

粗い表面における電気インピーダンス法 (EIM) の電圧特性 Voltage Characteristics of Electrical Impedance Method on Rough Surfaces

NSK (正) *小杉 大智 (正) 相川 文明 (正) 岩瀬 駿介 (正) 丸山 泰右

東工大 (正) 桃園 聡

Daichi Kosugi*, Fumiaki Aikawa*, Shunsuke Iwase*, Taisuke Maruyama*, Satoshi Momozono**

*NSK Ltd., **Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

近年、持続可能な開発目標 (SDGs, sustainable development goals) を達成するため、様々な機械のしゅう動部に用いられる転がり軸受にはさらなる低トルク化が求められている。低トルク化の手段として、潤滑剤の低粘度化や少油量化が挙げられるが、潤滑不良となり表面の損傷が生じるリスクが高まる。したがって、低トルク化と長寿命化を両立するためには、適切な潤滑状態の維持が必要であり、そのためには潤滑状態の可視化技術が不可欠である。これまで、EHD (elastohydrodynamic) 接触域の油膜厚さ、油膜破断率の評価手法として、電気インピーダンス法 (EIM, electrical impedance method) が開発され、また交流周波数を掃引する電気インピーダンス分光法 (EIS, electrical impedance spectroscopy) も研究されている¹⁾。しかし、印加電圧が大きくなり、かつ油膜厚さが薄い場合 EHD 接触域で絶縁破壊が生じるため、これらの手法を適用することが困難となる²⁾。ここで、絶縁破壊とは絶縁体にかかる電場が材料によって定まるある上限値 (これを絶縁破壊強度という) を上回った際に絶縁性を失い通電する現象である³⁾。つまり、EHD 接触域における油膜は非常に薄いため、電場が大きくなりやすいことから、絶縁破壊が生じやすいと考えられる。そこで本研究では、EHD 接触域の一方を粗い表面とし、電圧振幅と表面粗さのそれぞれが絶縁破壊に及ぼす影響を調査した。粗面を用いることで、接触域内の油膜厚さに分布を持たせることができ、突起の近接における電場集中が及ぼす影響を調査できると考えた。

2. 実験方法

本研究で用いたボールオンディスク型試験機の模式図について、Fig. 1 に示す。潤滑剤には PAO (411 mm²/s at 40°C) を用いた。ボール (直径:25.4 mm) の回転数を 240 min⁻¹ とし、純転がり接触となるようガラスディスクの回転数を設定した。ディスクは導電性を有する酸化インジウムスズ (ITO, indium tin oxide) 膜を被覆しており、粗さはボールと比較してはるかに小さい (Table 1)。また、LCR メータを用いて交流周波数 1 MHz の電圧を接触域に印加し、オシロスコープを用いてボール 2 回転分の時間に相当する電圧波形を計測した。さらに、波形計測時間に対する絶縁破壊が生じる時間の割合を絶縁破壊割合 (electrical breakdown ratio) と定義して測定した。ただし、絶縁破壊が生じる時間は、電圧波形の包絡線 (以下、包絡波形と呼ぶ) に対して設定電圧振幅 (V_p) の 80%を下回る時間とした。

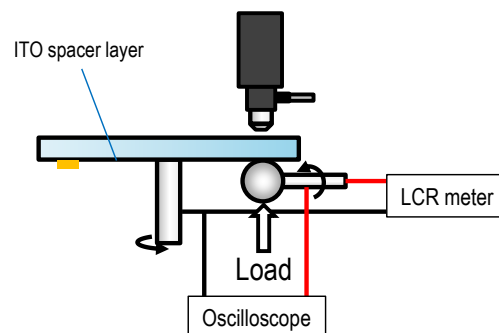


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Surface Roughness of specimens

| | Ball | Disc |
|--------------------|--------|--------|
| $R_q, \mu\text{m}$ | 0.3525 | 0.0054 |
| $R_a, \mu\text{m}$ | 0.2911 | 0.0044 |

3. 実験結果および考察

包絡波形に対して自己相関を計算した結果を Fig. 2 に示す。0.25 s の間隔でピークが認められたが、これはボールの回転周期に等しい。また、異なる電圧振幅で測定した電圧波形 2 つの相互相関を計算した結果を Fig. 3 に示す。本実験では波形取得を開始する時点での回転座標を統一させていないため、図中矢印で示すようなランダムなラグを含んでいるが、ボールの回転周期 (Fig. 2) と一致する間隔を持つピークが確認された。相互相関の結果を用いて、波形取得を開始した回転座標 (Fig. 2 中のラグ) を揃えた上で、各電圧振幅における包絡波形を並べた結果を Fig. 4 に示す。絶縁破壊が生じやすい領域はボール円周上の特定の位置に集中しており、電圧振幅の増大によってその領域が徐々に広がることがわかった。すなわち、これらの結果は絶縁破壊は完全なランダムで生じる現象ではなく、ボール表面の局所的な状態 (凸部における近接や電場集中、酸化被膜の被覆状態等) を反映した現象であることを示唆している。また、荷重 10 N, 20 N における設定電圧の振幅と絶縁破壊割合の関係を Fig. 5 に示す。いずれも $V_p = 0.6$ V 程度で絶縁破壊が生じ始め、電圧の増大に伴い絶縁破壊割合が大きくなった。絶縁破壊が生じ始める V_p が同一である理由は、荷重によって油膜厚さがほとんど変化しないことに起因すると考えられる。また、荷重が大きいくほど絶縁破

壊割合が大きかった．荷重が大きいと前述のように油膜厚さはほとんど変わらないまま，ヘルツ接触面積が大きくなるため，絶縁破壊が生じる確率が高くなったことで説明できる．

4. まとめ

本研究では，EHD 接触域に交流電圧を印加し，電圧振幅や表面粗さ，および荷重が絶縁破壊挙動に及ぼす影響を調査した．その結果，電圧振幅を大きくすることで生じる絶縁破壊は，ボールの粗さや表面状態の変化を反映していることが示唆された．つまり，本研究を応用することで EHD 接触域の表面状態をその場観察できる可能性があり，金属接触や摩耗・表面粗さのモニタリング等に有用な手段になり得る．ただし，絶縁破壊に影響を及ぼす因子としては，前述したような様々な因子が考えられるため，各々の寄与率を解明する必要がある，これは今後の研究課題である．

文献

- 1) 丸山・岩瀬・糸魚川・中野・桃園：電気的手法を用いた潤滑状態診断技術について，トライボロジー学会 2024 春東京 (2024) B13.
- 2) 丸山：転がり軸受の潤滑状態モニタリングに関する研究 —電気インピーダンス法の開発—，横浜国立大学大学院 環境情報学府博士課程後期 学位論文 (2019).
- 3) H. Prasad: Effect of operating parameters on the threshold voltages and impedance response of non-insulated rolling element bearings under the action of electrical currents, Wear, 117, 2, (1987) 223.

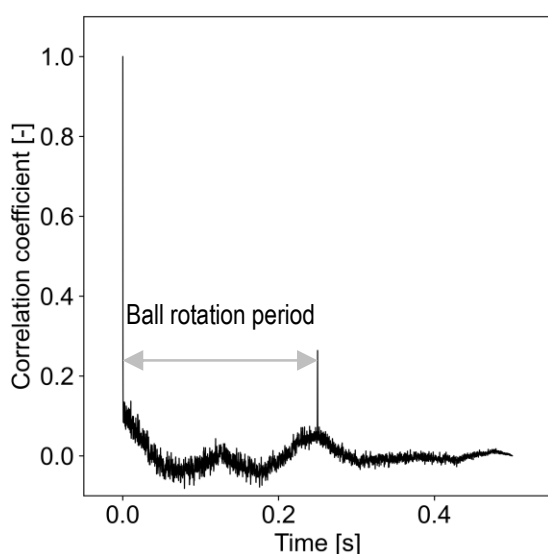


Fig. 2 Autocorrelation of envelope voltage waveforms.

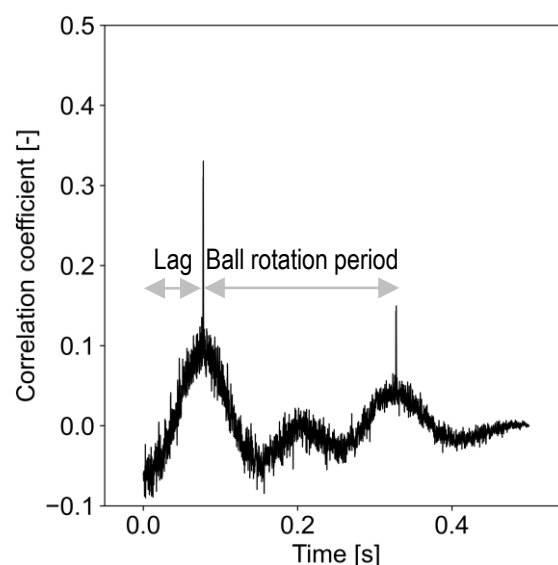


Fig. 3 Cross-correlation of envelope waveforms obtained by applying different voltage amplitudes ($V_p = 1.10$ V and 1.12 V).

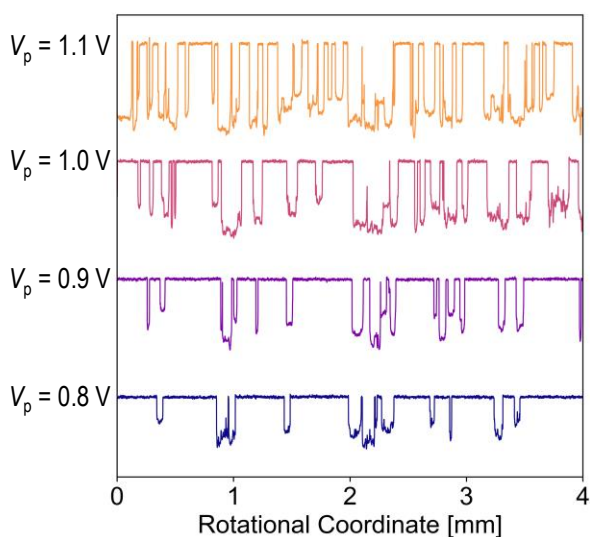


Fig. 4 Enveloped waveforms aligned by rotational coordinates using cross-correlation under various V_p conditions.

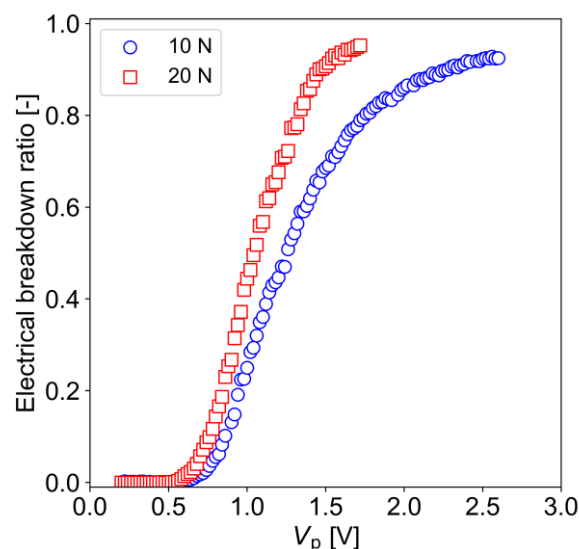


Fig. 5 The relationship between the electrical breakdown ratio and the magnitude of voltage under varying load conditions.