

AE 測定を用いたリン系／硫黄系添加剤併用系の濃度変化が摩耗現象に与える影響解析 —第2報—

Analysis of the effect of phosphorus/sulfur additives' concentration on wear phenomena using AE measurements (Part 2)

東理大（正）*森田 美穂 東理大（正）*土屋 拓摩 （正）**佐藤 剛久 東理大（正）*佐藤 魁星
東理大（正）*佐々木 信也

Miho Morita*, Takuma Tsuchiya*, Takehisa Sato**, Kaisei Sato*, Sinya Sasaki*

* Tokyo University of Science, **TriboJapan Co.,Ltd.

1. 緒言

アコースティックエミッション（acoustic emission, AE）は、固体の変形・破壊の際に生じる弾性波である。摩擦面で発生する AE 信号には、摩擦・摩耗現象に関する多くの情報が含まれるため、摩擦界面の状態をインプロセスで診断・評価することが可能である¹⁾。前報では、これまでの広帯域の AE 周波数領域ではなく、より狭い摩耗周波数領域に着目することにより、試験後の摩耗幅と AE エネルギー強度指数との間に高い相関が得られることを確認した²⁾。本報では、試験中の摩耗幅変化を観察することで、摩耗幅と相関が高い AE 周波数領域の経時変化と摩耗の関係を整理した。

2. 実験方法

2.1 摩擦・摩耗試験

試験部の概要を Fig. 1 に示す。摩擦・摩耗試験として、摩擦・摩耗試験機（UMT-Tribolab, Bruker, US）を用い、ボールオンディスクの試験を行った。摩擦試験片には、軸受鋼製ボール（SUJ2, ϕ 10.0 mm）と軸受鋼製ディスク（SUJ2, ϕ 50.8 mm, Sa: 1.4 μ m）を用いた。試験条件として、荷重 100 N（最大ヘルツ圧 2.1 GPa）、すべり速度 0.22 m/s（回転数 100 rpm）、油温は室温成り行き、試験時間は 30 分間とした。上部に取り付けたロードセルから垂直方向の荷重を負荷した。また、試験後のディスク試験片について共焦点レーザー顕微鏡（VK-150X, KEYENCE, JP）による表面観察を 8 か所ずつ実施し、摩耗幅と表面粗さを測定した。試験槽上部に固定したカメラで試験中の摩耗幅を定点観察し、試験後に顕微鏡で測定した摩耗幅とカメラで撮影した画像から試験中の摩耗幅の経時変化の値を算出した。表面粗さは、しゅう動痕中心 200 μ m \times 200 μ m の範囲の算術平均粗さ Sa で評価した。

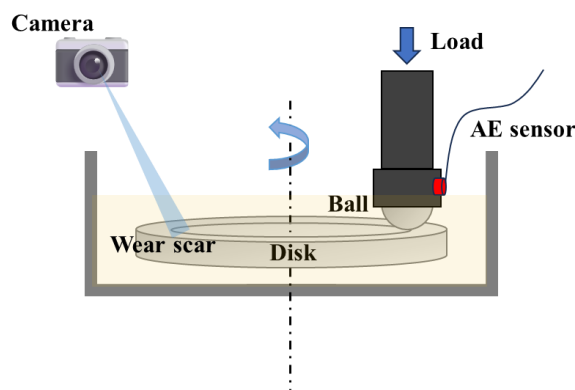


Fig. 1 Experimental setup

2.2 AE 測定

AE センサ（AE-900M, エヌエフ回路設計ブロック）はボールホルダーに取り付け、しゅう動部において発生する AE 信号を検出した。センサ取り付け面である金属表面は平坦に研磨し、瞬間接着剤により AE センサを固定した。ボール試験片はボールホルダーの円周上で線接触しており、ボール先端の摩擦部と AE センサまでの距離は約 10 mm であった。AE 信号は、プリアンプ（AE-912）および AE アナライザ（AE9701）を用いて測定・解析を行った。AE アナライザは、メインアンプ、フィルタ、A/D コンバータ、信号処理ユニット、インタフェース、および解析ソフトウェアから構成される。AE 信号はプリアンプおよびメインアンプで合計 80 dB に増幅され、100 kHz のハイパスフィルタでノイズを除去した後、サンプリング周波数 2 MHz で取得・記録した。

2.3 試料油

試料油として、基油である PAO4 に硫化オレフィン（S 量 850 ppm）を添加したサンプル S、PAO4 に酸性リン酸エステルアミン塩（P 量 250 ppm）を添加したサンプル P の 2 種類を用意した。油量は 30mL とした。

2.4 AE 信号の解析

AE 信号は、AE エネルギー強度指数の経時変化により評価した。試験時間を t 、AE 原波形を $V(t)$ とすると、AE エネルギー強度指数 $I(t)$ は指定時間内の AE 原波形の二乗累積値であるため以下のように表される。なお、今回の指定時間は 1 秒間とした。

$$I(t) = \int_{t-1}^t V^2(t) dt \quad (1)$$

ある特定の時間の AE 原波形の FFT 解析から得られる AE 周波数スペクトルは、AE 発生源の損傷モードをあらわすと考えられている¹⁾。0.05 から 0.2 MHz までの AE 周波数ピークは表面突起間の接触、0.2 MHz 以上は塑性変形および

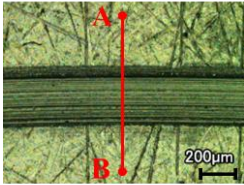
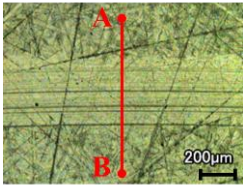
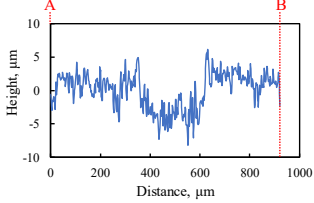
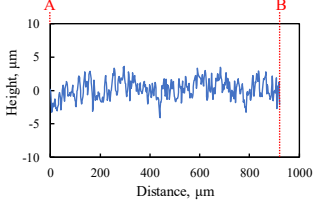
摩耗により発生すると報告されている³⁾。本研究では、摩耗を示す 0.2 MHz 以上の周波数領域から 1 つのピークに着目し、周波数変動を踏まえて 10 kHz の幅を持たせ、326-336 kHz の周波数領域を選択した。この周波数領域での AE エネルギー強度指数を算出し、時間推移を観察した。

3. 実験結果および考察

Table 1 に、試験後のディスク試験片の表面観察画像、表面プロファイル、表面粗さの結果を示す。サンプル S は摩耗痕深さが大きく、表面粗さは初期粗さ ($Sa: 1.4\text{ }\mu\text{m}$) と同等レベルの値となった。サンプル P はほとんど摩耗が進行しておらず、表面粗さは初期粗さから低減した。

Fig. 2 に、各サンプルの AE エネルギー強度指数の経時変化を示す。サンプル S の、AE エネルギー強度指数は、試験開始から 3 分後まで急激に上昇し、その後 20 分後から減少する傾向を示した。サンプル P はの AE エネルギー強度指数は試験を通してほとんど一定の値が維持された。これら AE エネルギー強度指数と摩耗状態との関係は、摩耗進行状態を連続的に計測することにより相関を見出せるものと考えている。

Table 1 Surface image, surface profile and surface roughness

Sample name	Sample S	Sample P
Surface image		
Surface profile		
Surface roughness (Sa), μm	1.4	1.1

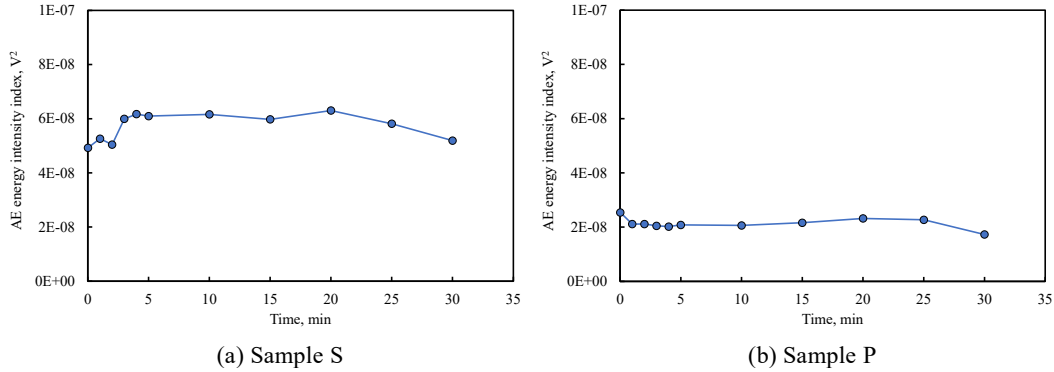


Fig. 2 AE energy intensity index during the test

4. 結言

しゅう動部における添加剤反応による摩耗の進行をインプロセスで評価するため、摩擦試験中に得られる AE 信号の、その経時変化を測定した。得られた AE エネルギー強度指数の経時変化は、摩耗の進行状況との相関が予測されるが、詳細な検討結果は発表において報告する予定である。なお、AE エネルギー強度指数の経時変化には、硫黄系とリン系添加剤の違いが明確に見られたことから、詳細な摩耗メカニズムの検討に役立つことが期待される。

謝辞

本研究で使用した硫黄系添加剤は DIC 株式会社よりご提供いただいた。また、リン系添加剤は大崎工業株式会社よりご提供いただいた。ここに記し、感謝の意を表する。

文献

1) A. Hase, H. Mishima & M. Wada: Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms, *Wear*, 292-293 (2012) 144-150.

2) 森田・土屋・佐藤・佐藤・佐々木: AE 測定を用いたリン系／硫黄系添加剤併用系の濃度変化が摩耗現象に与える影響解析, トライボロジー会議 2024 秋 名護, (2024). D21

3) M. Morita, S. Tachiyama, K. Onodera & A. Hase: Study on Reaction Mechanism of Sulfur and Phosphorus Type Additives Using an Acoustic Emission Technique, *Tribology Online*, 17, 2 (2022) 78-85.