

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

○ 大瀬 勝弥(院)^{*1}, 里永 憲昭^{*1}, 竹田 雄祐^{*1}, 渡邊 孝司^{*2}, 園田 智之^{*2}

^{*1} 崇城大学, ^{*2} D1 ケミカル

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

^{*1} Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan

^{*2} D1 Chemical Co., Ltd., Japan

著者らはこれまで潤滑油の成分の違いが、油膜厚さや潤滑状態に与える影響について光干渉法を用いて観測してきた。しかしながら近年の低粘度化した潤滑油では油膜厚さを比較評価することが難しくなっている。そこで新たな評価方法として、油膜の電気抵抗を利用することで、それらを詳細に観測できないかと考えた。そこで電気的接触抵抗法 (Measurement for Electrical Contact Resistance) を用いて油膜の状態監視に取り組んできた。今回は新たに改造したチムケン試験機と潤滑油膜可視化装置にECR回路を取り付け、潤滑油膜可視化装置における光学的油膜厚さとの比較や、油膜厚さと油膜形成状態の評価方法について報告する。

キーワード：エステル系添加剤, 接触抵抗法, チムケン, 状態監視

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ポリアルファオレフィンからなる新還元添加剤を開発し、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。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示すスラスト玉軸受を用いた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、軸受の転動体と内外輪間に形成される潤滑油膜の厚さについては図2に示す潤滑油膜可視化装置を用いて光学的に直接観察してきた。これらの研究結果から、添加剤に含まれる成分の影響によって、軸受転送面に形成される潤滑油膜の膜厚が厚くなり、潤滑条件が境界潤滑条件から、流体潤滑条件に遷移することで軸受の寿命が延長されているとの仮説に至った。^{[1][2]}

しかしながら、近年の省エネルギー化から自動車用潤滑油などは低粘度化が進んでおり、光干渉法を用いた油膜厚さの観測では低粘度時の膜厚差を評価することは大変難しく、潤滑油の性能評価における新たな問題となっている。

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たインピーダンス法と、直流電源を用いた電気抵抗法が広く知られている。著者らは設備的にも簡易な直流電源を用いた電気的接触抵抗法 (Measurement for Electrical Contact Resistance, 以下、ECRと称す) を用いて油膜の状態監視に取り組んできたので本報にて紹介する。

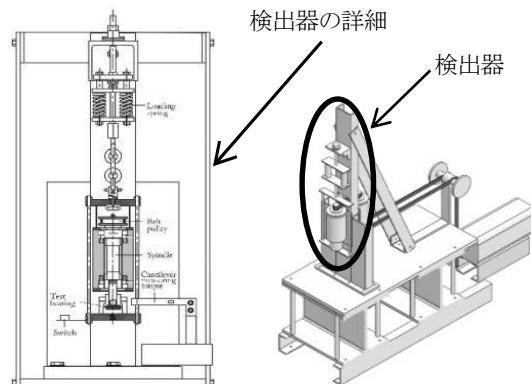


図1 スラスト玉軸受寿命試験機

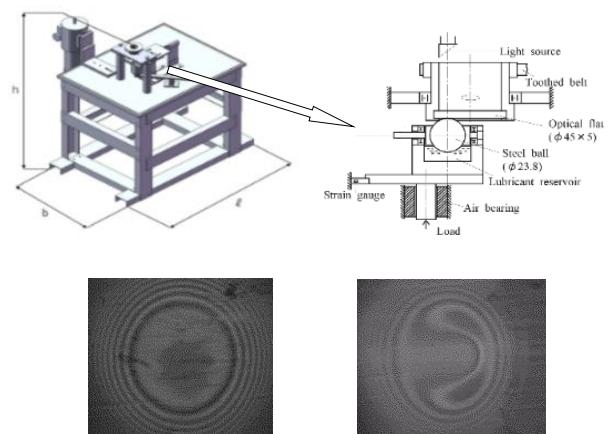


図2 潤滑油膜可視化装置概要

2. 電気的接触抵抗法 (ECR) とは

2.1 観測理論

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 3 に接触回路を示す。

図 4 の①に示すように、軌道面と転動体の間に油膜が潤沢に形成されている場合は、電気抵抗が無限大となる。一方で③膜に示すように表面粗さよりも油膜が薄い上程では軌道面と転動体が直接接触するため電気抵抗はゼロとなる。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電気的接触抵抗法 (ECR) である。

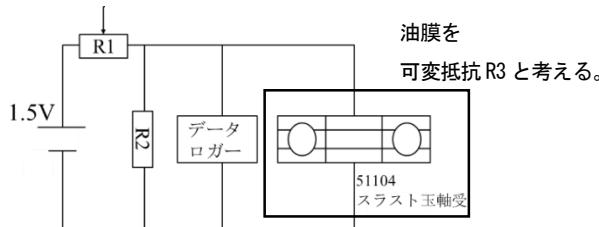


図 3 電気的接触回路の回路図 (ECR)

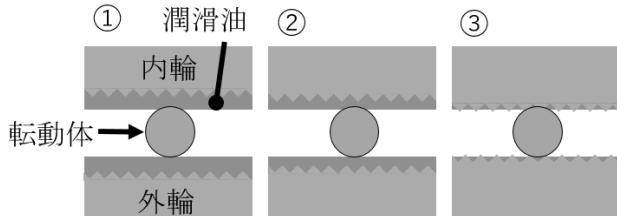


図 4 軸受転動面と転動体間の油膜形成状態

2.2 先行試験結果

これまでに著者らは図 1 に示したスラスト玉軸受寿命試験機に図 5 に示すように ECR 測定回路を取り付け、軸受寿命と潤滑油膜の形成状態を観測してきた。油槽内に試験片となるスラスト玉軸受を設置したおり、上輪をモータにより回転させ、下輪を固定している。それぞれが導通防止のために取り付け部に樹脂製部品を設け絶縁している。^[3]

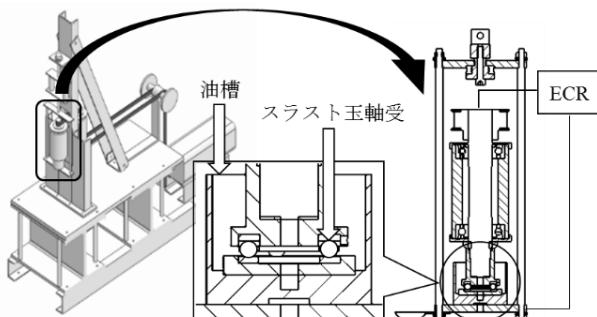


図 5 ECR 取付け位置

実際にギア油 VG320 を用いて軸受がフレーキングに至った軸受寿命試験における ECR 電圧値について図 6 に示す。

縦軸は分離度であり、測定した最大電圧に対する電圧値の変化率である。横軸は試験時間となる、理論寿命時間 Lo に対する実稼働時間 La についても併記している。

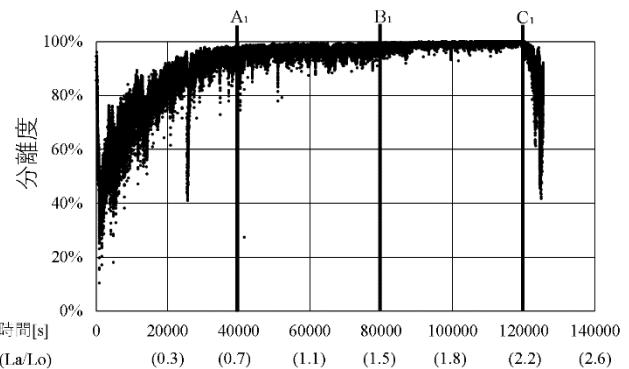


図 6 軸受寿命試験における ECR 観測結果 (ギア油 VG320)

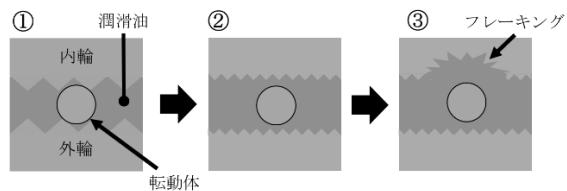


図 7 寿命試験時における軸受表面の変化の仮説

試験開始直後は軸受の状態は図 7 の①に示すように、油膜に対して軸受転動面の表面粗さが大きいため、軸受転動面と転動体の直接接触が頻繁に繰返され、分離度の変動が大きかったものと考えられる。図 8 に示すトライベック曲線の境界潤滑領域と考えられる。

その後次第に図 7 の②に示すように軸受の馴染みが進み油膜に対して軸受転動面と転動体の表面粗さが小さい状態であり、図 8 の混合潤滑領域にあると考えられる。

フレーキングが発生したと思われる 1200×10 秒においては、図 7 の③に示すように軸受転動面と転動体に疲労が蓄積し転動面にフレーキングが発生した状態である。この時、転動面が剥離を生じたことで再び転動面と転動体の直接接触が生じ、図 8 の境界潤滑状態へと移行する。

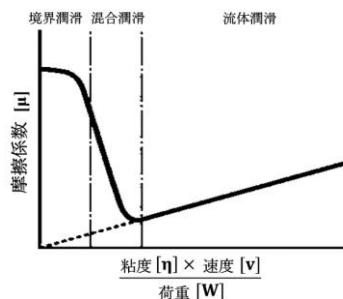


図 8 ストライベック曲線

先行試験の結果から ECR が油膜の形成状態を監視する能力があることは明らかとなった。しかしながら計測した電圧値と油膜厚さの相関関係は不明であり、先行試験では油膜形成の有無を判別するのみに留まっており、課題が残されている。

3. 油膜厚さと ECR 観測値

3.1 油膜の光学観測値と ECR 観測値の関係

潤滑油膜可視化装置は荷重一定であり、試料油の種類に対する油膜厚さを観測している。スラスト玉軸受寿命試験機は荷重一定であり、試料油の種類に対する寿命を観測している。各々の実験装置の荷重と周速条件を合わせることができれば油膜と寿命の相関関係を求められると考えている。しかし、各実験装置の仕様上、合わせることは不可能である。そこで、潤滑油膜可視化装置における油膜厚さの観測結果と ECR 測定データ、また寿命試験機における軸受寿命の ECR 測定データを比較することにより、潤滑油の寿命に対する影響と油膜厚さの関係を見つけることができるのではないかと考えている。

3.2 光学的観測値と ECR 観測値の比較

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て油膜を光学的に観測している。今回の ECR 測定では、オプティカルフラット部分を S45C 鋼板に置き換える。ECR の+端子はブラシを介して鋼板に接点を設ける。-端子は転動体にあたる鋼球の回転軸上にブラシを介して接点を設ける。油槽に試料油を投入し、+接点間に油膜が形成される。また鋼球と鋼板間が絶縁できるよう各部に樹脂製部品を追加している。詳細を図 9 に示す。

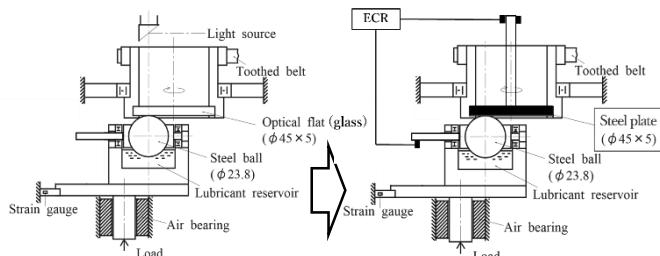


図 9 潤滑油膜可視化装置への ECR 取付け

実験条件は油膜観測手順と同様に周速 0.52[m/s] とし、荷重は 19.6N としている。

可視化装置で用いるオプティカルフラットは直径 $\Phi=45$ mm、厚さ 5 mm (ポアソン比: $v=0.25$ 、縦弾性係数: $E=63.7$ GPa、粗さ 5.6 μm) であり、鋼球は直径 $\Phi=23.8$ mm (ポアソン比: $v=0.3$ 、縦弾性係数: $E=208$ GPa、粗さ 6.1 μm) である。

外輪材質がオプティカルフラットから S45C に変更しているため理論膜厚はポアソン比を変えて補正した。

ECR 測定においては鋼球と鋼板がともに回転するため+接点にはブラシを用いて対応している。そのためブラシ部においても接触抵抗が生じてしまう。また実験機自体の内部抵抗も存在している。そこで試験前に潤滑油無しの状態で補正を行う。ECR には可変抵抗を設けており、絶縁状態で電圧値 50mV となるように調整する。

今回の実験では、試料油はエンジン油 5W-30、ギヤ油 VG320、それぞれに SOD-1PN10%を添加した合成油の4種である。

荷重条件は面圧 463MPa にて観測実験を行っている。

それぞれの試験結果を図 10,11,12 にそれぞれに示す。

グラフにおける縦軸の分離度は最大電圧 50mV に対する測定値の変化率である。今回は測定時間 10s~60s の 50 秒間の分離度をサンプリングし、平均分離度としている。

各試料油における平均分離度を表 1 に示す。

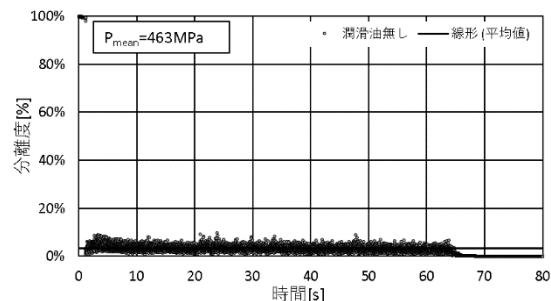


図 10 可視化装置における ECR 値 潤滑油無し (DRY)

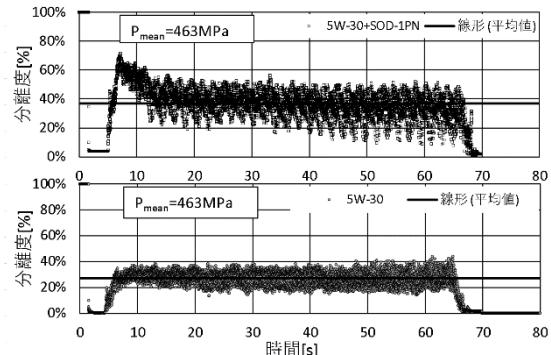


図 11 可視化装置における ECR 値 エンジン油 (5W-30)

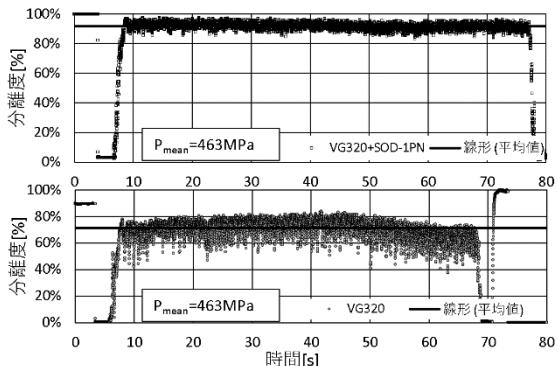


図 12 可視化装置における ECR 値 ギヤ油 (VG320)

表 1 可視化装置における ECR 測定値

試料油	なし (DRY)	エンジン油		ギヤ油	
		5W-30	5W-30+SOD-1PN[10vol%]	VG320	VG320+SOD-1PN[10vol%]
面圧 [MPa]	463	463	463	463	463
平均分離度 [%]	3.2%	27.1%	37.0%	71.4%	91.8%
同条件下 油膜厚さ [μm]	-	0.296	0.592	0.592	0.691
動粘度 [mm^2/s]	-	135.914	143.426	1370.86	1117.94

表 1 に試験条件とそれぞれの試験結果をまとめた。これらの結果から試料油の膜厚が厚くなるほど平均分離度が高くなる傾向がある。

3.3 接触圧力、油膜の電気抵抗の変化

3.3.1 チムケン試験機と改造内容

荷重、接触面圧に対する油膜の変化を観測するためにチムケン試験機を改造し観測を行った。チムケン試験機とは（JIS K2519）で規定されている潤滑油の耐摩耗性を計測する試験機である。図13に外観を示す。本来の使用方法は試験片（Φ10×14.5 mm）を直径35 mmの回転子に荷重一定の下で一定時間接触させ、試験片の摩耗状態から潤滑油の耐摩耗性を評価する試験機である。

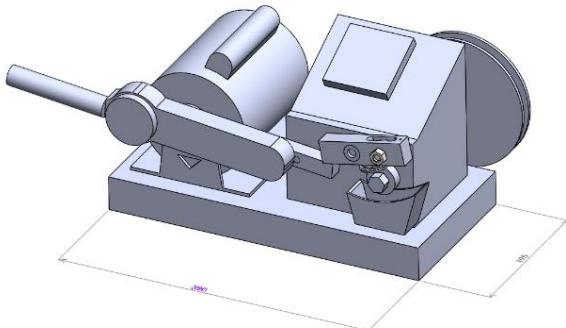


図13 チムケン試験機 外観

著者らはチムケン試験機を用いてスラスト球軸受寿命試験機の潤滑状態を再現できるように改造し実験を行った。以下にその詳細を示す。

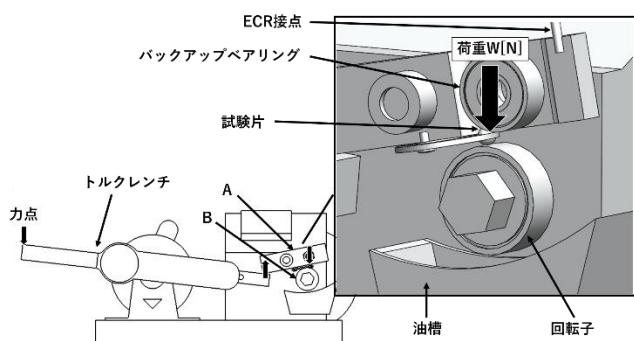


図14 改造チムケン試験機 試験片取り付け部詳細

図14のA部は試験片取り付け部である。軸受寿命試験機の試験片としているスラスト玉軸受A51104の保持器の一部と転動体1個を取付けている。上部には回転子に転動体を押し付けた際に転動体が保持器から脱落しないよう深溝玉軸受をバックアップとして設置している。加えて転動体近傍にECR接点を設けている。

図14のB部は回転子である。寿命試験機ではスラスト玉軸受の外輪となるが、深溝玉軸受6003を完全脱脂し転動体部の隙間を金属パテで埋め外輪と内輪を一体化し回転軸上にECR接点を設けている。

ECRにおいては膜厚と接触面の表面粗さに大きく影響を受ける。試験片である転動体と回転子の表面粗さはそれぞれRa 0.015とRa 1.6である。

今回の試験では試験荷重を図14におけるトルクレンチを用いて掛けた。A部のバーを介して転動体に荷重が掛かる構造である。試験荷重の値はトルクレンチの値と、図14の試験片取付部にフォースゲージを取り付け、測定試験荷重の校正を行っている。

3.3.2 改造チムケン試験機における面圧

チムケン試験機における接触圧と式の導出を列記する。

2つの弾性体I, IIは、接触点で一般に互いに直角をなす2組の主曲率（ ρ_{I1} , ρ_{I2} ），（ ρ_{II1} , ρ_{II2} ）をもつが、Hertz理論によると、圧縮接触面の形状は橍円でその直径2a, 短径2bはそれぞれ次式で表される。

$$a = \mu \sqrt[3]{\frac{3W(\theta_1 + \theta_2)}{8\sigma\rho}}, \quad b = \nu \sqrt[3]{\frac{3W(\theta_1 + \theta_2)}{8\sigma\rho}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\mu, \nu = \cos \tau$ に関する定数は次のように表される。

$$\cos \tau = \frac{|\rho_{1,i} - \rho_{1,ii}| + |\rho_{2,i} - \rho_{2,ii}|}{\rho_{I1} + \rho_{I2} + \rho_{II1} + \rho_{II2}} \quad \dots \dots \dots \dots \dots (2)$$

また、式(1)の θ_1, θ_2 は次式から求めた。

$$\theta_1 = \frac{4(1 - (\frac{1}{m_1})^2)}{E_1}, \quad \theta_2 = \frac{4(1 - (\frac{1}{m_2})^2)}{E_2} \quad \dots \dots \dots \dots \dots (3)$$

E : 縦弾性係数[Pa]

$1/m$: ポアソン比[-]

W : 荷重[N]

式(3)と式(2)から求めた $\cos \tau$ から μ, ν を算出し、式(1)より圧縮接触面の直径2aと短径2bを求めた。

そして、接触面の接触圧力の算出にはHertzの接触理論を用い、次式より求めた。

$$\text{最大接触圧力}[MPa] \quad p_{max} = \frac{3W}{2\pi ab} \quad \dots \dots \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{平均接触面圧}[MPa] \quad p_{mean} = \frac{W}{\pi ab} \quad \dots \dots \dots \dots \dots (5)$$

改造チムケン試験機の試す荷重は荷重W=10, 60, 187Nで行っており、各荷重に対する平均接触面圧を表2に示す。

また、今回は測定に至っていないが改造チムケン試験機における平均接触面圧は、荷重W=509Nのとき2584MPaとなり、寿命試験機と同じ平均接触面圧になる。

3.3.3 改造チムケン試験機の ECR 測定結果

改造チムケン試験機による ECR 測定についても接点にブランシを用いているため接触抵抗が、試験機の構造体の内部抵抗をそれぞれ生じている。本来は可視化装置での実験と同様に 50mV で測定を行うが、差を見ることが難しいため、ECR 回路の可変抵抗を用いて絶縁状態、油膜形成状態で 2.9V となるように調整して測定を行っている。

試料油は、エンジン油 5W-30、ギア油 VG320 とそれぞれに SOD-1PN10%を添加した合成油の 4 種である。今回は可視化装置における ECR 測定と同様に潤滑油なしの状態でも試験を行い、荷重条件は接触面圧 693MPa, 1254MPa, 1831MPa にて実験を行った。

各試料油の 1831MPa における試験結果を図 15, 16 に示す。

可視化装置での ECR 測定と同様に、エンジン油 5W-30 に対して粘度の高いギア油 VG320 の方が、分離度が大きくなる傾向がある。

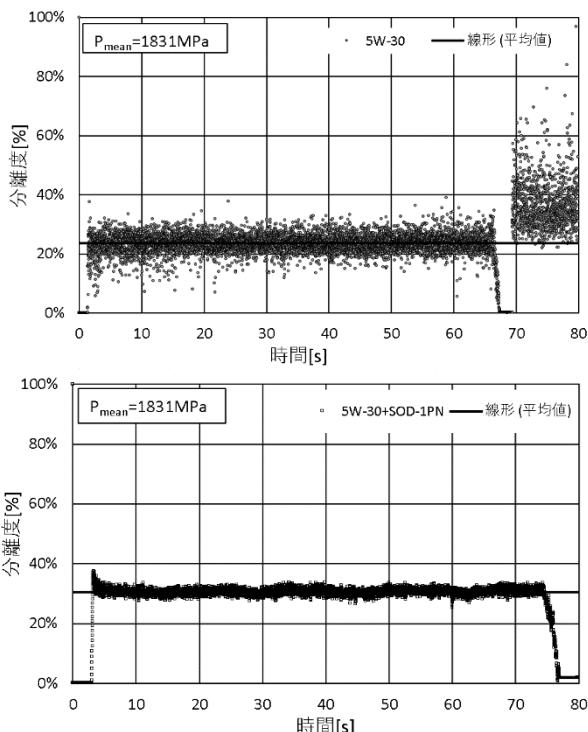


図 15 チムケン試験機における ECR 値 エンジン油 (5W-30)

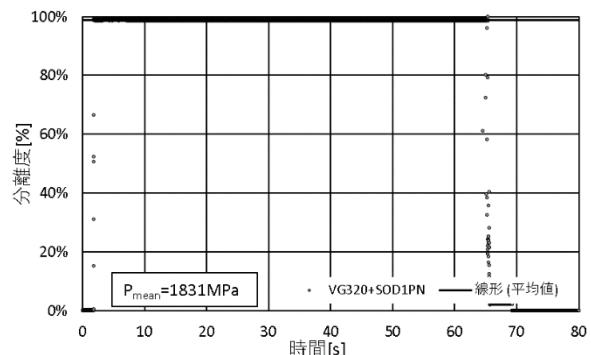
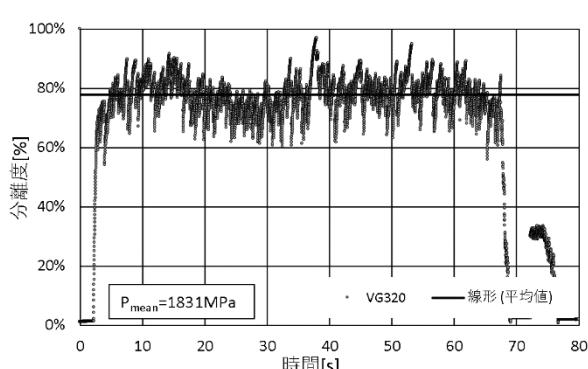


図 16 チムケン試験機における ECR 値 ギア油 (VG320)

各試料油における ECR 値を表 2 にまとめる。荷重 10N において潤滑油なしの状態で 24.4%となっているが、これは荷重をほとんどかけていない状態なので、回転子の回転による影響で安定した接触をしていないためだと考えられる。

また改造チムケン試験機と潤滑油膜可視化装置での ECR 測定における、各試料油における面圧と平均分離度の関係について図 17 に示す。

表 2 改造チムケン試験機における ECR 値

荷重 [N]	接触 面圧 [MPa]	ECR値			
		潤滑油なし (DRY)		エンジン油	ギア油
		5W-30	5W-30+SOD-1PN [10vol%]	VG320	VG320+SOD-1PN [10vol%]
10	690	24.4%	42.5%	40.2%	98.6%
60	1254	0.1%	25.0%	25.5%	97.9%
187	1831	0.1%	23.6%	30.5%	78.0%

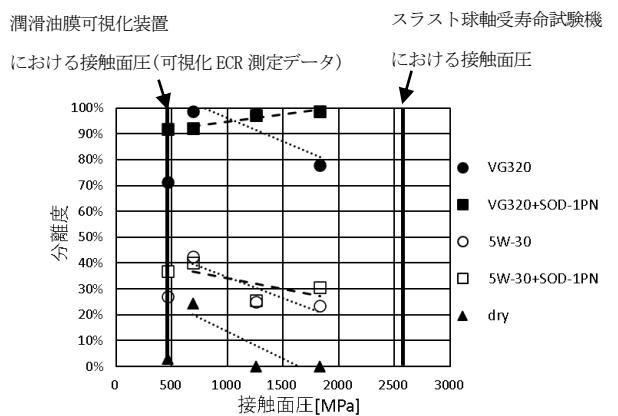


図 17 接触面圧と平均分離度の関係

図 17 の測定結果より可視化装置における各試料油の平均分離度はチムケン試験機での測定結果と近似している。

各試料油において面圧の上昇とともに平均分離度はおよそ 8~20%低下していることがわかる。

また、エンジン油 5W-30、ギア油 VG320 共に PN を添加した合成油の方が面圧 1831MPa に対する平均分離度はそれぞれ 6.9%と 20.8%上昇している。

4. 結論

潤滑油膜可視化装置と改造チムケン試験機を用いた ECR 測定結果から下記のことが判明した。

- 1) 潤滑油膜可視化装置と改造チムケン試験機の結果より、それぞれの試験機において各潤滑油や面圧に対する分離度を算出することが可能となり、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見られた。
- 2) ECR 測定結果より、可視化装置による光学的油膜厚さ測定時の条件において、SOD-1PN 添加時の方が平均分離度は 9.9~20.4% 高くなった。
- 3) チムケン試験機における ECR 測定結果より、エンジン油 5W-30、ギア油 VG320 共に面圧の増加とともに平均分離度は低下する。SOD-1PN を添加することで 1831MPa における平均分離度はそれぞれ 6.9%, 20.8% 上昇する。
- 4) ECR 測定では平均分離度を用いて、潤滑油膜可視化装置における油膜の形成状態との整合性を確認することができたが、軸受寿命試験機における試験面圧までの ECR 測定には至らなかった。また潤滑油膜可視化装置においてはオプティカルフラットと鋼板で物性が異なること、チムケン試験機では回転子の周速を他の実験条件に合わせることができていない。今後はこれらの実験条件を同一とできるように試験機に改良を加えて更なる信頼性の向上が必要である。

参考文献

- [1] 竹田雄祐, 里永憲昭, 渡邊孝司, 園田智之: 転がり軸受の損傷に与える自動車と産業機械における潤滑油新還元添加剤 (SOD-1PN) の寿命効果に対する考察, 第 17 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, pp75-80(2018)
- [2] 城戸祥成, 里永憲昭, 竹田雄祐, 渡邊孝司, 園田智之: 弾性流体潤滑条件下における新還元添加剤 (SOD-1PN) の挙動と高圧粘性に関する考察, 平成 30 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集, pp.95-100 (2018)
- [3] 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)
- [4] 坂井祐一: スラスト球軸受の寿命に及ぼす代替冷媒用潤滑油の影響, 佐賀大学工学系研究科機械工学専攻, 平成 10 年度 修士論文
- [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)