

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 —不導体異物混入の検証

Verification of Technology for Diagnosing the Condition of Lubricating oil using Electrical Contact Resistance Method

○学 西 陽希^{*1}, 里永 憲昭^{*1}, 竹田 雄祐^{*1}

渡邊 孝司^{*2}, 園田 智之^{*2}

Haruki NISHI^{*1}, Noriaki SATONAGA^{*1}, Yusuke TAKEDA^{*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、これまで軸受に形成される油膜の状態を図1に示す軸受油膜可視化装置（以降、可視化装置と略す）を使用して、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を用いて油膜厚さの評価している。さらに、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氣的接触抵抗法(Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下、ECR と称す)を用いた油膜の状態観測に取り組んできた。

ECR の観測方法は、印加電圧に対する観測電圧の比を分離度として評価し、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。そこで、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や、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 0.01wt%, 0.1wt%, 1wt%, 10wt%混入した試料油の ECR 観測を行った。

例として、エンジン油 5W-30 の単体と、アルミナ粉末を 1wt%, 10wt%混入させた試料油の ECR 観測結果を示す。

図2, 図3, 図4は ECR 観測波形であり、左側の図が実際の観測波形を、右側の図はその観測時間 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。5W-30 単体(図2)に対してアルミナ粉末混入 1wt%(図3)は、平均分離度が急激に低下し、10wt%(図4)まで濃度を高めると平均分離度は 0%へと近づく。加えて、ヒストグラムの分布も 0%近傍に集中して尖度が上昇することが確認できる。このことから、ECR 観測において、平均分離度とヒストグラムの尖度から潤滑油の状態診断技術の可能性を確認している。

これまで混入させた異物は導体であるが、自動車のエンジンや機械にはオイルシールや樹脂製のブッシュなどに不導体を使用されており、これらの不導体部品が摩耗してその摩耗粉が潤滑油に混入することで、油膜の形成を阻害する場合も想定される。そこで、ポリウレタン粉末、ポリアセタール粉末を混入させた潤滑油を ECR 観測したので本報にて結果を報告する。

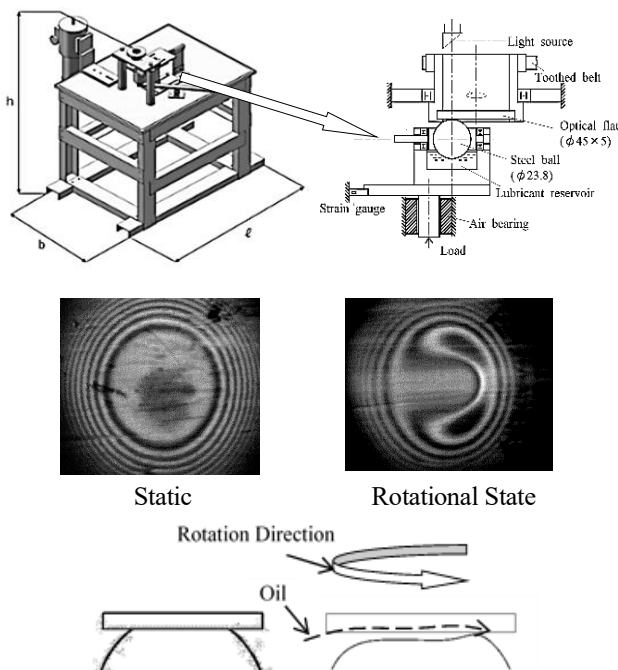


Fig.1 Observation Machine of the Contact Surface in Bearing

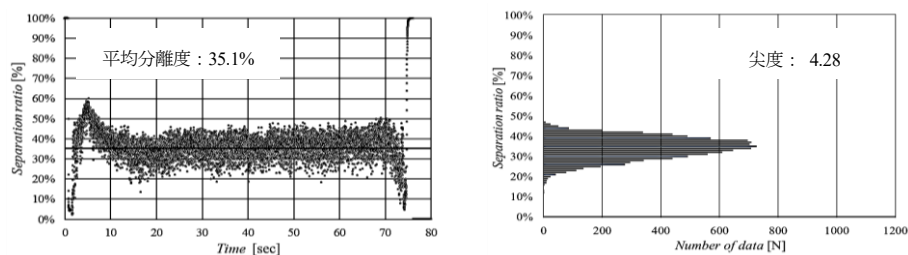


Fig.2 ECR observation results (5W-30 [2022])

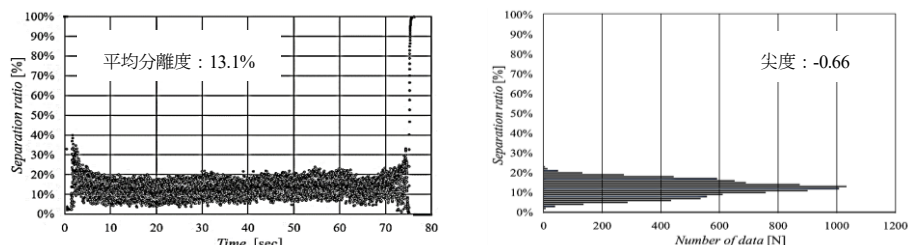


Fig.3 ECR observation results (5W-30+AL 0.3 1wt%)

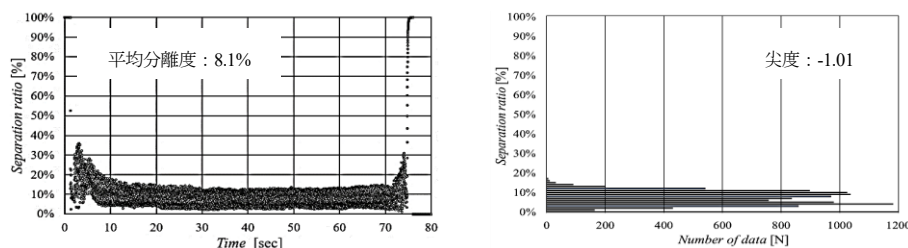


Fig.4 ECR observation results (5W-30+AL 0.3 10 wt%)

1. 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 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．

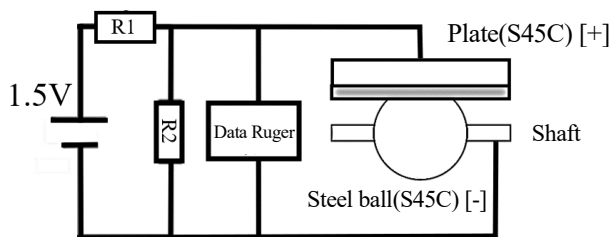


Fig.5 Circuit Diagram of ECR

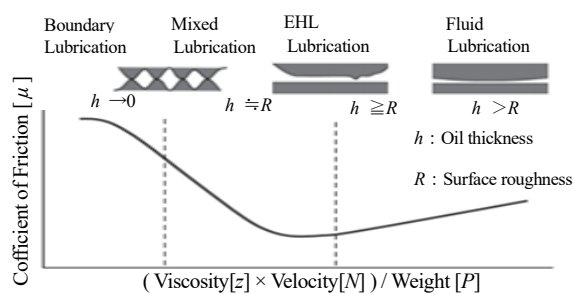


Fig.6 Stribeck Curve

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. 異物混入試料油の ECR 観測電氣的接触抵抗法 (ECR) の観測理論

2.1 可視化装置を用いた ECR 観測の条件

図 1 に示す可視化装置は、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が、ECR 観測では、オプティカルフラットを鋼板 (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。観測条件は油膜の光学観測手順と同様に周速 0.565m/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 $0.366\text{ }\mu\text{m}$) であり、鋼球は直径 $\Phi=23.8\text{mm}$ ($\nu=0.3$ 、 $E=208\text{GPa}$ 、表面粗さ $0.06\text{ }\mu\text{m}$) 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ヒストグラム化し、尖度を算出する。

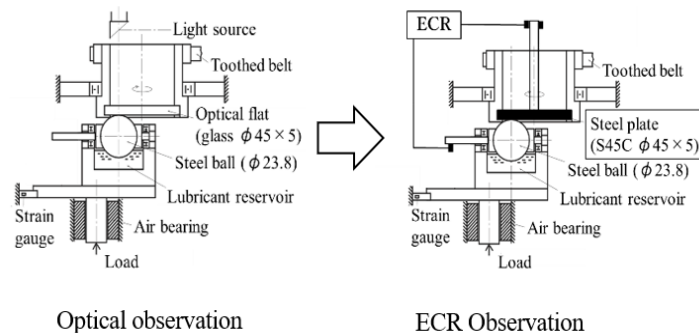


Fig.7 Change of observation method from optics to ECR

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。

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

確率分布の期待値を E 、確率変数を X とすると、尖度 a^4 は式 (3) で表される。

$$a_4 = \frac{E(X-\mu)^2}{\sigma^4} \cdots (3)$$

正規分布の尖度は $a_4 = 3$ となり、 $a_4 > 3$ では尖っている、 $a_4 < 3$ 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。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。

2.2 試料油

ECR 観測を用いた潤滑油の状況の診断能力を検証するにあたって、人為的に異物の混入状態を模した試料油を作成している。用いた試料油は基準油 5W-30 単体、基準油にポリウレタン粉末を 0.1wt%、0.01wt%混入させた試料油、基準油にポリアセタール粉末を 0.1wt%、0.01wt%混入させた試料油の 5 種類の ECR 観測を行った。導体と不導体の比較と併せて、同じ不導体でも物性が異なる点を波形で観測できるかを検証するため 2 種類の不導体を使用している。ポリウレタンには切削性に優れており、製品のデザインや試作などに用いられるウレタン合成木材を、ポリアセタールは耐摩耗性、耐疲労特性、自己潤滑性に優れていることから、金属製の歯車やねじ、軸受に替わって用いられることがある熱可塑性樹脂をそれぞれ卓上マシニングセンタで切削した時に生じた粉末を使用している。顕微鏡で確認した結果、どちらも平均粒径はおおよそ $1\sim 10\mu\text{m}$ であった。

2.3 ECR 観測結果

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 Polyurethane [0.01wt%]	5W-30 Polyurethane [0.05wt%]	5W-30 Polyacetal [0.01wt%]	5W-30 Polyacetal [0.05wt%]
Average separation [%]	35.10	55.33	66.37	44.67	53.79
kurtosis	4.28	-0.87	0.46	-0.98	-0.62

各試料油の ECR 観測回路観測結果を図 8 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。

基準油 5W-30 については、導体を混入させた試料油と同じ視点で比較するために、2022 年度に観測したデータ（図 2）を用いている。

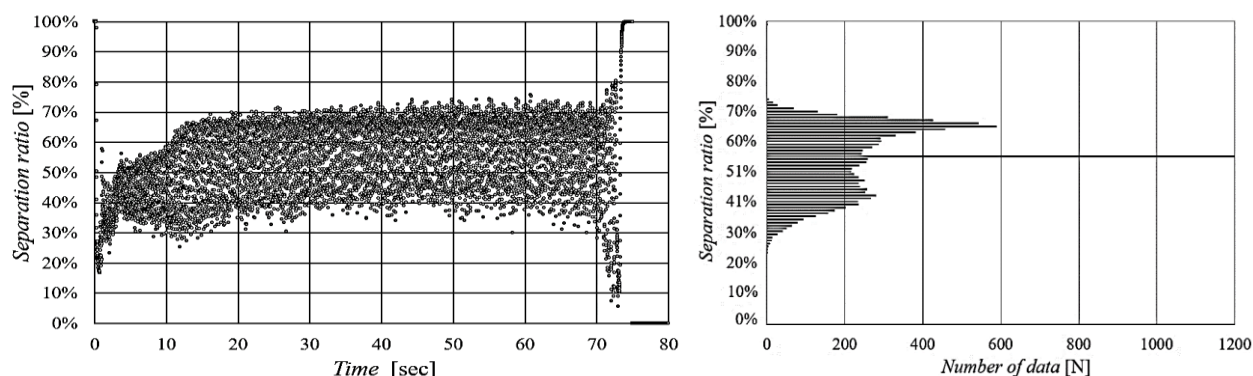


Fig.8 ECR observation results (5W-30+Polyurethane 0.01wt%)

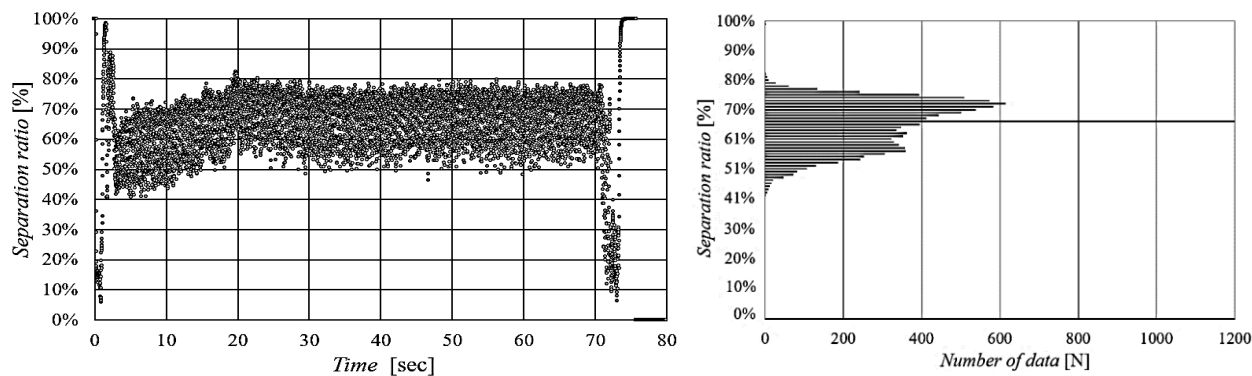


Fig.9 ECR observation results (5W-30+Polyurethane 0.05wt%)

図 7 は基準油 5W-30 の観測結果であり、平均分離度は 38.36%，ヒストグラムの尖度は 1.49 であった。図 8 がポリウレタン粉末を 0.01wt% 混入させた試料油である。基準油と比較して、平均分離度は 55.33% に上昇し、ヒストグラムの尖度は -0.87 と小さくなっていることが確認できた。また、図 8 のヒストグラムのように、2 つの山が並ぶ特徴的な分布が確認された。図 9 はポリウレタン粉末を 0.05wt% 混入させた試料油である。平均分離度が 66.37%，尖度が 0.46 となっており、0.01wt% よりも分離度が上昇し、さらに尖度が小さくなることを確認した。

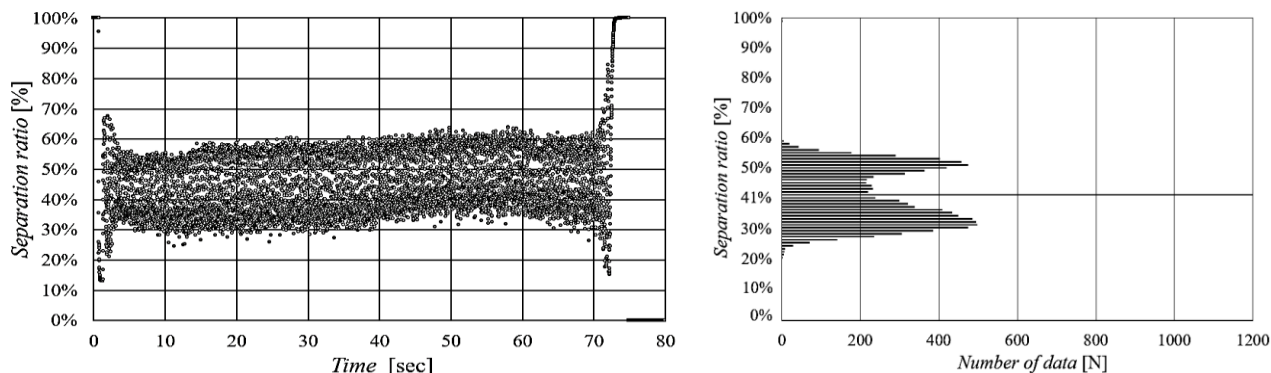


Fig.10 ECR observation results (5W-30+Polyacetal 0.01wt%)

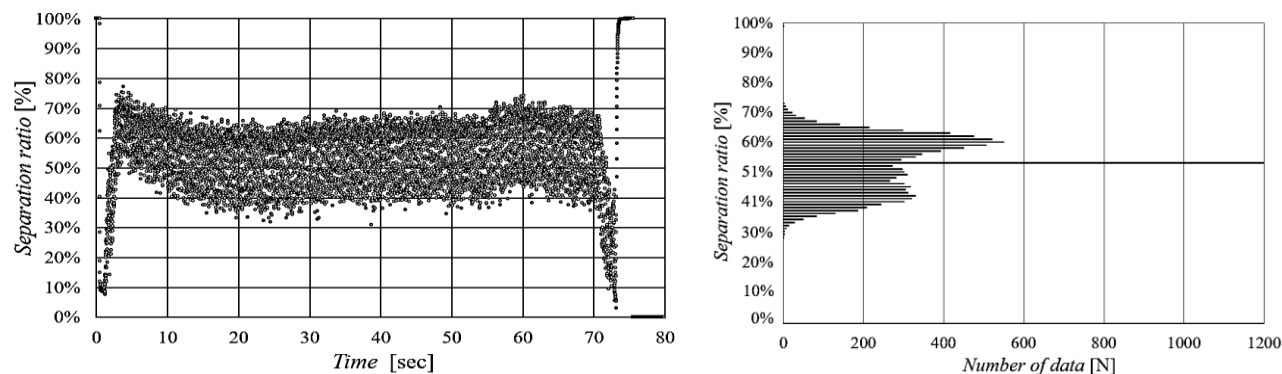


Fig.11 ECR observation results (5W-30+Polyacetal 0.05wt%)

図 10 がポリアセタール粉末を 0.01wt% 混入させた試料油である。平均分離度が 44.67%，尖度は -0.98 となっている。混入割合が 0.05wt% (図 11) になると、平均分離度 53.79%，尖度 -0.62 へとそれぞれ変化している。

以上の結果から、ポリウレタン粉末とポリアセタール粉末の不導体の異物を混入させた潤滑油では、その混入割合が大きくなると平均分離度が上昇し、尖度が小さくなる傾向と、ヒストグラムの分布において 2 つの山ができる特徴的な傾向を示すことが明らかとなった。アルミナ粉末などの導体の混入割合を高めるほどに分離度は低下し、尖度が上がるという傾向と反対の結果となっている。このことから ECR 観測を用いた潤滑油の状態診断には、その分離度と尖度、ヒストグラムの分布形状から、含まれている異物が導体か不導体か判別する可能性があることを確認した。

このような特徴を示した理由については、不導体の異物の影響と考えているが、導体であるアルミナ粉末の平均粒径が $0.3\mu\text{m}$ であったことに対して、今回準備したポリウレタン粉末やポリアセタール粉末の粒径が $1\sim 10\mu\text{m}$ と大きかったため、異物の粒径の差による影響も考えられる。今後は、今回の使用した樹脂粉末を混入させた試料油の潤滑状況について光学観測を行うと共に、アルミナ粉末の粒径を大きくして ECR 観測を行い、関連性を検証していきたい。

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) 基準油に対して平均分離度が上昇し、ヒストグラムの尖り度は小さくなることが確認できた。
- 2) 不導体を混入させた試料油のヒストグラムは2つの山を伴う特徴的な分布となる事が確認できた。

ECR 観測では導体の異物と不導体の異物を混入させた場合に平均分離度とヒストグラムの尖り度の変化が反対の傾向である。これらの結果から、ECR 観測を用いた潤滑油診断において、混入異物の導体か不導体かの判別能力の可能性を確認することができた。

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, 日本設備管理学会誌 第35巻2号 (2023) pp.41-56
- (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) 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)
- (5) 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氣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)