

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—

AE Sensing of Various Phenomena Occurring at Tribological Interface:
Understanding Complex Phenomena from the Tones Played at the Interface

埼玉工大（正）*長谷 亜蘭

Alan Hase*

*Saitama Institute of Technology

1. はじめに

私たちは、耳（センサ）で声や音を検出し、脳内の記憶（データベース）と照らし合わせて、それらの違いを認識している。音声は、空気の振動によって鼓膜が振動し、その振動が耳小骨で増幅され、内耳の蝸牛が振動を電気信号に変換することで脳に伝わる。これは、本稿の趣旨であるアコースティックエミッション（AE）センシングの仕組みと同様と言える。

AE センシングは、材料の変形・破壊時に発生する弾性応力波（AE 波）を計測して、その波形解析などから材料の状態を診断・評価する技術である¹⁾。AE 波は材料の発する声とも例えることができ²⁾、AE センシングは声や音の解析技術と共に通する部分も多い。そこで、声や音を識別する解析技術の例を解説しながら、トライボロジー分野における AE センシングの核心へと迫っていく。

2. 音声・音色を識別する技術

声の違いは、口腔、鼻腔、声帯といった発声器官および口唇、舌などの発声（振動・共鳴）に関わる部分の違いから生じるとと言われている。楽器に関しても、音を発生させる根本的な原理は同じである。これらの音色を識別する研究は、Kersta による声紋（サウンドスペクトログラムまたはソナグラム）の研究³⁾に遡る。

声紋分析の一例として、Fig. 1 に「ま・さ・つ」と「ま・も・う」の音声（言語音）の音圧変化およびその波形の周波数解析（スペクトログラム）の結果を示す。音声は、破裂音、摩擦音、破擦音に分類され、これらの違いによって波形の特徴が変化する。そのため、Fig. 1 にみられるように同じ音素（言語の音韻論上の最小単位）の部分は、波形および周波数成分の特徴が類似していることがわかる。さらに、声色によって周波数成分の変化が生じることから、心や身体の状態の診断にも活用されている。声紋分析は現在、声紋認証や声紋鑑定、音声認識技術などに発展している。後述する AE センシングにおいても、同様の解析手法によって変形・破

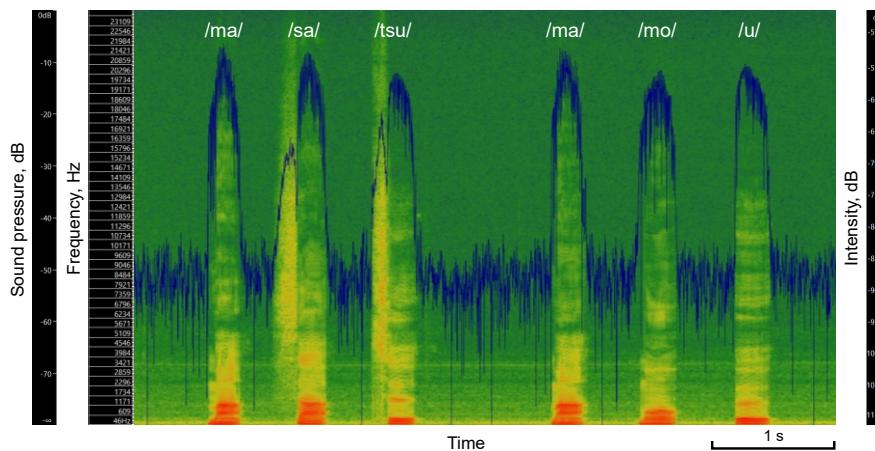


Fig. 1 An example of visualization of voiceprint using sound spectrogram

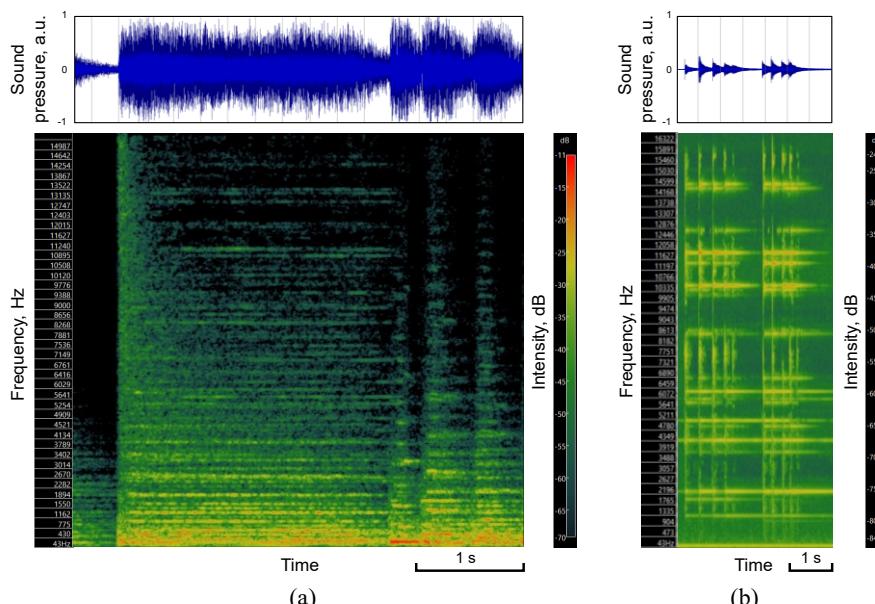


Fig. 2 An example of frequency analysis of music using spectrogram:
(a) part of orchestral music ('Jupiter' from G. Holst's Suite 'The Planets')
and (b) stand-alone sound of the triangle

壞の規模（声の大きさに相当）やメカニズム・モード（声紋・声色に相当）などを診断・評価することができる。

ここで、もう一つ音楽に関する音響分析の例を Fig. 2 に示そう。Figure 2 (a) は、Holst の組曲「The Planets (惑星)」から「Jupiter, the Bringer of Jollity (木星)」の冒頭部分の音圧変化（上部）とそのスペクトログラム（下部）である。この楽曲「木星」は、四管編成のフルオーケストラ（100 名程度、57 パート以上で構成）による演奏であり、特にこの冒頭部分ではフルオーケストラ *fff*（フルティッッシシモ）により音圧が大きくなっている。この際、音圧の変化には演奏されている楽器すべての音が含まれており、どの楽器がどのように演奏されているかまではわからない。一方の Fig. 2 (b) は、トライアングル単体の音に関する音圧変化とそのスペクトログラムである。これより、10 kHz 以上（特に 11 kHz 付近）に強い周波数成分をもつことがわかる。Figure 2 (a) においては、*fff* 部分の最初の部分のみに 10 kHz 以上の周波数成分が認められる。したがって、トライアングル自体の音は大きくはないにも関わらず、この部分でトライアングルが演奏されており、フルオーケストラの中でもその存在をスペクトルグラムから確認することができる。また、周波数成分（音色に相当）などの情報を利用すれば、音源分離や音源抽出も実現可能となる。これらは、トライボロジー界面で起こる様々な現象（フルオーケストラに相当）から、どのような諸現象（楽器単体に相当）が起こっているかを特定・識別することと同様である。すなわち、AE センシングにおける周波数解析や特徴抽出から、複雑なトライボロジー現象を紐解くことができる。

3. 材料の声を聴く AE センシング⁴⁾

トライボロジー界面で起こる変形・破壊現象と AE センシングの概略を Fig. 3 に示す。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（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、各種評価パラメータとして計測する。この AE センシングの計測・評価システムは、本稿の冒頭で述べた耳から脳内へと声や音が伝達されて識別する原理・構成と酷似している。

AE センシングでは、AE 信号波形を周波数解析もしくはウェーブレット解析することによって、振幅変化の裏に隠れた現象判別に有用な情報を取得することができる。特に、AE 信号波形の周波数解析から得られる周波数スペクトルの特徴（AE 周波数とも呼ばれる）が、変形・破壊現象の認識・識別に有用であることがわかっている⁵⁾。この AE 周波数の変化から、トライボロジー界面で起こる微視的かつ複雑な変形・破壊現象をインプロセス診断・評価できると考えられている。

近年のデジタル技術の進歩に伴い、大容量の AE 信号データを容易にオンライン解析して即時表示できるようになった。Figure 4 は、ボール・オン・ディスク摩擦・摩耗試験において高速サンプリングで AE 信号波形を連続計測すると同時に、その短時間周波数解析（STFT, Short Time Fourier Transform）した一例である。このように、AE 周波数の変化をスペクトログラムとして表示させ、リアルタイムで視覚的に確認することができ、その特徴抽出も可能となる。

Figure 4 の AE 信号波形に関しては、 ± 0.05 V 以下の振幅が 125 s 付近から徐々に大きくなっている、140 s 付近から ± 0.25 V とステップ的に大きくなつた後、 ± 0.5 V の振幅変動が持続し、最終的に ± 0.6 V に至っている。一方、Fig.

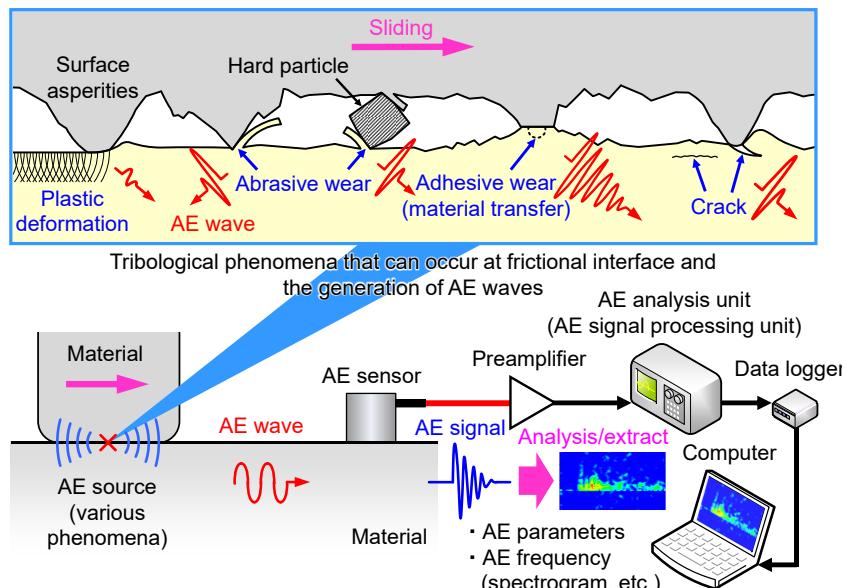


Fig. 3 Schematic diagram of tribological phenomena and AE sensing

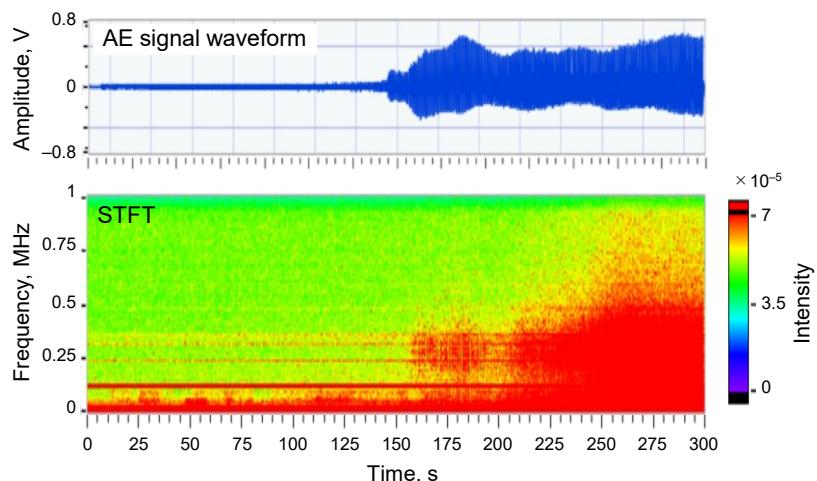


Fig. 4 An example of continuous measurement of an AE signal waveform (top) and its real-time STFT (bottom) (bearing steel/bearing steel, dry, $v = 0.2$ m/s, $W = 0$ N → 50 N)

Fig. 4 はスペクトログラムである。ここで注目すべきは、 ± 0.5 V の振幅変動が持続している 160~280 s の区間でみられる AE 周波数の変化である。これを上述したオーケストラに例えると、全体として音圧が同じに聞こえる音楽であっても、その中ではパートごとに強弱や休符が変化しながら楽曲が進行しており、Fig. 2 (a) の *fff* 部分で様々な周波数成分が変化しているのと同様である。Fig. 4においては、垂直荷重を直線的に増加させた結果として、低周波が主体であった AE 周波数成分に中周波、高周波が重畠していく過程がよくわかる。すなわち、主たる摩擦・摩耗現象の逐次変化を捉えている。トライボロジー界面では、Fig. 3 に示すように種々の変形・破壊現象に起因した特徴の異なる AE 波が複合的に伝播する。これらの AE 波を識別して評価するために、AE センシングでは諸現象と AE 信号の対応関係を把握しておくことが重要である。

4. トライボロジー界面で起こる諸現象の AE センシング

表面突起同士の接触点は接触面内で無数に存在し、各接触点で様々な現象に起因した AE 波が発生することから、まさにフルオーケストラと同じ状況と言える。ここでは、トライボロジー界面で起こる諸現象を評価・診断するための知見を紹介する。

4.1 界面の奏でる音色⁶⁾

Figure 1 や Fig. 2 で示した声や音の音響解析技術のように、音素や楽器単体で得られる波形の特徴を把握しておくことによって、それらの繋がりである言葉や音楽を解析して、その構成を明らかにすることができます。

AE センシングにおいては、Fig. 3 や Fig. 4 で示したようにトライボロジー界面の様々な現象の進行によって信号振幅および AE 周波数が変化していく。AE 信号波形の周波数解析を行うことによって、そこに含まれる各周波数成分の強度分布（周波数スペクトル）を得ることができる。この周波数スペクトルの特徴とトライボロジー界面で起こる諸現象とを紐づけすることによって、AE 信号振幅のみならず AE 周波数などから現象の評価・診断が可能となる。したがって、まずはトライボロジー界面の奏でる音色について見てみよう。

Figure 5 は、表面突起の接触・衝突、塑性変形、凝着摩耗、アブレシブ摩耗、疲労摩耗がそれぞれ主体となる現象下で得られた AE 周波数スペクトルの例である。各現象の AE 周波数は、(a) 表面突起の接触・衝突では 0.1 MHz 付近⁷⁾、(b) 塑性変形では 0.25~0.4 MHz 付近⁸⁾、(c) 凝着摩耗では 1 MHz 以上⁹⁾、(d) アブレシブ摩耗では 0.25~1 MHz 付近⁹⁾、(e) 疲労摩耗では 0.2 MHz 付近⁷⁾である。これらの AE 周波数の違いは、変形・破壊現象のスケールと速度に依存するものと考えられている。また、これらを単体の変形・破壊現象とみなしているが、厳密には各現象の中にも様々な現象が混在している。本稿では割愛するが、AE 信号の包絡線検波波形の周波数解析、すなわち損傷に関わる AE 信号発生周期（音楽で言うリズムに相当）から、損傷の発生位置を特定することも可能である。

4.2 相関マップとその活用

実際には、上述した諸現象が複合的に発生・変化していくため、極めて複雑である。このトライボロジー界面で起こる複雑現象を紐解くために、トライボロジー諸現象および変形・破壊現象で得られた AE 信号波形の特徴を整理し、Fig. 6 に示すようなトライボロジー現象と AE 周波数の相関マップとして体系化した。これを指針とすれば、AE センシングで得られた AE 周波数スペクトルやスペクトログラムを読み解くことができるようになる。

相関マップの活用例として、円すいころ軸受の焼付き予兆検知¹⁰⁾、潤滑油添加剤の耐焼付き性向上メカニズムの解明^{11,12)}、自動車用ブレーキにおけるスティックスリップ現象解析¹³⁾、鉄道車両用踏面制輪子のトライボロジー特性評価¹⁴⁾など幅広く展開している。また、微小径ドリル加工の状態監視のための相関マップも提案している¹⁵⁾。さらには、通電摩耗や疲労摩耗で起こる現象の詳細解析に、AE 信号波形のリアルタイム STFT を活用している^{16,17)}。

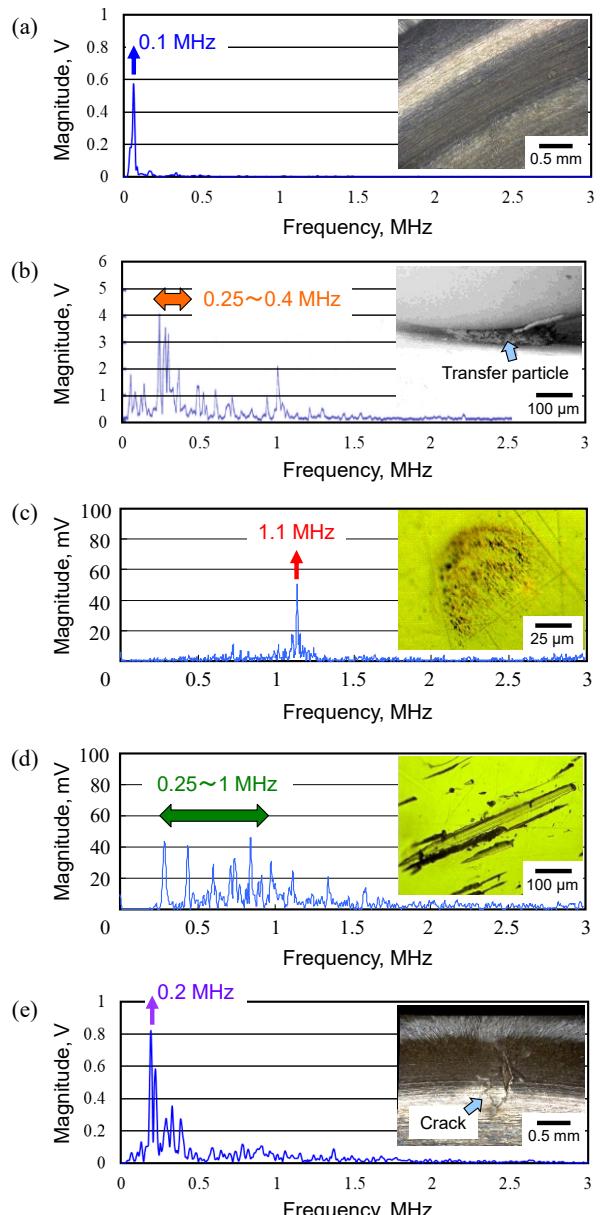


Fig. 5 Features of AE frequency in fundamental friction and wear phenomena

5. おわりに

トライボロジー界面が奏でる音色も、かつては試験室内外に響き渡るほどの轟音であった。それがトライボロジー技術の発展とともに、その音色も穏やかになり、従来のセンシング技術では差がわかりにくいのが現状である。そのため、トライボロジー現象に対して優れた検出感度をもつセンシング技術が求められている。メンテナンスにおいては、大きな信号が検出されて何となく停止するだけでなく、どのような現象がどの程度の規模・頻度で発生したのかを評価・診断できる技術が今後より一層必要になるであろう。

本稿で述べてきたように、AEセンシングは見えない界面の状態をそこで奏でられた音色の解析から紐解くことができ、将来的にはトライボロジー現象評価・診断には欠かすことのできないマストアイテムになる大きなポテンシャルを秘めている。

文献

- 1) 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, 10 (2012) 856.
- 2) A. Hase: Listening to Voice of Materials: Identification and Evaluation of Tribological Phenomena by Acoustic Emission Sensing, Transaction of MIRAI Vol.10-The 15th MIRAI Conference on Microfabrication and Green Technology (15th MIRAI, 2022), Sanjo, M000 (2022) 3.
- 3) L.G. Kersta: Voiceprint Identification. Nature, 196, (1962) 1253.
- 4) 長谷：電気接触を伴うトライボロジー現象のAEセンシング、トライボロジスト, 68, 10 (2023) 680.
- 5) A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, Wear, 292-293 (2012) 144.
- 6) 長谷：AEセンシングを活用したプロアクティブメンテナンス、潤滑経済, 688 (2022) 2.
- 7) A. Hase: Early Detection and Identification of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearings by an Acoustic Emission Technique, Lubricants, 8 (2020) 37.
- 8) A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Fundamental Study on Early Detection of Seizure in Journal Bearing by Using Acoustic Emission Technique, Wear, 346-347 (2016) 132.
- 9) A. Hase, Mishina, H., Wada, M.: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, Wear, 292-293 (2012) 144.
- 10) 獅子原・長谷：AE法を用いた円すいころ軸受の焼付き予兆検知に関する研究、トライボロジスト, 68, 5 (2023) 342.
- 11) 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.
- 12) A. Hase, M. Morita, K. Onodera: Analysis of Seizure-resistance-improvement Mechanism of Polymer Additives by Acoustic Emission Sensing, Tribology International, 184 (2023) 108441.
- 13) 矢澤・豊田・新井・小野・原・長谷：アコースティックエミッション計測を用いたクリープグローン発生時のスティックスリップ現象解析、自動車技術会論文集, 54, 2 (2023) 271.
- 14) 長谷・嵯峨：AEセンシングによる鉄道車両用踏面制輪子のトライボロジー特性評価、日本機械学会関東支部第30期総会・講演会講演論文集, No.240-1 (2024) 14F02.
- 15) A. Hase: In Situ Measurement of the Machining State in Small-Diameter Drilling by Acoustic Emission Sensing, Coatings, 14, 2 (2024) 193.
- 16) 小沢・長谷：通電摩耗時のAEセンシング研究—AE信号波形のSTFT解析に見られる特徴—、トライボロジー会議予稿集 東京 2024-5 (2024) 発表予定。
- 17) 向井・長谷：転がり疲れ試験におけるアコースティックエミッション信号と表面状態の評価、トライボロジー会議予稿集 東京 2024-5 (2024) 発表予定。

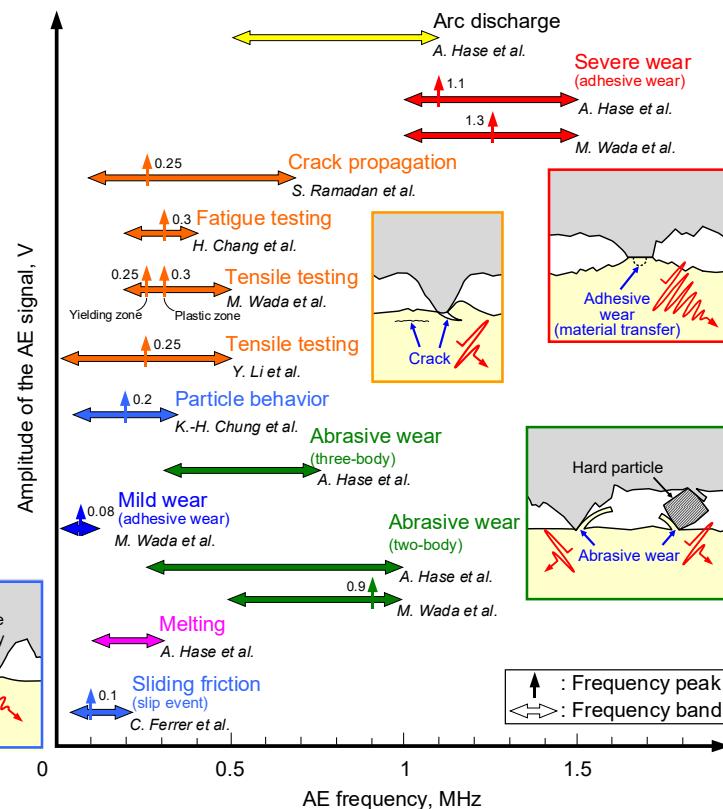


Fig. 6 Correlation map between the frequency spectra of AE signals and deformation and fracture phenomena (friction and wear modes)