

AE センシングを用いた歯車の転がり-すべり接触面の潤滑状態検知

Lubrication State Detection on Rolling-Sliding Contact Surface of Gears Using AE Sensing

ジェイテクト（正）*獅子原 祐樹 埼玉工大（正）長谷 亜蘭

Yuki Shishihara*, Alan Hase**

*JTEKT CORPORATION, **Saitama Institute of Technology

1. 緒言

近年の機械システムの省エネルギー化に伴い、動力伝達装置に用いられる歯車にも高効率化が求められている。高効率化の達成のため、潤滑油の供給量削減や低粘度化が検討されているが、背反として歯車の潤滑環境がより過酷化しつつある。この過酷な潤滑環境下における動力伝達のかみあい接触部の転がり-すべり接触面では、突起同士の直接接触率が増加し、摩擦損失の増加や摩耗・ピッチング等の表面損傷が深刻な問題となっている。この問題の解決と、高効率と高信頼性とを両立させる表面を設計するためには、実環境における潤滑状態の把握が必要不可欠である。

しかしながら、潤滑状態の検知手法として知られる振動法は、摩耗進行後の変化しか捉えられず、歯車における潤滑状態の差異を高精度に検知できない。また、接触電気抵抗法では、測定原理的にかみあい接触部以外を絶縁する必要があり、実使用環境への適用は容易ではない。

そこで、本研究では、歯車の潤滑状態を高精度に把握可能な手法として、アコースティックエミッション（AE）センシングに着目した。異なる表面粗さを有する歯車試験片を用いて AE センシングを行い、接触電気抵抗法で得た金属接触率の変化と AE 信号の相関を明確化した。さらに本計測結果と表面粗さの関係から、表面変化と対応した AE 信号の特徴変化を捉えることで、歯車の転がり-すべり接触面の摩耗進行過程と共に潤滑状態の評価法としての AE センシングの有効性を検討した。

2. 試験方法

2.1 歯車試験

歯車試験に用いた供試歯車は、駆動歯車、従動歯車ともに、モジュール 2.5、歯数 36、圧力角 20°、歯幅 20 mm の平歯車とし、歯数比 1 : 1 の歯車対を用いた。歯車の材質は浸炭焼入れ焼戻しを施した JIS-SCM420 とした。歯面仕上げは、Fig.1 に示す通り、研削仕上げにより表面粗さを調整した 2 水準（Gear-A、Gear-B）とし、Gear-A 同士、Gear-B 同士の組合せで試験を行った。試験条件を Table 1 に、歯車試験機を Fig.2 に示す。試験は、従動歯車側からブレーキを用いてトルクを負荷し、駆動歯車をモータで回転させた。潤滑方法は滴下潤滑とし、かみあい接触部の上部から潤滑油を滴下した。供給油量は 50 ml/min（一定）とした。供給油温は、滴下直前の潤滑油温度を熱電対で計測し、 $50 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲で温度を制御した。負荷トルクは 1.7 N·m とし、入力速度を 500 min^{-1} から 10 min^{-1} まで段階的に低下させる試験とした。

2.2 AE 計測および接触電気抵抗法

歯車試験中の AE 信号を、歯車箱に取り付けた AE センサを介して取得した。AE センサにより電圧信号として検出された AE 信号を、プリアンプを用いて 40 dB で増幅し、100 kHz のハイパスフィルタによりノイズを除去した後、メインアンプを用いて 40 dB で増幅した。ノイズ除去後の AE 信号（AE 信号生波形）の包絡線検波を行った信号の電圧値を AE 信号振幅として評価した。また、AE 周波数の変化を確認するため、AE 信号生波形の周波数解析を実施した。

接触電気抵抗法による計測は、かみあい接触部の金属接触と油膜による分離とを導通・非導通で判別した。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、軸端のロータリーコネクタを介して、かみあい接触部の電圧信号（以下、接触電圧）を取得した。本計測回路では、金属接触が生じた場合、接触電圧は 0 V を示し、油膜により完全に分離した場合、接触電圧は 0.1 V を示す。計測回路に印加する電圧は 0.5 V とした。

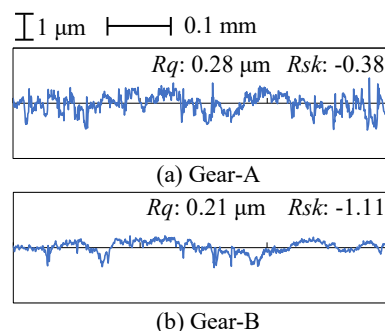


Fig. 1 Gear roughness profiles

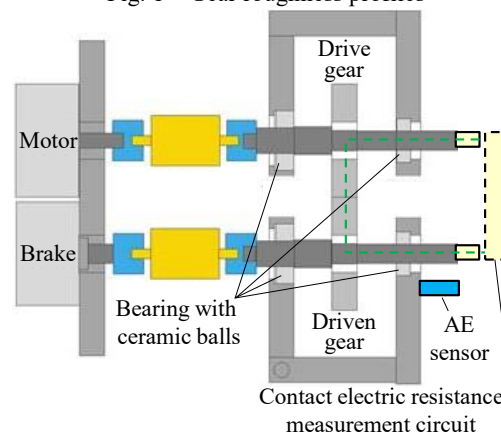


Fig. 2 Gear test apparatus

Table 1 Gear test conditions

Rotational speed, min^{-1}	500→400→300→250→200→150→100→50→10
Loading torque, N·m	1.7
Oil temperature, $^\circ\text{C}$	50
Oil amount, ml/min	50
Lubricant	ATF (Kinematic viscosity at 40°C : $23.2 \text{ mm}^2/\text{s}$)

3. 試験結果

歯車試験中に計測した AE 信号および接触電圧と回転速度の関係を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。各データは、一連の回転速度に対して 3 回測定した結果の平均値である。AE 信号振幅は、回転速度が 500 min^{-1} から 300 min^{-1} にかけて低下する傾向を示し、その後は一定の値で安定した。さらに、回転速度が 100 min^{-1} 以下になると再び AE 信号振幅が低下する傾向を示した。また、すべての回転速度域において Gear-B の AE 信号振幅は Gear-A よりも低い値となった。接触電圧は、すべての供試歯車および回転速度において 0.1 V 以下であり、金属接触が生じている状態であった。回転速度に依らず、Gear-B は Gear-A よりも高い接触電圧を示し、金属接触率が低い結果となった。

4. 考察

4.1 AE 信号の周波数スペクトルと潤滑状態の関係

AE 信号の周波数特性から接触面の潤滑状態を考察するため、回転速度 500 min^{-1} および 300 min^{-1} における AE 周波数スペクトルを比較した (Fig. 5)。いずれの条件下でも、AE 周波数スペクトルには 0.1 MHz 付近にピークが認められた。先行研究では、 0.1 MHz 付近の AE ピークは表面突起同士の直接接触到起因する¹⁾。この 0.1 MHz のピーク強度が Gear-A より Gear-B が低くなったことから、Gear-B の表面突起の直接接触到率が低いことが示唆される。この結果は、接触電気抵抗法で確認された金属接触到率が低い結果とも一致している。回転速度の低下に伴う 0.1 MHz 付近のピーク強度の低下は、油膜厚さの減少に伴い金属接触到率が増加するものの、速度が低下することで単位時間当たりの直接接触到頻度が減少したためと考える。

4.2 AE 信号と表面粗さの関係

AE 計測結果と歯車表面の状態との相関を明らかにするため、試験前後の歯面レプリカから表面粗さパラメータを解析した (Fig. 6)。試験前後いずれにおいても、二乗平均平方根粗さ Rq 、最大高さ粗さ Rz は、Gear-A と比較して Gear-B の方が小さい値を示した。この表面粗さの大小関係は、AE 信号および接触電圧から示唆された金属接触到率の傾向と一致する。さらに、両供試歯車ともに、試験後に Rq および Rz の増加が認められた。特に、局所的な凹凸を反映しやすい Rz の増加が顕著であることから、試験中に表面突起の直接接触到が生じ、局所的な表面変化が生じたと推定する。これらの結果から、AE 信号、特に 0.1 MHz 付近の周波数成分は、歯車の転がり-すべり接触到面における表面突起の接触到状態を反映する有効な指標であると考ええる。

5. 結言

異なる表面粗さを有する歯車試験片を用い、AE センシングによる潤滑状態評価の有効性を検討し、以下の知見を得た。

- 1) 粗さが小さい歯車 (Gear-B) は、粗さが大きい歯車 (Gear-A) と比較し金属接触到率が低く、AE 信号振幅が低いことを明らかにした。
- 2) AE 信号の周波数スペクトルにおいて、金属接触到に起因する 0.1 MHz 付近のピーク強度は、金属接触到率が低い Gear-B において顕著に低下した。
- 3) 試験後の歯面では、 Rq 、 Rz の増加が確認され、上述した AE 信号の特徴は、表面突起の直接接触到による表面変化と対応していることを明らかにした。

以上の結果から、AE センシングは歯車の転がり-すべり接触到面の潤滑状態を評価する上で有効な手法であると示された。

文献

- 1) A. Hase: Early Detection and Identification of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearings by an Acoustic Emission Technique, Lubricants, Vol.8 (2020) 37.

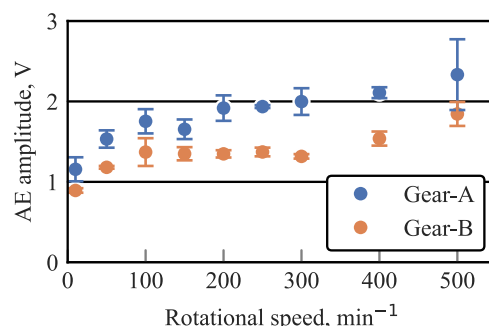


Fig. 3 Comparison of AE amplitude results

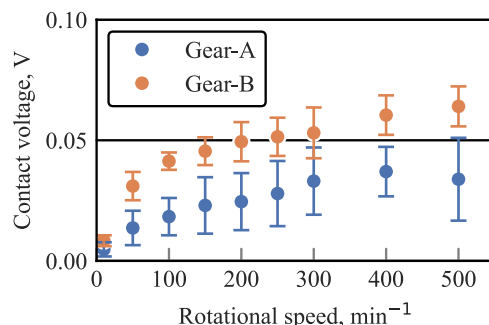
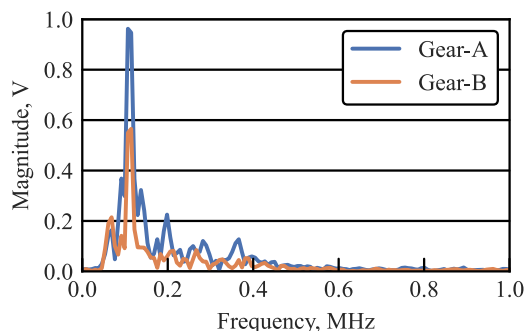
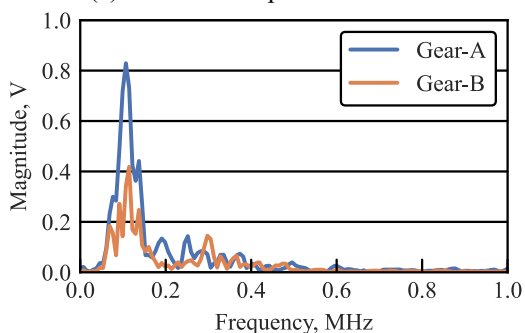


Fig. 4 Comparison of contact voltage results



(a) Rotational speed: 500 min^{-1}



(b) Rotational speed: 300 min^{-1}

Fig. 5 Comparison of AE frequency results

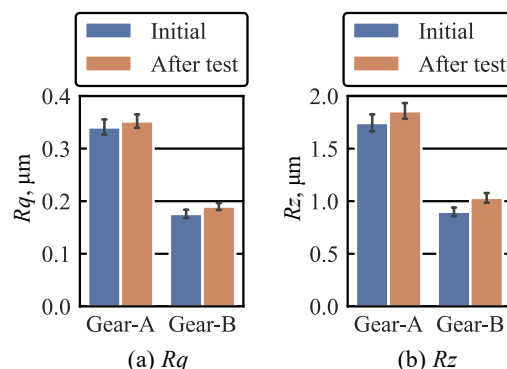


Fig. 6 Comparison of gear surface roughness