

# アコースティックエミッション法を用いた 通電摩擦下の損耗現象評価

長谷 亜蘭\*, 三科 博司\*\*

\* 埼玉工業大学工学部機械工学科

\*\* 千葉大学大学院工学研究科

alan\_hase @ sit.ac.jp

## Evaluation of Wear Phenomena under Sliding Friction with Electric Current Using Acoustic Emission Technique

Alan HASE\* and Hiroshi MISHINA\*\*

\* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of  
Technology

\*\* Graduate School of Engineering, Chiba University

### Abstract

In wear phenomena for a collector friction system (for instance, sliding friction between a trolley wire and a pantograph contact strip), not only mechanical wear but also wear by discharge and melt occurs. So, the wear rate under electric current is greatly higher than that without electric current because of the additional factors. It is very important to evaluate the tribological characteristics under electric current for the development of current collector materials since the generation of arc discharge and melt and their damages are different by the current collector materials. In this study, the evaluation of tribological characteristics for current collector materials on an electric railway by using an acoustic emission technique was attempted. Friction and wear experiments were performed with a pin-on-disk type sliding friction tester. The electric current was impressed between specimens (sintered Cu/Cu and sintered Fe/Cu). In order to recognize friction and wear phenomena with electric current, it was focused onto the frequency analysis of the AE signals detected at arc discharging and melting. It was found that the presence of electric damage can be predicted by the change in the AE mean value. Furthermore, the difference in main phenomena (arc discharge and melt) can be identified from the difference in the frequency spectrum of the AE signal waveform.

**Key Words:** Tribology, Acoustic Emission, Wear, Arc Discharge, Melt, Fusion, Pantograph,  
Contact Strip, Trolley Wire, Current Collector

## 1. 諸言

集電系における損耗現象は、機械的な摩擦に加え放電・溶融などが伴い、その付加的要因によって通電下の摩擦率は無通電下に比べて格段と高くなることがわかっている。摩擦界面では、表面突起間において縮流抵抗の増加による発熱が生じ、溶融・融着が起こる。その後、その空隙において絶縁破壊が生じてアーク放電が開始し、最終的にアーク放電による材料のアブレーションに至る。この放電・溶融の発生および損傷は、集電材料の種類によって異なることが予想され、通電下トライボロジー特性の評価が集電材料開発のうえでとても重要になる。集電摩擦系の一つである鉄道車両のトロリ線・パンタグラフすり板では、摩擦条件や材料のみならず、通電状態、雰囲気、設置状態など多くの因子が関係するため、これらが複雑な摩擦増加要因となる。また、これらの現象が電気接点接触不良や騒音などといった鉄道車両の運転に支障をきたす原因となることも考えられる。したがって、通電下の摩擦現象を的確に認識し、評価・対策をすることが必須となる。

固体の変形・破壊時に生じる弾性応力波を検出するアコースティックエミッション（以下、AEと略す）法を用いて、摩擦界面で起こるトライボロジー現象の評価・診断を考える。これまでの筆者らの研究により、トライボロジー特性（摩擦・摩擦特性）とAE評価パラメータ間の様々な相関が認められている<sup>1-7)</sup>。また、AE信号原波形の周波数スペクトルが変形・破壊現象によって異なることに着目し、AE信号波形の周波数解析から現象を診断するための“摩擦-AE相関図”を提案している<sup>8,9)</sup>。現象に対応したAE周波数スペクトルを特定できれば、計測されたAE信号のバンドパスフィルタ処理によって、現象に対応した信号成分を抽出できるようになる。よって、AE法が様々な現象が複合的に生じる通電下のトライボロジー特性の評価に有用と考えられる。

本研究では、通電下の摩擦面の摩擦・損傷時に計測されるAE信号の計測とともに、試験片間の電圧降下計測および摩擦界面の発光状態、

摩擦面の観察を行っている。また、通電摩擦下の損耗現象（特に、放電・溶融現象）をAE周波数スペクトルから識別・評価するため、放電・溶融現象を人為的に発生させる静的な実験も実施している。さらに、この摩擦させない静的な実験で得られた放電・溶融時のAE信号波形の周波数スペクトルの特徴が、動的な摩擦実験時にも得られるか検証を試みる。この摩擦実験中に計測されたAE信号変化から、材料の違いによる通電摩擦下の損耗現象評価について検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1. 実験装置および計測システム

本研究では、実際の鉄道車両におけるトロリ線・パンタグラフすり板を想定したピン・オン・ディスク型の摩擦方式の実験装置を用いた。両試験片間に電流を印加し、通電下での摩擦・摩擦実験を行った。図1は、本研究で用いた摩擦試験機の外観である。図2は、摩擦系および電圧印加回路、AE計測システムの構成概略図である。ここでは、通電のための固定接点と回転接点をピン固定部およびディスク回転軸に取り付けた。これにより、摩擦面間の抵抗電圧変化を計測することができる。

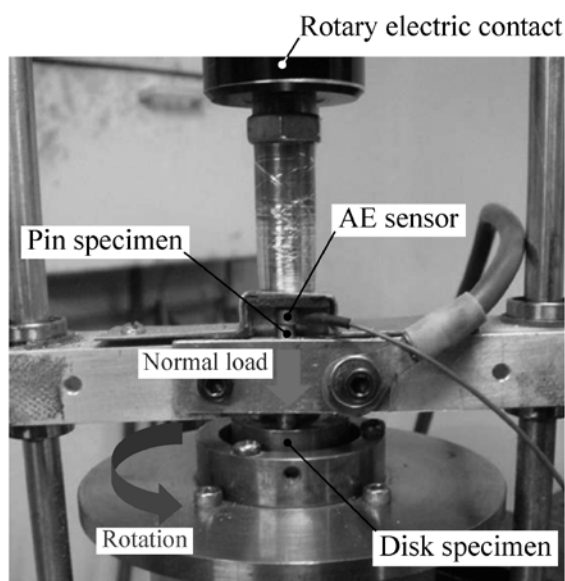


Fig. 1 Appearance of the sliding friction tester.

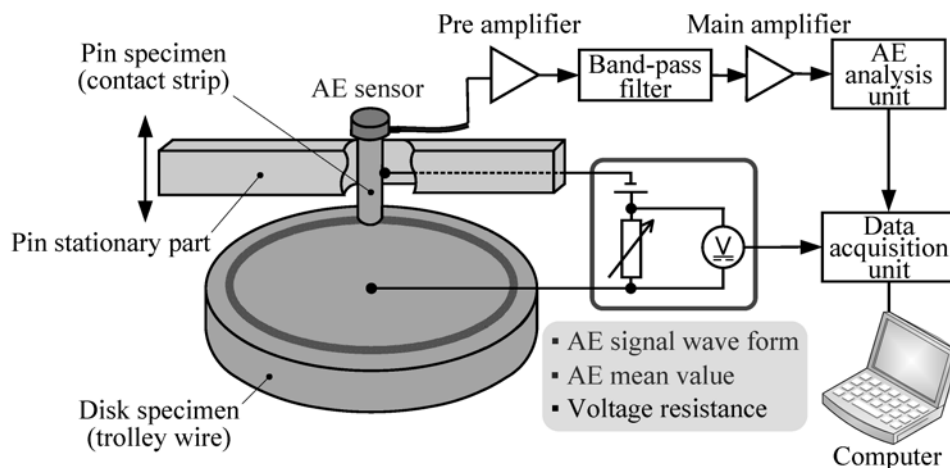


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup and the AE measuring system.

AE センサは、図 1 および図 2 に示すようにピン試験片摩擦部の反対側に取り付け、主にピンの摩耗・損耗により生じる AE 波を AE 信号として計測した。使用した AE センサは広帯域

Table 1 Summary of the experimental conditions

Normal load $W$ (Mean contact pressure)	1.5 N (0.12 MPa)
Sliding velocity $v$	0.8 m/s
Sliding distance $L$	2.0 km
Source voltage	DC 20 V (pin: -, disk: +)
Initial current	4 A
AE amplification factor	60 dB
AE band-pass filter	High-pass filter: 100 kHz Low-pass filter : non-filter

Table 2 Properties of the pin specimens

Material	Sintered Cu alloy	Sintered Fe alloy
Composition, wt%	Cu (87%), Sn (11%), Cr (5%), C (4%), P (0.6%)	Fe (66.8%), Cr (16%), Mo (4.2%), Pb (0.6%), S (2.8%), P (0.2%)
Electrical resistivity, $\mu\Omega\text{m}$	0.3 or less	Uncertainty
Hardness HV	160	90

型であり、周波数応答がなるべく平坦な特性のものを選択している。AE 信号に関しては、AE 平均値（AE 信号の振幅値の変化）および AE 信号波形を計測した。本実験ではノイズ信号レベルより大きなトリガ電圧を設定し、それ以上の信号を検出・記録した。また、AE 平均値に関しては背景ノイズの直流成分を減算して評価した。

## 2.2. 実験条件

ディスク試験片は、鉄道車両のトロリ線（陽極）を想定し、無酸素銅（成分：Cu (99.99%)，硬さ：57.4 HV，電気抵抗率： $1.7 \times 10^{-2} \mu\Omega\text{m}$ 以下）を用いた。ピン試験片は、パンタグラフすり板（陰極）を想定し、銅系焼結合金および鉄系焼結合金を用いた。ピン試験片の材料特性を表 1 に示す。ピンの形状は、直径 4 mm，長さ 20 mm の円柱状とした。摩擦面は、耐水研磨紙（粒度#2000）により鏡面に仕上げ、アルコール中で十分超音波洗浄した後に実験に用いた。実験は表 2 に示す実験条件において、すべて室温，大気中で行った。

## 3. 実験結果および論議

### 3.1. 損耗状態および AE 信号への通電の影響

図 3 は、ピンおよびディスク摩擦面の (a) 摩擦前，(b) 摩擦後（通電なし），(c) 摩擦後（通電あり）の観察結果である。これより、通電し

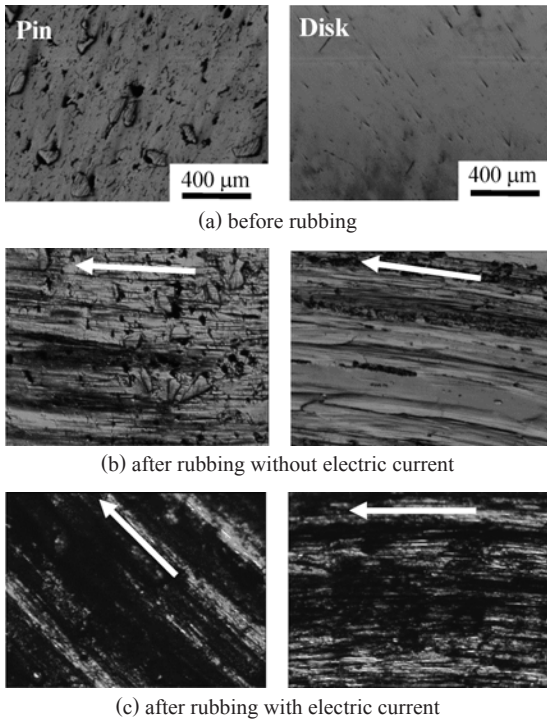


Fig. 3 Micrographs of the friction surface of the pin (left) and disk (right). Arrows show the direction of sliding.

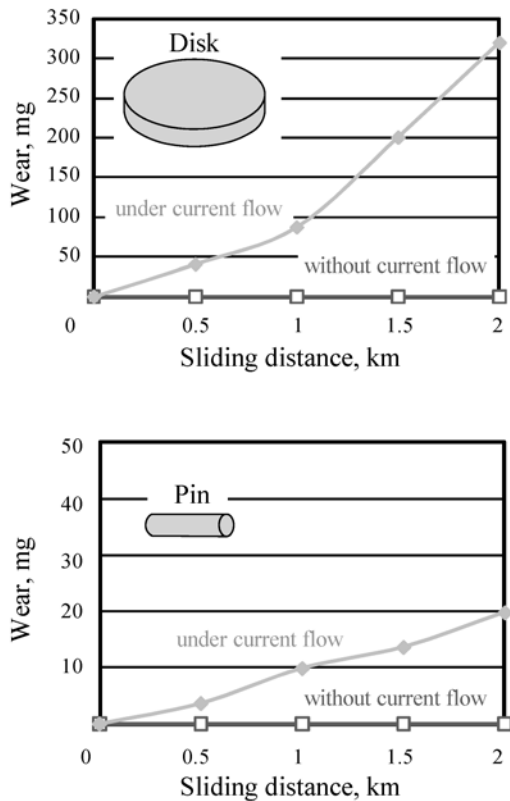


Fig. 4 Wear-sliding distance curves for disk and pin specimen.

Table 3 Summary of the wear rate for the pin/disk (unit:  $\times 10^{-5}$  [mg/mm])

Disk material	Without current flow	With current flow
Sintered Cu	0.03/0.17	1.3/9.1
Sintered Fe	0.64/0.82	1.3/2.9

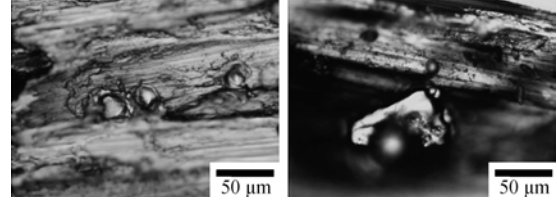


Fig. 5 Micrographs of the wear track damage by arc discharge and melt caused by rubbing under electric current flow.

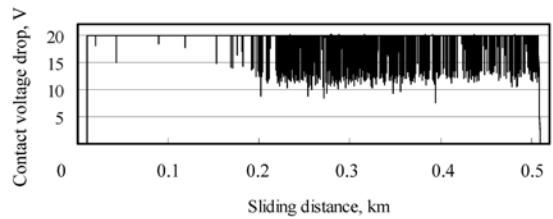
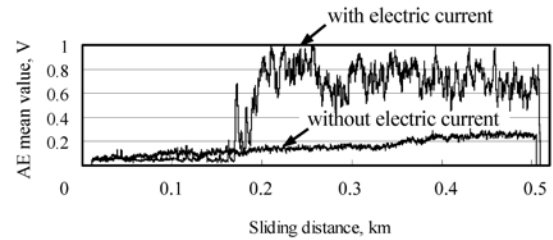


Fig. 6 Fluctuations of the AE mean value (above) and the contact voltage drop (below).

ない場合の摩擦面には凝着痕や残留した摩耗粒子や移着粒子が観察でき、典型的な凝着摩耗の特徴を示すことがわかる (図 3 (b)). また、通電した場合には凝着摩耗のような機械的摩耗だけでなく、放電による衝撃や熱の影響による球状化した摩耗粒子やクレーター状の損耗痕が観察され、摩擦表面は黒く酸化していた (図 3 (c)). これらの比較からもわかるように、通電下における摩擦面の表面損傷状態は大きく異なる。

図 4 は、ディスク試験片とピン試験片の摩耗進行曲線を通電の有無で比較したものである。また、表 3 に摩耗率の値をまとめた。これらの結果から、通電時の摩耗量は無通電時に比べて大きいことが明らかである。図 5 は、通電下の

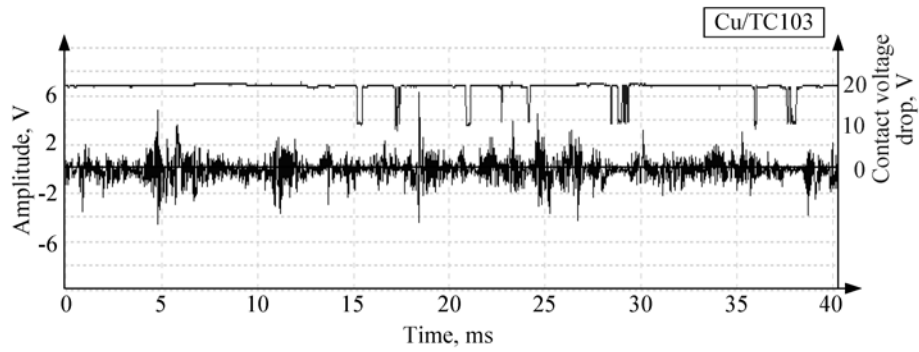


Fig. 7 Fluctuations of the AE signal wave form and the contact voltage drop.

摩擦・摩耗実験において摩耗面上に観察されるアーク放電によるクレーター状のアブレーション痕および球状化した溶融物の観察結果である。このように、機械的な摩耗現象のみならず電気的な損耗（放電・溶融現象）が大きな影響をもたらすといえる。

通電の有無による AE 平均値の変化および通電時の抵抗電圧変化を図 6 に示す。この図 6 における AE 平均値の変化より、放電開始（摩擦距離 0.17 km 付近）までは、AE 平均値の大きさが同程度であることがわかる。それ以降は、抵抗電圧降下が連続して起こり、摩擦界面における放電現象が連続的に観察された。これは、試験片間の瞬間的な離線（かい離）に伴い発生したアーク放電である。このとき、図 5 で観察されるような電気的損傷が摩耗量と AE 平均値増加の原因になっていると考えられる。したがって、AE 平均値の変化によって電気的な損傷の有無を把握することが可能といえる。

図 7 は、微小時間における AE 信号波形と抵抗電圧変化の計測事例である。通電摩擦下の主な AE 源として、機械的摩耗、アーク放電、溶融が考えられるが、この結果からは各現象と AE 波形の対応付けは困難である。しかし、摩耗機構など変形・破壊現象の違いによって AE 周波数に特徴があるため、AE 波形の周波数解析により通電摩擦現象を把握できると考える。詳細な AE 信号波形と損耗現象の対応については後述する。

### 3.2. 放電・溶融現象による AE 周波数の特徴

通電下の摩耗現象は、電気的な損耗が支配的になると、摩耗現象が激しく増加することがわ

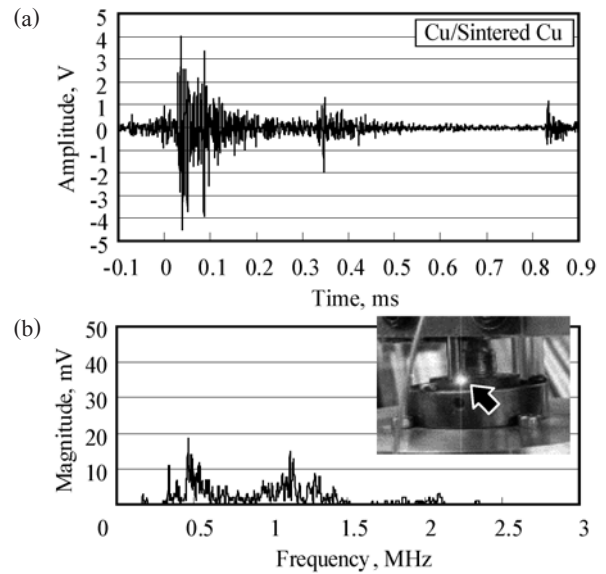


Fig. 8 Typical AE signal detected at arc discharge: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

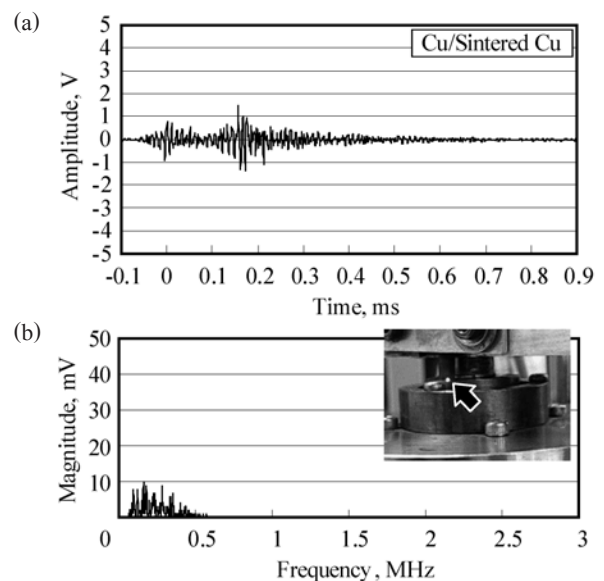


Fig. 9 Typical AE signal detected at melt: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

かった。これは鉄道車両の運転状況にも大きな支障となるため、その電氣的な損耗現象を識別・評価することが必要となる。そこで、アーク放電と溶融現象を人為的に発生させる実験を行った。ピン・オン・ディスク摩擦試験機上において、摩擦させずにZ軸ステージを用いて両試験片を少しずつ離し、離線状態を再現させる。このとき、非接触状態になる直前で放電・溶融現象が確認できた。このとき、接触部の発光状態から、アーク放電（白色や青白い発光）と溶融現象（橙色や黄色の発光）を判断した。

銅系焼結合金に関して、これら各現象時に計測されたAE信号波形および周波数分析結果を図8および図9に示す。ここで、(a)はAE信

号波形を示し、(b)はその周波数分布を示している。これより、アーク放電時には高周波領域(0.5~1.5 MHz)に周波数の分布が存在し、溶融時には低周波領域(0.1~0.3 MHz)に周波数の分布が存在することが確認できる。鉄系焼結合金を用いた場合にも同様の傾向が得られた。したがって、この周波数分布の特徴を利用して、通電下の損耗現象を認識・評価できよう。

### 3.3. AE周波数による通電摩耗現象の認識

図10および図11は、それぞれ銅系および鉄系焼結合金に関する摩擦距離0.5 kmまでのAE信号波形の周波数スペクトル変化を0.1 kmごとに並べた結果である。この結果より、0.1 kmの摩擦初期は機械的な摩耗が主体であり、周波数スペクトルに特徴はみられなかった。0.2 km以降になると、それぞれ以下の特徴がみられるようになる。図10の銅系焼結合金では0.5 MHz付近にピークが現れ、図11の鉄系焼結合金では0.2 MHz付近にピークが現れている。アーク放電時には高周波領域(0.5~1.5 MHz)に周波数のピークが存在し、溶融時には低周波領域(0.2 MHz付近)に周波数のピークが存在することを確認している。この傾向は、実験終了の摩擦距離3.0 kmまで継続的にみられた。

前項で述べた知見から判断すると、銅系焼結合金では放電現象が主体であり、鉄系焼結合金では溶融現象が主体であるといえる。この認識結果から、表3で示した通電時の摩耗率の違いが説明できる。確かに銅系焼結合金は鉄系焼結

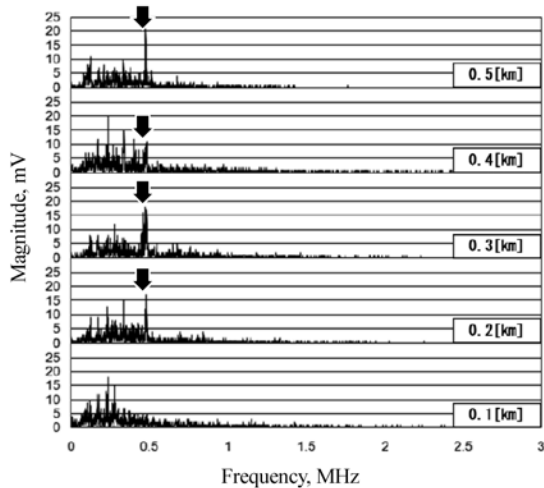


Fig. 10 Change in the frequency spectrum of AE signal waveforms for sintered Cu pin/Cu disk.

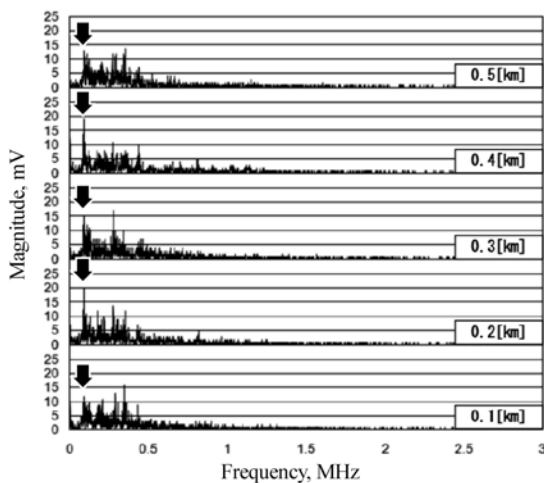


Fig. 11 Change in the frequency spectrum of AE signal waveforms for sintered Fe pin/Cu disk.

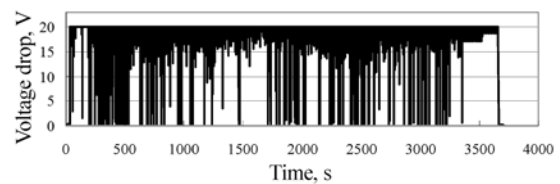


Fig. 12 Fluctuation in the voltage drop for sintered Cu pin/Cu disk.

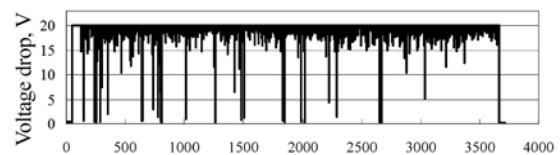


Fig. 13 Fluctuation in the voltage drop for sintered Fe pin/Cu disk.

合金に比べ離線も多く、放電による損傷も多かった。実験後の摩擦面の観察結果からは、通電による溶融・放電の損傷が摩擦の進行に伴って多くみられるようになる。しかしながら、この外観からだけでは溶融や放電といった電氣的損傷の発生状態を評価することは困難である。ここで、それぞれ銅系焼結合金および鉄系焼結合金を用いた実験で得られた試験片間の電圧降下の変化を図 12 および図 13 に示す。これより、どちらにおいても電圧が 0 V まで降下する離線が起きていることがわかる。この離線という現象が起これると、十分な電力を供給できないだけでなく大きな放電を誘発するという欠点があるため、離線は極力少なくする必要がある。また、離線発生時には放電による大きな音や振動が発生するため、実用上では大きな問題となる。図 12 および図 13 の結果から、銅系焼結合金では離線の発生が多く、鉄系焼結合金では離線の発生が少ないことがわかる。これは、一連の通電摩擦の損耗過程において、銅系焼結合金では放電現象が主体であり、鉄系焼結合金では溶融現象が主体であるということがいえる。

以上のことから、AE 信号波形の周波数ピークの位置から通電摩擦下の損耗現象評価の可能性が示された。

#### 4. 結 言

本研究では、銅系焼結合金および鉄系焼結合金の 2 種類の材料に関して、試験片間に電圧印加したピン・オン・ディスク型の摩擦・摩耗実験を行い、通電摩擦下の損耗現象で生じる AE 信号の計測・評価を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 通電摩擦下では機械的な摩耗現象のみならず電氣的な損耗（放電・溶融現象）が支配的になり、通電時の摩耗量は無通電時に比べて摩耗率で 1~2 桁大きくなった。
- (2) AE 平均値の変化によって電氣的な損傷の有無を把握することが可能である。
- (3) アーク放電時には高周波領域（0.5~1.5 MHz）に AE 周波数の分布が存在し、溶融時には低周波領域（0~0.5 MHz）に AE

周波数の分布が存在する。

- (4) 本実験条件下で発生する損耗現象は、銅系焼結合金では放電現象が主であり、鉄系焼結合金では溶融現象が主であることを周波数ピークの位置から評価することができた。

#### 謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金〔若手研究 (B) 課題番号 25820036〕による補助のもとで行われたことを付記し、ここに謝意を表します。また、実験補助いただいた千葉大学大学院自然科学研究科 竹本義明氏、千葉大学工学部電子機械工学科 杉山 豊氏、矢野健太郎氏、埼玉工業大学工学部機械工学科 細田彬史氏に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 長谷亜蘭, 和田正毅, 広田平一: 凝着摩擦における移着現象と AE 信号の相関, トライボロジスト, **50**, 11 (2005) pp.808-815.
- 2) 長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司: アプレシブ摩耗現象と AE 信号の相関, トライボロジスト, **51**, 10 (2006) pp.752-759.
- 3) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: The Relationship between Acoustic Emissions and Wear Particles for Repeated Dry Rubbing, *Wear*, **265**, 5-6 (2008) pp.831-839.
- 4) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition, *Tribology Online*, **3**, 5 (2008) pp.298-303.
- 5) A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Acoustic Emission in Elementary Processes of Friction and Wear: In-Situ Observation of Friction Surface and AE Signals, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, **3**, 4 (2009) pp.333-344.
- 6) A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Microscopic Study on the Relationship between AE Signal and Wear Amount, *Wear*, **308** (2013) pp.142-147.

- 7) A. Hase, M. Wada, H. Mishina: Scanning Electron Microscope Observation Study for Identification of Wear Mechanism Using Acoustic Emission Technique, *Tribology International*, **72** (2014) pp.51-57.
- 8) A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, *Wear*, **292-293** (2012) pp.144-150.
- 9) 長谷亜蘭, 三科博司, 和田正毅: 金属におけるトライボロジー現象診断・評価のための相関図の検討, 第18回アコースティック・エミッション総合コンファレンス講演論文集, (2011) p.115-118.