

AE センシングによる摩耗粒子排出量モニタリングの検討

Study on Wear Particle Emission Monitoring by AE Sensing

埼玉工大（正）*長谷 亜蘭

Alan Hase*

*Saitama Institute of Technology

1. はじめに

摩耗は多かれ少なかれ避けられない現象であり、その産物として摩耗粒子が排出される。生成する摩耗粒子は、摩擦界面において形状や性質を変化させながら、トライボロジー特性に大きな影響を及ぼす。また、摩擦系から排出された摩耗粒子が他の機械要素部品のしゅう動部に入り込み、その状態を悪化させるケースも多い。摩擦系からの摩耗粒子の流出経路が閉じていれば、経路上で捕集フィルタなどを用いて分離除去が可能である。対して、流出経路が開いていれば摩耗粒子は系外へと放出される。

近年、粒子状物質の放出が環境や健康へ与える影響が懸念され、様々な規制が世界規模で検討されている。自動車に関しては、排出ガス規制に加えてブレーキ摩耗由来の粒子質量（Particle Mass, PM）排出に関する規制が新たに追加され、その粒子個数（Particle Number, PN）もブレーキエミッション計測の中で義務付けられている^{1,2)}。

本研究では、材料の変形・破壊時のひずみエネルギーの解放に伴って発生する弾性応力波を計測・解析して現象の評価・診断を行うアコースティックエミッション（Acoustic Emission, AE）センシングを摩耗粒子排出量モニタリングへ活用することを考える。AE センシングを活用することによって、パーティクルカウンタのような摩耗粒子を吸引して PM や PN を計測・評価しなくとも、吸引が困難な実機摩擦系や各種試験機上での活用が期待される。

2. AE センシングの概略

トライボロジー現象に関しては、摩擦界面で生じる様々な変形・破壊現象に応じて弾性応力波（AE 波）が発生する。この AE 波を AE センサで AE 信号として計測することによって³⁾、見えない摩擦界面の情報を in situ で得ることが可能となる。

Figure 1 は、摩擦系における AE センシングの概略である。AE センシングにおける計測システムは、AE センサ、プリアンプ、AE 解析装置

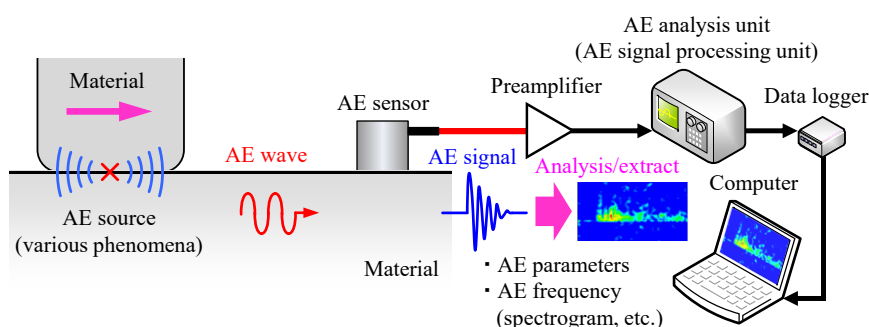


Fig. 1 Schematic diagram of AE sensing in friction systems

（AE 信号処理装置）、データロガー（オシロスコープも含む）、コンピュータから基本的に構成される。AE センサからの出力信号は、プリアンプで増幅した後、AE 解析装置内で信号処理（適宜、コンピュータ内で計算処理）を行い、各種 AE 評価パラメータとして計測する。基本的な AE 評価パラメータとしては、AE 信号波形から得られる最大振幅値・立ち上がり時間・持続時間やその周波数解析結果、AE 信号波形の包絡線検波波形から得られる AE 平均値電圧や AE 実効値電圧、しきい値を設定することによって得られる AE 計数率や AE 計数総数などがある³⁾。特に近年、AE 信号波形の周波数解析結果の特徴（AE 周波数とも呼ばれる）から、複雑なトライボロジー諸現象を紐解くことができるようになっている⁴⁾。

3. 摩耗粒子生成と AE 波の発生メカニズム⁵⁾

本稿では、摩耗粒子の排出が大きな影響を及ぼす乾燥摩擦下の事例について、これまでに得られている知見を紹介する。まず、ピン・オン・シリンダ型摩擦・摩耗試験機を用いた金属材料に関する実験結果を交えながら、摩耗粒子生成と AE 波の発生メカニズムについて述べる。

Figure 2 は、概算した摩耗粒子数と AE 計数総数の関係を示している。摩耗粒子数は、採取した摩耗粒子の粒度分布（試料数 100 個）を求め、総摩耗体積をその分布に基づく摩耗粒子 1 個あたりの体積で除することで算出した。この結果、摩耗粒子の形態に依存して摩耗粒子数と AE 計数総数が良好な相関を示すことが確認された。これは、無潤滑の繰返し摩擦において、移着成長と移着粒子の脱落（摩耗粒子の生成）が主な AE 発生源となっているためと考えられる。摩耗粒子の生成すなわち摩

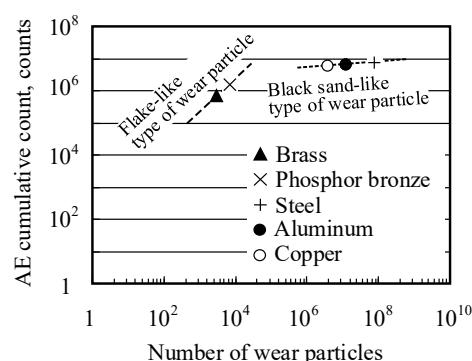


Fig. 2 Relationship between the AE cumulative count and the number of wear particles⁵⁾

耗粒子の排出時には、移着粒子に蓄えられた弾性ひずみエネルギーが脱落の際に解放され、AE 信号として計測されると推察される。

移着粒子 1 個に蓄えられる弾性ひずみエネルギー $e(x)$ は、Fig. 3 に示す Rabinowicz の摩耗粒子生成機構モデル⁶⁾に基づく以下の式 (1)を用いて算出される。

$$e(x) = \left(\frac{\nu^2 \sigma_s^2}{2E} \right) v(x) \quad (1)$$

ここで、 ν 、 σ_s 、 E はそれぞれ移着粒子のポアソン比、降伏応力、弾性率であり、 $v(x)$ は任意の粒度分布における摩耗粒子の体積である。摩擦界面には、垂直荷重を支えるための移着粒子（介在粒子数 n ）が存在する。これらが同時に脱落して摩耗粒子になると仮定すると、 $e(x) \times n$ の弾性ひずみエネルギーが一挙に放出される。実際には、摩耗粒子の脱落のみならず転動や衝突などの影響も含まれるため、Fig. 2 で示したように摩耗粒子形態に依存する。

4. AE センシングによる摩耗粒子排出量モニタリング

つぎに、ピン・オン・ディスク摩擦・摩耗試験機を用いたブレーキ摩擦材に関する実験結果を交えながら、AE センシングによる摩耗粒子排出量モニタリングについて述べる。

Figure 4 は、AE 信号振幅（AE 平均値電圧）の計測と同時にパーティクルカウンタを用いて摩耗粒子の排出量（PN）を計測した結果である。AE 信号振幅は、摩擦初期において約 0.5 V の値を維持しながら細かい変動を伴っている。一方、摩耗粒子の排出量は、摩擦開始 4 min 付近から徐々に増加している。AE 信号振幅の変化を拡大して確認したところ、この摩耗粒子の排出量の変化に合わせて AE 信号振幅の変動も大きくなっていることがわかった。また、全体的に比較しても AE 信号振幅と摩耗粒子排出量の変化が対応していることがわかる。

摩耗粒子形態が変化しない摩耗過程では、摩耗量と AE 評価パラメータの間に良好な相関が得られ、摩耗量との定量的な関係が示されている^{7,8)}。これは、摩耗粒子排出量を *in situ* 計測できることを示唆している。ただし、粒子の形状や大きさによって摩擦界面での挙動が変化するため、高精度なモニタリングを行うには、AE 周波数による特徴抽出などの手法が必要である。

5. おわりに

今回、AE センシングによる摩耗粒子排出量モニタリングの可能性について検討を行った。その結果、移着粒子に蓄えられた弾性ひずみエネルギーの解放によって AE 信号が計測されることから、摩耗粒子排出量をモニタリングできることがわかった。

文献

- 1) United Nations: Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council. Document 32024R1257 (2024), <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1257/oj>, (参照 2025-02-17).
- 2) 萩野:世界技術規則第 24 号に基づいた室内試験による 乗用車・小型商用車のブレーキエミッション計測—GTR24 和訳と解説—, JARI Research Journal, 11 (2024) 18.
- 3) 長谷:アコースティックエミッション計測の基礎, 精密工学会誌, 78 巻, 10 号 (2012) 856.
- 4) 長谷:トライボロジー界面で起こる諸現象の AE センシング—界面の奏でる音色から複雑現象を紐解く—, トライボロジー会議 2024 春 東京 予稿集 (2024) 116.
- 5) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: The Relationship between Acoustic Emissions and Wear Particles for Repeated Dry Rubbing, Wear, 265, 5-6 (2008) 831.
- 6) E. Rabinowicz: Friction and Wear of Materials, John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y. (1965) 151.
- 7) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition, Tribology Online, 3, 5 (2008) 298.
- 8) 嵯峨・長谷: AE 法を用いた鉄道車両用制輪子の実験的評価 (第 3 報), 第 31 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2024), No.24-45 (2024) SS2-11-2.

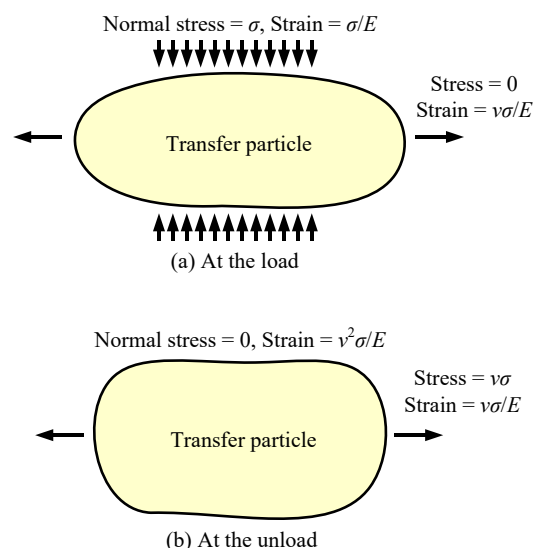


Fig. 3 The model of generation mechanism of wear particle by Rabinowicz⁶⁾

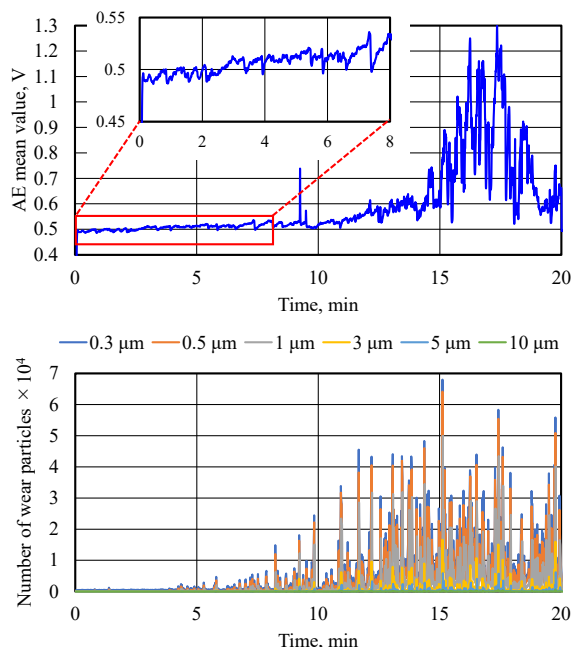


Fig. 4 Changes in the AE signal amplitude (above) and the number of wear particles (below)