

## 電気インピーダンス法を用いたヘリカルギヤ噛合部の潤滑状態評価

Lubrication condition evaluation of helical gear meshing by electrical impedance method

横国大(学)※渡邊 明日香, (正)大久保 光, (正)中野 健

Asuka Watanabe<sup>1</sup>, Hikaru Okubo<sup>1</sup>, Ken Nakano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yokohama National University

### 1. 緒言

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、環境負荷の低い電動車に関する研究が推進されている。電動車の普及には航続距離の改善が必須であり、さらなる電費の向上に向けた駆動モータの小型・軽量化・高出力化が求められている。このような背景から、動力伝達要素である歯車の高速回転化の需要が高まっている。しかし、高速回転する歯車の潤滑については、「潤滑油の供給量増加による厚膜化」という楽観的な予測のほか、「潤滑油の発熱による薄膜化」ならびに「潤滑油の飛散による薄膜化」という悲観的な予測もあり、潤滑の可否自体が危ぶまれている。そこで本研究では、軸受の潤滑状態モニタリングを実現した既往の計測技術(電気インピーダンス法[1,2])を拡張して、ギヤ噛合部の潤滑状態モニタリング技術を開発している。本報では、電動車で用いられるヘリカルギヤに対して電気インピーダンス法を適用し、潤滑状態を推定した結果を報告する。

### 2. 方法

本研究で開発した歯車試験機の概念図を図 1(a)に示す。本歯車試験機は、サーボモータにより歯車を駆動し、従動側の歯車が接続されたモータで回生制御して、ギヤ噛合部に負荷を印加する。歯車シャフトに働くトルクと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。ロータリーコネクタを介して各シャフトに電極を取り付け、図 1(b)の等価回路を構成した。歯車はヘリカルギヤ(材質:S45C, 歯幅:15 mm, モジュール:2.0 mm, 歯数:35 & 45, 基準円直径:70 mm & 90 mm, 減速比:35/45)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と歯車回転数を独立に設定し、負荷トルク一定:0.5 Nm の条件にて計測を行った。図 1(b)に示すように印加電圧  $V_0$ (周波数:10 kHz, 振幅:0.5 V)と、回路内に挿入した固定抵抗  $R_1$  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。

電気インピーダンス計測は、潤滑油(KF96-100CS-1, 信越化学工業, 粘度:100 cSt@25°C)を歯車嚙合部に 1.0 mL 滴下した後、15 秒経過後に実施した。回転数を 100 から 1000 rpm まで上昇させ、その後再び 100 rpm まで断続的に下降させる回転速度昇降試験を実施した。なお、回転速度を設定するたびに潤滑油を供給する場合と、試験開始時にのみ潤滑油を供給する場合との二種の供給条件で試験を実施した。

### 3. 結果および考察

図 2 に代表的な条件で実施した電圧応答  $V_0$  および  $V_1$  を示す。(試験条件:負荷トルク 0.5 Nm, 潤滑剤粘度 100 cSt, 回転数 100, 300, 1000 rpm)。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、歯車嚙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、歯車嚙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、各運転速度の嚙合周期に基づいて歯車 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表示した。)回路内に印加される印加電圧  $V_0$  の振幅は一定であるのに対して、応答電圧  $V_1$  の振幅は変化した。各速度条件で得られた波形を比較すると、回転速度の上昇に伴い、応答電圧  $V_1$  の振幅が減少した。すなわち、高速化に伴い、歯車嚙合部における油膜形成が促進されたことが示唆され、潤滑理論の予測と定性的に一致することを確認した。

電気モデルと幾何モデルに基づき、各回転速度で計測された電気インピーダンスを解析し、歯車嚙合部における「見かけの接触面積」に対する「真実接触面積」の割合(破断率  $\alpha$ )を算出した。各潤滑油供給条件における破断率と歯車回転速度の関係を図 3 に示す。潤滑油の供給条件によらず、破断率  $\alpha$  はヘリカルギヤの回転速度の上昇に伴い減少し、回転速度の下降に伴い増加した。回転速度を設定するたびに潤滑油を供給した場合、往路と復路のヒステリシスは認められなかった(図 3(a))。一方、試験開始時にのみ潤滑油を供給した場合、往路と比較して復路の破断率  $\alpha$  が著しく高い値を示した(図 3(b))。このことは、歯車の高回転化に伴う潤滑剤の飛散によって、初期に供給した潤滑油が歯車嚙合部で枯渇したからと考えられる。よって、本計測手法は、ヘリカルギヤ運転時の潤滑状態の定性的判定とその遷移挙動を同時に評価可能であると言える。

### 4. 結言

本研究ではヘリカルギヤの嚙合部を対象として、電気インピーダンス計測を可能とする試験機を作成し、嚙合部の潤滑状態の計測を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 電気インピーダンス法によりヘリカルギヤの潤滑状態を定性的に判定できる。
- (2) 電気インピーダンス法によりヘリカルギヤの潤滑状態の遷移挙動を計測できる。

## 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, K. Nakano, In Situ Quantification of Oil Film Formation and Breakdown in EHD Contacts, *Tribol. Trans.*, **61**, 6, 1057-1066 (2018).
- [2] T. Maruyama et al., Lubrication Condition Monitoring in EHD line contacts of Thrust Needle Roller Bearing by Electrical Impedance Method, *Lubricants*, **11**, 5, 223-238 (2023).

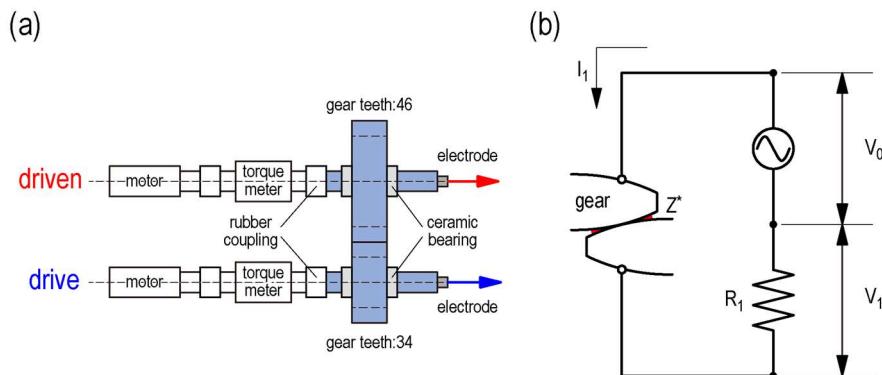


図 1 開発した歯車試験機:(a)概念図, (b)等価回路

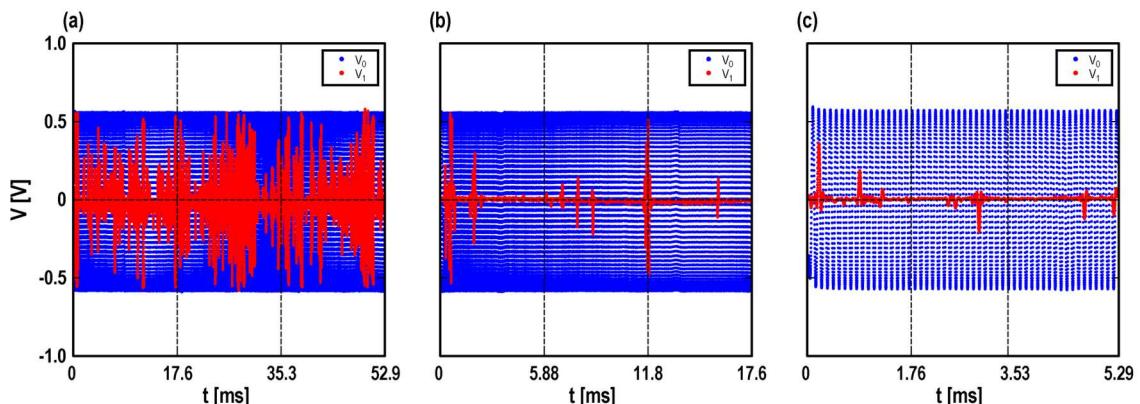


図 2 3 歯通過時間の電圧応答(青:  $V_0$ , 赤:  $V_1$ ) : (a) 100 rpm, (b) 300 rpm, (c) 1000 rpm

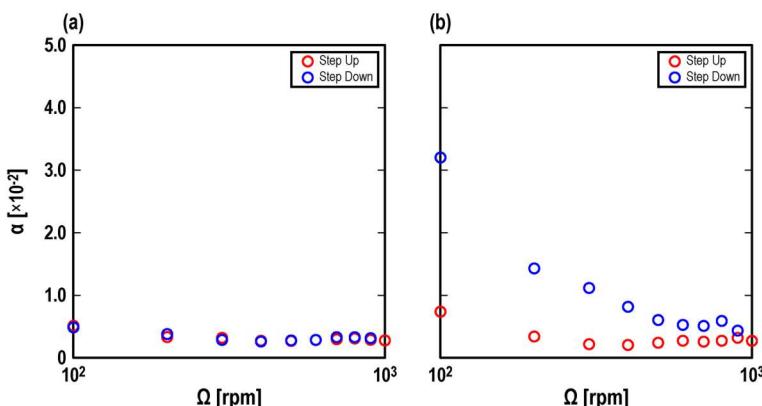


図 3 嘴合部の破断率と歯車回転速度の関係:(a)十分潤滑条件, (b)枯渇潤滑条件