

トライボロジー現象の定常・非定常では何が起こっているのか？

～その場観察・AE センシングから遷移点を探る～

What Happens in Steady and Unsteady Tribological Phenomena?

—Exploring the Transition Points through In Situ Observation and AE Sensing—

埼玉工大（正）*長谷 亜蘭

Alan Hase*

*Saitama Institute of Technology

1. はじめに

定常状態とは「時間の経過によって変化しない一定の状態」であり、非定常状態とは「時間の経過とともに変化する状態」と定義される。トライボロジーにおいては、定常・非定常の典型的な現象を Table 1 のように大別することができる。定常状態では、接触・摩擦・潤滑に関する条件が時間の経過とともにほぼ一定で、設計通りの動作を続けている状態を指す。非定常状態は、装置の起動直後、過負荷状態、潤滑不足、あるいは劣化によって条件が時間的に変化していく状態と言える。トライボロジーにおける非定常問題を解決するためにも、その定常・非定常の遷移点の理解が重要と考える。本稿では、摩擦界面のその場観察とアコースティックエミッション（AE）センシングによる研究アプローチから、その遷移点で何が起こっているのかについて探ってみる。

Table 1 Classification of steady and unsteady phenomena related to tribology

Category	Typical phenomena
Steady state	<ul style="list-style-type: none"> - Stable coefficient of friction - Constant wear rate (steady-state wear) - Stable lubrication regime (e.g., fluid film lubrication) - Minimal changes in surface roughness - Constant surface temperature
Unsteady state	<ul style="list-style-type: none"> - Fluctuating coefficient of friction - Initial wear (running-in) - Transition of lubrication regimes (boundary → mixed lubrication) - Surface transformation (oxidation, phase transition) - Surface damage or accelerated/abnormal wear - Rising surface temperature (flash temperature)

2. 摩擦界面で起こる現象の認識と評価

定常・非定常の評価には様々な考え方があるが、基本的には摩擦・摩耗・潤滑状態などの時間変化を追跡して、安定しているかどうかを判断する。トライボロジーにおいては、Fig. 1 に示すように表面突起間の接触から始まる様々な摩擦・摩耗現象が、その状態変化に大きく関与している。インプロセスで状態変化の追跡を行う手法としては、摩擦抵抗（摩擦係数）や振動加速度、温度などがあるが、計測手法によって現象に対する検出感度は異なる。例えば、円すいころ軸受における潤滑不良による状態変化は、トルク・振動加速度・温度の計測と比較して、AEセンシングによって最も早期かつ明確に検出できることが示されている²⁾。

AEセンシングは、材料の変形・破壊に伴う弾性応力波（AE波）を計測・解析する手法である³⁾。上で触れたように検出感度に優れ、様々な現象を大局的に捉えることができ、かつAE信号波形の周波数解析から現象の識別が可能であるという大きな利点がある⁴⁾。最近の研究では、潤滑膜の形成状態によって生じる摩擦・摩耗現象の遷移も把握することができることがわかっている⁵⁾。AE波の発生原理から、均一変形時に比べ不均一変形時はAE波の発生が活性化するため⁶⁾、AEセンシングによってトライボロジー現象の定常・非定常を評価することが可能となる。

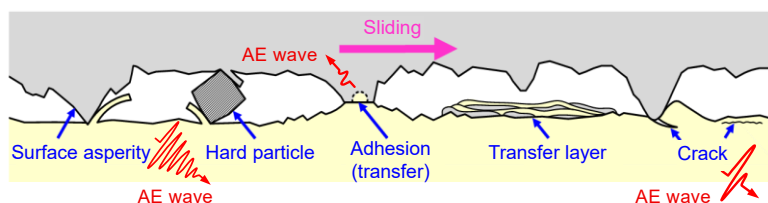


Fig. 1 Friction and wear phenomena that occur at frictional interface

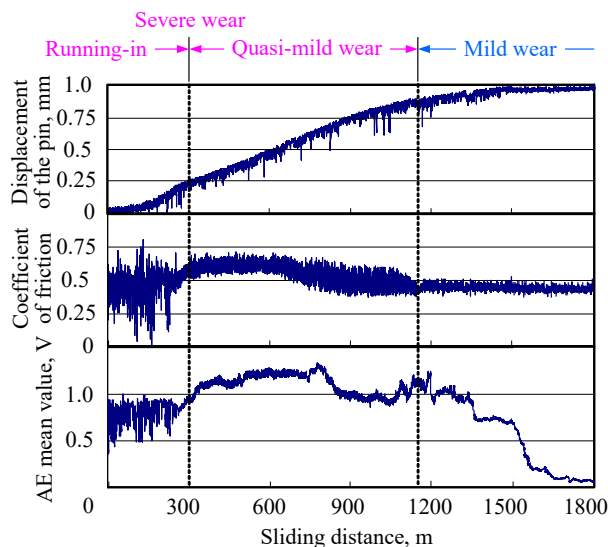


Fig. 2 Changes in the displacement of the pin, coefficient of friction, and AE signal amplitude in severe-mild wear transition

3. 非定常状態から定常状態への遷移点の例（初期なじみ、シビア・マイルド摩耗遷移）

まず、非定常状態から定常状態への遷移点の例として、初期なじみとシビア・マイルド摩耗遷移について見てみよう。Figure 2 は、鋼材同士の摩擦・摩耗実験で得られたシビア・マイルド摩耗遷移時の摩耗量、摩擦係数、AE 信号振幅の変化である⁷⁾。ここでは、摩耗の状態からシビア摩耗（初期なじみ、準マイルド摩耗）とマイルド摩耗の領域に分けている。摩擦係数においては、変動が大きい非定常状態から、その遷移過程（準定常状態）を経て定常状態へと変化していくことがわかる。

初期なじみ過程では、表面突起の変形・摩耗（主に凝着摩耗による移着現象）が進行し、大きな金属色の摩耗粒子が生成して表面損傷も大きくなる。移着から移着粒子の生成・脱落を繰り返す、いわゆる移着成長過程による非定常状態と言える。表面性状および移着状態が均一化すると、微細な黒色砂状の摩耗粒子が生成し始めるようになり、摩擦係数および AE 信号振幅の変動幅は小さくなる。しかしながら、摩耗率は高いままであり、AE 信号レベルも高い値で推移している。これは、まだ完全な定常状態とは言えず、準定常状態と考えられる。この過程を経ると、微細な赤褐色の摩耗粒子が生成し始めるようになり、摩擦係数および AE 信号振幅の変動幅はさらに小さくなる。摩耗率も低くなり、マイルド摩耗への遷移が進行した結果の定常状態と言える。この領域の AE 信号振幅変化に着目すると、AE 信号レベルが急激に低下していることがわかる。これは、AE 信号レベルが比摩耗量と相関があり、摩擦界面における摩擦・摩耗の状態を的確に捉えていると言える。この定常状態は、移着粒子（摩耗粒子）の微細化および界面への滞留により、摩擦界面に作用する応力が分散・緩和された結果であると考えられる。

4. 定常状態から非定常状態への遷移点の例（ブレーキ摩擦材の異音発生源）

つぎに、定常状態から非定常状態への遷移点の例として、ブレーキ摩擦材の異音発生源について見てみよう。Figure 3 は、ブレーキパッド材料の摩擦・摩耗実験で得られた摩擦係数と AE 信号振幅の変化である⁸⁾。ここで注目すべきは、アブレイブ系ブレーキパッド材料において、摩擦係数には現れない変動が、AE 信号振幅の変化として顕在化している点である。この原因を究明するために、摩擦界面のその場観察実験を実施した結果が Fig. 4 である⁸⁾。Figure 4 (a) と (b) は、それぞれ Fig. 3 における安定時（定常時）と変動時（非定常時）で実験停止して切り出した試験片を供試して得られた観察映像の 1 コマである。この結果から、定常時は軽微な表層部の摩耗と摩擦表面下の変形が進行し、非定常時は表層部が一気にはく離して摩耗していく様子が観察された。すなわち、定常時に進行した軽微な摩耗粒子が、繰り返し摩擦によって表面上で圧縮・積層され、硬いトライボ被膜が形成されていく。これが、Fig. 4 (b) の赤い点線で示すように、摩擦面直下で亀裂が進展していくことで大規模な摩耗を引き起こす。この変化は AE 信号振幅の変動として明確に検出され、剛性の高い摩擦系では顕著な変化は認められなかったと考えられる。しかし、AE センシングで捉えられるこのような非定常な変形・破壊現象が、ブレーキシステムにおける異音の発生要因の一つであることは確かである。

Figure 5 は、シャンドイナモメータを用いてクリープグロ

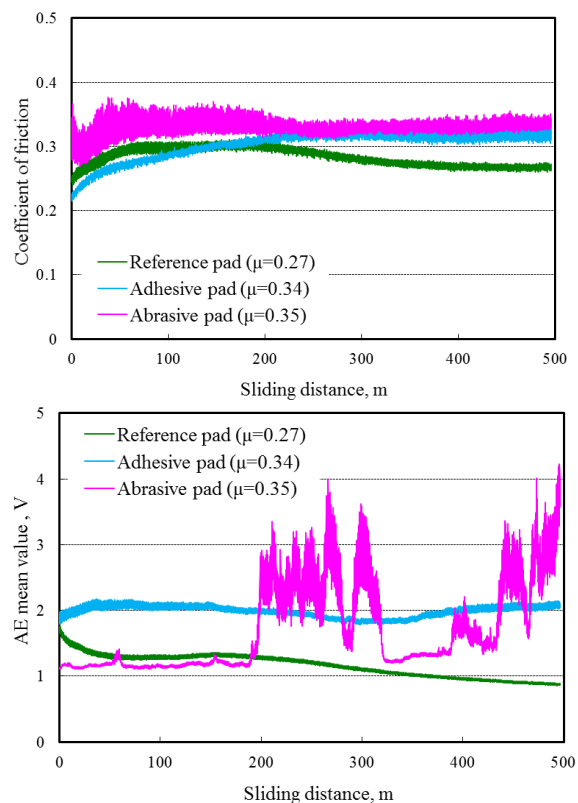


Fig. 3 Changes in the coefficient of friction and AE signal amplitude with during steady and unsteady conditions for brake pad materials

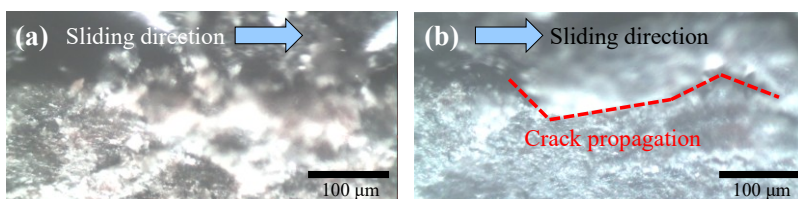


Fig. 4 In situ observation images of stable and unstable conditions in the abrasive brake pad material

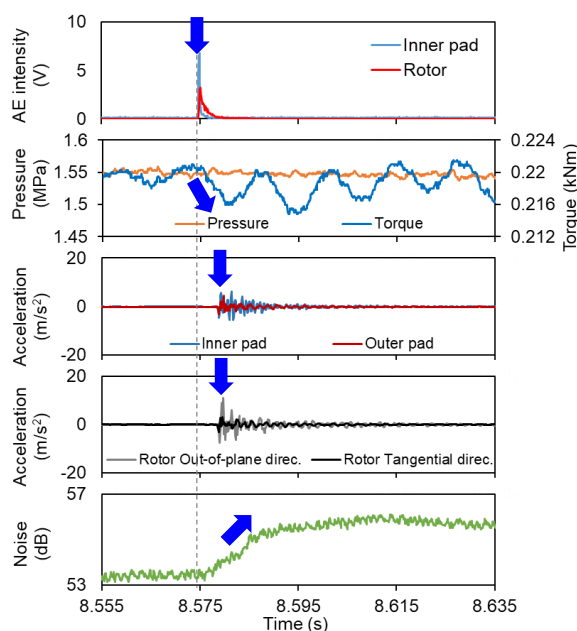


Fig. 5 Changes in AE signals, torque, vibration acceleration, and noise during creep groan

ーン（ブレーキペダルを弱く踏んでいる状態や、ブレーキから足を離した際に発生する異音）の発生メカニズムを調査した計測データの一例である⁹⁾。上から、AE 信号振幅、トルク、振動加速度、異音の変化を示している。この結果から、AE 信号振幅が立ち上がった後にトルクが低下し、振動加速度の変化へと移行して、最終的に異音の発生へと進展していくことが明らかにされている。スティック状態からスリップが発生する瞬間には、摩擦界面での変形・破壊が生じる。この時に検出された AE 信号波形の周波数解析結果（スペクトログラム）を Fig. 6 に示す。これらの周波数成分から、パッド側では Fig. 4 で観察されたようなき裂進展が発生し、同時にロータ側ではアブレイシブ摩擦（摩擦）が発生していることがわかった。

その他、すべり摩擦のみならず転がり摩擦においても同様に AE センシングを活用して、歯車の歯面における接触状態の変化¹⁰⁾や二円筒表面における転がり疲れの進行¹¹⁾に伴う定常・非定常の遷移点の探究が進められている。

以上で述べてきたように、定常・非定常の遷移点を理解することによって、材料開発や最適設計へと結び付けることが可能となり、持続可能な社会の構築というトライボロジー研究の使命を果たすことができると考える。

5. むすび

「トライボロジー現象の非定常がどのようにして起こるのか？」という問いに対する答えとしては、シンプルに「摩擦界面での“つまずき現象”が発生するため」と集約することができよう。この“つまずき現象”とは、局所的な凝着、塑性変形や材料破壊などによる負荷の急変を意味する。アイススケートにおいて滑走中に氷面の異物や凹凸に引っかかればバランスを崩すように、摩擦界面でも微小な不連続が動的安定性を乱す。定常状態を維持するためには、スケート選手が筋力や関節の安定性を鍛えるように、機械システムにおいては摩擦系の剛性向上、摩擦材の機械的特性・表面性状の改善、さらには潤滑条件の最適化が必要となる。

文献

- 1) 長谷：In situ 観察・AE センシングを駆使したトライボロジー現象の解析技術，設計工学，59，7（2024）301.
- 2) 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.
- 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，78，10（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，B16（2024）116.
- 5) A. Hase, M. Morita, K. Onodera: Analysis of seizure-resistance-improvement mechanism of polymer additives by acoustic emission sensing, Tribology International, 184 (2023) 108441.
- 6) 岸：塑性変形により生ずるアコースティック・エミッション，塑性と加工，19，208（1978）360.
- 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) A. Hase, K. Mizuta, Y. Nishizawa, K. Sugimoto, K. Okayama: Visualization and Evaluation of Friction and Wear Phenomena for Brake Pads Using In Situ Observation and Acoustic Emission Measurement Method, Proc. of EuroBrake 2015, (2015) EB2015-FID-004.
- 9) H. Toyoda, Y. Yazawa, S. Arai, M. Ono, Y. Hara, A. Hase: Analysis of Stick-slip Phenomenon during Creep Groan Using Acoustic Emission Sensing, Proc. of EuroBrake 2025, (2025) EB2025-TSD-006.
- 10) 獅子原・長谷：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，トライボロジー会議 2025 秋 函館 予稿集，（2025）発表予定.
- 11) 向井・長谷：AE センシングを活用した転がり疲れ試験中の表面き裂発生・進展過程の詳細解析，トライボロジー会議 2025 秋 函館 予稿集，（2025）発表予定.

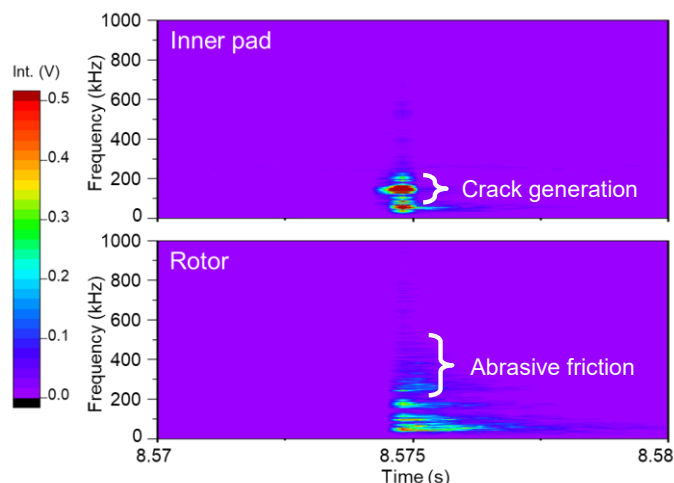


Fig. 6 Frequency spectrum changes (spectrograms) in AE signal waveforms detected during slip for a brake system (inner pad and rotor)