

特集技術論文

電気的接触抵抗法を用いた 潤滑油の状態診断技術の検証

竹田雄祐* 里永憲昭* 西 陽希* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学 **D1 ケミカル

Verification of Lubricant Condition Diagnostic Technology
by Electrical Contact Resistance Method

Yusuke TAKEDA*, Noriaki SATONAGA*, Haruki NISHI*,
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、光干渉法と油の絶縁性を利用し、軸受接触面間の電圧と油の電気抵抗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を観察している。これまでの研究で、潤滑油膜状態の光学的な観測結果と電気的な観測結果には関連性があることを確認している。その過程で、軸受の摩耗粉が混入した試料油の観測波形は、確率密度関数を用いてヒストグラム化した際に、特徴的な傾向を確認することができた。回転機械の振動診断では、振動値のヒストグラムの形状から状態診断を行う技術があり、ECR 観測に同様の考え方を用いることで、潤滑油の状態診断ができるのではないかと考えて、人為的に異物を混入させた資料油を用いて検証したので報告する。

キーワード: エンジン油, 接触抵抗法, 潤滑油診断

The authors have examined the effects of different components of lubricating oil on bearing life extension. The thickness of the lubricating oil film formed on the rolling elements and raceways of rolling bearings and the state of lubrication were observed using optical interferometry and measurement for electrical contact resistance (ECR), which uses the insulating property of oil to measure the voltage between bearing contact surfaces and the change in electrical resistance of the oil to observe the state of lubricating oil film formation. Contact Resistance (hereinafter referred to as "ECR") to observe the state of oil film formation by measuring the change in voltage and oil resistance between bearing contact surfaces. In previous studies, we have confirmed that there is a relationship between the optical and electrical observations of the lubricating oil film condition. In the process, a characteristic trend was confirmed when the observed waveforms of sample oil contaminated with bearing wear were histogrammed using a probability density function. In the vibration diagnosis of rotating machinery, there is a technique for condition diagnosis based on the shape of the histogram of vibration values, and we thought that the condition of lubricating oil could be diagnosed by using the same concept for ECR observation.

KEY WORDS: engine oil, contact resistance method, Lubricant diagnosis

1. まえがき

著者らは、これまで自動車用潤滑油や産業用潤滑油について、それを構成する成分の違いが機械の寿命や消費エネルギーにどのような影響を与えるかを検証してきた。例えば、エスティルとメタロセン触媒を用いたポリ 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) を適用することにより、自動車や産業用機械の寿命延長や省エネルギーを示してきた。新添加剤を自動車用エンジン油に 10vol% 添加することで、軸受の転動体と軌道面間に形成する油膜厚さが上昇する。その結果、軸受の軌道面に与える繰返し負荷が軽減して、軸受の寿命延長と消費エネルギーの削減につながることを解明してきた^[1]。軸受に形成される油膜の状態は図 1 に示す潤滑油膜可視化装置を用いて、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^{[2],[3],[4]}を用いて油膜厚さの評価に取組んできた。加えて、油の絶縁性を利用して軸受接触面間の電圧変化から、油膜状態を観測する ECR^{[5],[6]}を用いた油膜の状態観測にも取り組むことで、油膜の状態について光学的観測と電気的観測の結果には、一定の関連性があることを確認した^[7]。

ECR 観測方法は、印加電圧に対する観測電圧の比を分離度として評価しているが、観測波形をヒストグラム化して、その中央値と併せて評価している。図 2、図 3 は実際の ECR 観測波形であり、右が観測時間 10s から 60s のヒストグラムである。縦軸は分離度であり、100%に近いほど油膜が厚いことを示している。

VG320 新油 (図 2) に対して VG320 損傷油 (図 3) は、平均分離度の低下に加えて、ヒストグラムを比較すると新油の尖った分布から、損傷油では低く広がった分布に変化している。これは、試料油中に含まれる軸受の摩耗粉の影響と考えられる。

今回、人為的に損傷油を模した試料油を用いて、ECR 観測を用いた潤滑油の状態診断技術の可能性を検証したので報告する。

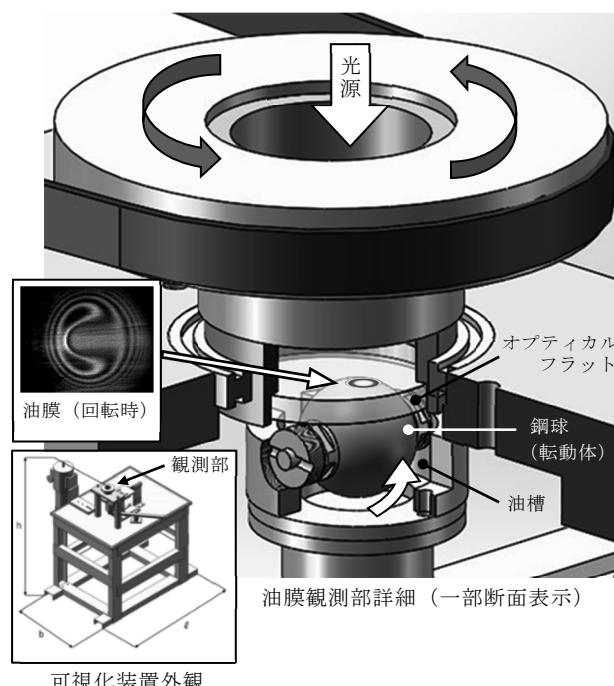


図 1 潤滑油膜可視化装置概要

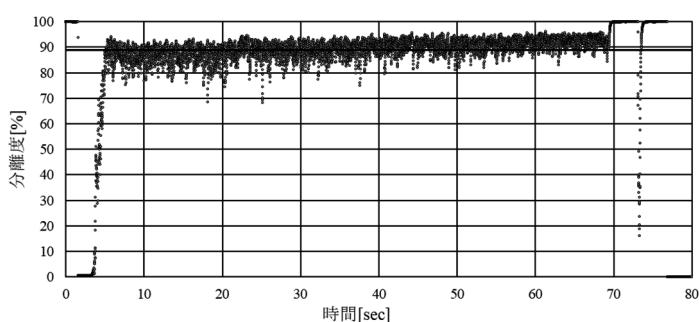


図 2 ECR 観測結果 (VG320)

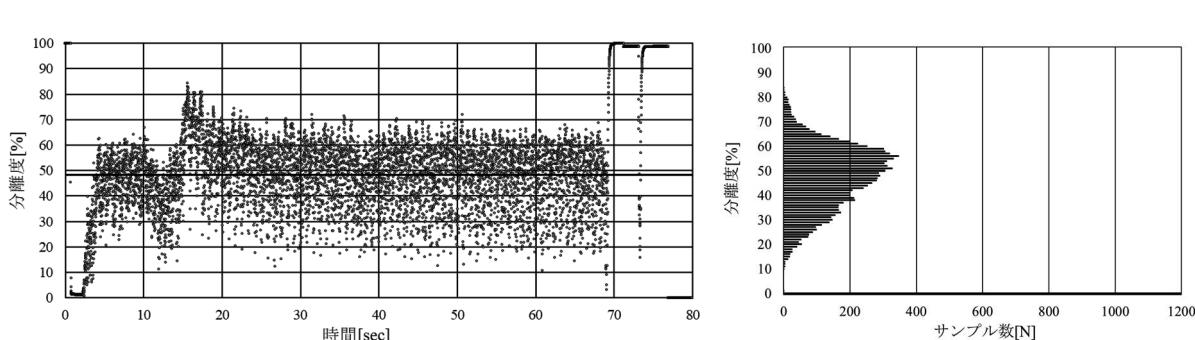
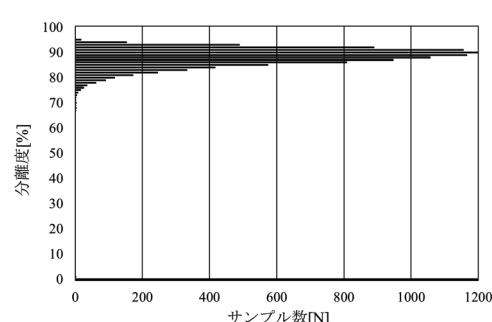


図 3 ECR 観測結果 (VG320 フレーキング損傷)

2. 電気的接触抵抗法 (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 4 に ECR 観測回路を示す。図 5 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滑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 0Ω となる。

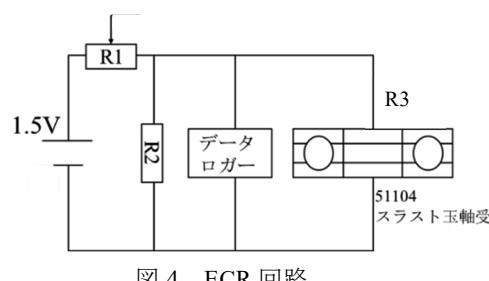


図 4 ECR 回路

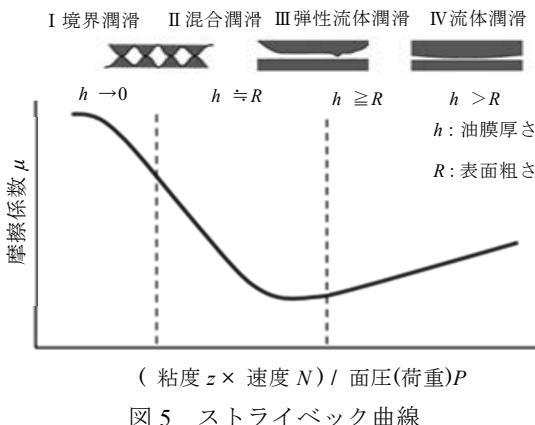


図5 ストライベック曲線

弹性流体潤滑 (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。

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

3. 異物混入試料油の ECR 観測

3.1 潤滑油膜可視化装置による ECR 観測条件

図 1 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、図 6 に示すように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おり、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。

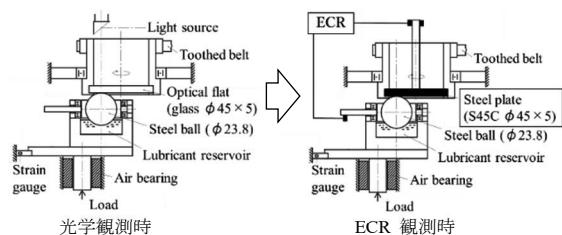


図 6 潤滑油膜可視化装置の ECR 観測への変更点

ECR 観測条件は、油膜の光学観測と同様に周速 0.52m/s 、ヘルツ接触圧は 277MPa （荷重 4.11N ）である。ここで、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 $0.366\text{ }\mu\text{m}$ ）、鋼球は直径 $\varPhi = 23.8\text{mm}$ （ $\nu = 0.3$ 、 $E = 208\text{GPa}$ 、表面粗さ $0.06\text{ }\mu\text{m}$ ）である。

最大印加電圧を 50mV, 試料油の油温は 40°C, 観測時間は 70s 以上とし, その 10s~60s の 50 秒間の分離度を 0.01s 毎に観測し算術平均分離度として評価している。

加えて、10s～60sの50秒間の分離度についてヒストグラム化し尖度を算出する。

ここで、確率密度関数の考え方から、平均を μ 、分散を σ^2 とすると、正規分布は、式 (2) のように定義される^[8]。

$$N(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad \dots \quad (2)$$

確率分布の期待値を E 、確率変数を X とすると、尖度 α_3 は式 (3) で表される^[8]。

$$\alpha_4 = \frac{E(X-\mu)^4}{\sigma^4} \quad \dots \quad (3)$$

正規分布の尖度は $\alpha_4=3$ となり、 $\alpha_4 > 3$ では尖っている、 $\alpha_4 < 3$ では潰れていると、ヒストグラムの形状を評価することができる^[8]。なお、分離度 0% から 100% の範囲における尖度を評価するために、50 秒間で観測した 5001 点の分離度に、指標として分離度 0% と 100% の 2 点を加えた 5003 点の分離度から尖度を算出している。

3.2 試料油

ECR観測を用いた潤滑油の劣化状況の診断能力を検証するに際して、自動車用エンジン油で考えられる劣化や損傷状況を想定した。それは、冷却水の混入やエンジン内の結露等による水分の混入と、摺動部の摩耗による金属粉の混入である。

実際に用いた試料油はエンジン油(5W-30)を基準油として、水分を混入させた資料油は、水道水10wt%を混入し白濁化させて作成している。金属粉を混入させた試料油は、平均粒子径0.3μmのアルミナ粉末(酸化アルミニウムAL₂O₃)を0.01wt%, 0.1wt%, 1wt%, 10wt%混入濃度を変えて作成している。

数ある金属素材の中からアルミナを選択した理由は、潤滑油膜の光学観測において、その流動状態を確認するための指標として試料油に混入実績があるためである。

以上6種類の試料油を用いてECR観測している。

3.3 ECR観測結果

潤滑油膜可視化装置における各試料油のECR観測結果を表1に示す。各試料油のECR観測波形を図7から図12にそれぞれ示す。各図の左側のグラフの縦軸は分離度、横軸は観測時間、観測時間10sから60sの平均分離度を線形にて表示している。右側のグラフは観測時間10sから60sまでの50秒間の観測データをヒストグラム化したものである。

図7は基準油5W-30の観測結果であり平均分離度は35.1%、ヒストグラムの尖度は4.28であった。図8は水道水を10wt%混入し白濁化させた試料油の観測結果である。基準油に対して平均分離度が21.1%に低下し、尖度は8.62と僅かに尖ることを確認した。一般的に水は導体であり、水の圧縮率は油の半分以下であることから、平均分離度が低下したと考えられる。今後、同試料油の光学観測を行い油膜厚さの確認をしたい。

表1 ECR観測結果

試料油	エンジン油 5W-30					
	5W-30	5W-30 water [10wt%]	5W-30 AL0.3 [0.01wt%]	5W-30 AL0.3 [0.1wt%]	5W-30 AL0.3 [1wt%]	5W-30 AL0.3 [10wt%]
平均分離度 [%]	35.1	21.1	17.4	12.6	13.1	8.1
尖度	4.28	8.62	3.91	3.79	41.07	103.67

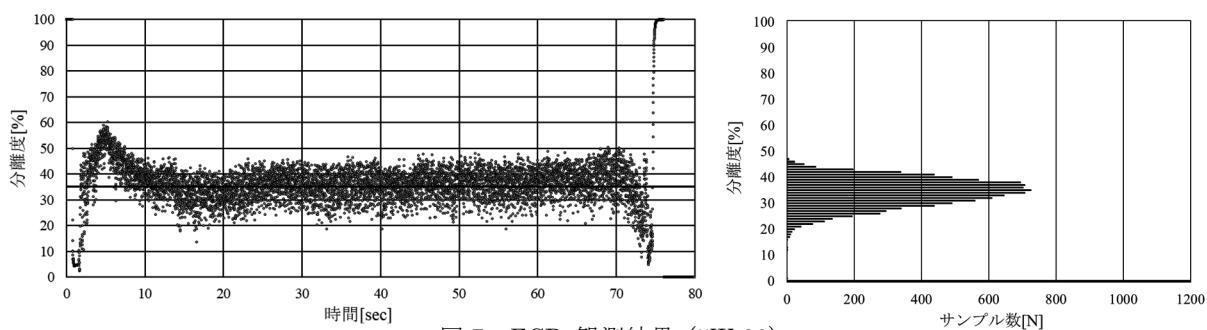


図7 ECR観測結果(5W-30)

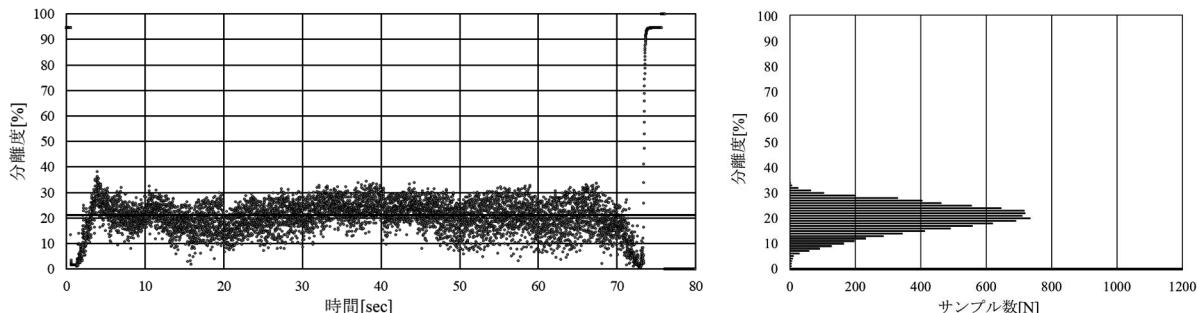


図8 ECR観測結果(5W-30 水道水混入)

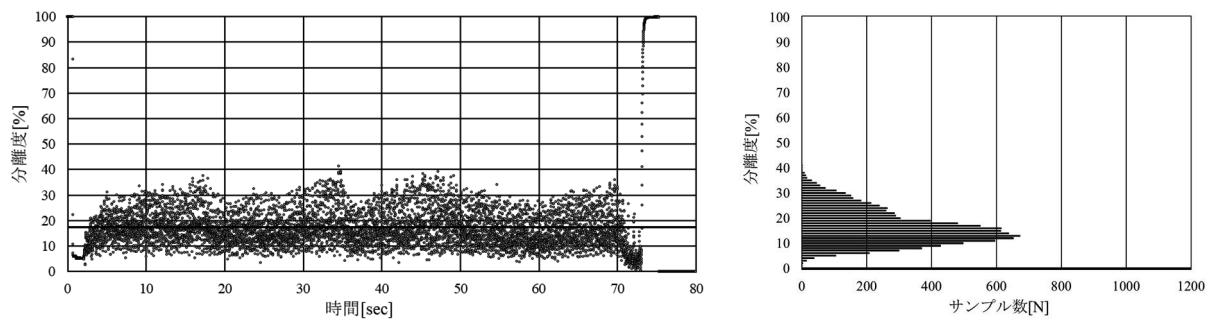


図 9 ECR 観測結果 (5W-30 with AL0.3 0.01wt%)

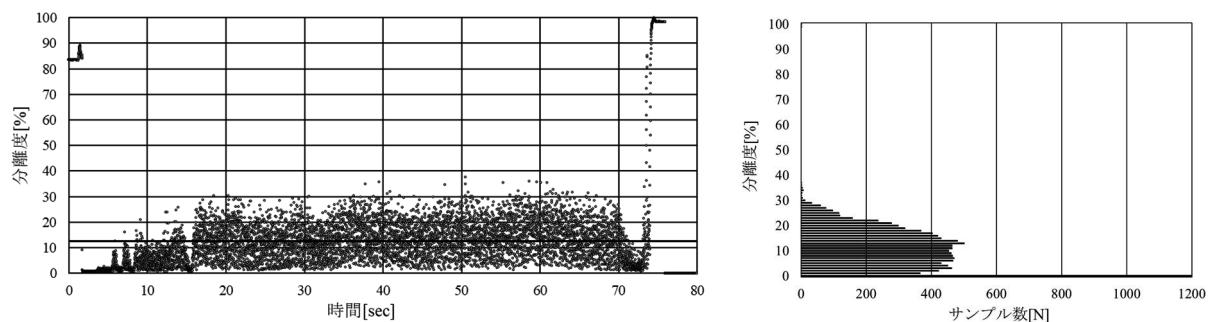


図 10 ECR 観測結果 (5W-30 with AL0.3 0.1wt%)

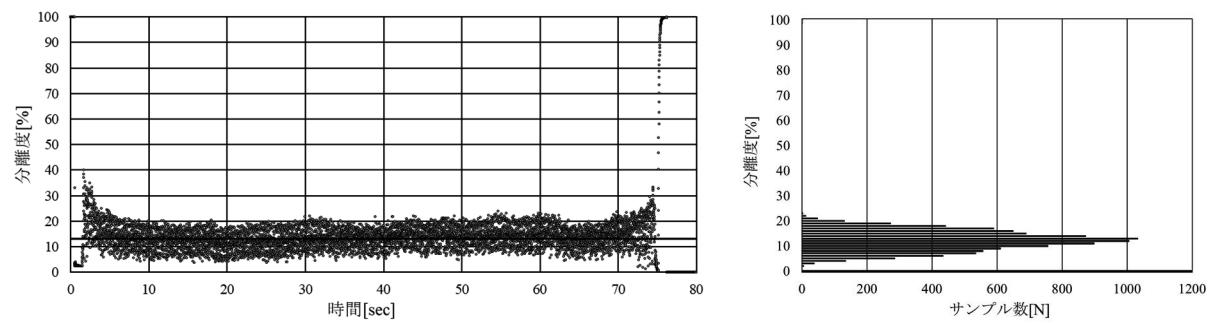


図 11 ECR 観測結果 (5W-30 with AL0.3 1wt%)

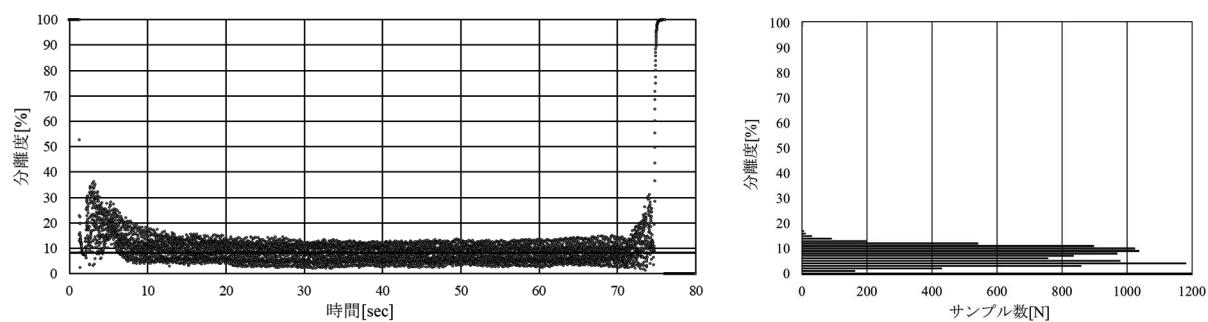


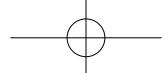
図 12 ECR 観測結果 (5W-30 with AL0.3 10wt%)

基準油に対してアルミナの混入濃度 0.01wt% (図 9) から 0.1wt% (図 10) においては、新油に対して平均分離度の低下と、尖度が正規分布に近づくことが確認できる。

アルミナの混入濃度を高めた 1wt% (図 11) では尖度は 41.07 へと尖り、最終的にアルミナの混入濃度が 10wt% (図 12) では平均分離度は 8.1% に低下し、尖度は 103.67 と非常に尖ることを確認した。

水道水 10wt%混入 (図 8) と、アルミナ 10wt%混入 (図 12) を比較すると、それぞれ混入濃度は同じであるが、平均分離度の低減と尖度の変化が異なっている。これは混入させた異物の導電率の違いによると考えられる。

今回の実験結果から、ECR 観測において新油に対して異物を混入させることで、その混入濃度を高めるほどに平均分離度が低下することを確認した。



加えて、そのヒストグラムの尖度に注目すると、異物の混入濃度が低濃度では正規分布に近づき、1wt%を超えて混入させると、著しく尖ることを確認した。これらの結果から ECR 観測の潤滑油の状態診断技術の可能性を確認した。今後は、混入する異物の条件を増やすとともに、実機で使用された試料油についても観測し、平均分離度と尖度に加えて歪度にも注目して、潤滑油の状態診断技術の可能性を追求していきたい。

4. 結論

- 1) 水道水を 10wt%混入させた試料油は、基準油に対して平均分離度は 35.1%から 21.1%に低下し、尖度は 4.28 から 8.62 に変化した。
- 2) 基準油に、平均粒子径 0.3μm の酸化アルミニウムを混入させた試料油では、濃度を高めると平均分離度が低下することを確認した。尖度は低濃度では正規分布に近づき、高めると著しく尖る傾向に変化した。

異物を混入させた各試料油において、平均分離度の低下と、尖度の変化を確認した。これらの結果から ECR 観測を用いた潤滑油の状態診断技術の可能性を確認した。

謝 辞

最後に実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 中野範人殿と沼田明菜殿、および実験に協力を得た本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、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)の挙動に關わる考察、日本設備管理学会誌 第 31 卷 4 号 (2020) pp.85-89
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) B.J.Hamrock&D.Dowson : Ball Bearing Lubrication, John Wiley & Sons(1981)
- (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) 51-155
- (6) 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)
- (7) 竹田雄祐、里永憲昭、狩野将矢、渡邊孝司、園田智之: 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、日本設備管理学会誌. Vol.33, No.3, pp. 113-118(2021)
- (8) 松原望、繩田和満、中井検裕:「統計学入門」、東京大学出版会、pp99-102, 120-123 (1999)



竹田 雄祐 (たけだ ゆうすけ)

崇城大学工学部機械工学科准教授。2022 年崇城大学大学院工学研究科博士後期課程機械システム工学専攻修了。2008 年平田機工㈱入社。2018 年より現職。博士 (工学)



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)



西 陽希 (にし はるき)

2023 年崇城大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程 1 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。