輪間に形成される弾性流体潤滑膜の厚さと同じオーダーであり、転走面上には極めて微量の油しか存在していない可能性が高い。

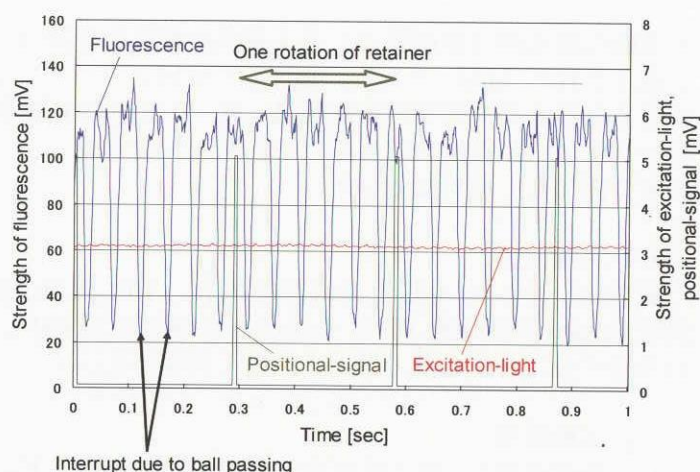


Fig.1-2 Fluorescence from the raceway (500r/min)

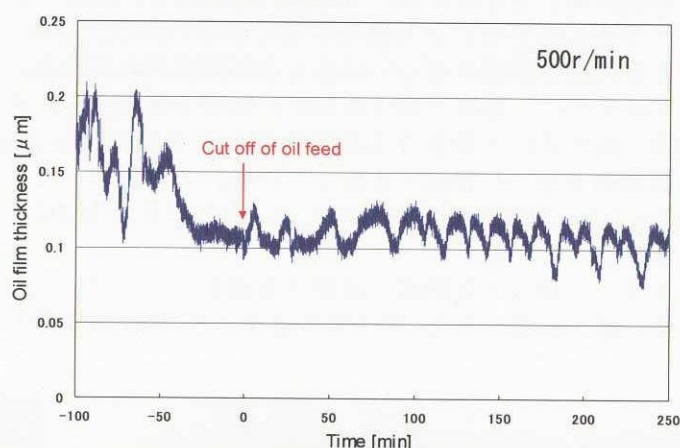


Fig.1-3 Oil film thickness before and after the cut off of oil feed

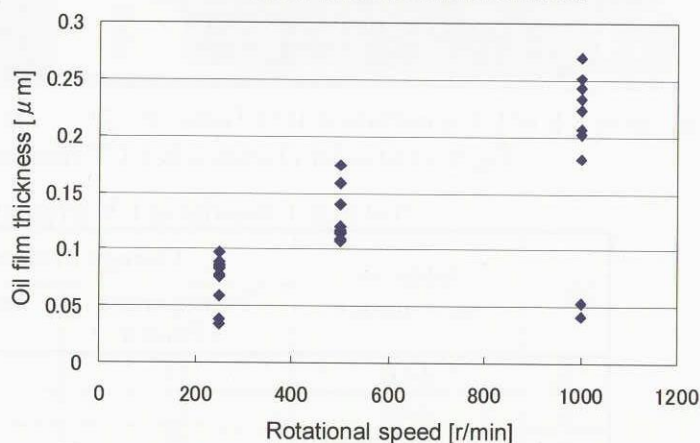


Fig.1-4 Oil film thickness vs rotational speed

(2) MAC の変色に対する原因究明と対策

海外オイルメーカより購入した MAC が保管期間中に白濁化するという現象が確認された。再現性を確認したところ、油の変色は紫外線環境と低温環境において顕在化してくることが明らかとなった。本研究では、MAC の変色に対する原因の究明と対策の提案を行った。

(a) 試料油

白濁を生じた油は、2 種類の酸化防止剤（アミン系酸化防止剤（添加剤 A）、含硫黄フェノー

ル系酸化防止剤（添加剤 B）と 1 種類の極圧添加剤（リン酸エステル系極圧添加剤（添加剤 T）が添加された MAC である。添加剤が原因となっている可能性があることから、白濁を生じた油に含まれるものと同等の添加剤 A、B、T と、添加剤 B とほぼ同様な化学構造をもち硫黄を含まないフェノール系酸化防止剤（添加剤 C）を準備し、これらを基油である MAC に種々の組み合わせで添加し、試料油とした。

(b) 実験方法

実験は、サンプル瓶に試料油を入れ、40℃の恒温槽で一定温度に保ちながら上面より波長 280-315nm の紫外線 (UV) を最大 16 時間まで照射し、その後油の色を観察した。また、0~6℃に保管することにより、低温の影響も評価した。

(c) 実験結果

UV 照射直後と、続く低温保管後での油の状態を Fig.2-1 に示す。UV 照射により褐色または白色へ変化する可能性があること、さらに、低温保管により特に白濁化が進むことがわかる。Table 2-1 は実験結果をまとめたものである。これより、褐色への変化は添加剤 A により、白濁化は添加剤 B と T との組合せにより発生することがわかる。なお、白濁化については、添加剤 B の低溶解性による析出も原因となっていることが確認されている。

本研究では、基油と極圧添加剤の影響を確認するため、Table 2-1 の組合せ以外にも、MAC と同様の飽和炭化水素系合成潤滑油である PAO (Poly-Alpha-Olefin) や、他のリン酸エステル系極圧添加剤を用いた評価も実施している。その結果、これらの基油と極圧添加剤を用いた場合でも Table 2-1 と同様な変化が認められ、油の変色が MAC と添加剤 T の特有の現象ではないことが明らかとなっている。

ホイール等の宇宙機器へ適用する油については、化学的安定性と製造工程管理の面から、変色しない油が必要である。本研究の結果より、酸化防止剤 C と極圧添加剤 T の組合せが推奨される。



(a) After 3 h of UV irradiation (Oil Temp. 40°C)

(b) After cold storage at 5°C for 12 h

Fig.2-1 Oil color change after UV irradiation and cold storage

Table 2-1 Results of UV irradiation experiments

No.	Additive combination	Change in oil color		Remarks
		Transparent → Brown	Transparent → White	
1	A+B	○	△	
2	A+C	○	—	
3	A+T	○	—	
4	B+T	—	○	
5	C+T	—	—	Recommendable
6	A+C+T	○	—	
7	A+B+T	○	○	Commercially available

○ : Changed, — : Unchanged, △ : Not clear

A : Amic antioxidant

B : Phenolic antioxidant with sulfur

C : Phenolic antioxidant without sulfur

T : Phosphoric ester extreme-pressure additive

(3) MAC の Dewetting 現象の軸受に対する影響

MAC で潤滑された玉軸受の Dewetting 現象は、窒素中よりも真空中において、一定回転よりもゼロクロス（正転逆転運動）で発生しやすい傾向がある。原因については、これまでのところ明らかとなっていない。本研究では、Dewetting を発生した場合でも、玉と内外輪との間に油膜が形成されるかを、軸受内外輪間の接触電圧を計測することにより確認した。

(a) 供試軸受

供試軸受として、内径 15mm×外径 32mm の 2 組の組合せ軸受 BRG1 及び BRG2 を用いた。玉及び内外輪転走面の表面粗さは $Ra\ 0.02\ \mu m$ 以下である。これらの軸受は、いずれも真空中でのゼロクロス試験により、全ての玉表面がすでに Fig.3-1 のような Dewetting を発生している軸受である。潤滑油はリン酸エステル系極圧添加剤を含む MAC である。



Fig.3-1 Ball surface before the test

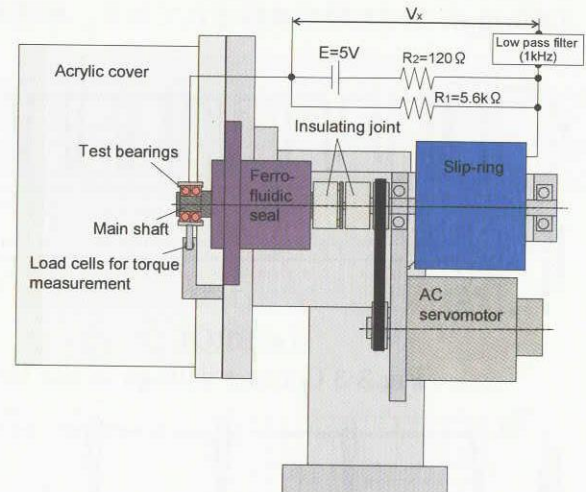


Fig.3-2 Test apparatus

(b) 試験内容

(b-1) 試験装置

本研究では、玉と内外輪との油膜形成は、外輪と内輪の間に電圧をかけ、この導通の状態を確認する（接触電気抵抗法）。軸受試験装置を Fig.3-2 に示す。本試験では、油膜内放電を防止するため、接触電圧をより小さい 49mV に設定した。

(b-2) 試験条件

試験は、国産ホイールに対し規定されている最大角加速度によるゼロクロス試験とした。試験条件を以下に示す。

- ①速度範囲：N=±300r/min（ゼロクロス 400 回）、N=±3200r/min（ゼロクロス 100 回）

ゼロクロス回数は、軸受ホルダ表面温度が定常となる回数を設定

- ②雰囲気：BRG1 については真空（133Pa 以下）、BRG2 については窒素パージ雰囲気で行った。真空中で実施した BRG1 の試験後に全ての玉表面が Dewetting から Wetting 状態に回復していることが確認されたため、続く BRG2 では、Dewetting の状態を試験終了時まで維持できるように、これまでの経験から真空中に比較して玉の濡れ状態に影響を与えにくいと考えられる窒素雰囲気とした。温度は室温（22～26℃）とした。

(c) 試験結果

真空中で回転した BRG1 については、±300r/min 試験に引き続き±3200r/min 試験を実施したところ、試験終了後に全ての玉が Dewetting から Wetting 状態に回復していることが確認された（±300r/min 試験終了時点で玉表面の観察は行っておらず、どの時点で Wetting 状態になったかは断定できない）。また、窒素中で回転した BRG2 では、±300r/min 試験終了時点では全ての玉が Dewetting を維持、続く±3200r/min 試験終了後でも半数以上の玉で Dewetting が残存しており、窒素中の方が玉の濡れ性に影響を与えにくい傾向が見られた。

$\pm 300\text{r/min}$ 試験における内外輪間の接触電圧と回転速度との関係を Fig.3-3 に示す。これらの図において、“Non-contact”は玉と内外輪との間に油膜が形成されている状態（流体潤滑状態）であり、“Contact”は金属接触を生じている状態である。BRG1 では、 $60\sim 90\text{r/min}$ 以上の速度で、BRG 2については $110\sim 130\text{r/min}$ 以上の速度で油膜が形成されている。BRG2 については、試験前後で全ての玉が Dewetting であることが確認されていることから、Fig.3-3(b)の結果は Dewetting での結果を表している。図から読み取った流体潤滑到達速度は、BRG2 が Wetting と仮定した場合に Hamrock-Dowson の理論式^[2]から予測される速度約 100r/min とおおむね一致している。これより、Dewetting が玉／内外輪間の油膜形成に与える影響は小さいと推測される。

$\pm 3200\text{r/min}$ 試験の結果を Fig.3-4 に示す。BRG1 では、およそ $100\sim 250\text{r/min}$ 以上の速度で、BRG 2についても $110\sim 320\text{r/min}$ 以上の速度で油膜が形成されている。BRG2 については、試験期間を通じて Dewetting の玉が存在していた状態であるが、数百 r/min から最大回転速度 3200r/min まで油膜が維持されており、高速域であっても油の枯渇は発生していない。

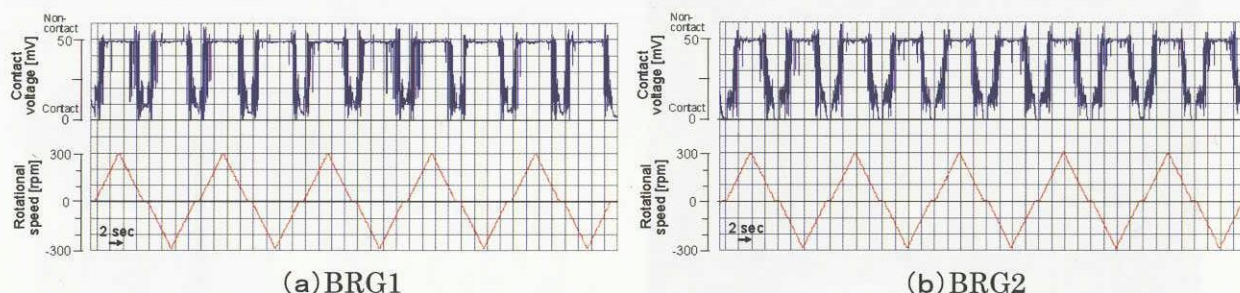


Fig.3-3 Contact voltage in the last 5 cycles of $\pm 300\text{ r/min}$ zero-crossing

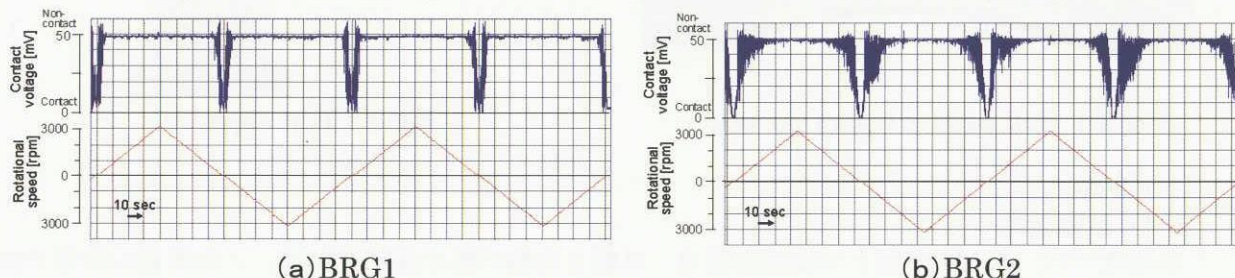


Fig.3-4 Contact voltage in the last 2 cycles of $\pm 3200\text{ r/min}$ zero-crossing

4. まとめ

(1) アンギュラ玉軸受の油膜厚さに関するその場計測

軸受回転中の転走面に形成される油膜厚さのデータは新たな知見であり、最適油量の設定や加速試験の可能性を検討する上で有益である。今後は、計測技術について測定精度を向上させ、転走面の油膜形成状態と軸受特性とに関するデータを取得していく必要がある。

(2) MAC の変色に対する原因究明と対策

本研究で推奨した新たな添加剤の組合せについては、別途、添加剤の添加量、耐酸化性、耐摩耗性等が評価され、開発中の国産ホイールの潤滑油に反映された。今後は、油の変色メカニズムを検討していく予定である。さらに、宇宙用潤滑油については、より高真空まで対応可能な添加剤が求められており、今後研究を進める必要がある。

(3) MAC の Dewetting 現象の軸受に対する影響

Dewetting 現象が発生した場合でも油膜形成は良好であり、軸受の潤滑特性に対する影響は見られない。MAC は、その優れた耐摩耗性等から総合的に判断して、ホイールに適した油といえる。

[参考文献]

- [1] B. Bialke, “Space-Flight Experience and Life Test Performance of a Synthetic Hydrocarbon Lubricant,” ESA SP-374 (1995) 285.
- [2] B. J. Hamrock and D. Dowson, “Ball Bearing Lubrication,” John Wiley & Sons (1981).