

## 通電摩耗時の AE センシング研究 —AE 信号波形と摩耗状態の相関—

### AE Sensing Study during Sliding Wear under Electric Current: Correlation between AE Signal Waveforms and Wear State

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

通電摩耗は、通電を伴う様々な機械部品、例えばモータブラシの他、ワイヤハーネス、鉄道のパンタグラフなどで発生している。鉄道のパンタグラフは外部に露出しているため、雨水など自然現象の影響を大きく受ける。パンタグラフは、車両を走行させるために必要な電力を架線から車両に供給するための要素である。回生ブレーキ時には逆に車両から架線に電力を送るため、通電不良などの問題が発生すると安定した運行が難しくなることも考えられる。

本研究では、鉄道のパンタグラフを想定した通電下の摩擦・摩耗実験を実施し、アコースティックエミッション（AE）センシングから摩耗状態の評価および通電摩耗メカニズムの解明を行う。特に雨天時を想定した実験を実施し、そこで検出される AE 信号変化および摩耗面観察などから、通電下の摩耗現象について比較・考察を行った。

#### 2. 実験方法および実験条件

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・摩耗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電気回路を配線した。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すり板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）で鏡面に仕上げた。

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。雨天時を想定した実験を行うため、定量ポンプで水（雨水）を滴下した。今回の実験では、すべてにおいて AE 信号の増幅率を 40dB 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。また、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。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）行った。すべての実験は、室温、大気中で行った。

#### 3. 実験結果および考察

Figure 2 および Fig. 3 は、30～40 分にかけての実験データである。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 信号振幅値と AE 平均値、接触電圧のデータとなっている。まず、Fig. 2 の Case 1（今回確認された二つの傾向のうちの一つ）のデータを確認すると、実験開始 1 分間と開始 1 分直後の水滴下時では、滴下した方の振動加速度の振幅が小さくなっていることが確認され、これは水を滴下したことによる潤滑効果と考える。しかし、AE 信号振幅値および AE 平均値を確認すると、振動加速度センサの振幅値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、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。そして、Fig. 2 において水分が減少するほど AE 平均値が高くなる傾向があり、水分が完全に蒸発すると下がるということが確認された。また、Fig. 4 の Case 1 実験後に観察した摩擦面からも、クレータのような放電痕が多数確認できる。一方、Fig. 3 の Case 2 を確認すると、水を滴下した瞬間から振動加速度センサの振幅値が小さくなるのは Case 1 と同様であるが、AE 信号に関しては Case 1 と逆に小さく

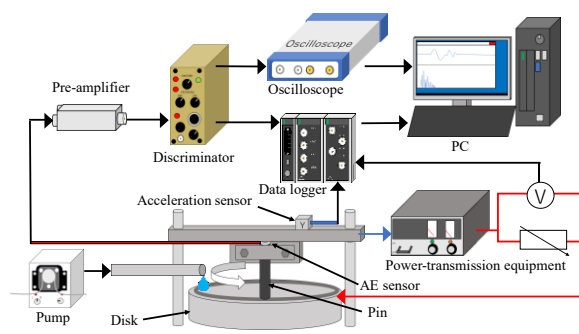


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

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	40dB
High-pass filter	100 kHz
Water amount	1.8 ml/min

なることが確認された．Figure 4 に示す Case 2 の実験後の摩擦面を確認すると，Case 1 とは異なり摩耗面が虹色に変色した．したがって，水膜や被膜の影響を受け，現象の違いが生じたと考える．

つぎに，AE 信号の周波数変化から考察を加える．Figure 5 は，AE 信号波形の STFT（短時間 FFT）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<sup>2)</sup>．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．Figure 6 は，実験開始 3 分半後からそれぞれ水を滴下する直前，水を滴下した瞬間，水滴下後，水が蒸発した後の放電時および溶融時の AE 信号波形の周波数強度の推移を整理した結果である．この結果から，Case 1 では徐々に強度が上昇し，水が蒸発すると下がる事が確認できる．これは，水膜が薄くなるにつれて放電が生じやすくなるが，水が蒸発して直接接触すると放電しにくくなるためと考える．一方，Case 2 では水を滴下した瞬間から両周波数帯で低下がみられ，放電および溶融の損傷の違いを周波数変化から認識できることがわかった．

Figure 7 の摩耗量の推移を比較すると，Case 1 の摩耗量が多いことは明らかである．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 は放電および溶融があまり発生しなかったと言える．変色に対する考察だが，ディスク表面の水のみが蒸発し雨水に含まれていた不純物がステンレスの酸化膜に付着し変色し，この被膜の影響によって Case 2 は放電および溶融があまり発生しなかったと考える．以上のことから，AE 信号振幅値と摩耗量に相関がみられることが確認された．

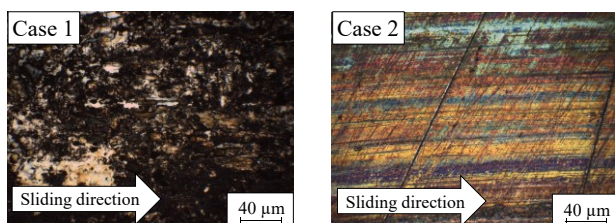


Fig. 4 Micrographs of the worn surface for the disk specimen after rubbing under electric current for Case 1 and Case 2

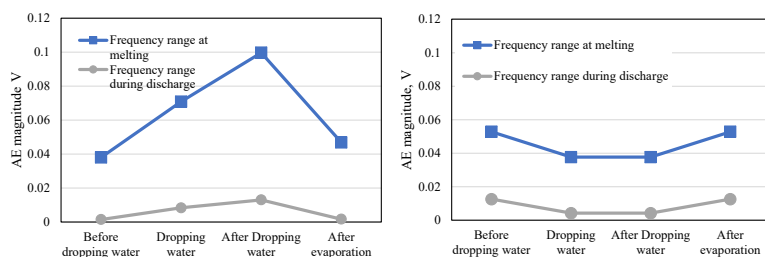


Fig. 6 Frequency transitions for Case 1 (left) and Case 2 (right)

#### 4. 結語

水の滴下実験において，水膜の形成状態の違いにより放電が起きやすい摩擦面と，虹色に変色し放電が発生しづらい摩擦面の摩擦形態に分かれ，それらで発生するアーク放電発生の違いを AE 信号の振幅値および周波数の変化からインプロセスで認識できることがわかった．また，摩擦界面における水分量が減ることで試験片間の表面が接近し，放電および溶融の頻度が増えることで，その特徴を示す周波数帯での AE 信号強度が上昇する変化が確認された．

#### 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：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 2024 春 東京，（2024）386.

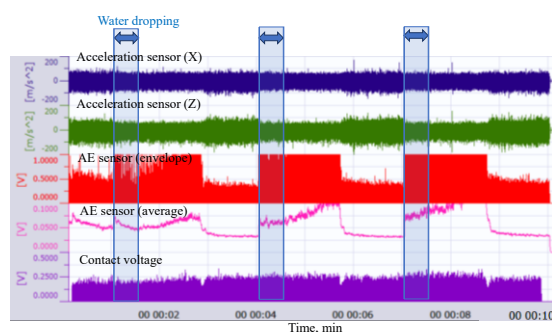


Fig. 2 Changes in the measurement signals (Case 1)

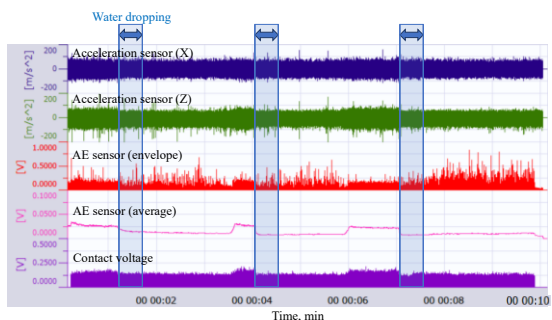


Fig. 3 Changes in the measurement signals (Case 2)

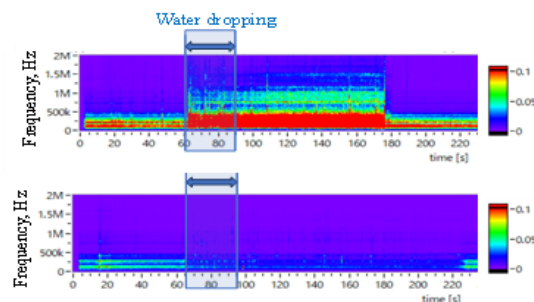


Fig. 5 Frequency changes of the AE signal waveforms by STFT for Case 1 and Case 2

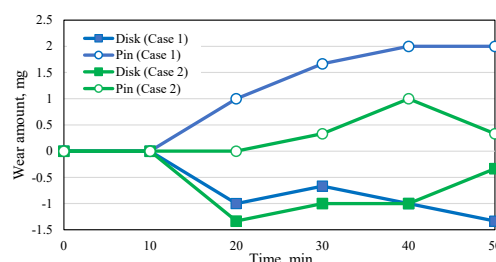


Fig. 7 Wear curves of the both specimens for Case 1 and Case 2