

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—

AE Sensing Study during Sliding Wear under Electric Current:
Features Obtained from STFT Analysis of AE Signal Waveforms

埼玉工大・院（学）*小沢 光輝 埼玉工大（正）長谷 亜蘭

Kouki Ozawa*, Alan Hase*

*Saitama Institute of Technology

1. 緒言

通電下での摩擦・摩耗は様々な機械部品に介在し、力行時や回生時に電力の供給を行っている鉄道車両のパンタグラフの他、モータのブラシなどにおいても発生する。この通電下での摩擦は、無通電下の摩擦よりも損傷・摩耗が多いため、部品交換の頻度が多くなり、また機械運転時に安定した電力供給ができない等の悪い影響を及ぼし、最悪事故にも繋がりかねない。特に鉄道車両のパンタグラフに関しては、他の通電摩擦の部品とは異なり外部に露出しているため、雨などの自然環境の影響を大きく受ける。通電下の摩擦・摩耗は鉄道のみならず様々な機械部品で発生するため、その機械部品の材料選定時や材料開発時に通電摩耗状態の計測・評価が重要となってくる。

本研究では、ピン・オン・ディスク型摩擦・摩耗試験機を用いて鉄道車両のパンタグラフおよび架線を想定したカーボン系材料の摩擦・摩耗実験を実施し、アコースティックエミッション（AE）センシングを活用して¹⁾、その通電摩耗状態の評価を行った。また、ディスク表面に水を散布した雨天時と乾燥摩擦による晴天時を想定した比較実験を実施し、通電摩耗状態の違いを評価した。さらに、AE 信号波形の短時間 FFT（STFT）解析の結果についても述べる。

2. 実験方法および条件

本研究で使用したピン・オン・ディスク型摩擦・摩耗試験機の概略を Fig. 1 に示す。AE センサはピン試験片上部に設置し、実験中の AE 信号を計測した。また、3 軸加速度センサを用いてピン試験片の振動加速度を計測し、接触電圧印加回路を用いてピン試験片とディスク試験片の乖離・接触状態を計測した。今回、通電下の摩擦実験を行うにあたり、ピン試験片からディスク試験片に電流が流れるように配線した。このとき、印加電圧は 10 V で電流は 2 A とした。

試験片材料については、ピン試験片に鉄道車両側のパンタグラフを想定した銅含浸カーボン、ディスク試験片に架線側を想定したステンレス鋼を使用した。両試験片の摩擦面は、事前に研磨紙（粒度#2000）で鏡面に仕上げている。Table 1 に本実験条件を示す。垂直荷重は 0.3 N とし、ディスク試験片を摩擦速度 0.8 m/s で回転させた。今回の実験では、すべてにおいて AE 信号の増幅率を 40 dB とし、背景ノイズを除去するために 100 kHz のハイパスフィルタ処理を施した。1 回の実験は摩擦時間 50 分とし、10 分ごとに摩耗量を電子天秤で測定した。また、雨天時を想定した実験を行うために定量ポンプで水（雨水）を滴下した。水の滴下については、10 分間に合計 3 回（実験開始 1 分後、4 分後、7 分後に 30 秒間滴下）を行った。すべての実験は、室温、大気中で行った。

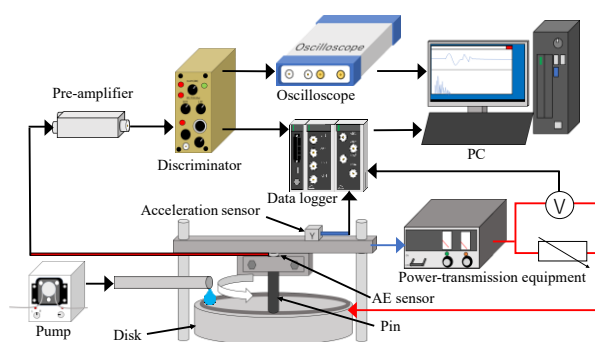


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Normal load	0.3 N
Sliding velocity	0.8 m/s (612 rpm)
Source voltage	DC 10 V (pin: -, disk: +)
Initial current	2 A
AE amplification factor	40 dB
High-pass filter	100 kHz
Water amount	1.8 ml/min

3. 実験結果および考察

Figure 2 および Fig. 3 は、実験開始後 30～40 分の計測データである。上から、摩擦方向の振動加速度センサの振幅値、垂直方向の振動加速度センサの振幅値、AE センサから得られた AE 信号振幅値（ENV）と AE 平均値（AVE）、接触電圧の変化である。ここでは、Fig. 2 の結果を Case 1、Fig. 3 の結果を Case 2 と分類する。

まず、Fig. 2 の Case 1 における変化を確認すると、実験開始 1 分間と開始 1 分直後の水滴下時では、滴下した時の振動加速度の振幅値が小さくなっていることが確認できる。これは、水を滴下したことにより潤滑されたためと考える。

しかし、AE 信号振幅値および AE 平均値を確認すると、振動加速度とは逆に水を滴下した瞬間から大きくなっていることが確認された。これは、水を滴下したことによりピン試験片とディスク試験片の間に水膜が発生し、放電の頻度が増えた影響と考える。また、Fig. 4 の Case 1 実験後に観察した摩耗面からも、クレータのような放電痕が多数確認できる。また、Fig. 3 の Case 2 における変化を確認すると、振動加速度は水を滴下した瞬間から振幅が小さくなるのは Case 1 と同様であるが、AE 信号に関しては小さくなることを確認された。Fig. 4 の Case 2 の実験後に観察した摩耗面を確認すると、Case 1 とは異なり放電痕が確認されない代わりに摩耗面が虹色に変色していた。

Figure 5 および Fig. 6 は、AE 信号波形の STFT 解析の結果である。先行研究から、0.1~0.3 MHz は溶融時に確認される周波数帯であり、0.5~1.5 MHz は放電時に確認される周波数帯であることがわかっている²⁾。この特徴を踏まえて溶融時および放電時にみられる周波数帯では、明らかに水滴下時の Case 1 の方が大きいことが確認できる。また、摩耗量の推移を比較したところ、Case 1 の摩耗量が明らかに多かった。つまり、摩耗面と AE 信号波形の周波数スペクトルの結果から、Case 1 では放電が頻発に発生し溶融が起きているが、Case 2 では放電および溶融があまり発生しなかったといえる。

ここで、Case 2 のディスク試験片の摩耗面が虹色に変色した理由について考察する。まず、実験中の観察から水が蒸発していく様子が確認された。これは AE 信号の変化からも確認でき、Fig. 2 では実験開始 3 分後などの振幅値が下がった部分、Fig.3 では実験開始 3 分 45 秒後などのように振幅値が高くなった部分などで水が蒸発した。よって、両試験片の摩擦界面は高温になっている。ステンレス表面は酸化被膜で覆われており、水を蒸発させた際に水に含まれていたカルシウム等の不純物がその酸化被膜に付着して虹色に見えていると考える。今回、ステンレス鋼のディスク試験片上には雨水の成分の他、ピン試験片から発生した摩耗粒子が残留した影響も考えられる。したがって、この虹色の不純物層の影響を受け、放電しにくくなったと考察する。

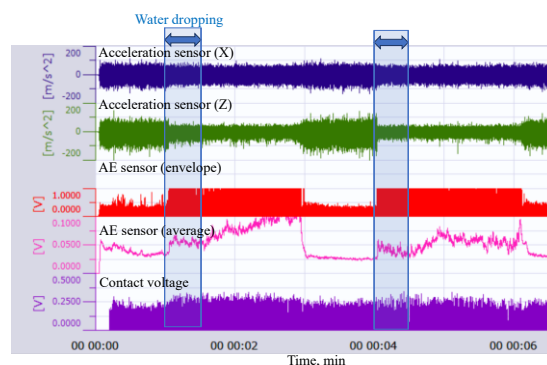


Fig. 2 Changes in the measurement signals (Case 1)

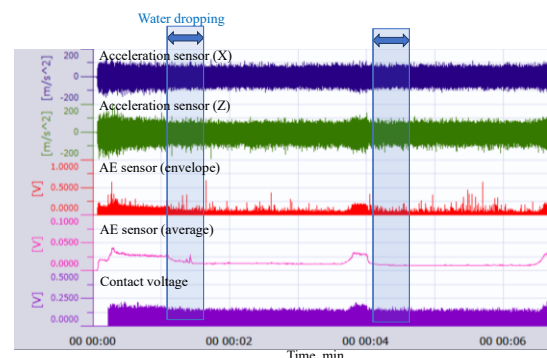


Fig. 3 Changes in the measurement signals (Case 2)

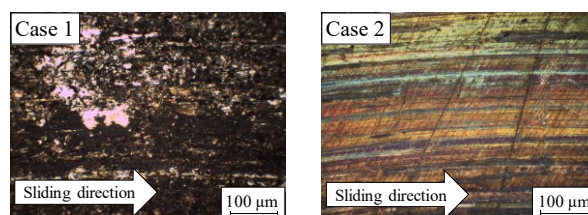


Fig. 4 Micrographs of the worn surface for the disk specimen after rubbing under electric current for Case 1 and Case 2

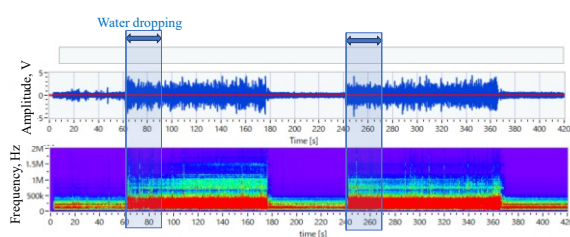


Fig. 5 Frequency change by STFT of AE signal waveforms for wear under electric current (Case 1)

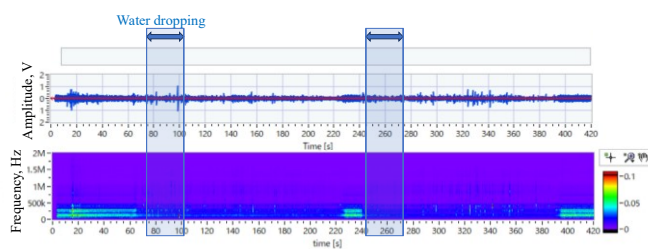


Fig. 6 Frequency change by STFT of AE signal waveforms for wear under electric current (Case 2)

4. 結語

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 水の滴下時には、水膜の形成状態の違いで発生するアーク放電の影響によって、AE 信号振幅が高くなる場合と低くなる場合が確認されることがわかった。
- (2) 水の滴下によって AE 信号振幅が低下し、ディスク試験片の摩耗面が虹色に変色する場合、AE 信号波形の周波数成分の違いの他に、摩耗量の少なさおよび摩耗面の放電痕の少なさからアーク放電の頻度が少ないといえる。

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) 小沢・長谷：AE センシングを用いた通電下のトライボロジー現象の認識—雨天時の通電摩耗で検出される AE 信号の特徴—，日本機械学会 2023 年度年次大会講演論文集，No.23-1（2023）S114-20.