

電気的接触抵抗法を用いた油膜評価と状態監視技術への応用

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

○竹田 雄祐^{*1}, 里永 憲昭^{*1}, 東 慎之介(院)^{*1}

渡邊 孝司^{*2}, 園田 智之^{*2}

Yusuke TAKEDA^{*1}, Noriaki SATONAGA^{*1}, Shinnosuke AZUMA^{*1}

Takashi WATANABE^{*2} and Tomoyuki SONODA^{*2}

^{*1} 崇城大学 Sojo University

^{*2} D1 ケミカル D1 Chamilcal Corporation

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

1. 緒 言

著者らは、これまで自動車用潤滑油や産業用潤滑油について、その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、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）について、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の上昇により、軸受の軌道面に与える繰返し負荷が軽減することである。これにより、軸受の寿命が延長し、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],[2]}。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^{[3],[4],[5]}を用いて油膜厚さの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極低粘度化が進んでおり、油膜も著しく薄膜化が進んでいる。そのため光学的な観測のみの性能評価は難しくなっている。そこで、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電気的接触抵抗法(Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下、ECRと称す)^{[6],[7]}を用いた油膜の状態観測に取組んできた。潤滑油膜可視化装置のオプティカルフラットを鋼板に置換して ECR 観測回路を搭載することで、光学観測と同じ条件で油膜の状態を電気的に観測でき、光学的観測と電気的観測の両結果には一定の関係性があることを確認した^{[8],[9]}。

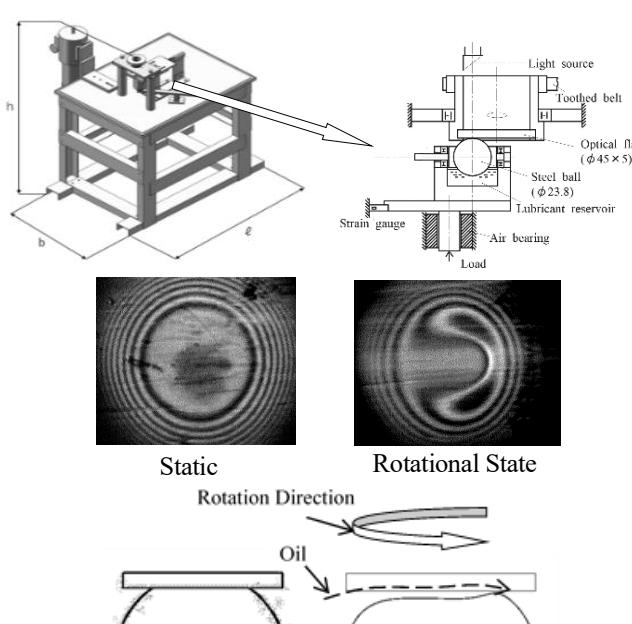


Fig.1 Observation Machine of the Contact Surface in Bearing

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、その観測波形をヒストグラム化することで、潤滑油の劣化状況や異物混入などの状態も観測できると考えられる。その一例として、過去にギア油 VG320 の新油と、軸受のフレーキング損傷を伴った試料油について ECR 観測を示す。図2、図3は ECR 観測波形であり、左側の図が実際の観測波形を、右図はその観測時間 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、平均分離度の低下だけでなく、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。

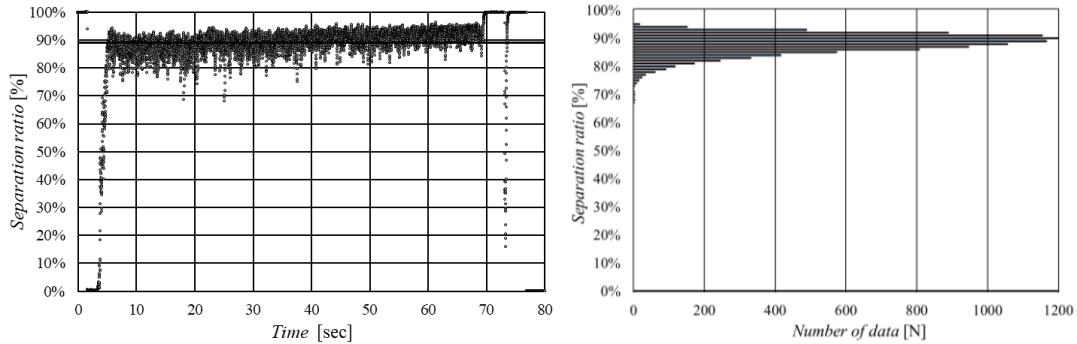


Fig.2 ECR observation results (VG320)

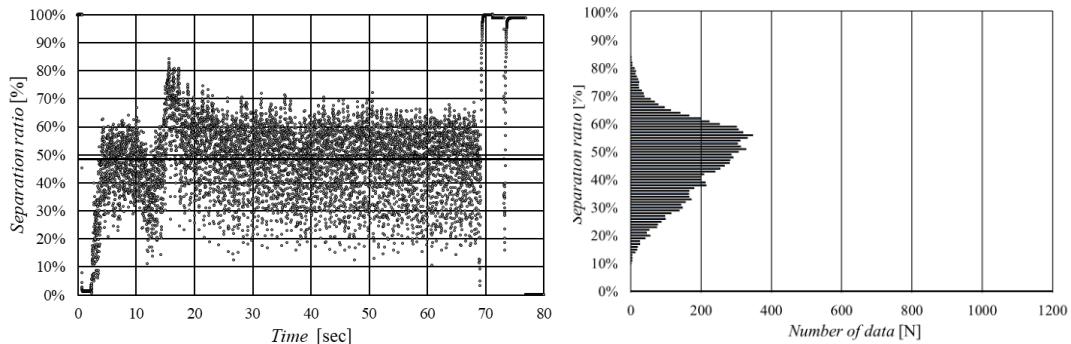


Fig.3 ECR observation results (VG320 with flaking damage)

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。

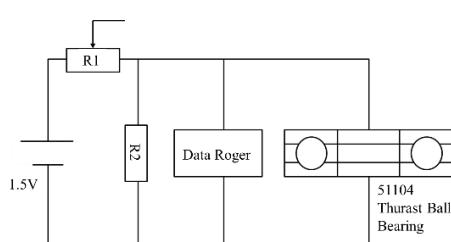


Fig.4 Circuit Diagram of ECR

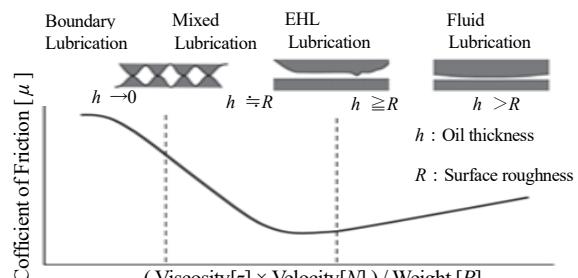


Fig.5 Stribeck Curve

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 観測電気的接触抵抗法 (ECR) の観測理論

3.1 潤滑油膜可視化装置を用いた ECR 観測の条件

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、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 6 に示す。

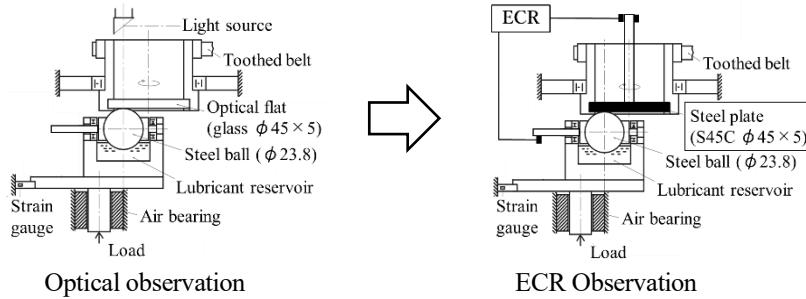


Fig.6 Change of observation method from optics to ECR

観測条件は油膜の光学観測手順と同様に周速 0.52m/s、荷重 4.11N とし、ヘルツ接触圧は 277MPa 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。

ECR 観測条件は軸受の最大印加電圧を 50mV、試料油の油温 40°Cにて行った。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確率密度関数の考え方を用いてヒストグラム化を行い、式 (2) を用いてヒストグラムの尖度を算出することで、試料油に異物を混入することによる状態変化を検証している。

$$\frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \cdot \dots \quad (2)$$

n : データ数 x_i : 各データ \bar{x} : データの平均 s : 標準偏差

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あたって、人為的に劣化状況を模した試料油を作成している。今回は自動車用エンジン油で考えられる劣化状況として、冷却水の混入やエンジン内の結露等による水分の混入、各部摺動部の動作振動に伴う気泡の混入や摺動部の摩耗による金属粉の混入としている。著者らは、これまで添加剤の性能評価では体積濃度 (vol%) を用いて試料油を作成していたが、金属粉などは体積による計量が難しいため重量濃度 (wt%) にて作成している。

実際に用いた試料油はエンジン油 (5W-30) を基準油として、水道水 10wt%を混入し乳化させた試料油、基準油単体に気泡を含ませた試料油と、平均粒子径 $0.3\mu\text{m}$ のアルミナ粉末 (酸化アルミニウム Al_2O_3) を 1wt%, 5wt%, 10wt%混入した 6 種類の試料油の ECR 観測している。

アルミナ粉末については、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、数ある金属素材の中からアルミナを選択している。

なお、気泡を含ませた試料油については、試験管を密封して 1 分間ほど人間の手で振り続け、試料油外観から気泡を含み白濁したことを確認したのちに測定している。しかしながら、混入させた気泡の大きさや数については未検証であり、再現性が難しいため、今回の実験では参考観測として扱っている。今後はインジェクター等を用いて定量的な気泡を混入できるようにしていきたいと考えている。

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。

Table 1 ECR observation results using a visualization device

Oil Type	Engine Oil					
	5W-30	5W-30 bubble	5W-30 water [10wt%]	5W-30 AL0.3 [1wt%]	5W-30 AL0.3 [5wt%]	5W-30 AL0.3 [10wt%]
Average separation [%]	35.1	35.7	21.1	13.1	9.9	8.1
kurtosis	-0.30	-0.34	-0.23	-0.66	-0.69	-1.01

各試料油の ECR 観測回路観測結果、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、平均分離度を線形にて表している。右側のグラフは観測時間 10s から 60s までの 50s 間の観測データをヒストグラム化したものである。

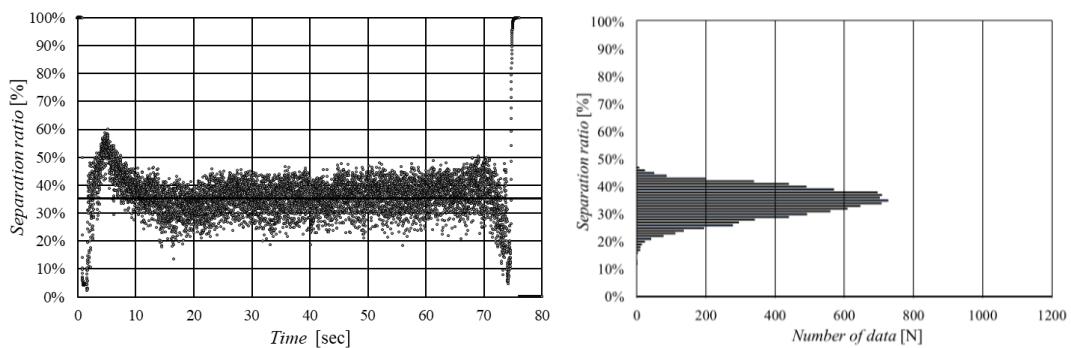


Fig.7 ECR observation results (5W-30)

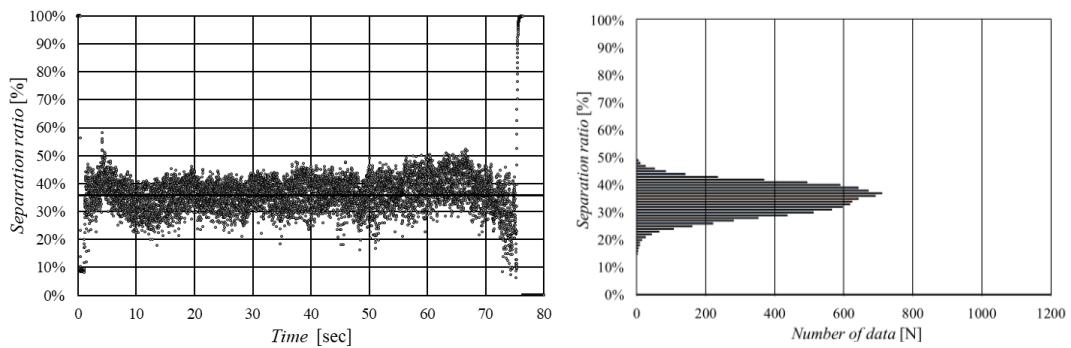


Fig.8 ECR observation results (5W-30 with bubble)

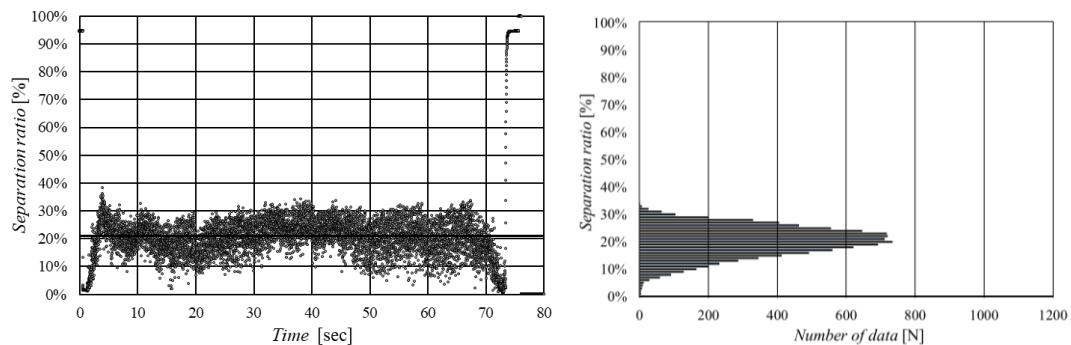


Fig.9 ECR observation results (5W-30 with water10wt%)

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-0.30であった。図8は人為的に気泡を混入させた試料油であり、平均分離度とヒストグラムの尖度に違いは確認されなかった。外観では気泡を含むため白濁していたが、実際の軸受接触面においては、潤滑油に含まれる消泡剤の効果によって気泡が消失したためではないかと考えられる。今後、気泡の定量的な混合を検討し再確認したいと考えている。

図9は水道水を10wt%混入し乳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%に低下している。ヒストグラムの尖度は-0.23と僅かに尖る傾向であった。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、乳化した潤滑油では接触圧力は一定であるため、油膜厚さが減少したため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が低下するのかを確認したいと考える。

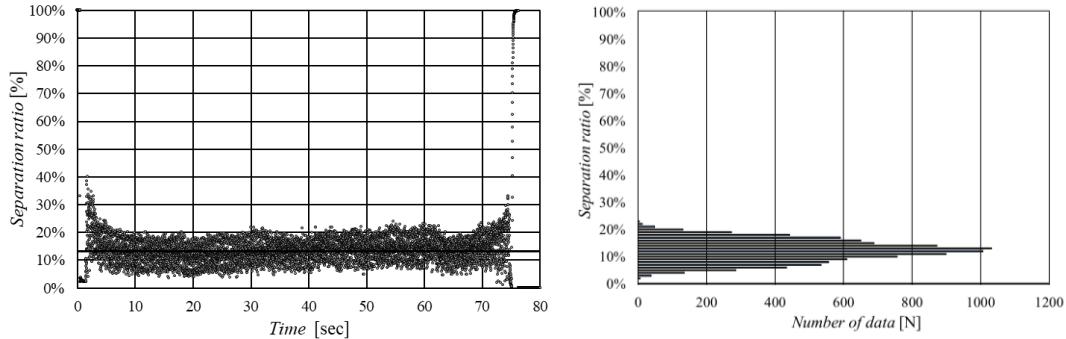


Fig.10 ECR observation results (5W-30 with AL0.3 1wt%)

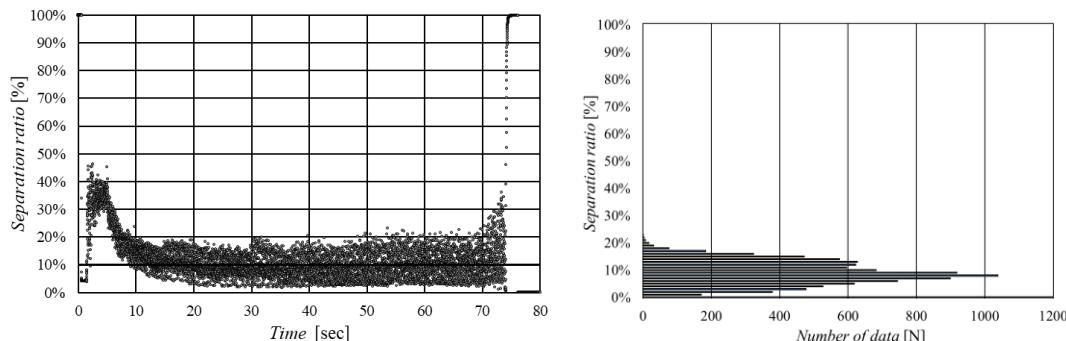


Fig.11 ECR observation results (5W-30 with AL0.3 5wt%)

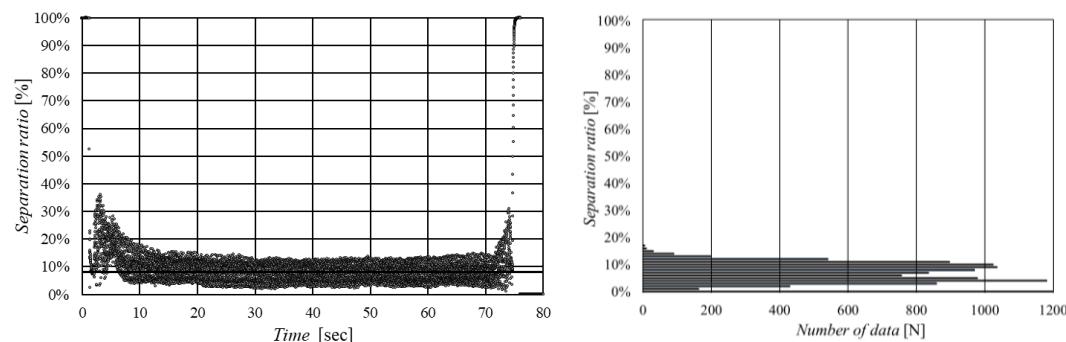


Fig.12 ECR observation results (5W-30 with AL0.3 10wt%)

基準油に対してアルミナの混入濃度1wt%混入することで平均分離度が13.1%に大きく低下する。混入濃度10wt%へと高めていくと平均分離度はさらに低下し10%を下回ることが確認できる。ヒストグラムの尖度についても-0.66から-1.01と、僅かではあるが分布が広がる傾向であることが確認できる。

平均分離度の低下は認められたが、図1、図2で示したVG320損傷油のようにヒストグラムの特徴的な変化は確認できていない。原因としては、混入させた異物が軸受鋼の粉末とアルミナで異なる事。VG320では実際に使用していたため、潤滑油自体が劣化を伴っていたことに対して、今回は新油の状態にアルミナを混入させており、それらの試料油自体の劣化状態の違いが影響したと考えられる。

4. 結 言

人為的に異物を混入した試料油の ECR 観測の結果、下記の事が明らかとなった。

- 1) 基準油エンジン油 5W-30 に対して、人為的に気泡を混入させた試料油では分離度の低下は認められなかった。
- 2) 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が 35.1%から 21.1%に低下した。
- 3) 基準油に、平均粒子径 $0.3\mu\text{m}$ の酸化アルミニウムを混入させた試料油では、混入濃度を高めるにつれて平均分離度が低下し、5wt%以上では平均分離度は 10%を下回ることを確認した。ヒストグラムの尖り度も -0.66 以下となり、基準油に対して広がった分布に変化することが確認された。
- 4) 異物を混入させた各試料油は、平均分離度の低下と観測波形をヒストグラム化して比較した結果、尖度の微小な変化を確認した。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。

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)の挙動に関する考察, 日本設備管理学会誌 第 31 卷 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) 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
- (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)
- (8) 竹田雄祐, 里永憲昭, 犬野将矢, 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, No3, pp. 113-118(2021)
- (9) 竹田雄祐, 里永憲昭, 犬野将矢, 渡邊孝司, 園田智之: 電気的接触抵抗法を用いた油膜状態の評価観測手法, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集 No.21-58