

2020年度秋季研究発表大会特集 速報論文

直流電源を用いた電気的接触抵抗法による 油膜厚さと油膜形成状態の評価手法

竹田雄祐* 里永憲昭* 狩野将矢* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学 **D1 ケミカル

An Evaluation Method of Oil Film Thickness and Oil Film Condition
by Electrical Contact Resistance Method Using DC Power Source

Yusuke TAKEDA*, Noriaki SATONAGA*, Masaya KANO*,
Takashi WATANABE**, Tomoyuki SONODA**

*Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan

**D1 Chemical Co., Ltd., Japan

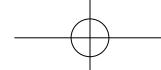
著者らは、これまで潤滑油を構成する成分の違いが軸受寿命延長に与える影響について検証してきた。そこで転がり軸受の転動体と軌道面に形成される潤滑油の油膜厚さや潤滑状態について、光干渉法を用いて観測し、比較評価に取組んできた。しかしながら、近年の自動車用潤滑油は機械摩擦損失の低減などを目的として極低粘度化しており、形成される潤滑油膜の厚さも著しく薄膜化しているため、光干渉法を用いた観測のみでは比較評価することが難しくなっている。そこで、新たな潤滑油膜の評価方法として、油の絶縁性を利用し、電気抵抗の変化から軸受接触面間の電圧の変化を測定することで、潤滑油膜の形成状態を観測する電気的接触抵抗法（Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下 ECR と略す）を用いて油膜の状態観察を開始した。今回は潤滑油膜可視化装置に ECR 観測回路を取り付け、軸受接触面に形成される潤滑油膜状態の電気的な観測結果と、これまで観測してきた光学的油膜厚さとの比較結果について報告する。

キーワード:エンジン油, ギア油, エステル系添加剤, 接触抵抗法, 状態監視

The authors have examined the effects of different components of lubricating oil on bearing life extension. In doing so, we have been working on a comparative evaluation by observing the oil film thickness and lubrication state of the lubricating oil formed on the rolling element and the raceway surface of the rolling bearing using an optical interferometry instrument. However, in recent years, lubricating oils for automobiles have become extremely low in viscosity for the purpose of reducing mechanical friction loss, and the thickness of the lubricating oil film formed is also significantly thinned. This causes difficulty in making a comparative evaluation with a single method using optical interferometry.

Therefore, as a new evaluation method for the oil film and lubrication state of the lubricating oil, the electrical contact resistance (ECR) method is used to observe the change in voltage between the bearing contact surfaces and the formation state of the lubricating oil film using the change in the insulation resistance of the oil. This time, we have attached an ECR observation circuit to the lubricating oil film visualization device and report the comparison between the electrical observation results of the lubricating oil film state formed on the bearing contact surface and the optical oil film thickness observed so far.

KEY WORDS: engine oil, gear oil, ester-based additives, contact resistance method, condition monitoring



1. まえがき

著者らは、これまで自動車や産業用機械の寿命延長を目的としてエスカ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、図1に示すスラスト玉軸受寿命試験機を用いて実際の寿命延長効果を検証してきた。また、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]を用いて油膜厚さの評価に取組んできた。これらの研究結果から、添加剤に含まれる成分の効果によって、軸受転送面に形成される油膜の膜厚が増加して、境界潤滑条件から流体潤滑条件に遷移することで、軸受寿命が延長されているとの仮説に至った^{[1][2]}。

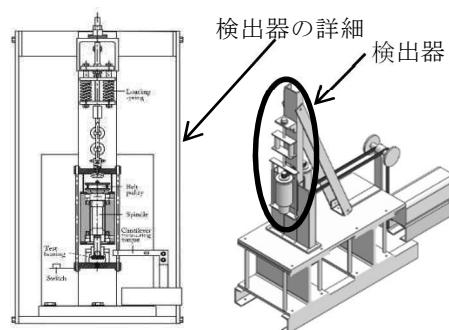


図1 スラスト玉軸受寿命試験機

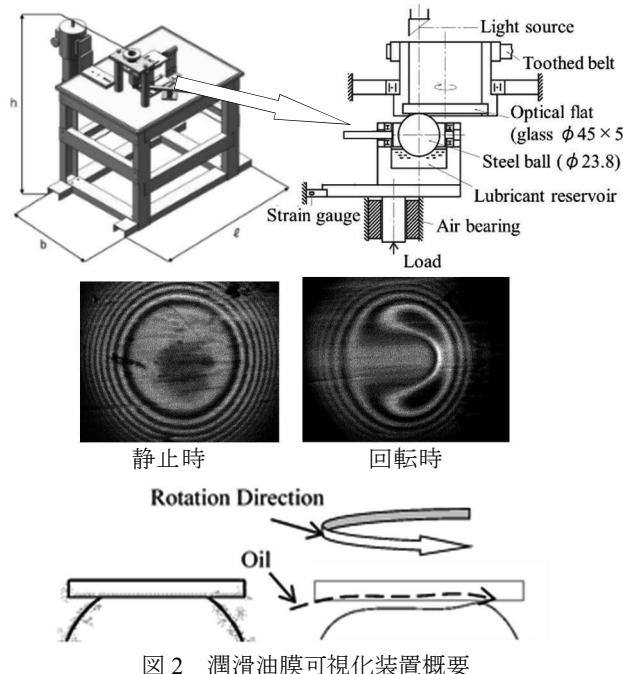


図2 潤滑油膜可視化装置概要

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^[3]。

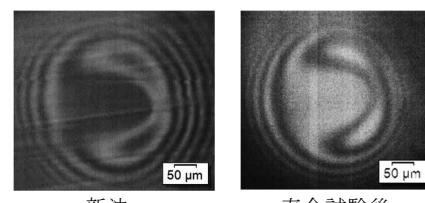


図3 ギア油(VG320)の観測結果(40°C)

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^[4]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。

図4は成分構成が異なる二種類の極低粘度エンジン油 (0W-8 油温 40°C) の転動時における、潤滑油膜の観測画像であり、左がサンプル A、右がサンプル B である。それぞれ接触円形の内側に僅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、油膜観察と状態評価における新たな問題となっている。

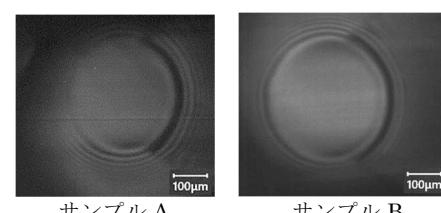


図4 低粘度エンジン油の潤滑油膜観測画像

そこで、新たな油膜の評価方法の一つとして、油の絶縁性を利用した油膜の観測技術に着目した。これらの技術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^[5]。著者らは、これまで設備的に簡易な直流電源を用いた電気的接触抵抗法 (ECR) を、軸受寿命評価試験における軸受の状態監視技術のひとつとして利用している^[6]。

この 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気的に評価観察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. 電気的接触抵抗法 (ECR)

2.1 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 はストライベック曲線と、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、電気抵抗は無限大となる。一方で接触表面粗さよりも油膜が薄い場合には、軌道面と転動体が直接接觸する境界潤滑となり電気抵抗は 0Ω 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。

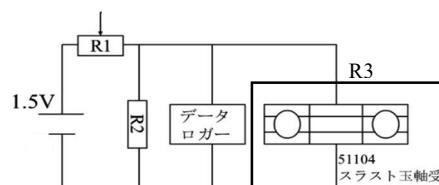


図 5 ECR 観測回路図

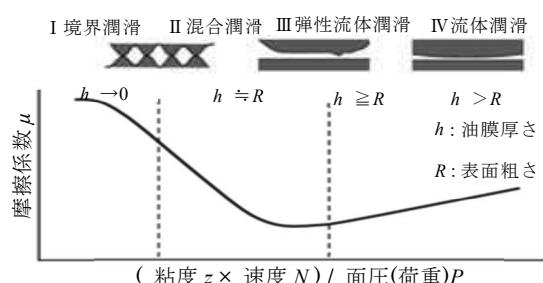


図 6 ストライベック曲線と軌道面の油膜形成状態

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、直接接觸を繰り返すこととなる。そのため軸受の電気抵抗値は無限大と 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。

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

2.2 ECR を用いた軸受の状態監視

これまで著者らは、図 1 に示したスラスト玉軸受寿命試験機に図 7 に示すように ECR 観測回路を取り付け、軸受寿命と潤滑油膜の形成状態を観測してきた。油槽内にスラスト玉軸受 51104 を、面圧を高めるために転動体数を 13 個から 3 個に減じて設置し、スラスト荷重 4.4kN を加え、上輪をモータにより回転速度 750rpm で回転させ、

下輪を固定している。ECR 観測回路の接点を上輪側と下輪側に取付け、軌道面と転動体間に形成される潤滑油膜の電気抵抗を測定している。なお、上述箇所以外に導通を防止するために樹脂製部品を設けて絶縁をしている^[6]。

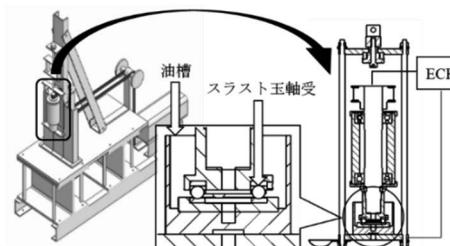


図 7 ECR 取付け位置

実際にギア油 VG320 を用いて、軸受がフレーキングに至った寿命試験における ECR 観測結果を図 8 に示す。

縦軸は軸受の最大印加電圧 50mV に対する分離度であり、横軸は実際の試験時間と Lundberg-Palmgren の寿命理論^[1]から求めた理論寿命時間 $Lo=15.14[h]$ に対する実稼働時間 La を併記している。

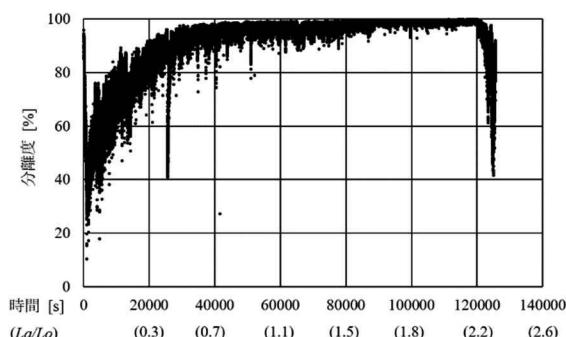


図 8 軸受寿命試験における ECR 観測結果(ギア油 VG320)

試験開始直後の軸受は、油膜に対して軌道面の表面粗さが大きいため、分離度の変動幅が大きく境界潤滑と考えられる。40,000 秒以降の分離度は 90%から 100%の間で変動している。これは軸受の馴染みが進み軌道面と転動体の表面粗さが油膜に対して小さい状態へ変化し、境界潤滑から混合潤滑へ移行したと考えられる。120,000 秒以降に軌道面に疲労が蓄積し $3.10 \times 2.25\text{mm}$ のフレーキングが発生し、再び境界潤滑状態へ移行したと考えられる。図 9 に実際の損傷部位を示すが、このように 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状態監視が期待される。

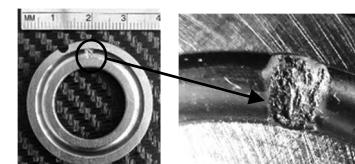
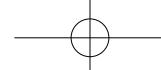


図 9 軸受寿命試験における軸受損傷の状況



3. 油膜厚さと ECR 観測値

3.1 油膜厚さと ECR 観測値の関係

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察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 10 に示す。

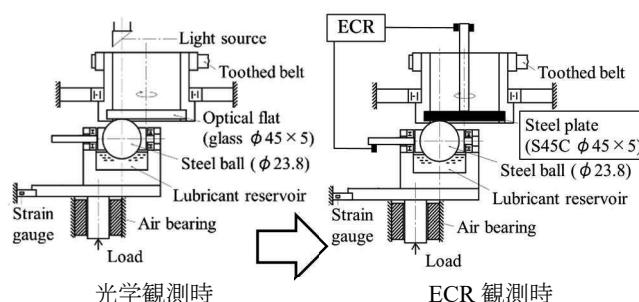


図 10 潤滑油膜可視化装置への ECR 観測回路

試験条件は油膜観測手順と同様に周速 0.52m/s とし、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 $\phi=23.8\text{mm}$ (ポアソン比: $\nu=0.3$ 、縦弾性係数: $E=208\text{GPa}$ 、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で分離度を測定する。その結果を図 11 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。

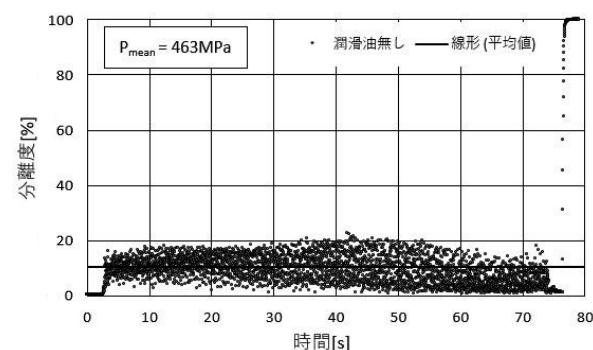


図 11 ECR 観測結果 潤滑油無し

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^[7]。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% となるよう图 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。

3.3 ECR 観測条件

ECR 観測で用いた試料油は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 10Vol% 添加した合成油の 4 種である。

この 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 10Vol% 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 10s～60s 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

潤滑油膜可視化装置を用いた ECR 観測結果を図 12, 13, 14, 15 にそれぞれに示す。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。

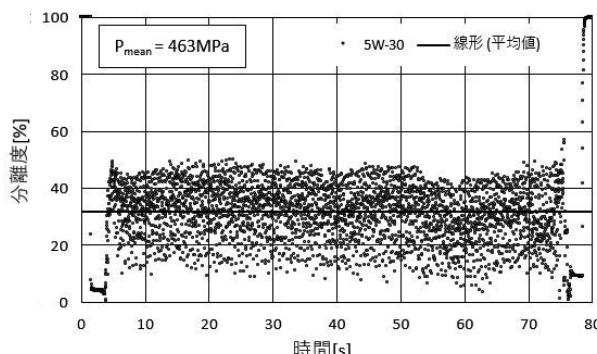


図 12 ECR 観測結果 エンジン油 (5W-30)

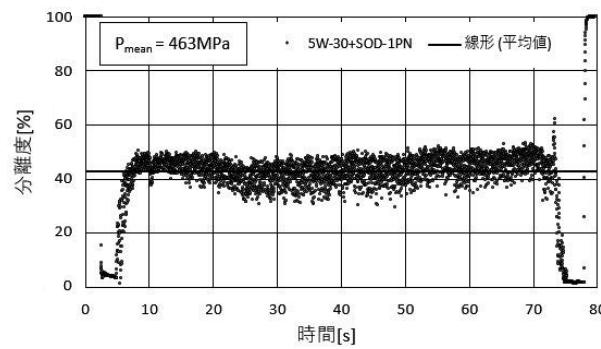


図 13 ECR 観測結果 エンジン油 (5W-30+SOD-1PN)

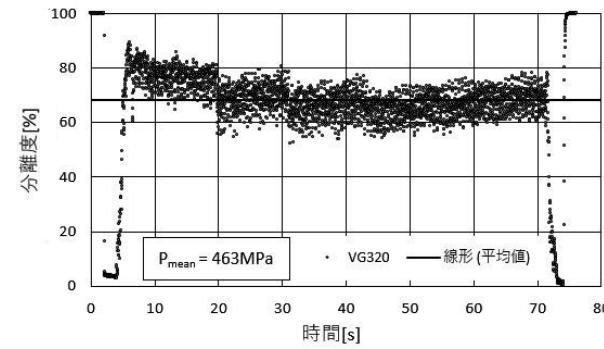


図 14 ECR 観測結果 ギア油 (VG320)

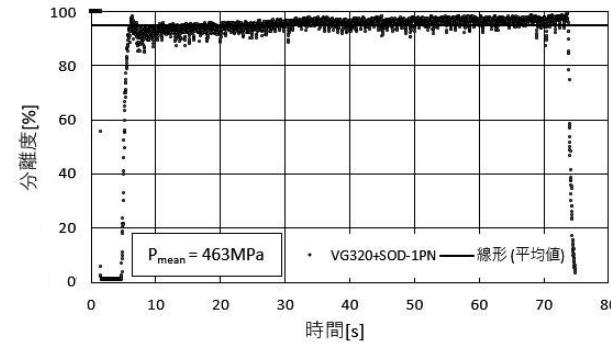


図 15 ECR 観測結果 ギア油 (VG320+SOD-1PN)

表 1 可視化装置における ECR 観測結果

試料油 (油温40°C)	潤滑油無し	エンジン油		ギア油	
		5W-30	5W-30 +SOD-1PN [10 vol %]	VG320	VG320 +SOD-1PN [10 vol %]
面圧 [MPa]	463	463	463	463	463
平均分離度 [%]	10.4	31.7	42.8	68.1	94.9
同条件下 無次元油膜厚さ	-	3.06×10^{-5}	4.03×10^{-5}	3.88×10^{-5}	5.06×10^{-5}
動粘度 [mm^2/s]	-	57.7	59.2	324	288

表 1 に潤滑油膜可視化装置を用いた各試料油の油温 40°C, 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における無次元油膜厚さと、動粘度を示す。

表 1 から動粘度が異なるエンジン油 5W-30 とギア油 VG320 を、同じ ECR 観測回路を用いて、印加電圧 50mV 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る。

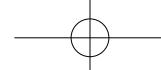
エンジン油 5W-30 とギア油 VG320 に新添加剤を 10Vol% 添加した場合、ECR 観測における分離度は各々 1.35 倍と 1.39 倍が認められた。光学的観測による無次元油膜厚さは各々 1.32 倍と 1.30 倍上昇^[2]していることから、光学的観測結果と電気的観測結果が同様の傾向であり、その僅かな膜厚上昇の差についても ECR 回路を用いて観測できることを確認した。

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、分離度には 1.59 倍上昇していた。

これらの観測結果から ECR 観測は、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、異なる動粘度の資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 論

潤滑油膜可視化装置を用いた ECR 観測結果から下記のことが判明した。

- 1) 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認められる。
- 2) 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。
- 3) 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。

謝 辞

最後に試験の機器調整等にご協力いただいた(有)D1 ケミカル営業部 園田夕喜殿、試験機器の改造に指導頂いた崇城大学ものづくり創造センター職員の方々と、試験に協力いただいた崇城大学工学部機械工学科生産システム工学研究室の学生諸君に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 竹田雄祐, 里永憲昭, 河野裕典, 渡邊孝司, 園田智之: 転がり軸受の損傷に与える潤滑油新還元添加剤(SOD-1PN)の効果, 日本設備管理学会誌 第 31 卷 2 号 (2019) pp.69-74
- [2] 竹田雄祐, 里永憲昭, 城戸祥成, 渡邊孝司, 園田智之: 弹性流体潤滑条件下における新還元添加剤(SOD-1PN)の挙動に関する考察, 日本設備管理学会誌 第 31 卷 4 号 (2020) pp.85-89
- [3] 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)
- [4] 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 卷 8 号 (2020) pp.151-155

[5] 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)

[6] 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)

[7] 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)



竹田 雄祐 (たけだ ゆうすけ)

崇城大学 (旧熊本工業大学) 工学部機械工学科助教。2008 年久留米工業大学大学院工学研究科修士課程修了。2008 年平田機工㈱入社。2018 年より現職。



里永 憲昭 (さとなが のりあき)

崇城大学工学部機械工学科教授。2009 年三重大学大学院生物資源学研究科博士後期課程修了。1990 年昭和電工㈱入社。2014 年より准教授, 教授。現在に至る。博士 (学術)



狩野 将矢 (かの まさや)

2020 年崇城大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程 2 年生。



渡邊 孝司 (わたなべ たかし)

有限会社 D1 ケミカル (最高顧問)
1969 年関東学院大学工学部 2 部機械工学科卒。久留米工業大学名誉教授。瀋陽大学客員教授。自動車技術会フェロー。2014 年より現職。博士(工学)



園田 智之 (そのだ ともゆき)

有限会社 D1 ケミカル 代表取締役
(〒812-0897 福岡県福岡市博多区半道橋 1-3-45) (TEL 092-292-4439)
1998 年に福岡県自動車整備振興会教育部の協力のもと「SOD-1」を開発する。