

電氣的接触抵抗法 (ECR) を用いた潤滑油の油膜評価と状態診断への応用

○学 東 慎之介* 里永憲昭* 竹田雄祐* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学, ** (有) D1 ケミカル

An Evaluation and Observation Method of Oil Film Condition
By Electrical Contact ResistanceShinnosuke AZUMA*, Noriaki SATONAGA*, Yusuke TAKEDA*,
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とそのメカニズムについて検証してきた。転がり軸受が回転することによって形成される潤滑油膜の状態を観察する方法として、油膜に光を当て干渉縞を直接観察する光学的観測と、潤滑油の絶縁性能を利用して油膜に微弱な電気を流しその抵抗値で観察する電氣的観測である電氣的接触抵抗法 (Measurement for Electrical Contact Resistance 以下、ECR と略す) の二つの方法で研究を行っている。これまで本研究室では、潤滑油膜の光学的観測と電氣的観測における観測結果には関連性があることを確認している。研究の中で、軸受が摩耗しその摩耗粉が混入した状態の試料油の ECR 観測波形は、確率密度関数を用いてヒストグラム化して際に、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採用されるヒストグラムを使った診断方法と同じ考え方を用いることで潤滑油の状態診断ができると考え、人為的に異物を混入させた試料油を用いて検証を行ったので報告する。

キーワード: エンジン油, ギア油, 接触抵抗法, 状態監視, 潤滑

1. 結論

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とそのメカニズムについて検証してきた。自動車や産業用機械の寿命延長を目的として、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、新還元添加剤と略す) について自動車用エンジン油に 10vol% 添加することで、軸受の転動体と転送面で形成される油膜の保持力が強化され、軸受の寿命とそれによる消費エネルギーの削減を確認している^[1]。軸受が回転することによって形成される潤滑油膜について本研究室では、光学的観測と電氣的観測を行っている。まず、光学的観測について図 1 に示す潤滑油膜可視化装置を用いて、油膜に光を当て干渉縞を直接観察し、Hamrock-Dowson が示した理論膜厚式^{[2],[3],[4]}を用いて油膜厚さの評価を行ってきた。電氣的観測について、潤滑油の絶縁性能を利用し軸受接触面での電圧変化から形成状態の監視を行う ECR^{[5],[6]}を用いた観測も行っている。そして、それぞれの観測結果には一定

の関連性があることを確認した。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評価しており、観測波形をヒストグラム化することで中央値と併せて評価を行っている。過去の研究では、実験前の親油状態の潤滑油とフレーキング後の損傷油のヒストグラムを比較したところ、親油は尖った分布になり、損傷油は低く広がった分布を示した。これは、試料油中に含まれる軸受の摩耗粉が影響を与えたと考えられる。

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について検証したので報告する。

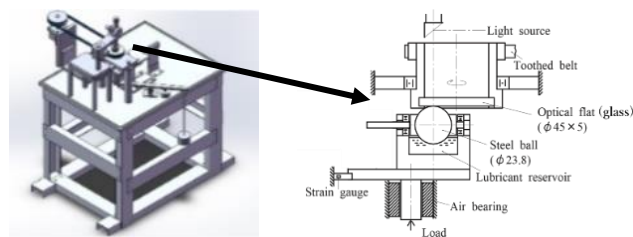


図 1. 潤滑油膜可視化装置

2. 電氣的接触抵抗法 (ECR) について

2-1 観測理論

著者らは、潤滑油膜の観測方法として電氣的接触抵抗法 (ECR) を用いている。図 2 ではその回路を示している。ECR 観測理論は、転がり玉軸受の転動体と転送面の間で形成される潤滑油膜に微弱な電気を流すことでその抵抗を測定している。

軸受が回転すると潤滑油膜が形成される。図 3 のストライベック曲線における速度成分が変化するため、接触面の粗さよりも油膜が厚くなり潤滑状態は境界潤滑から流体潤滑へと変化する。この時電気抵抗値は無限大となる。一方で、回転を停止すると速度成分が 0 となり潤滑油膜が軸受の表面粗さよりも大きくなるため転動体と転送面が接触し電気抵抗は 0Ω となる

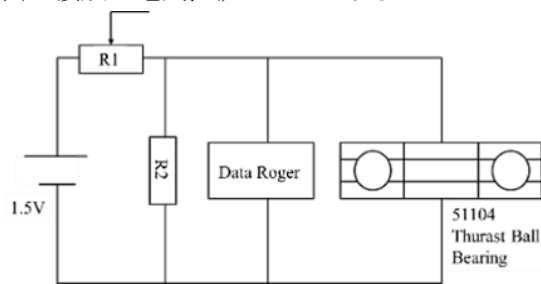


図 2. ECR 回路

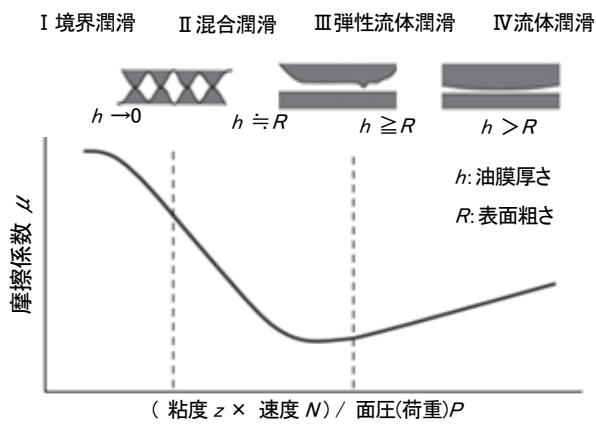


図 3. ストライベック曲線

2-2 ECR の評価方法

本研究では ECR を用いて油膜の評価を分離度で行った。式 (1) では分離度の算出方法を示している。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している。

$$\text{分離度} = \frac{\text{測定電圧}}{\text{最大印加電圧}} \times 100[\%] \cdots \cdots (1)$$

3. 異物混入試料油の ECR・EHL 観測

3-1 潤滑油膜可視化装置による ECR 観測条件

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ガラス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 S45C 素材の鋼板に置き換える。ECR 観測回路の接点を軸受外輪に相当する鋼球の回転軸上に設ける。観測時には、図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ー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。

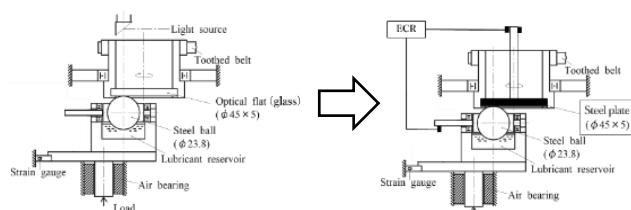


図 4 光学観測から ECR 観測への変更点

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 $0.366\mu\text{m}$)、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。

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 $10\text{s} \sim 60\text{s}$ 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、 $10\text{s} \sim 60\text{s}$ 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^[7]。

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

確率分布の期待値を E 、確率変数を X とすると尖度 α_4 は式 (3) で表される^[8]。

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

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 試料油について

ECR 観測を用いた潤滑油の劣化状況を検証することに際して、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。一つ目は冷却水や結露等による水分の混入、二つ目は軸受などの摺動部の摩耗による金属粉の混入である。

観測に用いた試料油はエンジン油(5W-30)を基準油として、水分を混入させた試料油は、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%と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。

全 6 種類の試料油について ECR 観測を行った。

3-3 水道水を混入させた ECR 観測結果

潤滑油膜可視化装置の基準油と水道水を混入させた試料油の ECR 観測結果を表 1 に示す。各試料油の ECR 観測波形を図 5、図 6 に示す。各グラフの縦軸は分離度、横軸は観測時間、観測時間 10s~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~60s までの観測データをヒストグラム化したものである。

図 5 は基準油 5W-30 の観測結果であり、図 6 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。それぞれの平均分離度は基準油が 35.1%，水道水を混入させた試料油が 21.1%となった。これは、混入した水道水が流れ込むことで油膜の形成を阻害したと考えられる。ヒストグラムについては基準油 5W-30 の尖度は 4.28 となり、水道水を混入させた試料油は 8.62 とわずかに尖ることが確認できた。

それぞれのヒストグラムから、エンジン油 5W-30 に対して水を混入させた試料油は分離度が全体的に低下することが読み取れる。

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

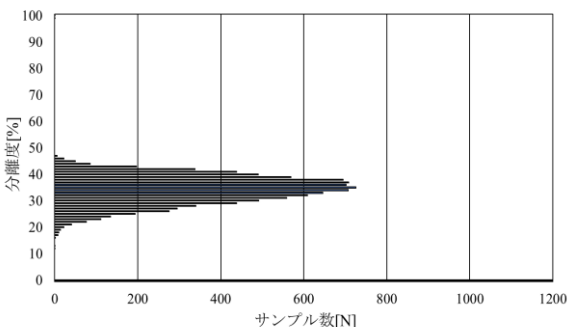
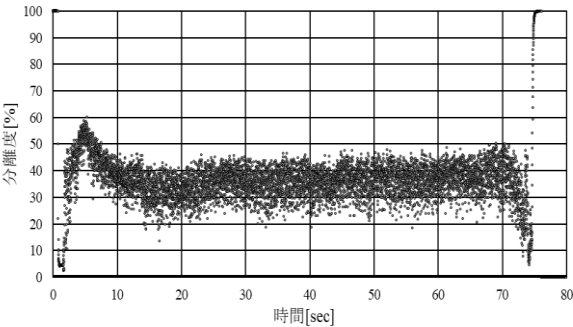


図 5 ECR 観測結果(5W-30)

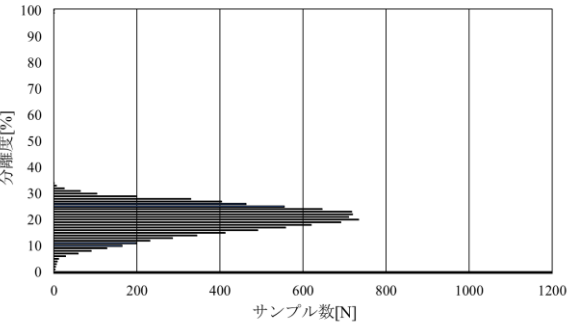
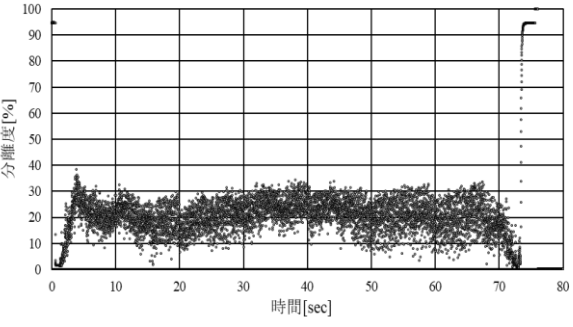


図 6 ECR 観測結果(5W-30 with water 10wt%)

3-4 アルミナを混入させた ECR 観測結果

5W-30 にアルミナを混入させた試料油の ECR 観測結果とヒストグラムを示す。基準油に対してアルミナの混入濃度 0.01wt%(図 7)から 0.1wt%(図 8)においては、親油に対して平均分離度の低下と、尖度が正規分布に近付くことが確認できる。

アルミナの混入濃度を高めた 1wt%(図 9)では

41.07 へと尖り、最終的にアルミナの混入濃度が 10wt%(図 10)では平均分離度が 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 6)とアルミナ 10wt%混入(図 10)を比較すると、それぞれ混入濃度は同じであるが、平均分離度の低域と尖度の変化が異なっている。

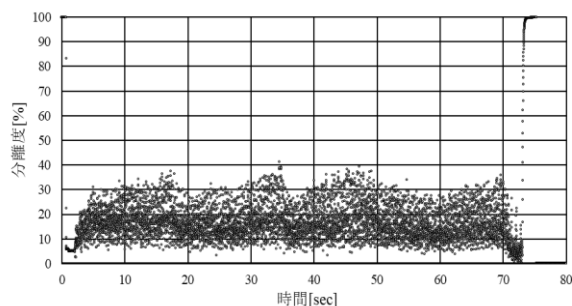


図 7 ECR 観測結果(5W-30 with AL0.3 0.01wt%)

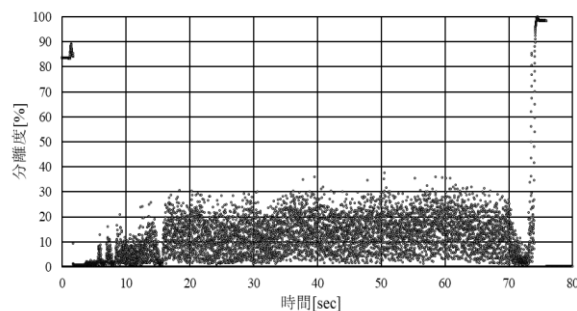


図 8 ECR 観測結果(5W-30 with AL0.3 0.1wt%)

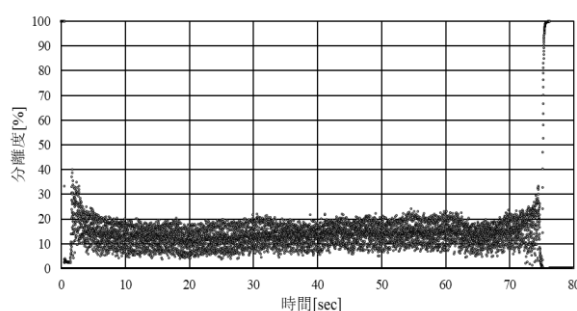


図 9 ECR 観測結果(5W-30 with AL0.3 1wt%)

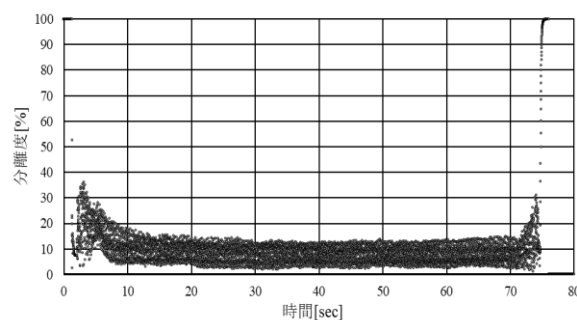


図 10 ECR 観測結果(5W-30 with AL0.3 10wt%)

4. 水道水を混入させた EHL 観測結果

4-1 観測結果

水道水を混入させた試料油について分離度の減少を油膜厚さが減少したことによるものと考え、光学的な視点からも観測を行った。図 11 は水道水を混入させた試料油の光学観測の画像である。

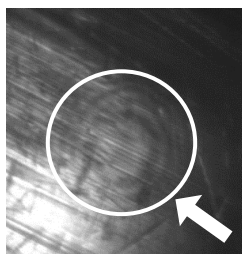


図 11 油膜あり

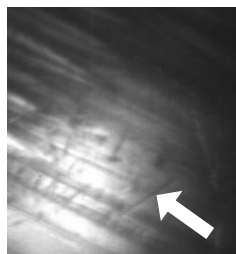


図 12 油膜喪失

図 11 の画像は油膜の白い円で囲んだ範囲に丸い干渉縞が確認できるが、右側の画像では干渉縞を確認することはできず、油膜がなくなっていることがわかる。観測中は、2s～3s 間隔でこの反応を繰り返し、干渉縞から油膜形成過程を継続的に観察することができなかった。

4-2 水混入による影響について

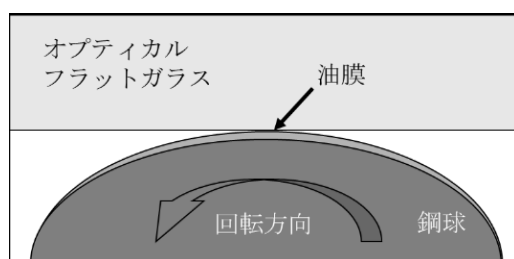


図 13 基準油 5W-30 の油膜形成

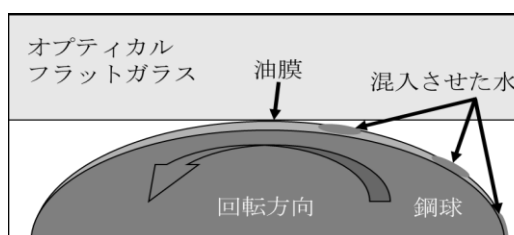


図 14 5W-30 + water 10wt%



図 15 水道水混入による油膜喪失

EHL 観測において油膜が断続的に出現した現象について、基準油 5W-30 では、観測時図 13 で示しているように、オブティカルフラットガラスが回転することで鋼球との間に油膜が形成される。しかし、水道水が混入すると、図 14 で示すように水が入り込むことで潤滑油が押し出され図 15 で示している通り油膜を喪失するメカニズムを想定している。

また、ECR 観測において分離度が全体的に低下してしまった原因についても、油膜形成が断続的になったことによるものであると考えた。

5. ECR・EHL 観測結果について

今回の実験から、ECR 観測において基準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ごとに平均分離度が低下することを確認した。ヒストグラムに注目すると、水道水を混入させた試料油は基準油に比べてわずかに尖る傾向を示した。

また、アルミナを混入させた 4 種類の試料油のうち、0.01wt%、0.1wt%の 2 つの試料油では、基準油より低い尖度を示し正規分布に近いグラフを示した。しかし、1wt%、10wt%と濃度を上げると再び尖る傾向が現れた。また、EHL 観測について水を混入させた試料油では形成された油膜に水が流れ込むことで断続的に干渉縞が現れ、この過程が分離度の低下に影響を与えたと考えられる。

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。

6. 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、平均粒子直径 $0.3\mu\text{m}$ の酸化アルミニウムを混入させた試料油では、濃度を高めると平均分離度が低下することを確認した。
- 3) 水道水を混入させた試料油での EHL 観測では、干渉縞の形成が断続的に行われることが観測できた。
- 4) 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することができた。また、この結果から、ECR 観測を用いた潤滑油の状態診断技術の可能性を確認できた。

参考文献

- [1] 竹田雄祐, 里永憲昭, 西陽希, 渡邊孝司, 園田智之: 電氣的接触抵抗法を用いた潤滑油の状態診断技術の検証, Vol.35, No2, pp41-46 (2023)
- [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, Applications Tribology Transactions, 56, 4 pp. 561-571, 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, (2007), pp. 91-94
- [7] 松原望, 縄田和満, 中井検裕: 「統計学入門」, 東京大学出版会, pp99-102, 120-123 (1999)