

電氣的接触抵抗法を用いた油膜状態の評価観測手法

An Evaluation and Observation Method of Oil Film Condition by Electrical Contact Resistance Method

○竹田 雄祐^{*1}, 里永 憲昭^{*1}, 狩野 将矢(院)^{*1}
渡邊 孝司^{*2}, 園田 智之^{*2}

Yusuke TAKEDA^{*1}, Noriaki SATONAGA^{*1}, Masaya KANO^{*1}
Takashi WATANABE^{*2} and Tomoyuki SONODA^{*2}

^{*1} 崇城大学 Sojo University

^{*2} D1 ケミカル D1 Chemical Corporation

Key Words : engine oil, gear oil, ester-based additives, contact resistance method, condition monitoring

1. 緒 言

著者らは、これまで自動車や産業用機械の寿命延長や省エネルギーを目的としてエステルとメタロセン触媒由来のポリ α オレフィンからなる新還元添加剤 SOD-1PN（以下、新添加剤と略す）を開発し、その性能改善に至るメカニズムを解明する為に検証を進めてきた^{[1],[2]}。潤滑油を構成する成分の違いが、軸受の寿命に与える影響について、スラスト玉軸受寿命試験機を用いて、実際に試験片となるスラスト玉軸受が破損するまでの寿命時間を観測することで検証してきた。このスラスト玉軸受寿命試験機には図1に示すように三軸加速度計や、潤滑油膜を電気抵抗と見なした電氣的接触抵抗法（Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下、ECR と称す）観測回路を取付け、試験片であるスラスト玉軸受が寿命に至るまでの潤滑状態についても観測している。

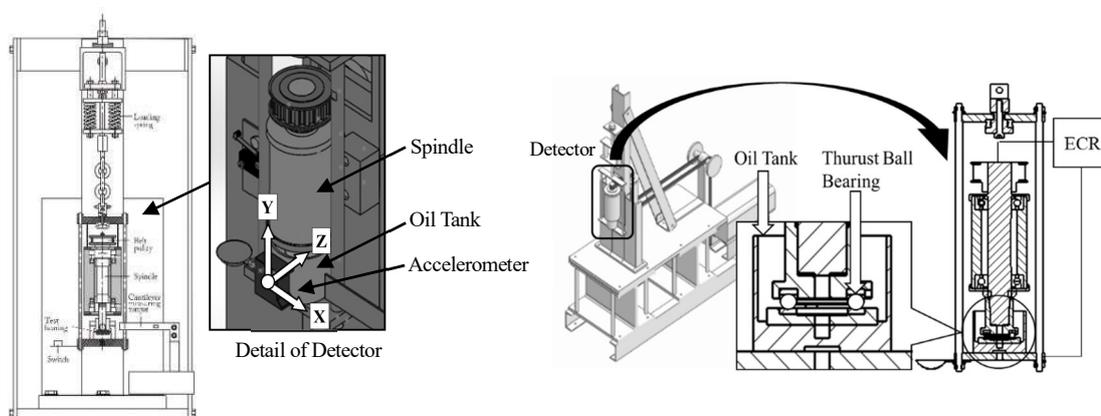


Fig.1 Detector for Evaluating Fatigue Life of Thrust Ball Bearing

軸受寿命試験における軸受の損傷原因の一つとしてフレーキングが挙げられる。接触面に局所的なヘルツ圧力を繰り返し受けることによって疲労し、表面が剥離するメカニズムが想定されている。この疲労の原因は接触面が境界潤滑状態になることで生じる軸受転送面と転動体の直接接触だと考えられている。過去の研究結果からギア油 VG320 に新還元添加剤を添加することによって寿命延長効果を確認している^{[1],[2]}。新添加剤を添加していない VG320 を用いた寿命試験における ECR 観測では、軸受寿命末期に潤滑油膜が欠損し、それと同時期に有次元の加速度も上昇することが明らかとなっており、ECR 観測回路を用いることで軸受寿命試験における軸受の潤滑状態の状態監視が期待される^[2]。このように潤滑油を構成する成分の違いによって軸受の寿命に影響を与えることは明らかとなったが、どのようなメカニズムで寿命延長に至ったのか検証が必要である。

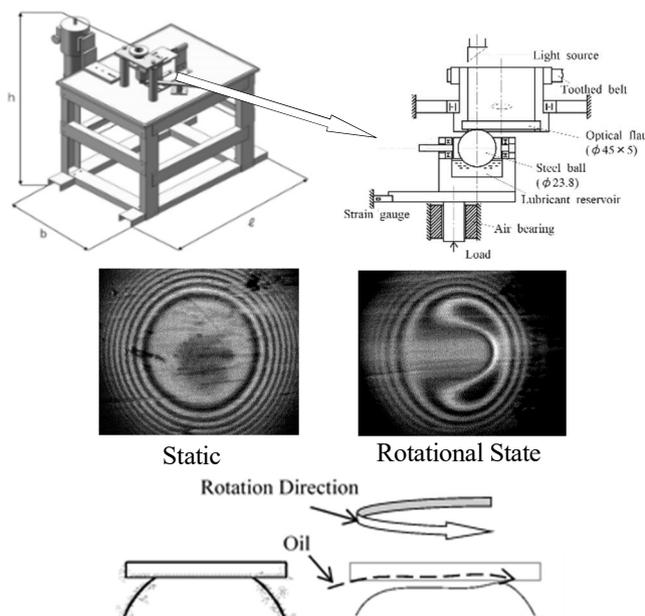


Fig.2 Observation Machine of the Contact Surface in Bearing

そこで、軸受の軌道面と転動体間に形成される潤滑油膜の状態に着目した。図2に示す軸受の軌道面をオプティカルフラットに置き換えた潤滑油膜可視化装置を用いて、転動体接触面に形成される油膜の干渉縞を光学的に直接観察し、Hamrock-Dowson が示した理論膜厚の式^{[3],[4],[5]}を用いて油膜厚さの評価に取組んできた。

潤滑油膜可視化装置を用いた油膜観察では、新油と寿命試験において軸受損傷を起こした後の潤滑油の膜厚をそれぞれ観測することで、潤滑油の劣化が軸受の寿命に与える影響についても検証を進めている。図3はギア油 VG320 (油温 40°C) における寿命試験前後の油膜観測結果である。図3では接触円形内部に現れる干渉縞を形成する明暗が反転しており、同心円状に広がる白と黒の境目が6ヶ所から5ヶ所へと減少していることから、軸受損傷後の潤滑油は新油に対して膜厚さの減少している様相が観察できる^[6]。

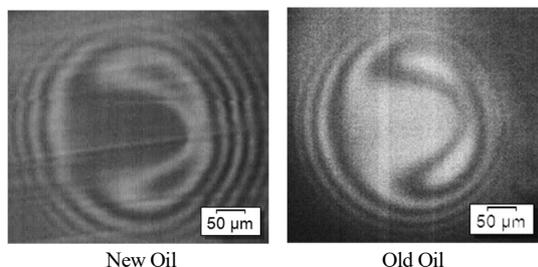


Fig.3 Observation results of VG320(40°C)

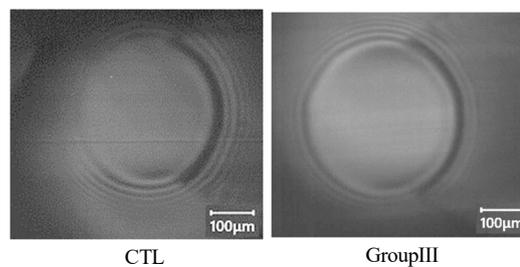


Fig.4 Observation results of 0W-8(20°C)

近年の自動車用潤滑油は更なる省エネルギー化を目的として低粘度化が進んでおり、著者らも 0W-8^[7]相当の極低粘度エンジン油についての性能評価に取り組んでいる。この極低粘度エンジン油は石炭由来のエンジン油であり Coal To Liquids (以下、CTL) と石油由来の鉱物油 GroupIII(以下、GroupIII)である。石油や石炭といった化石燃料には可採年数があり、資源の乏しい日本においては石炭由来である CTL の需要は今後増加すると期待されている。この2つの油の性能比較観測を行い、従来の石油由来のエンジン油に対して、石炭由来のエンジン油が性能的に代替可能であるか検証を行った。図4に其々の転動時 (油温 20°C) における膜観測結果を示す。左が CTL, 右が GroupIII である。それぞれ接触円形の内部に僅かながら馬蹄形の形状を確認することができるが、干渉縞を確認することが難しく、油膜厚さと潤滑状態評価における新たな問題となっている。

そこで、新たな油膜の評価方法の一つとして、前述のスラスト玉軸受寿命評価試験において、軸受の状態監視技術のひとつとして利用している ECR^[2]に着目した。ECR には交流電源を用いるインピーダンス法と、直流電源を用いる電気抵抗法が広く知られている^[8]。著者らは、これまでに実績もあり、設備的に簡易な直流電源を用いた ECR 観測回路を潤滑油膜可視化装置に取付け、油膜状態について電氣的に評価観測できないかとの結論に至った。その観測原理と結果について本報にて紹介する。

2. 電氣的接触抵抗法 (ECR) の観測理論

ECR 観測理論は、転がり玉軸受の軌道面と転動体間に形成される潤滑油膜を電気抵抗として考える。図5に ECR 観測回路を示す。図6はストライバック曲線と、軸受軌道面と転動体の表面粗さと油膜厚さの関係を示している。軸受の接触表面粗さに対して油膜が潤沢に形成されている場合は流体潤滑となり、電気抵抗は無窮大となる。一方で接触表面粗さよりも油膜が薄い場合では、軌道面と転動体が直接接触する境界潤滑となり電気抵抗は 0 Ω となる。この電気抵抗に伴う電圧値の変化から油膜の形成状態を観測する方法が ECR である。

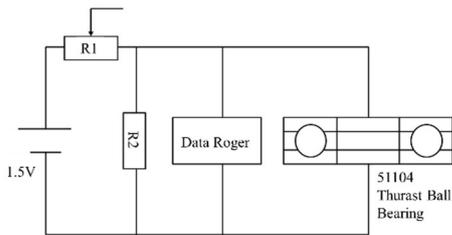


Fig.5 Circuit Diagram of ECR

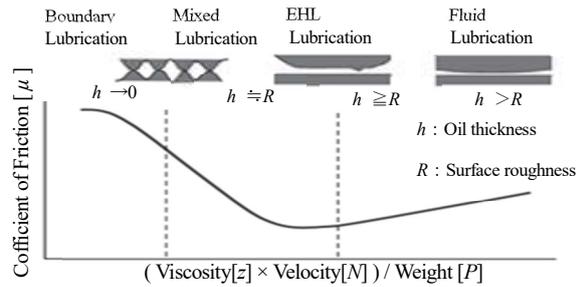


Fig.6 Stribeck Curve

弾性流体潤滑（EHL）条件下では転動体，軸受軌道面の表面粗さと形成される油膜の厚みによっては，直接接触を繰り返すこととなる．そのため軸受の電気抵抗値は無量大と 0Ω の間を変動することとなる．形成されている油膜が厚いほど印加電圧に近い値を示すため，式（1）のように ECR 観測回路の軸受部の最大印加電圧に対する測定電圧の比を分離度として評価する．

$$\text{分離度} = \frac{\text{測定電圧}}{\text{軸受の最大印加電圧}} \quad \dots (1)$$

3. 油膜厚さと ECR 観測値

3.1 油膜厚さと ECR 観測値の関係 電気的接触抵抗法（ECR）

潤滑油膜可視化装置を ECR 観測が可能となるように改造し，油膜厚さが既知である試料油について光学的な潤滑油膜を観測する場合と同じ運転条件で ECR 観測を行った．各試料油の ECR 観測における分離度と油膜厚さを比較評価し，その関係性について検証した．

3.2 潤滑油膜可視化装置を用いた ECR 観測

図 2 に示す潤滑油膜可視化装置は，軸受の外輪をオプティカルフラットに置き換えることで，油膜を光学的に観測している．今回の ECR 観測では，オプティカルフラット部分を鋼板（S45C）に置き換える．ECR 観測回路の接点を軸受外輪に相当する鋼板と，転動体に相当する鋼球の回転軸上に設ける．観測時には，鋼板と鋼球は回転するため，接点に銅製のモータブラシを転用している．油槽に試料油を投入し，鋼板と鋼球間に形成される油膜状態を観測する構成である．その詳細を図 7 に示す．

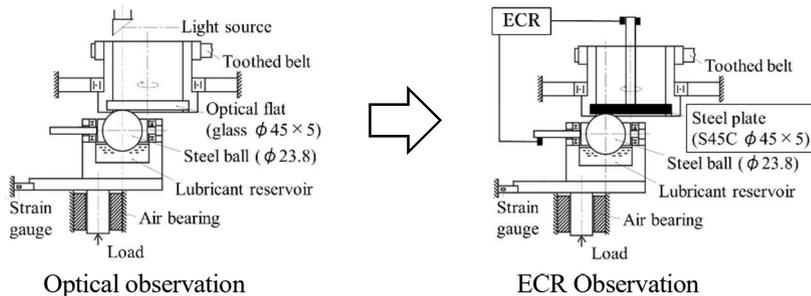


Fig.7 Change of observation method from optics to ECR

試験条件は油膜観測手順と同様に周速 0.52m/s ，荷重は 19.6N としている．その際のヘルツ接触圧は 463MPa となる．ここで，可視化装置で用いる鋼板（S45C）は直径 45mm ，厚さ 5mm （ポアソン比： $\nu=0.25$ ，縦弾性係数： $E=205\text{GPa}$ ，表面粗さ $0.366\mu\text{m}$ ）であり，鋼球は直径 $\Phi=23.8\text{mm}$ （ $\nu=0.3$ ， $E=208\text{GPa}$ ，表面粗さ $0.06\mu\text{m}$ ）である．外輪材質をオプティカルフラットから鋼板に変更しているため光学的観測における理論膜厚^[2]は補正している．

ECR 観測回路は軸受の軌道面と転動体の接触面に形成される潤滑油膜を可変抵抗と考えて観測をしている。しかしながら、ECR 観測回路は接点であるモータブラシ部と、試験機自体の内部抵抗の影響も受ける。そこで試料油を用いずに鋼板と鋼球が直接接触状態における分離度を測定する。その結果を図 8 に示す。理論上は直接接触しているため、抵抗値は 0Ω となり分離度は 0% となるが、前述した内部抵抗の影響から僅かに分離度が上昇する。この直接接触した導通状態の分離度を ECR 観測値の内部抵抗値と考え、各試料油の観測結果から減ずることで評価を行う。また観測時期によりモータブラシの摩耗具合も変化するため、観測毎に内部抵抗値を測定する。

次に、ECR 観測回路への最大印加電圧の調整を行う。

鋼板と鋼球を切り離し、絶縁状態で最大印加電圧を調整する。公知の事実として、軸受の印加電圧が高すぎる場合には、油膜の破壊が起きるため、通常は 100mV 程度が上限と言われている^[9]。しかしながら、軸受の印加電圧が低すぎる場合には油膜が無い状態においても抵抗値が無限大となり分離度が 100% に近い値を示す場合もある。

したがって、著者らは強制的な導通状態で試験機の内部抵抗を考慮し、分離度が 0% 、絶縁状態において分離度が 100% となるように図 5 に示す可変抵抗 $R1$ を調整し、軸受の最大印加電圧を 50mV に設定した。

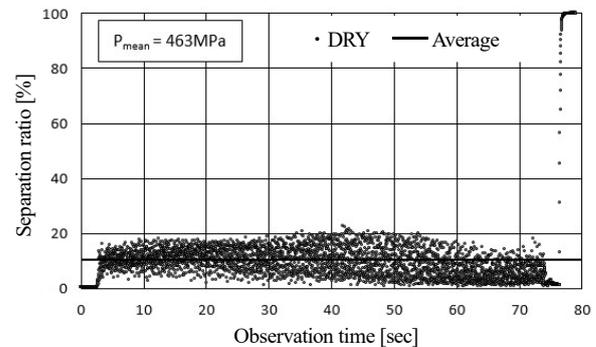


Fig.8 ECR observation results (DRY)

3.3 ECR 観測条件

ECR 観測で用いた試料油は光学観測において油膜厚さの判別が難しかった極低粘度エンジン油である CTL, GroupIII の 2 種と、油膜厚さが既知である、エンジン油 (5W-30)、ギア油 (VG320) と、それぞれに SOD-1PN を $10\text{Vol}\%$ 添加した合成油の 4 種の計 6 種である

前述の 2 種の極低粘度エンジン油に加えて、後述の 4 種の試料油を用いた理由は、エンジン油とギア油で、油温 40°C における動粘度が $57.7\text{mm}^2/\text{s}$ と $288\text{mm}^2/\text{s}$ であり、このように幅広い動粘度において、同じ観測条件で ECR 観測ができるのか検証する。加えて、エンジン油とギア油に新添加剤を $10\text{Vol}\%$ 添加することで、無次元油膜厚が各々 1.32 倍と 1.30 倍上昇することを確認している^[2]。継続試験においても多少の振れ幅は生じるが再現性を確認している。これら僅かな膜厚の変化を ECR 観測が可能であるか検証するためである。

ECR 観測条件は軸受の最大印加電圧を 50mV として、周速を 0.52m/s 、荷重条件は面圧 463MPa 試料油の油温 40°C にて行った。観測時間 $10\text{s} \sim 60\text{s}$ の 50 秒間の分離度を観測し、平均分離度として評価を行った。

3.4 ECR 観測結果

表 1 に潤滑油膜可視化装置を用いた各試料油の周速 0.52m/s における ECR 観測における平均分離度を示す。併せて比較対象として過去の試験^{[1][2]}における無次元油膜厚さと、動粘度を示す。極低粘度エンジン油 $0\text{W}-8$ と、エンジン油 $5\text{W}-30$ 、 $\text{VG}320$ の観測時期では潤滑油無し時の内部抵抗値に違いがあったため併記している。

Table 1 ECR observation results using a visualization device

Oil Type	DRY at 0W-8	DRY at 5W-30 VG320	Engine Oil				Gear Oil	
			0W-8 CTL	0W-8 group III	5W-30	5W-30 +SOD-1PN [10Vol%]	VG320	VG320 +SOD-1PN [10Vol%]
Surface pressure [MPa]	463	463	463	463	463	463	463	463
Oil temperature [°C]	-	-	20	20	40	40	40	40
Average separation [%]	3.2	10.4	16.05	8.52	31.7	42.8	68.1	94.9
Dimensionless film thickness	-	-	3.32×10^{-5}	3.32×10^{-5}	3.06×10^{-5}	4.03×10^{-5}	3.88×10^{-5}	5.06×10^{-5}
Kinematic viscosity [mm^2/s]	-	-	18.39	18.31	57.7	59.2	324	288

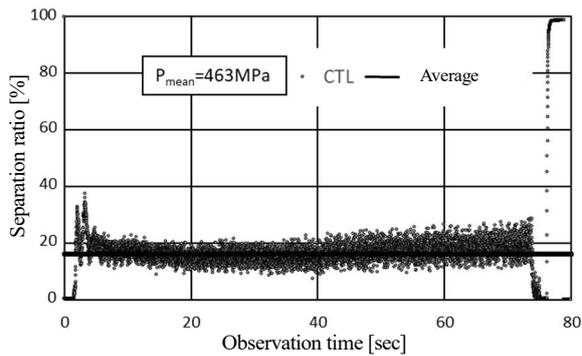


Fig.9 ECR observation results (CTL 20°C)

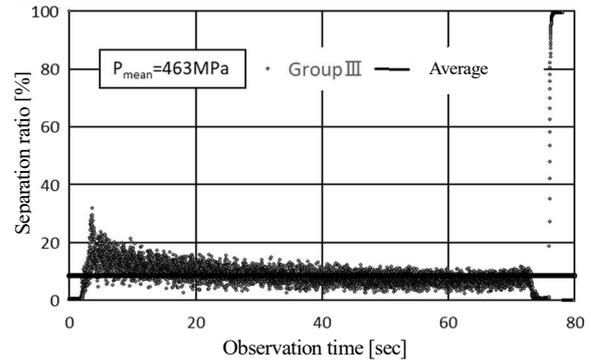


Fig.10 ECR observation results (GroupIII 20°C)

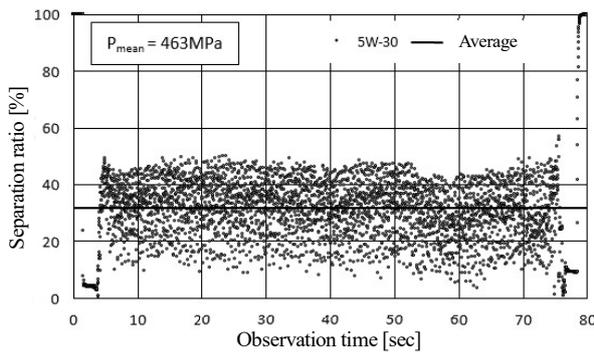


Fig.11 ECR observation results (5W-30 40°C)

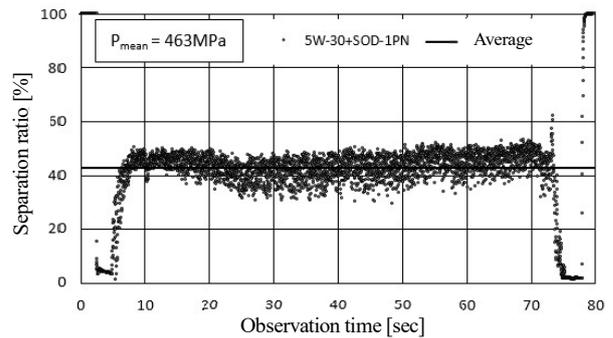


Fig.12 ECR observation results (5W-30+SOD-1PN 40°C)

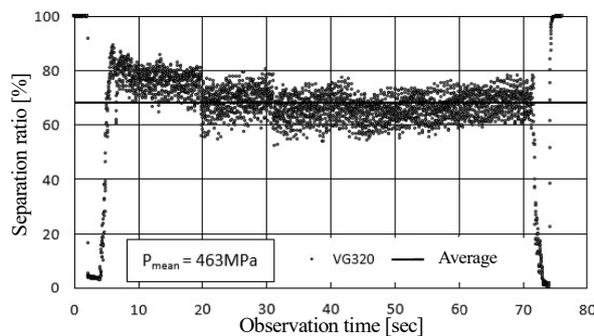


Fig.13 ECR observation results (VG320 40°C)

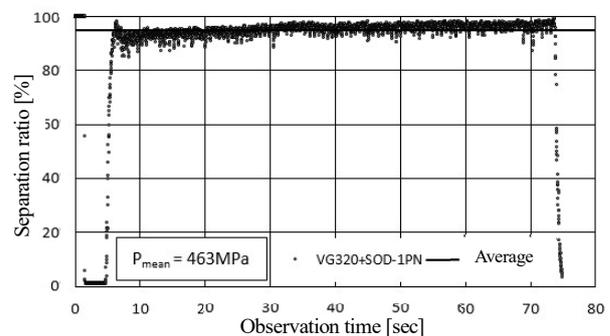


Fig.14 ECR observation results (VG320+SOD-1PN 40°C)

各資料油の ECR 観測回路観測結果，図 9，図 10，図 11，図 12，図 13，図 14 にそれぞれ示す．各グラフの縦軸は分離度，横軸は観測時間，平均分離度を線形にて表している．

極低粘度エンジン油である CTL（図 9）と GroupIII（図 10）は油温 20°Cでの観測結果である．本来は油温 40°Cでの観測をすべきであるが，極低粘度のため光学的観測，ECR 観測も難しい結果であり油温 20°Cにおける結果を示している．光学的観測による無次元油膜厚さでは差が見られなかったが，ECR 観測による分離度において，CTL は GroupIII の 1.88 倍高い観測結果であった．

表 1 から動粘度が異なるエンジン油 5W-30 とギア油 VG320 それぞれの油温 40°Cにおける分離度を観測することができている．試料油の動粘度が大きくなることで平均分離度も大きくなる傾向が認められた．

エンジン油 5W-30 とギア油 VG320 に新添加剤を 10Vol%添加した場合，ECR 観測における分離度は各々 1.35 倍と 1.39 倍が認められた．光学的観測による無次元油膜厚さは各々 1.32 倍と 1.30 倍上昇²⁾していることから，光学的観測結果と電氣的観測結果が同様の傾向であり，その僅かな膜厚上昇の差についても ECR 回路を用いて観測できることを確認した．

また、ギア油 VG320 では新添加剤を添加することによって動粘度が低下しているが、無次元油膜厚さが上昇していた。今回の ECR 観測においても、同様に分離度が上昇していることから、この現象は添加剤の成分による影響と考えられる。

一方で、エンジン油 5W-30 に新添加剤を添加したものとギア油 VG320 の無次元油膜厚さは各々 4.03×10^{-5} と 3.88×10^{-5} であり 1.03 倍減少している^[2]。しかしながら、分離度では 1.59 倍上昇していた。

これらの観測結果から ECR 観測は、極低粘度エンジン油 0W-8 のように光学的観測での比較評価が難しかったが、観測結果から分離度に差が認められた。また、基準油に添加剤を添加した場合のように、同じ粘度域の資料油を比較する場合は、各々の光学的観測による無次元油膜厚さと分離度には一定の関係が認められた。しかし、異なる動粘度域の資料油を比較する場合には現時点では齟齬が生じている。今後は、様々な動粘度の資料油について、動粘度に応じて印加電圧を調整するなど、最適な観測条件の検証を進めたい。それによって、異なる動粘度の試料油であっても比較評価が可能となり、ECR 観測の精度が向上するのではないかと期待される。

4. 結 言

- 1) 極低粘度エンジン油 0W-8 の CTL と GroupIII の油膜観測において、光干渉法では差が認められなかったが、ECR 観測結果における平均分離度では CTL は GroupIII の 1.88 倍高いことが認められた。
- 2) 潤滑油膜可視化装置を用いて ECR 観測を行った結果、エンジン油 5W-30 とギア油 VG320 において分離度に大きな差が確認できた。このことから動粘度と分離度には一定の関係があると考えられる。
- 3) エンジン油 5W-30 とギア油 VG320 において、新添加剤 SOD-1PN を 10Vol% 添加することで平均分離度は各々 1.35 倍と 1.39 倍上昇する。
- 4) エンジン油 5W-30 とギア油 VG320 において、潤滑油膜可視化装置を用いた光学的な観測による油膜厚さと、ECR 観測による平均分離度には一定の関係が認められた。

文 献

- (1) 竹田雄祐, 里永憲昭, 城戸祥成, 渡邊孝司, 園田智之: 弾性流体潤滑条件下における新還元添加剤(SOD-1PN)の挙動に関わる考察, 日本設備管理学会誌 第 31 巻 4 号 (2020) pp.85-89
- (2) 河野裕典, 里永憲昭, 竹田雄祐, 渡邊孝司, 園田智之: 電気的接触抵抗測定法(ECR)を用いた損傷メカニズムに関する傾向監視, 第 18 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, pp122-127 (2019)
- (3) 杉村丈一: EHL 油膜計算式, トライボロジスト, Vol 49, No.10, pp51-52, (2004)
- (4) T.Mawatari, T.Harada, M.Yano, H.Shiomi, S.Obara, N.Ohno: Rolling Bearing Performance and Film Formation Behavior of Four Multiply- Alkylated Cyclopentane (MAC) Base Greases for Space, Application Tribology Transaction pp561 -571, 56, 4 (2013)
- (5) B.J.Hamrock&D.Dowson: Ball Bearing Lubrication, John Wiley & Sons(1981)
- (6) 城戸祥成, 里永憲昭, 竹田雄祐, 奥田直史:メタロセン触媒を用いたポリ α オレフィン合成油における剪断劣化を受けた EHL 条件下の油膜の観察, 第 18 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, pp128-133 (2019)
- (7) 大木啓司, 蓬田知行, 原山貴登, 葛西杜継: 年鑑 22 燃料・潤滑油・グリース, 自動車技術 第 74 巻 8 号(2020) pp.1
- (8) 前田成志, 丸山泰右, 中野健: EHD 接触における膜厚と破断率の同時測定—インピーダンス法の検証, NSK Technical Journal No.691 (2019) 51-155
- (9) 村木正芳: 「図解トライボロジー—摩擦の化学と潤滑技術」, 日刊工業新聞社, pp91-94 (2007)