

弾性流体潤滑条件下における絶縁破壊電圧測定

Measurement of Dielectric Breakdown Voltage under Elastohydrodynamic Lubrication Conditions

NTN (正) *葛谷 紘澄 (正) 川村 光生

Hiroto Kuzuya*, Mitsuo Kawamura*

* NTN Corporation

1. はじめに

軸受の損傷形態の一つとして電食が挙げられる。軸受における電食とは軸受内に電流が通過すること起因して軌道面などが損傷する現象のことであり、梨地状に変質するフロスティングや、波板状の損傷になるフルーチング（リッジマーク）が軌道面に形成され¹⁾、軸受振動の原因となる。転動体と内外輪間で形成される油膜が絶縁破壊して、軌道面にフロスティングやフルーチングを形成すると考えられている。一般的に放電エネルギー量が小さいとフロスティングを維持し、放電エネルギー量が大きいとフルーチングになると言われているが、フルーチングが形成されるメカニズム²⁾やフルーチング形成に必要なエネルギー量³⁾などは未解明な部分が多い。特に弾性流体潤滑条件下における油膜の絶縁破壊に関しては、先行研究が非常に少ない⁴⁾。

本報では、フルーチング形成メカニズムの解明を最終目的として、弾性流体潤滑条件下における絶縁破壊電圧を調査した結果を報告する。

2. 実験方法

弾性流体潤滑条件下における絶縁破壊電圧測定試験には、Fig.1 に示す二円筒接触試験機を用いた。モーターと接続した軸に駆動円筒を、もう一方の軸に従動円筒を取り付け、これらを接触し転動させた。また絶縁破壊電圧の測定において円筒試験片間に交流電圧を印加する必要があるため、それぞれの軸を支えるハウジングと土台間へ樹脂板を挿入し、それらの締結部は樹脂カラーと樹脂ネジを用いて電氣的に絶縁した。また、ゴム製の V ベルトにより、モーターと絶縁を維持した状態での回転軸への動力伝達を行った。各回転軸にはスリップリングが接続されており、ファンクションジェネレーターで生成した任意の交流波形をバイポーラ電源で増幅し印加した。また、電気回路には電流制限抵抗としてシャント抵抗を直列に接続した。データ測定点は電源からの出力電圧であるファンクションジェネレーターの両端部、試験片に印加されている電圧としては二円筒試験機の両端部で、回路に流れる電流をサンプリング周波数 100 kHz で測定した。Table1 に実験条件を示す。円筒形状について一方の円筒のみ外径面に軸方向の曲率を設けた。

軸方向に曲率を持つ試験片を R 試験片、持たない試験片を St 試験片とする。円筒材質は高炭素クロム軸受鋼 JIS-SUJ2 製で、一般的な焼き入れ・焼き戻し処理を施しロックウェル硬度を 60-62HRC にした。熱処理後の外径面は、両円筒ともに超仕上げを施し、軸方向の算術平均粗さ R_a を約 $0.02 \mu\text{m}$ にした。給油は潤滑油を含浸したフェルトパッドを運転中の円筒に接触させを行った。中央油膜厚さは Chittenden らの油膜厚さ計算式と熱修正係数 Φ_T から計算した。電圧の印加パターンは連続昇圧法に基づき三角波で 0.1 V/s 、最大印加電圧値を 2.0 V とした。また最速で急激な電圧値の降下および回復と電流値の上昇および回復が同時に発生する点の直前の電圧値を絶縁破壊電圧とした。

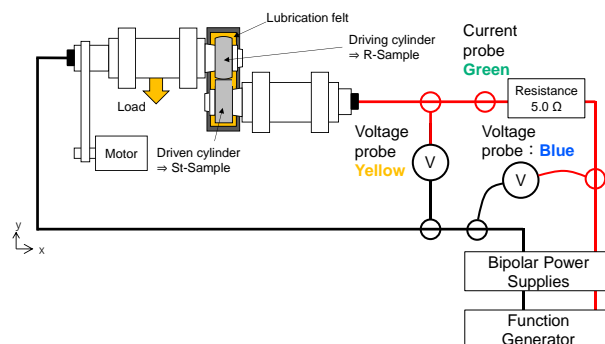


Fig.1 Twin-cylinder type rolling contact fatigue (RCF) testing

Table 1 Test conditions of the RCF testing

No.	Lubricant	Load, N	Rotational Speed, m/s	elliptical contact area S , mm^2	Hertzian contact pressure P_{mean} , GPa	Center film thickness h_c , nm
1	PAO (poly- α -olefin, VG32)	1600	1.57	1.09	1.47	337.8

3. 実験結果

絶縁破壊電圧測定結果を Fig.2 に示す。回路への印加電圧値の増加に伴い、絶縁破壊後に流れる電流の最大値が増加した。試験片間電圧は絶縁破壊後に任意の値に収束する挙動と、その後、印加電圧まで回復する挙動が観測された。この絶縁破壊後の試験片間電圧を絶縁破壊後二面間電圧と定義する。次に、同一条件下で複数回の実験を実施した結果を Fig.3 に示す。絶縁破壊電圧に実験ごとのばらつきが生じること、試験片間電圧の急激な降下点で必ずしも電流値が上昇するとは限らないことを観測した。

4. 考察

Figure 2 より、回路に流れる電流値は回路への印加電圧値、絶縁破壊後二面間電圧、そして回路のインピーダンスに依存している。絶縁破壊により軌道面に生じる放電痕の大きさ、すなわちフルーチング形成までの時間は回路に流れる電流値および二面間の電圧値に依存すること^{5,6)}から、放電痕の形成有無およびフルーチング形成までの時間は回路への印加電圧値と絶縁破壊後二面間電圧、回路のインピーダンスなどの要因に大きく依存していることが明らかとなった。

また、絶縁破壊電圧に実験ごとのばらつきが生じたことから、絶縁破壊電圧は一定値として一意に定義することは困難であり、統計的な取り扱いが必要であると言える。先行研究において、絶縁破壊電圧はワイブル分布に従う傾向が報告されている⁷⁾。この知見に基づき、実験で得られた絶縁破壊電圧データに対してワイブルプロットを適用し、分布特性の整理を試みた (Fig.4)。その結果、ワイブルプロットは高い線形性を示し、決定係数は $R^2 = 0.99$ であった。これにより、弾性流体潤滑条件下における絶縁破壊電圧もワイブル分布に適合していると言える。

5. まとめ

フルーチング形成メカニズムの解明を最終目的として、弾性流体潤滑条件下における絶縁破壊電圧を調査した。その結果下記のことになった。

- ・放電痕の形成有無およびフルーチング形成までの時間には回路への印加電圧と絶縁破壊後二面間電圧および回路のインピーダンスに関係がある。
- ・弾性流体潤滑条件下における絶縁破壊電圧は一定値として定義することは困難であり、統計的な取り扱いが必要であり、ワイブル分布に従う。

文献

- 1) 野口・堀田：スラスト玉軸受を用いたリッジマーク成長過程のミクロ的観察，トライボロジスト，62, 6 (2017) 405.
- 2) 古谷・西川・松田・砂原・山本：電食による損傷の進展挙動，トライボロジー学会予稿集，東京，2013-5, D14
- 3) H.Tischmacher：Systemanalysen zur elektrischen belastung von wälzlager bei umrichter gespeisten elektromotoren，(1966) .
- 4) Liang Guo・Henk Mol・Thijs Nijdam・Lieuwe de Vries・Jeroen Bongaerts：Study on the electric discharge behaviour of a single contact in EV motor bearings，Tribology International，187, (2023), 108743
- 5) 葛谷・小長井・端山・川村：転がり軸受のフルーチング形成メカニズムの解明-放電痕の形状がフルーチング形成に与える影響-，トライボロジー学会予稿集，東京，2025-5, B5
- 6) 国枝：放電加工の基礎と将来展望-I 基礎-，精密工学会誌，71, 1(2005), 58-62
- 7) 佐藤・上巾・高橋：変圧器油絶縁の面積効果と距離効果，電気材料技術雑誌，21, 1(2012), 46-55

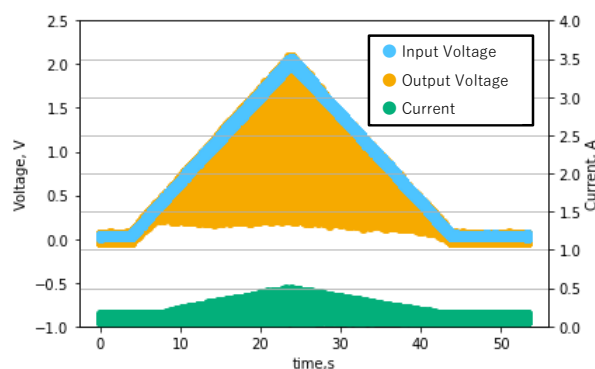


Fig.2 Result of measured dielectric breakdown voltage

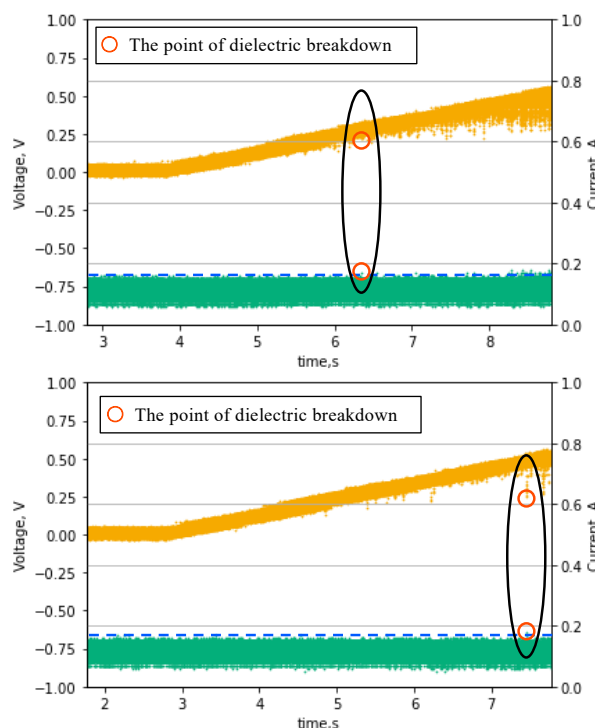


Fig.3 Comparison of experimental data under the same condition

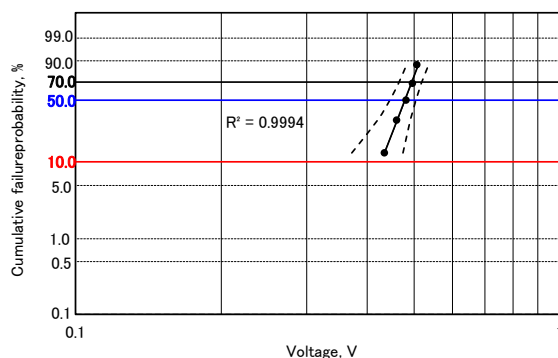


Fig.4 Cumulative failure probability