

高速回転深溝玉軸受の潤滑解析（第1報）－潤滑可視化による供給油量の影響評価－

Lubrication analyses of high-speed deep-groove ball bearings (Part 1)

—Effects of oil supply amount evaluated by visualization of lubrication—

（株）豊田中央研究所 *（正）遠山護 （非）大宮康裕 （非）佐藤範和 （非）佐藤秀彰 （非）横井将大

（株）ジェイテクト（正）廣瀬みちる （正）松山博樹 （正）戸田拓矢 （非）長谷川賢一 （非）鬼塚高晃

Mamoru Tohyama*, Yasuhiro Ohmiya*, Norikazu Sato*, Hideaki Sato*, Masahiro Yokoi*

Michiru Hirose**, Hiroki Matsuyama**, Takuya Toda**, Kenichi Hasegawa**, Takaaki Onizuka**

*Toyota Central R&D Labs., Inc., **JTEKT CORPORATION

1. はじめに

電動車の駆動ユニットなどに用いられる深溝玉軸受（以後、軸受と略記）では、軸回転速度 $20,000 \text{ min}^{-1}$ を超えるモーターの高速化に対応するために、摩擦トルクを小さくしながら高速でも焼き付かないような高効率化と高信頼性の両立が求められる。しかし、高速回転状態での軸受内部の油膜形成状態やオイル分布状態には不明な点も多く、高速軸受の設計・開発は耐久試験に基づく試行錯誤が主となっており、高速軸受の開発には多大な労力や時間を要している。そのため、高速軸受の設計・開発を加速することを目的に、実験計測によって高速回転状態での軸受内部の潤滑状態を明らかにし、得られた知見に基づいて軸受内部のオイル流れ CAE (Computer Aided Engineering) 解析法などのモデルベース開発 (MBD: Model Based Development) 技術の構築を目指している¹⁾。これまで、オイル潤滑軸受の摩擦トルク計測と同時に、転動面の油膜厚さの計測あるいは軸受内部のオイル分布状態を可視化できる試験機を製作し、軸受へのオイル供給量を一定とした条件で、軸回転速度が摩擦トルク、転動面の油膜厚さならびに軸受内部のオイル分布に及ぼす影響を検討した²⁾。軸回転速度 $20,000 \text{ min}^{-1}$ までの計測を行った結果、従来の十分潤滑下における弾性流体潤滑 (EHL) 理論とは異なり、高速条件では転がり速度が増加しても油膜厚さが増大しないことを明らかにした。本報では、軸受へのオイル供給量が摩擦トルク、転動面の油膜厚さおよび軸受内部のオイル分布状態に及ぼす影響を検討した結果を報告する。

2. 実験

2.1 高速玉軸受可視化試験機

試験機の横断面図を FiP 状は呼び番号 6008 [外径: $\phi 68 \text{ mm}$, 内径: $\phi 40 \text{ mm}$, 内外輪幅: 15 mm, 玉数: 12 個, 保持器: 樹脂製冠形] に相当する市販軸受と同一形状であり、その外径と幅のみを $\phi 80 \text{ mm}$, 18 mm に変更してある。玉と内輪には市販軸受のものを用いている。軸受ハウジングは、その軸回転方向に設置した摩擦トルク測定用のロードセル（本図には非表示）と石英軸受だけで支えられている。また、本図中には示していないが、軸受ハウジングの左右には錐を吊り下げられるアームを設けており、ラジアル荷重を負荷している。本検討ではラジアル荷重を 300 N 一定とした。

評価軸受の潤滑は、先端口径 $\phi 0.7 \text{ mm}$ の給油ノズルを軸受最頂部（最大荷重）の軸受側面に配置して、玉に向けて給油して行った。本検討では、供給油量を既報²⁾で設定した 100 mL/min から、70, 40 mL/min に減らした条件で試験を行った。油温はノズル出口部温度 60°C で一定とした。オイルには市販 ATF を用いた。

試験手順も既報²⁾と同様に、各速度条件での外輪の温度変化が少なくなるよう、本検討での最高速度条件である約 $20,000 \text{ min}^{-1}$ で 2 min 間保持した後に計測を開始して、各速度条件で 1 min 間の計測を行いながら、段階的に減速させていく方法とした。試験法の詳細は、既報²⁾を参照されたい。

2.2 外輪転動面の油膜厚さ計測

最大ラジアル荷重位置における外輪と玉の転動面の油膜厚さ（以下、本報では転動面の油膜厚さと略記）を 3 波長光干渉法^{3,4)}によって計測した。油膜に起因して

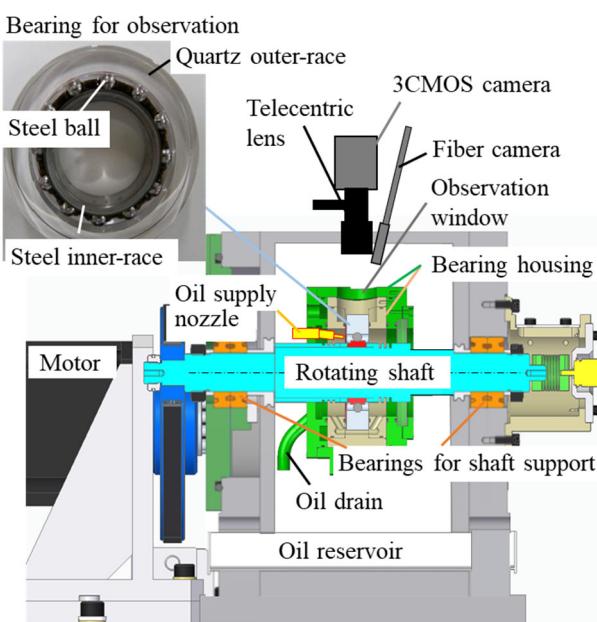


Fig. 1 Side sectional view of test apparatus (Optical systems are for optical interference method)

生じる光干渉像を視野 3.55 mm (玉公転方向) \times 0.86 mm (軸方向) で観察した。高速動状態での観察画像の流れを抑制するため、3 波長光の照射を 2 μ s/1 発光、周期 50 Hz のパルス状で行い、カメラのフレームレートを 50 fps に設定して、玉公転と光照射の周期が同期するように軸回転速度を微調整して、動画を撮影した。また本試験では同時に、摩擦トルク計測およびファイバーカメラによる白色光観察も行った。

2.3 外輪軌道面周辺のオイル分布観察

前述した油膜厚さ計測とは別に、既報²⁾と同様に、UV-LED フラッシュ照明を用いた蛍光法（本報では、フラッシュ蛍光法と称する）によって、玉周辺の外輪軌道面のオイル分布状態を観察した。油膜厚さ計測と同様に、フラッシュ発光と動画撮影のフレームレートをそれぞれ 40 Hz および 40 fps に設定した上で、それらに玉の公転が同期するように軸回転速度を微調整して、動画を撮影した。観察領域は、外輪最頂部付近の 23.6 mm (玉の公転方向) \times 17.7 mm (軸方向) とした。また本試験でも同時に摩擦トルクを計測した。

3. 結果

3.1 摩擦トルクに及ぼす供給油量の影響

まず、供給油量を 100 から 70, 40 mL/min に段階的に減少させて試験を行った油膜厚さ計測およびオイル分布観察と同時に計測した摩擦トルクをそれぞれ Fig. 2 および Fig. 3 に示す。両図には、参考データとして石英外輪の最外周温度も併記した。両図の摩擦トルクを比較すると、試験の繰り返しへばらつきや計測誤差によると判断される若干の相違はあるものの、全般的には類似しており、概ね良好な再現性が得られていると判断する。

Fig. 2 および Fig. 3 の両図とも、100 mL/min と 70 mL/min での摩擦トルクは全般的に概ね一致しており、軸回転速度の増加に伴って摩擦トルクが増大する傾向にある。ただし軸回転速度約 15,000 min⁻¹ 以上では、70 mL/min の方が 100 mL/min に比べて僅かながら摩擦トルクが小さい傾向にあり、このような高速域では供給油量の減少によって攪拌抵抗が小さくなっていることが考えられる。一方、40 mL/min では、約 11,000 min⁻¹ までは 100 および 70 mL/min と同傾向にあるものの、それ以上の高速条件では速度が高くなるほど摩擦トルクが急激に減少していく傾向にあり、100 および 70 mL/min に比べて摩擦トルクが小さくなっている。特に、約 16,000 min⁻¹ 以上の摩擦トルクは、100 mL/min に比べて 75% 以上小さくなっている。このような摩擦トルクの減少と対応するように、40 mL/min では外輪温度も、高速条件ほど他の油量条件に比べて低くなっている。なお、Fig. 2 に示した 40 mL/min の約 12,000 min⁻¹ 以下の速度域では 100, 70 mL/min に比べて摩擦トルクが若干小さくなっているが、Fig. 3 では概ね一致していることから、この差異は本試験における計測上のばらつき誤差によると考えている。

いずれにしても供給油量の影響として、一定の速度条件（本試験では軸回転速度約 11,000 min⁻¹）までは摩擦トルクの変化は小さいものの、低速度以上の高速条件において過度に（本試験では供給油量 40 mL/min 以下まで）減量すると、摩擦トルクが急激に減少する現象を生じることが分かった。

3.2 油膜厚さに及ぼす供給油量の影響

3 波長光干渉法で計測した転動面の油膜厚さを Fig. 4 に示す。本図の縦軸は、各試験条件での油膜厚さを、本検討で実測した供給油量 100 mL/min 条件での最高回転速度 20,320 min⁻¹ における油膜厚さの計算値を基準（1.0）とした比率で示している。供給油量 40 mL/min かつ軸回転速度 16,000 min⁻¹ 以上の条件でのみ、1 min 間の計測において油膜厚さの変動が認められたため、これらの条件については 10 点の光干渉像を定量化して、その最大値と最小値をエラーバーで示している。また参考までに、各試験条件における光干渉像（観察域からの部分拡大画像）の例を Fig. 5 に示す。軸

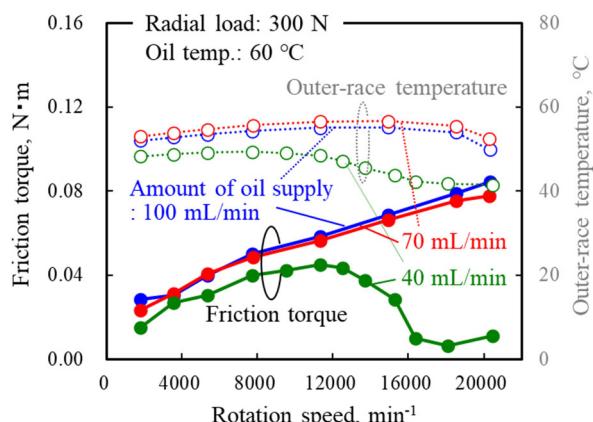


Fig. 2 Friction torque evaluated with oil-film thickness measurement

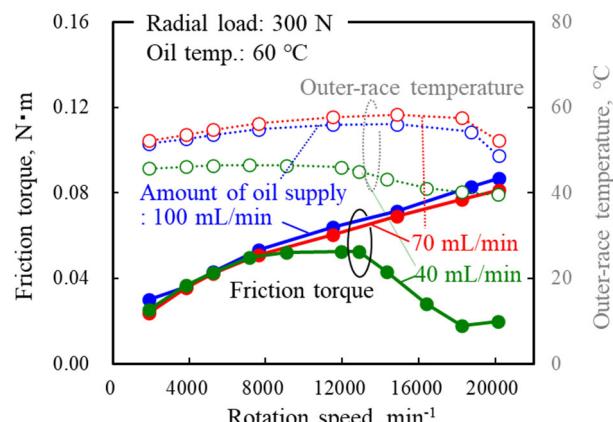


Fig. 3 Friction torque evaluated with oil-distribution observation

回転速度や供給油量の変化に伴う光干渉色の差異からも、油膜厚さの変化の有無が見て取れる結果である。

油膜厚さの定量値を示した Fig. 4 において供給油量 100 と 70 mL/min の油膜厚さはいずれの速度域でも概ね一致しており、Fig. 2 において摩擦トルクが一致していたことと対応している。また、既報²⁾で述べた供給油量 100 mL/min と同様に、70 mL/min 条件においても、約 5,400 min⁻¹ までは従来の十分潤滑状態での EHL 理論に準ずるように、速度の増加に伴い油膜厚さが増大する傾向にある。しかしそれ以上の高速域では、速度増加に伴う油膜厚さの増大割合が小さくなり、約 11,000 min⁻¹ 以上では油膜厚さが概ね一定となっている。一方、供給油量 40 mL/min では、約 15,000 min⁻¹ までは 70 および 100 mL/min と同程度となっているものの、それ以上の高速域では急激に油膜厚さが薄くなるとともに、油膜厚さの変動が生じていた。この Fig. 4 の 40 mL/min で油膜が薄くなった約 16,000～約 20,000 min⁻¹ 条件は、Fig. 2 において摩擦トルクが著しく小さくなっていた条件と一致する。ただし、Fig. 2 において速度増加に伴い摩擦トルクが徐々に減少した約 11,000～16,000 min⁻¹ までの間には、Fig. 4 において油膜厚さの変化が特に認められない。この結果は、転がり粘性抵抗と相関するとされている油膜厚さ⁵⁾以外にも、摩擦トルクに影響を及ぼしている因子があることを示唆する結果と考える。

3.3 ファイバーカメラ観察像の比較

油膜厚さ計測と同時にファイバーカメラで撮影した玉周辺の外輪軌道面の観察像を Fig. 6 に示す。なお、供給油量 40 mL/min の観察データは、他の油量条件のデータ数に揃える形で、一部を省略している。軸回転速度約 11,000 min⁻¹ までは、供給油量 100～40 mL/min のオイル分布状態は類似している。それ以上の高速条件においては、100 と 70 mL/min では顕著な差異は認められないものの、40 mL/min では軌道面のオイルが著しく減少している。このような軌道面のオ

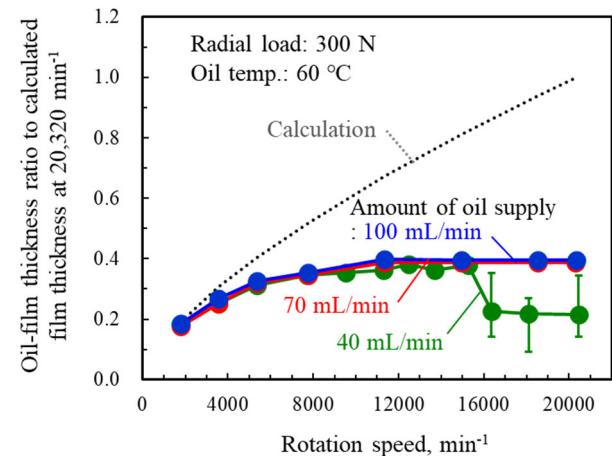


Fig. 4 Comparison of oil-film thickness between measurement values evaluated at various amount of oil conditions (solid lines) and calculated values (dotted line)

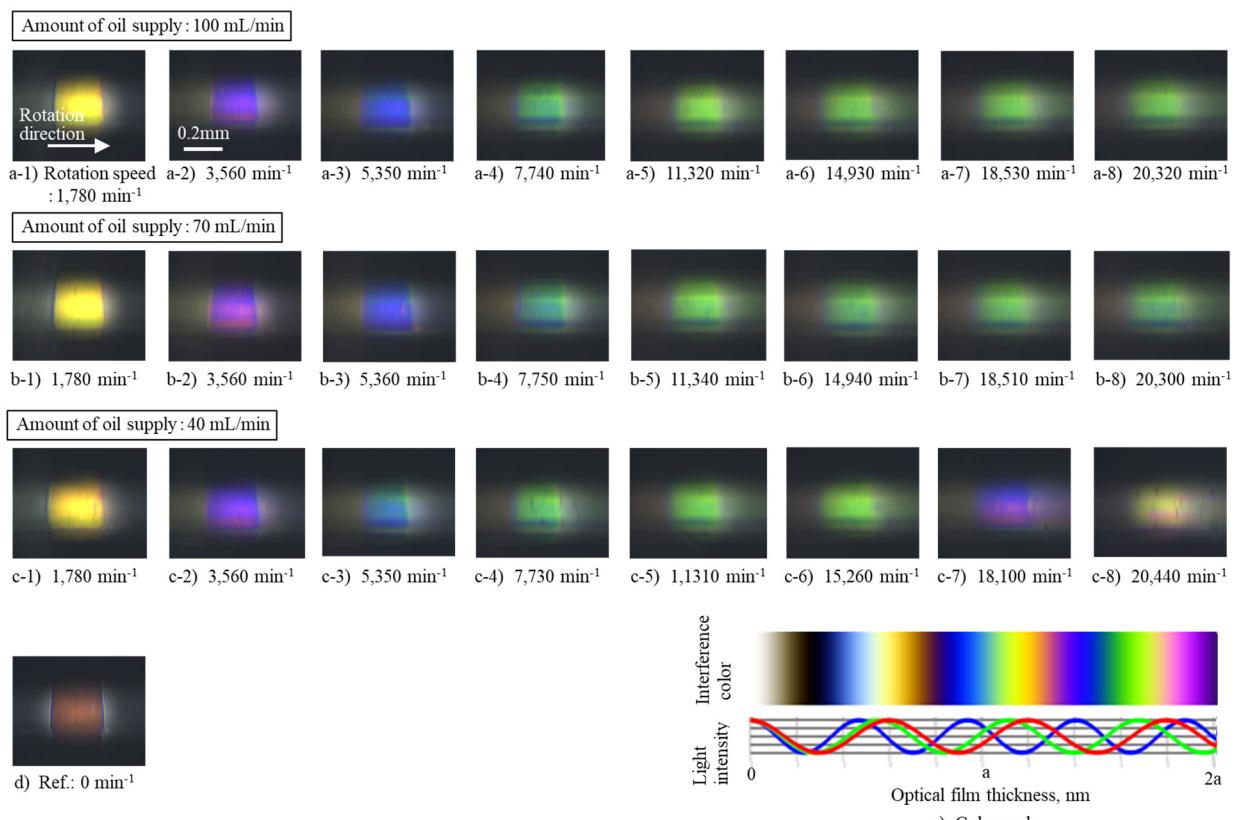


Fig. 5 Optical interference images of the oil-film thickness under each amount of oil supply conditions and color scale

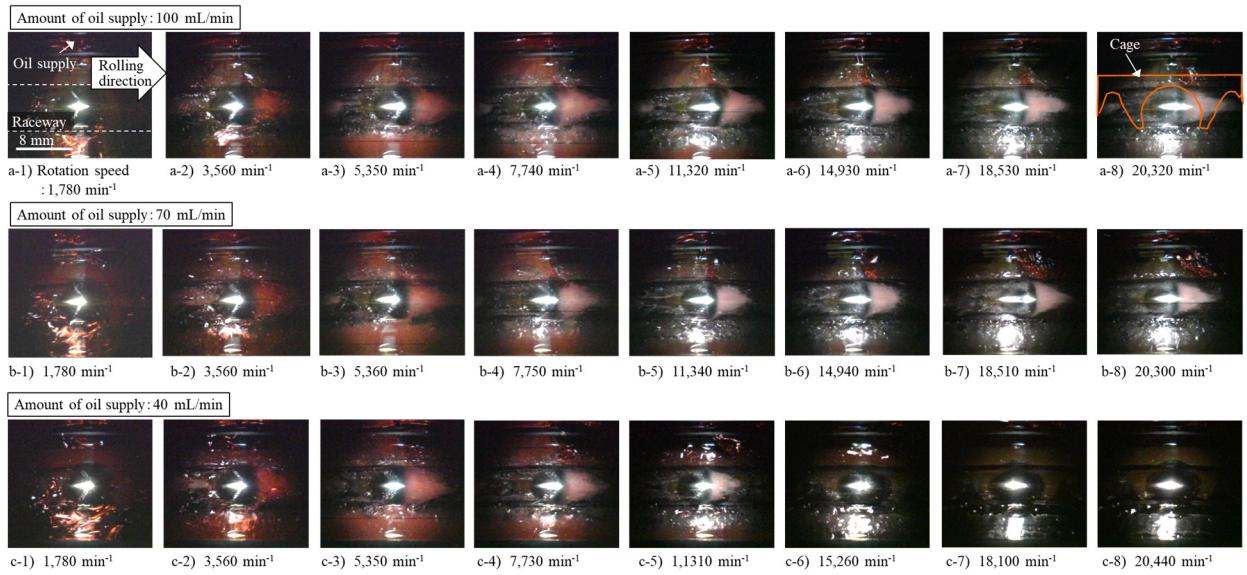


Fig. 6 White light images of oil-distributions under each amount of oil supply conditions observed by using fiber-camera

イル分布状態の変化は、前述した摩擦トルクおよび油膜厚さの変化に対応していると考える。また、玉の公転方向前方での気泡混入量（オイルの白濁）に関しては、既報²⁾で述べた 100 mL/min 条件と一致するように、いずれの油量条件においても約 5,400 min⁻¹ 以上で多くなる傾向にある。この気泡混入量の増加傾向は、前節で示した油膜厚さの速度增加に伴う増加割合が十分潤滑の EHL 理論に対して小さくなる現象と対応していると考える。

3.4 フラッシュ蛍光法によるオイル分布状態の比較

フラッシュ蛍光法によって撮影したオイル分布像を Fig. 7 に示す（40 mL/min 条件は一部の条件の表示を省略）。軸回転速度約 1,900 min⁻¹ の低速条件では、既報²⁾で述べた供給油量 100 mL/min 条件と同様に、70 および 40 mL/min 条件のいずれも玉入口（Fig. 7 写真では玉の右側）にはオイルが潤沢に存在していることが分かる。この玉入口オイルの分布面積に着目すると、軸回転速度約 7,000 min⁻¹ までは供給油量を 100 から 40 mL/min まで減少させても、観察域の全体的なオイル分布状態は類似している。しかし、それ以上の高速域での 40 mL/min 条件では、速度が高くなるほど玉入口および観察域全体のオイル量が減少する傾向にあり、100 および 70 mL/min では約 20,000 min⁻¹ までオイル量の変化が少ない傾向とは大きく異なっている。特に 40 mL/min の 11,000 min⁻¹ 以上では、玉入口および観察域全体のオイルは著しく少なくなっている。100 および 70 mL/min 条件との差異が大きくなっている。さらに、約 18,000 min⁻¹ 以上の 40 mL/min では軌道面にはオイルがほとんど無くなっている。なお、100 と 70 mL/min 条件との比較では、オイル分布状態は約 20,000 min⁻¹ 条件まで概ね類似しているが、詳細に比較すると、約 18,000 min⁻¹ 以上の 70 mL/min では 100 mL/min に比べて、観察像上側の給油位置左側および玉入口のオイルが僅かに少なくなっている傾向も認められる。

以上のオイル分布状態の比較結果は、総じて Fig. 3 に示した摩擦トルクの結果と対応していると判断される。特に、

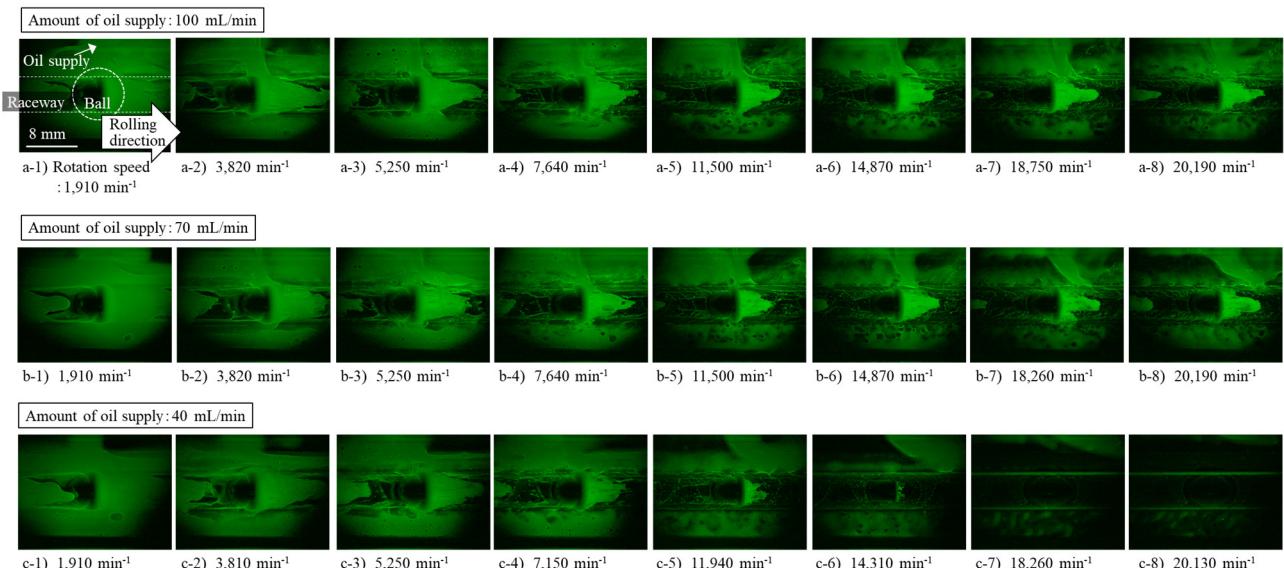


Fig. 7 Fluorescence images of oil-distributions under each amount of oil supply conditions

Fig. 6 の 40 mL/min の約 $18,000 \text{ min}^{-1}$ および約 $20,000 \text{ min}^{-1}$ において、軌道面のオイルがほとんど無くなっていることは、Fig. 3 に示した摩擦トルクが著しく小さくなっていたことと良く対応している。したがって、摩擦トルクには、転がり粘性に影響すると考えられる油膜厚さだけでなく、主に攪拌抵抗に影響すると考えられる軸受内部、特に玉周辺の外輪軌道面でのオイル量にも依存していると判断される。

4. おわりに

深溝玉軸受の高速回転状態における供給油量が摩擦トルク、外輪と玉の転動面の油膜厚さおよびその周辺のオイル分布状態に及ぼす影響を可視化試験機によって検討した。ノズル給油法において供給油量を 100 から 40 mL/min まで段階的に減少させた結果、70 mL/min までは摩擦トルク、油膜厚さおよびオイル分布状態のいずれも変化が小さかったものの、40 mL/min まで減少すると高速域で顕著な変化を生じた。軸回転速度約 $11,000 \text{ min}^{-1}$ までは 100 から 40 mL/min まで摩擦トルク、油膜厚さおよびオイル分布状態のいずれも同様であったものの、それ以上の速度域での 40 mL/min 条件では、速度が増加するほど摩擦トルクおよびオイル分布量が減少し、約 $16,000 \text{ min}^{-1}$ 以上の高速域では摩擦トルク、油膜厚さおよびオイル分布量のいずれも著しく小さくなった。

上記の結果から、供給油量の減少の影響はある一定量までは少ないものの、ある閾値を超えるまで減少すると、高速回転状態において摩擦トルクは低減できる反面、転動面油膜厚さの減少や軸受内部のオイル不足を生じる可能性があることが明らかになった。したがって、高効率化のみでなく高信頼性を両立するためには、過度なオイル供給量の削減には注意が必要で、その最適化には更に詳細かつ様々な使用条件での潤滑解析が必要と考える。

文献

- 1) 鬼塚高晃：電動車の高速回転化を支える軸受 MBD 技術，潤滑経済，2022 年 11 月号，692 (2022) 45.
- 2) 遠山・大宮・村田・入谷・佐藤・廣瀬・松山・戸田・長谷川・鬼塚：高速回転深溝玉軸受の油膜厚さ計測およびオイル分布観察，トライボロジーカンファレンス 2022 秋 福井 予稿集(2022) D16.
- 3) 大槻・北川・泉・遠山：3 波長光干渉法の開発（第 1 報）—薄膜干渉色解析による較正レスの油膜厚さ分布測定一，トライボロジーカンファレンス 2016 春 東京 予稿集 (2016) B9.
- 4) 友田・遠山・村田：3 波長光干渉法のロバスト性向上についての検討，トライボロジーカンファレンス 2020 秋 別府 予稿集(2020) E2.
- 5) 野木高：転がり軸受の油膜厚さと転がり抵抗の高精度予測，トライボロジスト，60, 9 (2015) 582.