

電気インピーダンス法による歯車噛合部の油膜形成と破断の実動作下計測

Measurement of oil film formation and breakdown at gear meshing
under actual operation by electrical impedance method

横国大(正)※大久保 光, (学)渡邊 明日香, (正)中野 健

Hikaru Okubo¹, Asuka Watanabe¹, Ken Nakano¹

¹Yokohama National University

1. 緒言

近年、輸送機器の電動化の加速により、摺動機械要素は大きな転換点を迎えており、航続距離の劇的な延長を狙ったモータの高出力化に向けて、将来、摺動機械要素は超高速な摩擦条件での運転が強いられる。この超高速条件における摺動機械要素の潤滑状態について、相反する二つの予測がある。潤滑理論に基づけば、高速域では潤滑油の巻き込み速度が増加し、厚い潤滑油膜が形成されるものと推定され、良好な潤滑状態での運転が予測される。一方、潤滑理論に反して、超高速化に伴い、潤滑油の飛散や低粘度化が引き起こされる恐れがあり、高速域にも関わらず油膜が薄い潤滑領域の存在が予測されている。後者の予想は、超高速状態の摩擦現象が極めて複雑になることを示唆しており、次世代技術開発の大きな弊害となっていることから、その全容の把握が急務である。しかしながら、高速運転中における摺動機械要素の潤滑状態を計測することは容易ではなく、その実際は不明瞭である。「超高速摩擦界面を高時間分解能かつ実動作下で計測する技術」として、「電気プローブ計測」に期待が寄せられている[1,2]。とりわけ、「電気インピーダンス法」は、適切な交流周波数を固液界面に印加することで、「所望の時間分解能」での計測が実現可能であり、二対の摩擦材料を「二対の電極」、潤滑油を「電解液」と見なせば、摩擦界面情報を実動作下で追跡可能となる。本報では、電気インピーダンス法を利用した歯車噛合部の潤滑状態を計測する技術について、その開発状況を報告する。

2. 方法

本研究で開発した歯車試験機の概念図を図1(左)に示す。本歯車試験機は、サーボモータにより歯車が駆動し、従動側の歯車が接続されたモータで回生制御することで、ギヤ噛合部に負荷を発生する機構である。シャフトに働くトルクおよび回転数をトルクメータとロータリーエンコーダでそれぞれ計測した。また、ロータリーコネクタを通して各歯車シャフトに図1(右)の等価回路を構成するための電極を取り付けた。歯車は平歯車(材質:S45C、歯幅:20 mm、モジュール:2.0 mm、歯数:34–46、減速比:34/46)を使用し、歯車の噛合部を介して電流が流れる構成とした。噛合部に生じる負荷トルクを0.5 Nmの一定条件に制御し、歯車回転数を100 rpmから1000 rpmまで増加させた。なお、各回転数に制御した後、潤滑油(KF96-100CS-1、信越化学工業、粘度:100 cSt)を歯車噛合部に1.0 ml滴下し、その後10秒後に複素インピーダンス計測を行った。本試験機の等価回路は図1(右)に示すように構成され、印加電圧 V_0 (周波数:10 kHz、振幅:0.5 V)と回路内に挿入した固定抵抗Rの両端の応答電圧 V_1 をそれぞれ1.0 MHzのサンプリング周波数で計測した。

3. 結果および考察

各回転速度における電圧応答 V_0 および V_1 を図2に示す。なお、本時系列データは、応答電圧 V_1 が印加電圧 V_0 近傍の振幅値を示す場合、歯車噛合部の油膜の破断を示唆し、応答電圧 V_1 が0近傍の振幅値を示す場合、歯車噛合部における油膜形成を示唆する。また、図2に示すデータ区間は、各回転速度の噛合周期に基づき歯車3歯分が通過する時間に対応する(図内黒線にて1歯通過分の時間間隔を指示)。図2より、一定の振幅で推移する印加電圧 V_0 に対して、応答電圧 V_1 の振幅値は運転速度に依らず時々刻々と変化した。各速度条件を比較すると、回転速度の上昇に伴って、応答電圧 V_1 の振幅値が全体的に減少した。すなわち、高速化に伴って、歯車噛合部における油膜形成が促されたものと推察される。歯車の潤滑状態を反映する応答電圧 V_1 と噛合周期の関係を調べるために、応答電圧 V_1 について高速フーリエ変換(FFT)による周波数解析を行った。各回転速度でのFFT解析結果と各噛合周期を図3に示す。図3より、各速度の噛合周期と応答電圧 V_1 の周波数ピークの一一致が確認された。すなわち、応答電圧 V_1 の時間発展挙動は、歯車の噛合状態の時系列変化に対応しており、歯車の潤滑状態モニタリングに対する電気インピーダンス法の有効性が示された。

4. 結言

本研究では電気インピーダンス法による歯車噛合部の潤滑状態の評価を可能とする試験機の開発し、開発した装置を用いて得られた電気応答から潤滑状態を推定する技術の確立を試みた。その結果、電気インピーダンス法は、歯車の回転速度および噛合周期に伴う潤滑状態の変化を捉えており、歯車の潤滑状態モニタリングに有効な手法であることが示された。

謝辞

本研究は2023年度の自動車用動力伝達技術研究組合(TRAMI)の委託研究により実施した。

文献

- [1] T. Maruyama et al., "In Situ Quantification of Oil Film Formation and Breakdown in EHD Contacts." *Tribol. Trans.* (2018).
- [2] T. Maruyama et al., "Lubrication Condition Monitoring in EHD line contacts of Thrust Needle Roller Bearing by Electrical Impedance Method." *Lubricants* (2023)

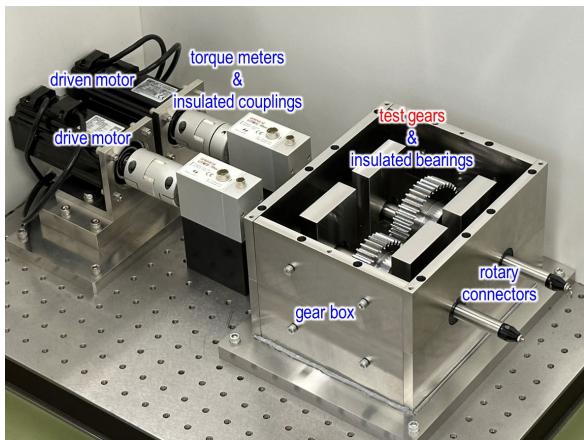


図1 開発した歯車試験機:(左) 外観図,(右) 等価回路.

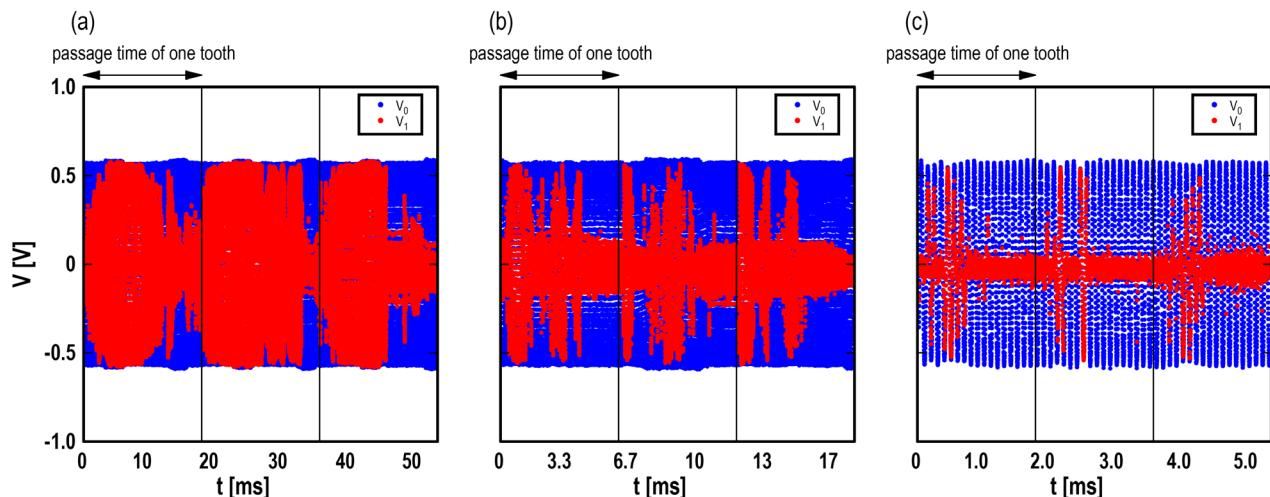


図2 3歯通過時間の電圧応答(青:V₀, 赤:V₁):(a) 100 rpm, (b) 300 rpm, (c) 1000 rpm.

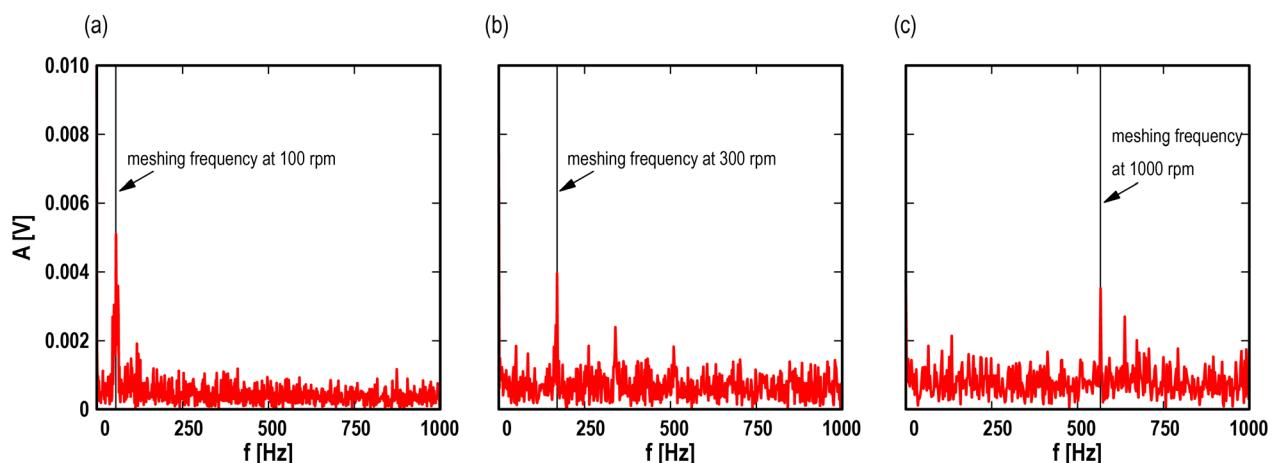


図3 電圧応答 V₁ の周波数分析結果:(a) 100 rpm, (b) 300 rpm, (c) 1000 rpm.