

宇宙用液体潤滑に関する研究 Study on Liquid Lubrication in Space

マテリアル・機構技術グループ 鈴木 峰男、佐々木 彰、宮馬 浩、小原 新吾、田中 康夫
Mineo Suzuki, Akira Sasaki, Hiroshi Miyaba, Shingo Obara and Yasuo Tanaka
Mechanical and Materials Engineering Group
宇宙先進技術研究グループ 野木 高
Takashi Nogi
Advanced Space Technology Research Group
システム誘導技術グループ 市川 信一郎、井澤 克彦
Shinichiro Ichikawa and Katsuhiko Izawa
Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

Abstract

This paper describes three topics for the study on oil-lubricated ball bearings and lubricants in space. Firstly, a numerical study on EHL point contacts with nonuniform inlet film thickness, which results from repeated ball passings, is presented. At high values of speed and viscosity, the central film thickness can decrease with speed and viscosity, which agrees with common experimental experience. Secondly, downsized, high-resolution Laser Induced Fluorescence system for measuring oil film thickness of a ball bearing was developed in TIT/JAXA collaboration. The measurement with the LIF system revealed that the film thickness on the outer-raceway was decreased by repeated ball passings, and, finally, very thin film of approximately $0.4\mu\text{m}$ was left to contribute to bearing lubrication. Lastly, some tribological properties of an ionic liquid were investigated by using a pin-on-disc friction and wear tester. Due to running-in, the coefficient of friction of the ionic liquid decreased with time to a very low value. Wear of the specimens lubricated with the ionic liquid was substantially comparable to that with a paraffin-based oil.

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 近傍の低摩擦係数が得られ、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。このような微少油量条件下では、転動体通過の繰り返しによって接触域の油膜が非常に薄くなり[1]、潤滑性能の低下が懸念されるため、転動体通過の影響を考慮して油膜厚さを精度よく予測できる解析技術の開発が必要である。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どの程度が転動体と転走面との潤滑に寄与しているかは明らかになっていない。さらには、蒸発やクリープ現象によるわずかな損失も油不足につながる。これらの点を明確にするためには、転走面上の潤滑膜厚を正確に予測する技術や計測する技術を確立し、転がり軸受の潤滑メカニズムを明らかにする必要がある。

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、1990 年代半ば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。MAC は、低蒸気圧でかつ添加剤を溶解可能であり、PFPE と鉱油の特長を併せ持つ油といえる。同油のトライボロジー特性については、本研究においても平成 14 年度から評価を進めており、耐摩耗性等において良好な結果を示している。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。さらに、最近では、正負のイオンのみから構成される「イオン液体」が開発され、優れた耐熱性、不揮発性を有することから、新規潤滑油として注目されており[2]、MAC に続く新しい宇宙用液体潤滑剤としても期待される。イオン液体は、構成イオンの選択によって粘度など諸特性のコントロールが可能で、国産の反応溶媒や電解質として入手できる

など長所が多く、そのトライボロジー特性についても早急に評価を進める必要がある。

本研究は、主にホイール等の高精度回転機器の開発及び信頼性向上に寄与するため、転がり軸受の潤滑膜厚の予測技術や計測技術を確立して潤滑メカニズムを明らかにすること、及び、宇宙用液体潤滑剤に関するトライボロジー特性を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「宇宙用油潤滑軸受の評価技術の研究」及び「宇宙用潤滑油のトライボロジー特性に関する研究」を主体として、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 16 年度は以下の項目について研究を行った。

(1) EHL (Elasto-Hydrodynamic Lubrication、弾性流体潤滑：玉軸受の玉と内外輪の接触のような高い接触圧力下で、油の粘度が非常に大きくなり、接触面が弾性変形する潤滑状態) 油膜厚さに及ぼす転動体通過の影響

EHL 接触域の出口部には、極めて低速の場合メニスカスが形成されるが、速度が大きくなるとメニスカスは不安定になって接触域の両側に分かれ、Fig. 1-1 に示すように、2 本の side band を形成する[3]。この side band は合流することなく次の転動体通過の接触域入口部に到達し、入口部の膜厚は side band で大きく、その内側で小さくなる。本報では、点接触 EHL において side band を考慮し、一様でない入口膜厚分布が接触域内部の膜厚に及ぼす影響を数値解析によって検討した。

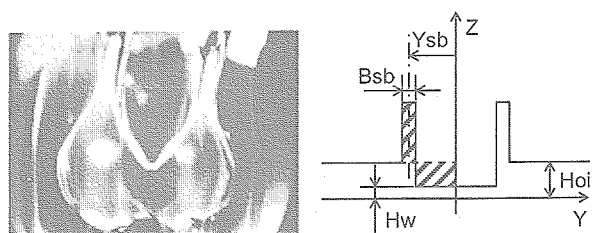


Fig. 1-1 Left: Flow around an EHL contact[2]; Right: Simplified model of inlet oil film distribution.

(2) 玉軸受転走面のその場油膜厚さ計測

(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・京極研究室)

回転中にある転がり軸受の転走面上の油膜厚さ測定は、前項の解析技術の妥当性を検証する上で、さらに、軸受の最適油量の検討や軸受の動特性に関する数値シミュレータのコリレーションを行う上で重要となる。今年度は、平成 15 年度までに実現した、油の紫外線に対する蛍光強度から玉軸受の転走面上の油膜厚さを計測する LIF (Laser Induced Fluorescence、レーザ誘起蛍光) 法について、測定精度の向上と装置の小型化を図るため、高効率な部品の採用等により光学系を簡素化した新たな装置を試作した。さらに、アンギュラ玉軸受の油膜厚さ計測を行い、同装置の有効性を確認した。

(3) イオン液体の潤滑特性

今年度は、真空中での評価に先立ち、イオン液体の基礎的な潤滑特性データを大気中で取得した。主に混合潤滑領域 (油膜形成が不完全で、接触域の一部で固体同士の接触が生ずる、実用上重要な潤滑状態) での評価を行った。

3. 成果の概要

(1) EHL 油膜厚さに及ぼす転動体通過の影響

微量油量条件を取り扱うため、油膜厚さと 2 面間すきまの比を表す変数 θ をレイノルズ方程式に組み込み、Multigrid 法で解いた[1]。弾性変形の計算は FFT 法[3]を用いて高速化した。以下では、等価ヤング率 E 、等価半径 R 、荷重 w 、転がり速度 u 、圧力粘度係数 α 、大気圧下の粘度 η_0 とする。解析に用いた入口膜厚分布のモデルを Fig. 1-1 に示す。座標 X が転がり方向で、 X 、 Y 方向の長さはヘルツ接触半径 a 、 Z 方向の長さ (膜厚 H) は a^2/R で無次元化した。油量一定を仮定して、2 つの斜線部の面積が等しくなるように side band の高さを決定したが、 Y_{sb} と B_{sb} は未知であり、パラメータとして変化した。1 回目に入膜厚が一様に H_{oil} であるとして解析を行い、2 回目以降の計算では、 n 回目の H_w が $n-1$ 回目の中央膜厚に等しいと仮定した。 $W = w/ER^2 = 4.33e-7$ 、 $G = \alpha E = 4.62e3$ の場合を解析した。

Fig. 1-2 に、膜厚 θH の計算結果を示す。 $U = u\eta_0/ER^2 = 4.33e-11$ の場合である。1 回目の接触では中央膜厚 H_c は 0.64 で、一様な入口膜厚の解析では油量不足にならないが、Fig. 1-2 の H_c は 0.53 で、side

band を考慮した 2 回目の接触では油量不足になっている。Fig. 1-1 のように、入口部のメニスカスがバタフライ形状になっており、side band の油は接触域に近づくとき押しつぶされて横方向に広がり、入口部に再流入している。

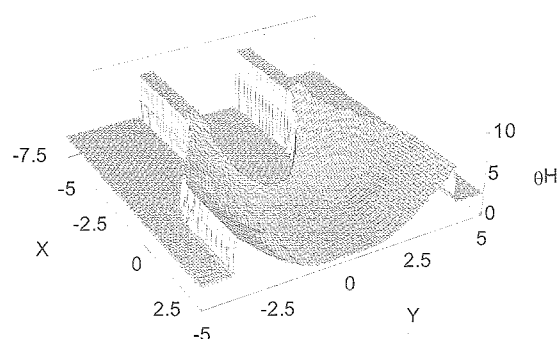


Fig. 1-2 Film thickness, $H_{oil} = 2.67$, $Y_{sb} = 1.9$, $B_{sb} = 0.6$, $n = 2$.

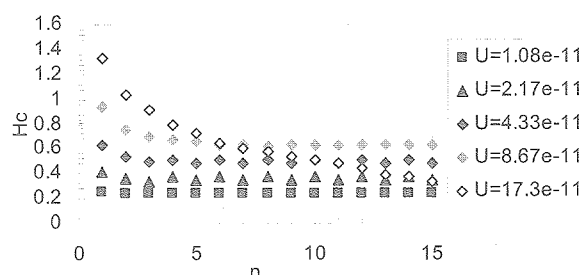


Fig. 1-3 Film decay, $H_{oil} = 2.67$, $Y_{sb} = 1.9$, $B_{sb} = 0.6$.

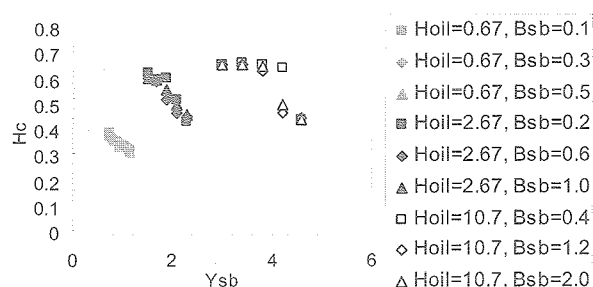


Fig. 1-4 Effect of the inlet distribution on H_c , $n = 2$.

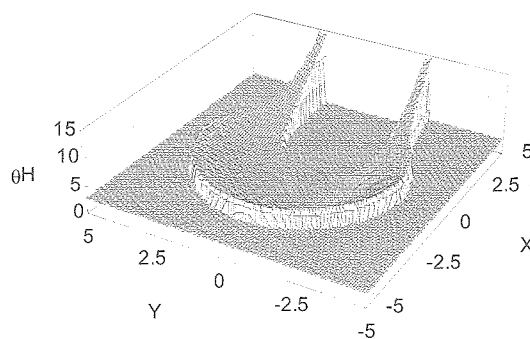


Fig. 1-5 Film thickness, $H_{oil} = 2.67$, $n = 1$.

Fig. 1-3 に中央膜厚 H_c と繰り返し数 n の関係を示す。 U が大きく（高速、高粘度）になると、転動体通過の繰り返しで H_c は急激に減少する。通常の解析では、膜厚は U と共に増大するが、転動体通過を考慮すると、 U と共に膜厚の減少する（速度×粘度が最大になる $U = 17.3e-11$ の H_c が、その他より小さくなる）場合があった。これは、 U が大きいと、side band の油が接触域入口部に到達しにくくなるためである。速度、粘度の増大によって油膜が薄くなる現象は微量油量条件下の実験でよく観察される。本報の解析結果から、side band を考慮した、一様でない入口膜厚分布によって、上述の実験結果を説明できることがわかった。

Fig. 1-4 に、side band の位置 Y_{sb} 、幅 B_{sb} を変化させて中央膜厚 H_c を計算した結果を示す。 $H_{oil} = 2.67$ 、 10.7 の場合、それぞれ $Y_{sb} = 2$ 、 4 以下では十分潤滑と同等の H_c が得られ、それより Y_{sb} が大きくなると H_c は急激に減少する。 $H_{oil} = 0.67$ の場合、油量が非常に少ないため、計算した全ての条件で十分潤滑と同等の H_c は得られなかった。

上述のように、膜厚を精度よく予測するためには、side band を考慮した一様でない入口膜厚分布が必要になるが、side band を再現する解析技術はいまだ開発されていない。Fig. 1-5 は、せん断流れの連続性から side band の再現を試みた結果である。ヘルツ接触域とキャビテーション域の境界を仮定し、圧力流れは今のところ無視している。今後は side band が破断する位置を求めることが課題になる。

(2) 玉軸受転走面のその場油膜厚さ計測

回転中にある玉軸受転走面の油膜厚さ計測については、平成 15 年度までの研究により、紫外線に対する油の蛍光強度を測定する LIF 法を応用することで可能となった。一方、計測技術に関する重要な課

題としては、測定精度をさらに向上させることと、ホイール等の実機器の回転系に適用するために計測装置の小型を図ることがあげられる。平成 16 年度は、これらの課題の解決を目指して、小型・高精度な油膜厚さ計測装置を試作した。

(a) 油膜厚さの計測原理

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。玉軸受に対する LIF 法を用いた油膜厚さ計測系を Fig.2-1 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、静的状態においてより精度が高い白色干渉法を適用して行う。

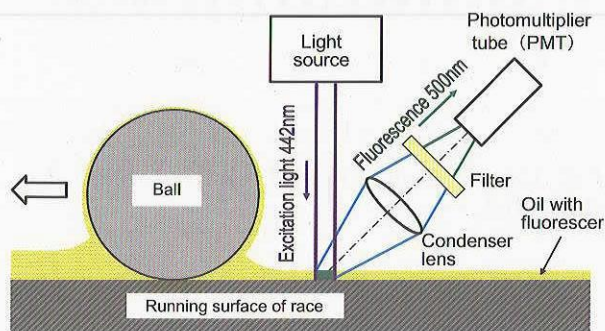


Fig.2-1 Oil-film-thickness measurement with LIF system

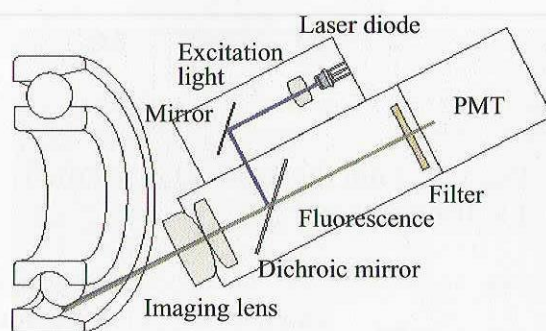


Fig.2-2 New downsized LIF system

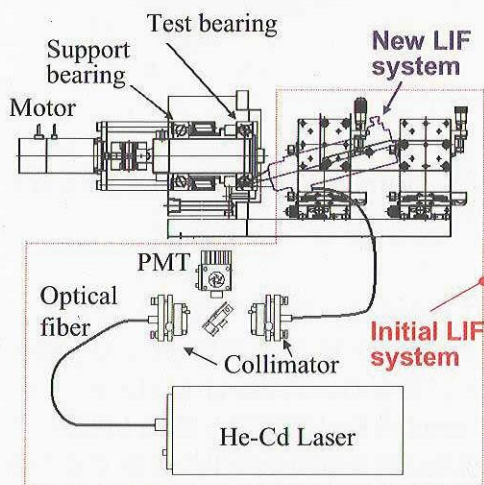


Fig.2-3 Comparison of size between new and initial LIF systems

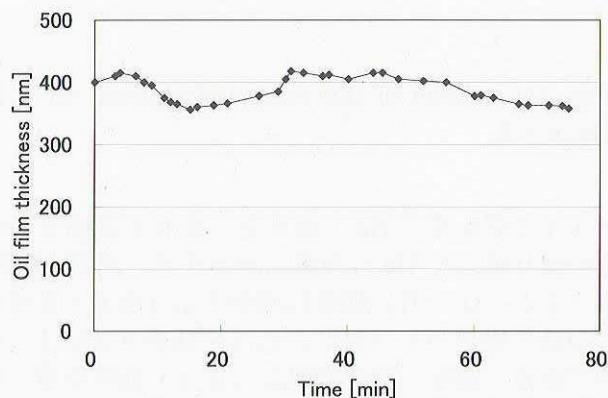


Fig.2-4 Oil film thickness remaining on the outer-raceway after ball passing

(b) 装置の改良と油膜厚さの計測結果

Fig.2-2 に新しい LIF 計測装置の概念図を示す。LIF 測定装置の小型・高精度化は、小型で高効率な半導体レーザや PMT (Photomultiplier Tube、光電子倍增管) を使用し、部品数を削減して光学系を簡素化することにより行った。半導体レーザから発生した励起光は、ミラーと結像レンズを経てスポット径 50 μ m 以下で油膜に照射される。油膜の蛍光はレンズで集光された後、蛍光以外の波長の光をフィルタで取り除き PMT に取り込まれる。本年度試作した装置と昨年度までの装置との大きさの比較を Fig.2-3 に示す。点線で囲われた部分が He-Cd レーザを利用した昨年度までの装置であり、本年度の試作品がかなり小型化されていることがわかる。重量比では、1/10 以下となっている。測定精度については、分解能は従来装置と同等の 0.1 μ m 以下であり、ノイズは 1/2 以下となり SN 比を向上させることができた。

本年度試作した装置により、回転中の玉軸受外輪転走面上の油膜厚さを計測した。供試軸受は内径 40 mm×外径 80mm、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、内輪回転速度は 500r/min である。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。油膜厚さの計測は、オイルエア方式による 0.05ml/h の微少給油量で 90 分間軸受を回転させた後給油を停止し、無給油状態で開始した。計測結果を Fig.2-4 に示す。同図の油膜厚さは、外輪転走面上の一点において、玉が通過した後に残存している油膜厚さを示しており、およそ 0.4μm である。この値は玉/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、転走面上には玉の通過により極めて微量の油しか存在していない可能性が高い。以上の試験結果は、前節の EHL 油膜厚さに及ぼす転動体通過の影響で得られた数値解析の結果と定性的に一致しており、今後、解析技術と測定技術を向上させることにより、転がり軸受の潤滑メカニズムについて、解析と実験の両面からの検討を進めることができると考えている。

(3) イオン液体の潤滑特性

試験に用いた潤滑剤の特性を Table 3-1 に示す。イオン液体は各種市販されているが、本報では、疎水性の N,N-Diethyl-N-methyl-N-(2-methoxyethyl)ammonium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (IL) と、比較のために市販の汎用鉱油系潤滑剤 (MO) を用いた。IL の構造を Fig. 3-1 に示す。

Table 3-1 Properties of the lubricants.

	Pour point, degC	Density, g/cm ³	Viscosity, Pa.s (20 degC)
IL	N/A	1.42	0.077
MO	-13	0.9	0.070

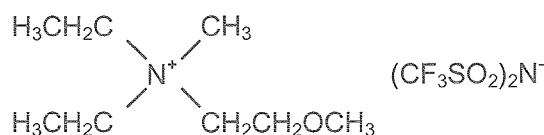


Fig. 3-1 Structure of the ionic liquid.

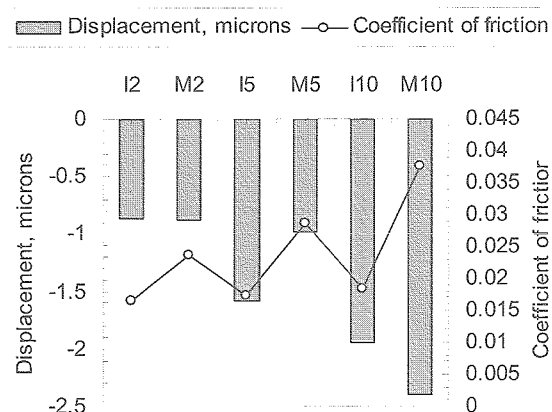


Fig. 3-3 Pin displacement and the coefficient of friction at the end of the test.

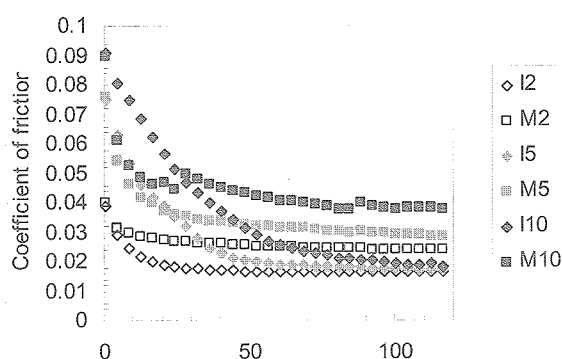


Fig. 3-2 Variation of the coefficient of friction with time.

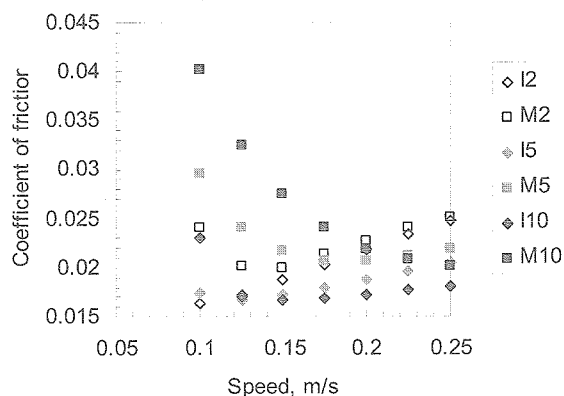


Fig. 3-4 Coefficient of friction versus speed.

試験はピン／ディスク型のすべり摩擦試験機を用いて、常温、大気中、浸漬潤滑、すべり速度 0.1m/s で行った。図中の記号で、I は IL、M は MO、2、5、10 は荷重 (N) を示す。摩擦係数に加えて、摩擦量を調べるために、非接触微小変位計を用いて、ディスクに対して垂直方向のピンの変位を測定した。ピン／ディスク材質 SUS440C、ピン先端半径 50 mm、ディスク直径 45 mm、表面粗さ（中心線平均粗さ）0.2 μm 、試験時間 120 min である。

Fig. 3-2 は摩擦係数の推移を示す。試験開始時は混合潤滑状態と考えられ、IL の摩擦係数は荷重 2、5、10 N の場合それぞれ 0.039、0.075、0.091 で、MO と同程度であった。IL の摩擦係数は時間と共に約 0.02 まで減少した。一方、試験終了時の MO の摩擦係数は荷重 10 N の場合 0.04 であった。MO の摩擦係数は荷重と共に減少するが、IL の 0.02 に比べて大きかった。

Fig. 3-3 は試験終了時のピン変位と摩擦係数を示す。変位の減少は摩耗によるピンとディスクの接近量を示し、棒グラフの長さが摩耗量に対応する。IL と MO の摩耗量は同程度であった。

IL の低摩擦は流体潤滑状態を示唆している。これは、摩耗試験の後に測定した、摩擦係数とすべり速度の関係から確認された。Fig. 3-4 に示すように、IL の摩擦係数は摩耗試験時のすべり速度 (0.1 m/s) 近傍で最小になっている。一方、MO の摩擦係数は IL に比べて大きいすべり速度で最小になっている。

4. まとめ

(1) EHL 油膜厚さに及ぼす転動体通過の影響

点接触 EHL において、転動体通過によって生ずる side band を考慮し、一様でない入口膜厚分布が接触域内部の膜厚に及ぼす影響を数値解析によって検討した。速度、粘度の増大によって油膜の薄くなる場合があるという結果は、一般的な経験則によく対応している。今後は入口膜厚分布を予測する手法の開発と、その実験的検証を行う予定である。

(2) 玉軸受転走面のその場油膜厚さ計測

小型で高効率な部品の採用と光学系の簡素化により、昨年度までの He・Cd レーザを用いた装置よりもノイズの少ない測定が可能となり、さらに、重量にして 1/10 以下の装置の小型化に成功した。同装置を用いて玉軸受に対する計測を行い、軸受回転中に外輪転走面上に存在する油膜厚さは 1 μ m 以下と、EHL 部の油膜厚さと同等レベルの極めて薄い膜であることを確認した。今後は、計測装置の調整や測定データの処理法の改善によりさらなる高精度化を図り、前項の解析技術の検証や、油量と摩擦トルク・保持器運動との関係など、油膜形成状態と軸受特性とに関するデータの取得・蓄積を進めていく予定である。

(3) イオン液体の潤滑特性

大気中、混合潤滑領域で、イオン液体 (IL) の潤滑特性を評価した。鉱油系潤滑剤 (MO) に比べて小さい摩擦係数が「なじみ」によって得られた。なじみは一種の摩耗であるが、IL の摩耗量は MO と同等であった。これは、IL が接触面を摩耗させる一方で、平滑な摩耗面が得られるため流体潤滑状態に移行して実質的な摩擦距離が減少し、両者の影響が相殺して MO と同等の摩耗になったと考えられる。このような特性は接触面の酸化膜の形成などに関連するため、雰囲気の影響を受ける可能性がある。今後は、真空中で、各種イオン液体及びイオン液体を基油として用いたグリースの評価を行う予定である。

参考文献

- [1] F. Chevalier, A. A. Lubrecht, P. M. E. Cann, F. Colin & G. Dalmaz, "Film Thickness in Starved EHL Point Contacts," ASME J. Tribol., 120 (1998) 126.
- [2] C. Ye, W. Liu, Y. Chen & Z. Ou, "Tribological Behavior of Dy-sialon Ceramics Sliding Against Si₃N₄ Under Lubrication of Fluorine-containing Oils," Wear, 253 (2002) 579.
- [3] J. Pemberton & A. Cameron, "A Mechanism of Fluid Replenishment in Elastohydrodynamic Contacts," Wear, 37 (1976) 185.
- [4] T. Nogi & T. Kato, "Influence of a Hard Surface Layer on the Limit of Elastic Contact – Part 1: Analysis Using a Real Surface Model," ASME J. Tribol., 119 (1997) 493.
- [5] T. Nogi, "Starved EHL Point Contacts with Nonuniform Inlet Film Thickness," Synopses of the International Tribology Conference Kobe 2005, 347.
- [6] T. Nogi, "Some Tribological Properties of an Ionic Liquid," to be published in Proc. World Tribology Congress 2005.