

## BEV 駆動ユニット用歯車の潤滑に関する研究（第 2 報）

### Study on Lubrication of Gears for BEV Drive Units (Second Report)

（株）ジェイテクト （正）大瀧 善弘

Yoshihiro Otaki

JTEKT CORPORATION

#### 1. 緒言

カーボンニュートラル実現に向けて、電気自動車（Battery Electric Vehicle; BEV）の開発が進められている。BEV の航続距離延伸のために、駆動ユニットの小型・高効率化が望まれる。小型化の方策の一つとしてモータの高速回転化が検討されているが、これによる遠心力の増大およびエアカーテンの発生により接触部の入口油量が減少し、オイルスタベーションが生じる恐れがある<sup>[1]</sup>。加えて、歯車は位相により面圧およびすべり率が変化するため、同一歯面内でも潤滑状態が異なりうる。このように、高速回転する歯車の潤滑は数多くの要因に支配される。そこで本研究では、接触電気抵抗（Electrical Contact Resistance: ECR）測定法に着目し、歯車回転中の潤滑状態評価を実施した。前報<sup>[2]</sup>では、基礎試験にて ECR 測定法における絶縁破壊の影響を確認した。また、同手法により表面粗さの異なる平歯車の潤滑状態を評価し、歯車潤滑現象を定性評価できることを示した。本報では、滴下潤滑条件における歯面潤滑状態に対する給油流量の影響を明らかにし、オイルスタベーションの発生について考察した。

#### 2. 原理

ECR 測定法は、しゅう動面の接触・分離を導通・非導通により判定する手法である。本手法では、油膜厚さ絶対値の測定は困難だが、簡便かつ高ロバストな評価が可能である。Fig. 1 に ECR 測定法の電気回路を示す。電気回路は直流電源  $V_{in}$  およびかみ合い部接触抵抗  $R_c$ 、固定抵抗（ $R_1=4\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=1\text{ k}\Omega$ ）から構成される。接触・分離の判定には、出力電圧  $V_{out}$  と印加電圧  $V_{in}$  の比を用いた。間庭ら<sup>[3]</sup>は、波動歯車かみ合い部の ECR 測定において、 $1\text{ k}\Omega$  以上を流体潤滑状態と判断している。そこで本研究もこれに準じ、式(1)より  $V_{out}/V_{in}<0.55$  を接触、 $V_{out}/V_{in}\geq 0.55$  を分離と判定した。また、歯車のかみ合いは面圧およびすべり速度が時々刻々と変化する。そこで、かみ合いに伴う潤滑状態の変化を、流体潤滑発生頻度を示す潤滑状態指数  $L_s$  で評価した。

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2 R_c}{R_2 R_c + R_1 (R_2 + R_c)} \quad \dots (1)$$

#### 3. 試験方法および試験条件

試験装置の概略図を Fig. 2 に、試験条件を Table 1 に示す。かみ合い部の出力電圧は、回転軸をセラミック玉軸受および絶縁カップリングを用いて絶縁し、スリップリングを介して取得した。試料歯車には、平歯車（モジュール 2.5、歯数 39/41、歯幅 40 mm/41 mm、材質: SCM420 浸炭焼き入れ、 $Ra0.21\text{ }\mu\text{m}$ ）を用いた。潤滑方式はチューブポンプによる滴下潤滑とし、かみ合い部直上から連続滴下した。潤滑油は TOYOTA AUTO FLUID WS とし、給油温度は恒温油槽により  $30^\circ\text{C}$  一定とした。歯車温度はかみ合い直上に設置したサファイアガラス窓を介して、赤外線カメラ（FLIR 製 X6580SC、撮影速度 1000 fps）により取得した。回転角度はロータリエンコーダ（HEIDENHAIN 製 ECN125）により取得し、入力軸歯車の特定歯の 1 歯かみ合い開始角度を出力電圧測定のトリガーとした。

試験はトルク 20 Nm、回転速度  $500\text{ min}^{-1}$  条件で 60 min の暖機運転により歯車温度を安定させ、その後  $1000\text{ min}^{-1}$  から  $100\text{ min}^{-1}$  までの速度スイープを繰り返し 3 回実施した。本回転速度範囲における油膜パラメータの範囲は  $0.3<\Lambda<1.4$  であり、かみ合い部の潤滑状態は境界潤滑から混合潤滑と推定される。

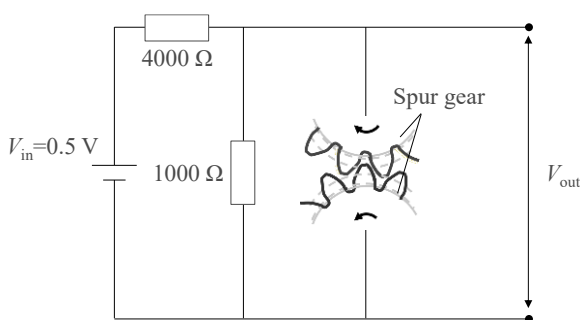


Fig. 1 Measurement circuit

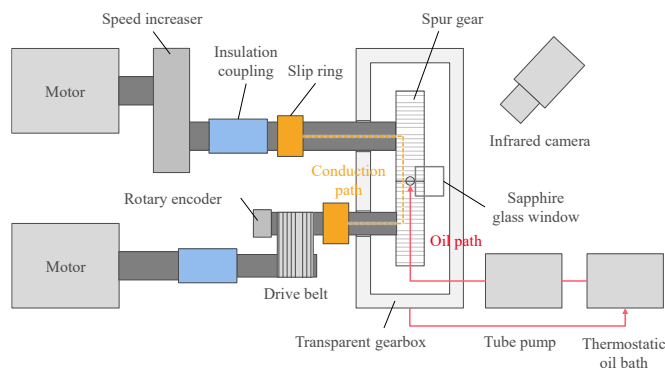


Fig. 2 Schematic diagram of gear test

#### 4. 試験結果および考察

潤滑状態指数と回転速度の関係を Fig. 3 に示す. いずれの流量条件においても, 回転速度の増加に伴い潤滑状態指数が増加することがわかった. しかし, 小流量条件では潤滑状態指数の増加率が小さく, 特に回転速度が大きい条件では 500 ml/min に比べ潤滑状態が悪化した. 高回転速度・小流量条件では遠心力による油飛散量に対し給油量が小さいために, かみ合い部でオイルスタベーションが生じ, 油膜が十分に成長できなかったことが原因と推察される. 以上の結果を踏まえ, 500 ml/min を十分潤滑条件と仮定し, 各速度条件における潤滑状態指数の差分 $\Delta L_s$ をオイルスタベーションの指標として用いることとした.

本試験におけるオイルスタベーション発生マップを Fig. 4 に示す. 回転速度が大きく, 給油流量が小さいほどオイルスタベーションが深刻化することがわかった. ここで, 給油流量と遠心力による油飛散量の均衡を考察する. 遠心力は角速度の二乗に比例するため, 給油流量と角速度の二乗の比を均衡の指標として用いる. 同指標とオイルスタベーションの関係を Fig. 5 に示す. 角速度に対して給油量が十分に大きいときにはオイルスタベーションは生じず, 一定値を下回ると急激にオイルスタベーションが進むことがわかった. 以上の結果から, 回転速度の増加および給油流量の減少はオイルスタベーションのリスクを高めうることを確認できた.

このように, ECR 測定法は簡便な手法ながらも, 歯車のオイルスタベーションの評価に十分に活用できることが確認できた. 今後高速回転化が予想される BEV 駆動ユニットの潤滑評価および潤滑条件の適正化に繋げていきたい.

#### 5. 結言

本報では, ECR 測定法を用いて, 潤滑状態に対する給油流量の影響およびオイルスタベーションの発生について調査し, 以下の知見を得た.

- 1) 高回転速度および小流量条件では, かみ合い部の油量が減少し, 潤滑状態が悪化することがわかった. 特に, 給油流量と角速度の二乗の比が一定値を下回ると急激にオイルスタベーションが進むことがわかった.
- 2) ECR 測定法は歯車のオイルスタベーション評価に有効な手法であることがわかった.

#### 文献

- [1] K. Suzuki, K. Sakai, K. Sakai, T. Hara: Consideration on Lubrication of High-Speed Rotating Gear(First Report), JSAE Annual Congress(Spring) – Summarized Paper, (2022) 129.
- [2] 大瀧: BEV 駆動ユニット用歯車の潤滑に関する研究 (第 1 報), トライボロジー学会予稿集, 名護, 2024-10, A47.
- [3] 間庭, 小原: 真空および大気中における波動歯車装置のウェーブジェネレータ/フレクスプライン間の潤滑機構, トライボロジスト, No. 52, Vol. 1, (2007), pp.40-50.

Table 1 Test condition

Torque, Nm		20
Rotation speed, min <sup>-1</sup>		100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
Oil	Kind	ATF-WS
	Flow rate, ml/min	30, 50, 500
	Temperature, deg	30
Sampling rate, GHz		10
Measurement time, s		0.5

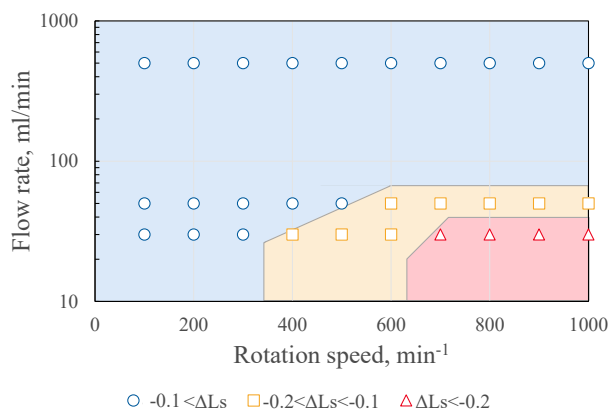


Fig. 4 Oil starvation occurrence map

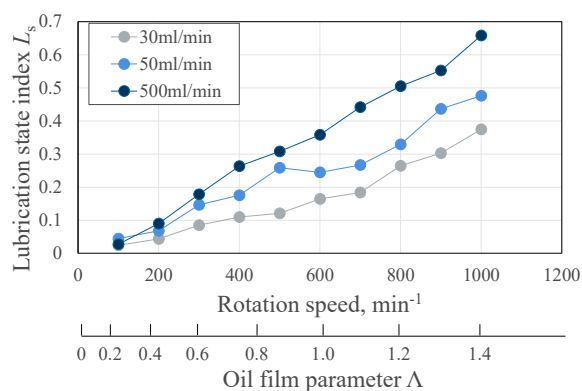


Fig. 3 Relationship between lubrication state and speed

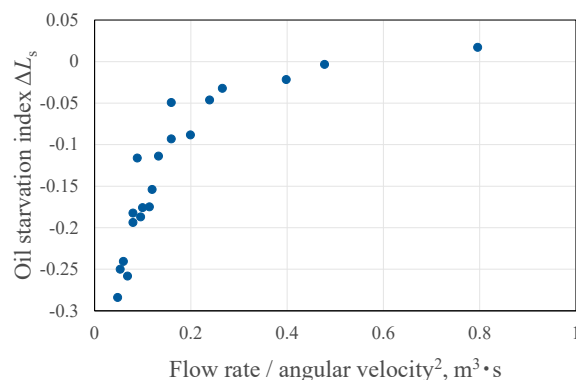


Fig. 5 The effect of balance between oil supply and splashing on oil starvation.