

接触電気抵抗法を用いた歯車の潤滑状態観測評価試験機の開発

竹田雄祐* 里永憲昭* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学, ** (有) D1 ケミカル

Development of an Observing Device for Evaluating the Lubrication Condition of Gears
Using the Electrical Contact Resistance method

Yusuke TAKEDA*, Noriaki SATONAGA*,
Takashi WATANABE**, Tomoyuki SONODA**

*Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan

**D1 Chemical Co., Ltd., Japan

著者らは潤滑油を構成する成分の違いが、機械の潤滑状態や寿命に与える影響について検証している。これまで、機械の中で最も損傷することが多いとされる、軸受の潤滑状態を光学的観測や電氣的観測を用いて評価してきた^[1]。しかしながら、近年、長期間使用されてきた歯車装置のメンテナンスの要求も高まっており、歯車の接触面における潤滑状態評価手法の必要性を認識している。このたび、接触電気抵抗法を利用した歯車の潤滑状態評価装置を新たに試作したので、その内容と観測結果について紹介する。

キーワード: ギア油, トライボロジー, 歯車装置, 接触電気抵抗法, 弾性流体潤滑

1. 結論

現代社会では、ロボットなどの数多くの産業用機械が用いられている。機械技術の発展により生産設備自体が長寿命化しており、適切な時期に保守点検を実施することで機械寿命の大幅な延長や、安定稼働が実現されている。しかしながら、それでも機械の損傷は発生しており、その多くは軸受と考えられている。各種機械装置の軸受の寿命時間は機械の寿命と言い換えることもできる。そこで、著者らはこれまで、潤滑油が軸受の寿命時間に与える影響について検証を進めてきた。しかしながら近年、軸受以外にも損傷部位として歯車の損傷にも注目が集まっている。たとえば、半世紀以上にもわたって使用され続けてきた歯車が寿命を迎え損傷する報告が数多く紹介されている。それらの歯車は軸受とは異なり、一般的な代替え部品も少なく、既に製造企業において交換予備部品が廃番されている場合もあり、復旧までに多大な時間が必要となることがある。

歯車の損傷は、歯面の軽微な摩耗から、スカuffリング、リップリングやリッジングなどの永久変形、ピッチングなどの表面疲労、亀裂や折損などが挙げられる^[2]。

歯車の長寿命化には、歯面の硬度を使用条件に合わせて適切に設定すること。局部的に荷重が集中しないように、荷重を均等に分散させること。そのためには高い加工精度と組立精度が求められる。とくに、片当たりなどが生じる場合は、前述したような異常摩耗などの損傷につながる。

ここで、歯車の潤滑においては、適切な粘度設定による油膜形成や、歯面温度の冷却性能、極圧剤の添加などが重要視されている。また、歯車の回転に伴う潤滑油の攪拌によって潤滑油中に気泡が生じて油膜形成を阻害して歯面損傷の原因となるため、消泡性も必要な性能とされている。

このような歯車を取り巻く社会的な状況を鑑みて、著者らがこれまで、軸受の潤滑状態を観測する手法として用いてきた接触電気抵抗法 (Electric Contact Resistance 以下 ECR と略す)^{[3][4]}を利用して歯車の潤滑状態を観測できると考えた。

それにより、歯の噛み合い部の潤滑不良を検知できれば、保守点検時期を警告し、歯車の折損などの重大被害を未然に防止できると考えた。そこで、このたび、自動車用の最終減速機を利用して、歯車潤滑状態の観測装置を試作したので報告する。

2. 接触電気抵抗法

接触電気抵抗法とは、潤滑油が絶縁体である物性を利用して、潤滑油膜の形成状態を観測する手法である。減速機や変速機のように両歯車の歯当たり間には潤滑油膜が形成される。それぞれに観測回路の接点を設けることで、二面間に油膜が形成されると絶縁され、油膜が欠損すると短絡する。このように油膜の形成状態によって観測回路の合成抵抗が変化して測定電圧が変化する。二面間に印加した電圧に対する測定電圧の比を式 1 のように分離度として潤滑油膜の状態を評価する観測方法である。その回路図を図 1 に示す。

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

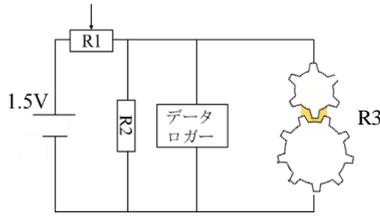


図 1 ECR 観測回路

図 2 に、転がり玉軸受における潤滑状態の ECR 観測の例を示す。左が観測波形であり縦軸に分離度を、横軸が観測時間である。観測時間 10~60 秒の 50 秒間の分離度の算術平均を直線で示しており、右が、そのヒストグラムである。

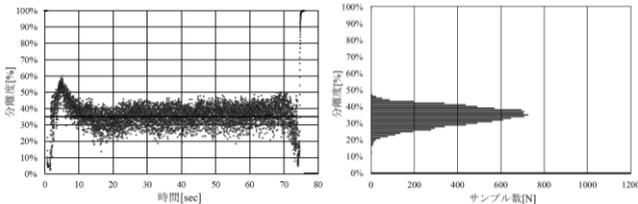


図 2 分離度グラフ (左) とヒストグラム (右)

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^[5]。

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

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^[5]。

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

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^[5]。

3. 歯車潤滑状態観測装置の概要

3-1 観測装置概要

歯車の潤滑状態を観測するために、観測装置として自動車用の最終減速装置を転用した。

最終減速機には自動車が旋回する際に左右輪間に生じる回転速度差を収める差動装置も含まれているが、無効化の改造を施して、エンジンから変速機を経て駆動力を伝えるドライブギアと、ドリブンギアの噛み合い部に形成される油膜の ECR 観測ができるようにしている。また、本体のエンドカバーは透明なポリカーボネート製に変更することで、目視でも潤滑状態を確認できるようにしている。その外観を図 3 に示す。

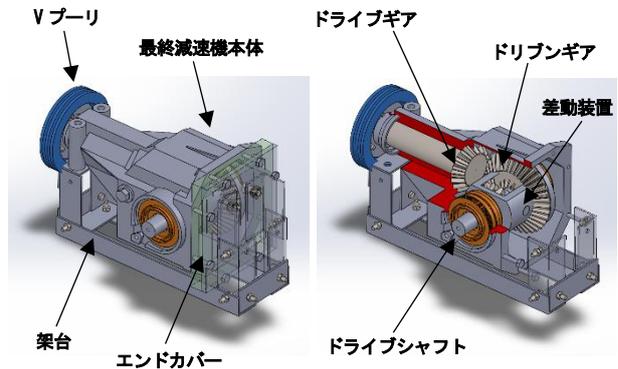


図 3 観測器概要 (左: 外観 右: 内部構造)

3-2 絶縁処理

ECR を用いて、ドライブギアとドリブンギアの油膜形成状態を観測するために、最終減速機本体から歯車機構全体を絶縁する必要がある。そこで最終減速装置の終端部となる左右のドライブシャフトを支持する軸受を変更している。自動車の高負荷に耐えるためにテーパころ軸受 (32007 外形 62mm 内径 35mm) が使用されているが、深溝玉軸受 (6908 外形 62mm 内径 40mm) に置き換えると共に、ドライブシャフトと軸受の間にポリアセタールでスリーブを追加することで絶縁している。図 4 に詳細を示す。

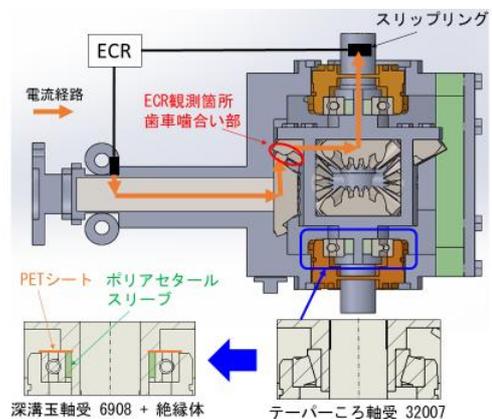


図 4 絶縁処理概要

4. 歯車潤滑状態観測試験

4-1 観測装置緒元と観測条件

歯車潤滑状態の観測条件を下記に示す。

- ・歯車種類……………ハイポイドギア
- ・減速比……………2.466
- ・ドライブギア歯数…15
- ・ドリブンギア歯数…37
- ・バックラッシ……………0.14mm
- ・最大接触面圧……………1.15GPa
- ・駆動源……………リングコンモータ
(Nidec : SCMK-200E)
- ・回転数……………100rpm, 200rpm, 300rpm
- ・測定項目……………分離度

ここで、本来であれば終端に何らかの負荷機構を設けるべきであるが、歯車の潤滑状態の観測について、その可能性の確認を優先したため、今回は設けずに無負荷での観測試験とした。

4-2 試料油

観測試験に用いた試料油は、最終減速機の整備仕様書⁶⁾に則りギア油 75W-80 (SAE J306 規格) とした。また、注入量は 0.75L とした。

ギア油 75W-80 は、高荷重の変速機やハイポイドギア用に開発された高粘度マニュアル・トランスミッション用ギアオイルであり、ISO 規格では VG46 と VG68 の中間に相当する。物性を表 1 に示す。

表 1 各試料油の動粘度・粘度係数

| | 75W-80 |
|-------------------------------|--------|
| 動粘度 (mm ² /s) 40℃ | 58.8 |
| 動粘度 (mm ² /s) 100℃ | 10.1 |
| 粘度指数 | 160 |

今回の観測評価は、潤滑油を無注入の乾燥状態とギア油 75W-80 (20℃) を注入した状態で観測した。

5. 観測結果

歯車の潤滑状態の ECR 観測結果を表 2 と表 3 に示す。また、図 5、図 6、図 7 に乾燥状態での、図 8、図 9、図 10 にギア油 75W-80 注入状態の ECR 観測結果を示す。

表 2 試験結果 (乾燥状態)

| 乾燥状態 | 100rpm 1回目 | 100rpm 2回目 | 100rpm 3回目 | 200rpm 1回目 | 200rpm 2回目 | 200rpm 3回目 | 300rpm 1回目 | 300rpm 2回目 | 300rpm 3回目 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 平均分離度[%] | 26.32 | 29.85 | 29.52 | 30.87 | 30.21 | 28.96 | 44.45 | 45.01 | 44.9 |
| 尖度 | 2.43 | 2.37 | 2.36 | 2.71 | 3.26 | 3.7 | 2.96 | 2.95 | 2.86 |

表 3 試験結果 (ギア油 75W-80)

| 75W-80 | 100rpm 1回目 | 100rpm 2回目 | 100rpm 3回目 | 200rpm 1回目 | 200rpm 2回目 | 200rpm 3回目 | 300rpm 1回目 | 300rpm 2回目 | 300rpm 3回目 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 平均分離度[%] | 40.02 | 46.29 | 46.49 | 60.45 | 55.47 | 56.39 | 55.03 | 53.27 | 52.21 |
| 尖度 | 2.39 | 2.32 | 2.35 | 2.81 | 2.63 | 2.22 | 3.25 | 2.78 | 2.87 |

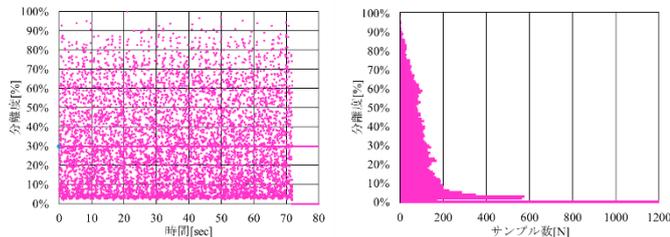


図 5 ECR 観測結果 乾燥状態 (100rpm)

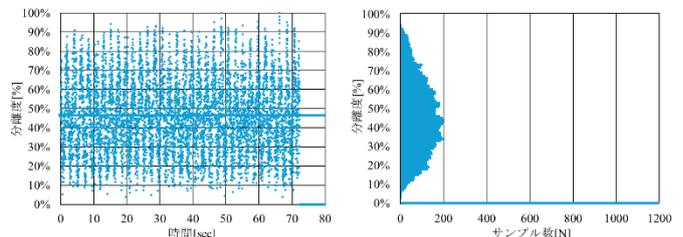


図 8 ECR 観測結果 ギア油 75W-80 (100rpm)

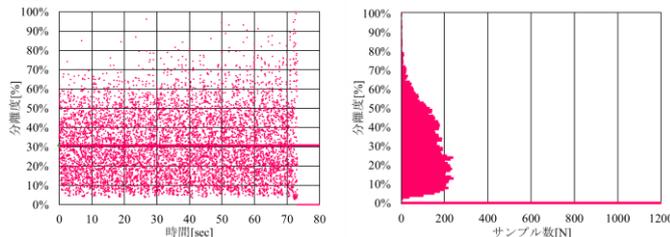


図 6 ECR 観測結果 乾燥状態 (200rpm)

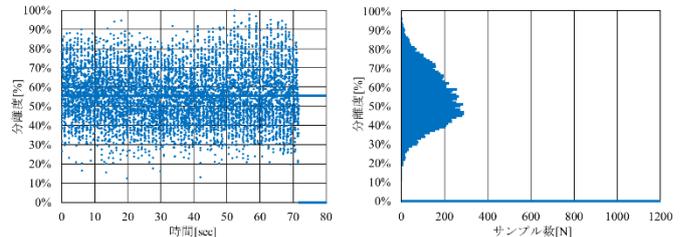


図 9 ECR 観測結果 ギア油 75W-80 (200rpm)

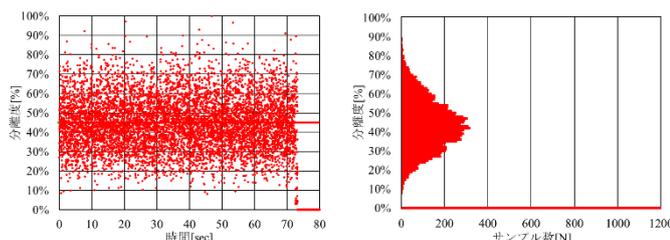


図 7 ECR 観測結果 乾燥状態 (300rpm)

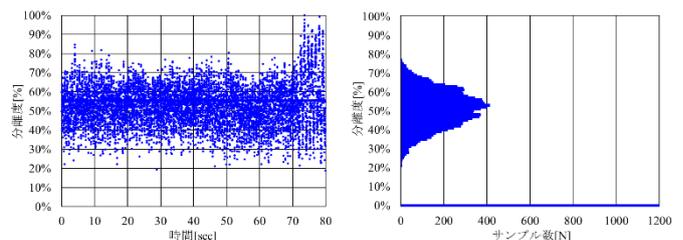


図 10 ECR 観測結果 ギア油 75W-80 (300rpm)

試料油が無注入の乾燥状態とギア油 75W-80 を注入した状態は、共に回転速度の上昇に伴い分離度が上昇することが確認できる。

また、ギア油 75W-80 を注入することで同じ回転速度であっても平均分離度が高いことから潤滑油膜の形成状態を確認できていると考えられる。

著者らがこれまで取り組んできた転がり玉軸受の潤滑状態の観測結果と異なり、広範囲に分布した観測結果であった。これは、軸受の潤滑状態観測では、常に油膜が連続形成されている状態に対して、歯車では噛合部が連続的に変化して、油膜形成が断続的に変化するためだと考えられる^{[7],[8]}。

試料油が無注入の乾燥状態にもかかわらず、平均分離度が上昇しているのは、安定した歯車の動作にはバックラッシュが必要であり、常に噛合う歯車どうしが押されて弾かれることによって瞬間的に絶縁状態を繰り返し生じているためと考えられる。観測装置に終端抵抗を設けることで、稼働時の弾き合いを抑えられるのではないかと考えられるので、改良後に再測定をしたいと考える。しかしながら、このような弾き合いの現象も観測できるのであれば、一般的には歯車のバックラッシュ調整や歯当たり調整は光明丹などを利用して目視確認しているが、ECRを使用することで調整の簡略化も期待できると考えられる。

6. 結論

1. 歯車潤滑状態の観測評価試験機を試作して、油温 20°Cにおける歯車の噛合い部の潤滑状態を観測可能とした。
2. 潤滑油を無注入状態で観測した結果、回転速度を高めるに追従して分離度も上昇することが認められた。これは、バックラッシュの影響と考えられる。
3. ギア油 75W-80 を注入状態では、回転速度の上昇に追従して平均分離度の上昇と、尖度が正規分布に近づく傾向を確認できた

7. 今後の展望と課題について

今回の試作では、歯車の噛合い部の潤滑状態を観測することを何よりも優先した。そのため終端抵抗が未設置である。今回の試作評価を基として、終端抵抗の設置や、各部形状を見直し、安定的に評価運用できるように改良を進めたいと考えている。また、歯車の破損状態や潤滑不良状態をどのように再現して評価するのか引き続き検討して、実際に現場での歯車装置の保守点検に役立つよう研究を継続したいと考えている。

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, 日本設備管理学会誌第 35 巻 2 号, pp41-46 (2023)
- [2] 社団法人トライボロジー学会: 「トライボロジー故障例とその対策」, 養賢堂, pp53-64 (2003)
- [3] 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
- [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] 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)
- [6] 株式会社 SUBARU: 「KK 型 VIVIO サービスマニュアル」, 3-223-241
- [7] 大津健史: 各種圧力条件での蛍光法を応用した弾性流体潤滑膜の粘度分布の測定, 日本機械学会論文集, Vol.88. No.914. 2022
- [8] 一般社団法人日本機械学会 JSME テキストシリーズ No14「機械要素設計」, 丸善出版, pp95-120 (2017)