

デュアル AE センシングによる銀めっき層の 摩耗過程の認識

長谷 亜蘭*, 佐藤 陽介**, 篠原 圭介**, 荒井健太郎**

* 埼玉工業大学工学部機械工学科

** DOWA メタルテック株式会社

alan_hase@sit.ac.jp

Identification of Wear Process of Silver Plating Layer by Using Dual AE Sensing

Alan HASE*, Yousuke SATO**, Keisuke SHINOHARA** and Kentaro ARAI**

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

** DOWA METALTECH Co., Ltd.

Abstract

The purpose of this study is to establish a measurement and evaluation method of dual acoustic emission (AE) sensing that uses two AE sensors to simultaneously measure the tribological characteristics of each two friction materials in real time. In this experiment, for in situ measurement and evaluation of the wear process of silver plating, AE sensors were attached to both silver plated pin and plate specimens, and the AE signals were measured simultaneously in a pin-on-plate-type reciprocal sliding tester. As a result, it was found that the change of AE signal can be classified into three phases. From surface observation and energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis, it was confirmed that the wear of the silver plating layer progressed in Phase I, and the nickel intermediate layer was exposed and the wear of nickel progressed in Phase II. Also, the contact electrical resistance increased and the copper underlayer was exposed in Phase III. In summary, it was found that there is a possibility that the wear process of the silver plating layer, which cannot be identified from the changes in frictional resistance and contact electric resistance, can be recognized from the changes in AE signals. Furthermore, it was found that the change in the wear state of both specimens can be identified from the difference in the amplitude of the AE signals and the timing of their detection.

Key Words: tribology, acoustic emission (AE), metal plating, sliding friction, wear mode analysis

1. 緒言

摩擦・摩耗は、二つの材料表面に存在する表面突起および雰囲気物質などの相互作用によっ

て生じ、その摩擦界面で起こる変形・破壊現象はとても複雑であり、不可測とされている。高精度に摩擦界面の摩擦・摩耗状態を把握するた

めには、各々の材料表面の状態を *in situ* 計測・評価する必要がある¹⁾。現状、摺動面の状態や摩耗量は、摺動を停止させて分析評価する *ex situ* 計測・評価が一般的である。しかし、摺動を停止させて摩擦界面を離してしまえば、実際の状態が保持されていないため、摩擦系を高確度に計測・評価したとは言い難い。

電気接点として使用されるめっき材料の摩耗機構は、未だ明らかになっていない部分が多い。摩耗開始から材料が寿命を迎えるまでの間に、いくつかの異なる段階を経て摩耗は進行していくが、各段階で表層めっき、下地めっき、基材がそれぞれどのような状態になっているか、凝着摩耗とアブレイブ摩耗ではどちらの寄与が大きいのか、固定側接点と可動側接点ではどのような違いがあるか等である。これらの詳細な説明、材料の組合せや端子形状の影響などを明らかにすることは、新規材料の開発に大きく貢献できると考える。

高耐摩耗性を要求される銀めっき用途においては、ニッケル下地が露出した時点が寿命とされている。このタイミングを検知する方法が、現在のところ確立されていない（部分的に銀が凝着していれば接触電気抵抗は維持されるため、接触電気抵抗ではわからない。摩擦係数は変動が大きいため、同じく評価パラメータとしては使用することができない）。この寿命の検知にアコースティックエミッション（Acoustic Emission, 以下 AE と略す）センシングが活用できれば、試験条件と耐久性の相関を正確に評価することができるようになるため、新製品の開発において、よりの確かつ効率的な研究が可能になると期待される。

本研究では、材料の変形・破壊の際に生じる弾性応力波を計測する AE 計測技術を利用し²⁾、二つの AE センサを両摩擦試験材料にそれぞれ取り付け、摩擦系で生じる AE 信号のデュアルセンシングを試みる。AE 信号振幅の挙動や突発型 AE 信号の検出タイミングから、各試験材料における損傷状態の *in situ* 計測・評価の可能性を期待した。本報告では、銀めっきが施されたピンおよびプレート試験片の双方に AE セン

ンサを取り付け、両試験片材料の銀めっき層および下地めっき層の摩耗状態が *in situ* 計測・評価できるかを検討した結果について述べる。

2. 実験方法

図1および図2は、本研究で使用したピン・オン・プレート型往復摺動試験機の外観および計測システムの概略図である。本試験機では、ロードセルを用いて垂直力および摩擦力が計測できると同時に、接触電気抵抗（印加定電流 10 mA）が計測できるようになっている。なお、接触電気抵抗は4端子法で計測した。試験機上部のピン側にインデント試験片、下部ステージ上のプレート側にベース試験片を取り付けて実験を実施した。また図1、図2に示すように、同タイプの二つの広帯域型 AE センサをインデント試験片固定部の治具およびベース試験片に設置した。ここで、両試験片の AE センサの取り付け位置は、摺動試験による比較から適当な位置を決定した^{3,4)}。表1は、AE 計測条件である。

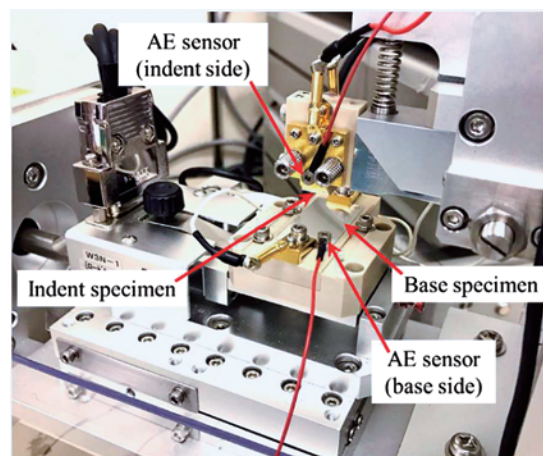


Fig. 1 Appearance of the experimental setup.

Table 1 Summary of the AE measuring condition

AE sensors (Frequency band)	Wideband-type (0.5–4.0 MHz)
AE amplification factor	90 dB
AE band-pass filter	HPF: 50 ~ 100 kHz LPF: Through

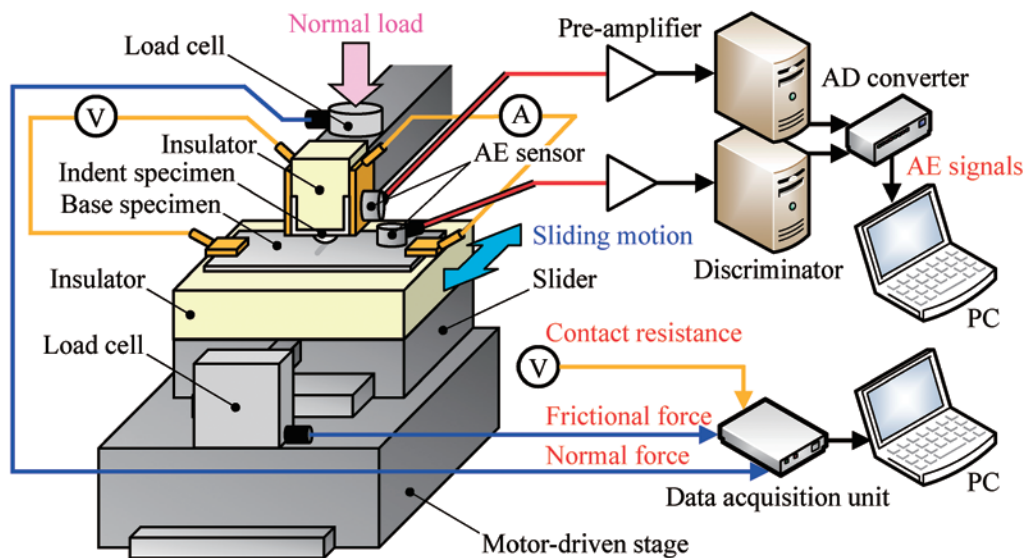
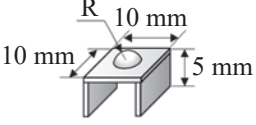
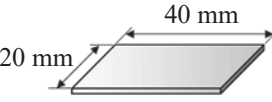
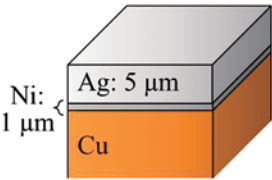


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup and the measuring system.

Table 2 Summary of the specimens and sliding condition

Indent specimen	Gloss silver plating (R 1.5 mm embossed sheet, t 0.64 mm) 
Base specimen	Gloss silver plating (t 0.64 mm) 
Composition of plating layer	
Normal load, W	2.0~3.0 N
Sliding velocity, v	100~200 mm/min
Sliding stroke	5 mm
Number of reciprocating, n	~150 times (repeated)
Atmosphere	at room temperature, in open air, under unlubricated condition

どちらの AE センサからの出力信号も AE 増幅率を 90 dB とし、ノイズ除去の目的で 50~100 kHz のハイパスフィルタ処理を行った。

表 2 は、今回供試した試験片の詳細と摩擦条件である。試験片の形状は、突起形状 ($R = 1.5$ mm) がエンボス加工されたインデント試験片と板状のベース試験片である。いずれも板厚 0.64 mm であり、銅基材上に無光沢ニッケル下地めっき (厚み 1 μm) と光沢銀めっき (厚み 5 μm) が施されている。なお、一部の実験において、突起形状 $R = 1.0$ mm、板厚 0.2 mm、ニッケル下地めっき厚み 0.5 μm 、銀めっき厚み 1 μm の試験片を供試した。垂直荷重 2.0~3.0 N、摩擦速度 100~200 mm/min として、摺動距離 5 mm を往復させて摩擦・摩耗実験を実施した。実験はすべて室温、大気中、無潤滑で行った。

3. 実験結果および論議

3.1 銀めっき層の一連の摩耗過程

最初に、本摺動試験における銀めっき層の一連の摩耗過程を概観する。図 3 は、50 回の往復摺動実験 (銀めっき厚み 1 μm を使用) で得られた摩擦力と接触電気抵抗の変化である。ここでは、摩擦力および接触電気抵抗の片道摺動区間の平均値を算出し、それぞれ往路と復路で

プロットしている。摩擦力は、摺動開始直後に一時的に増加し、初期なじみの過程を経て低下していく。そして、摺動回数30回付近から上昇していくことがわかる。接触電気抵抗も初期なじみの影響で低下していくが、摩擦力が上昇する前の摺動回数25回付近から上昇していることがわかる。

図4は、50回往復摺動後の両試験片の摩耗面の顕微鏡観察結果である。この観察結果から、

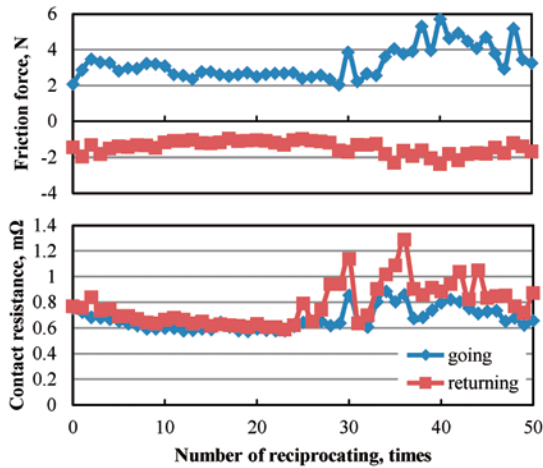


Fig. 3 Changes in the friction force and the electrical contact resistance (t 0.2 mm, Ag plating 1 μm , $W=3.0$ N, $v=100$ mm/min).

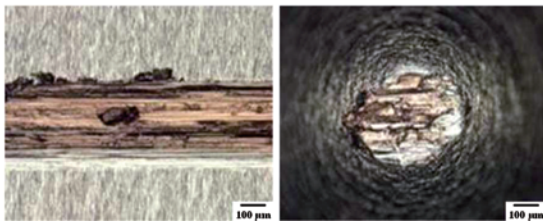


Fig. 4 Micrographs of the worn surface for base (left) and indent (right) specimens (t 0.2 mm, Ag plating 1 μm , $W=3.0$ N, $v=100$ mm/min, $n=50$ times).

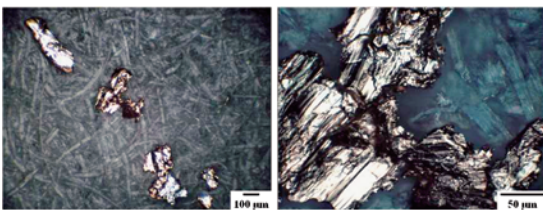


Fig. 5 Micrographs of the wear particles collected after the experiment.

移着粒子の残留や凝着による表面の荒れが確認でき、いずれも基材の銅が露出していることがわかる。実験中には、図5に示すような金属色のシビア摩耗粒子の排出も観察された。摩耗粒子表面の拡大像から、銅褐色のみならず銀白色部も確認することができ、凝着摩耗による相互移着を伴いながら移着成長過程^{5,6)}を経て生成したものとと言える。

3.2 銀めっき層の摩耗に伴う AE 信号変化

3.2.1 ベース側 AE 信号の変化

つぎに、上述した銀めっき層の摩耗に伴う AE 信号変化について考察する。まずは、ベース側の AE 信号変化について述べる。図6~8は、銀めっき厚み 5 μm を使用して摺動実験を行った結果である。図7は、AE 信号 (AE 平均値電圧) の変化であり、図6の実験に対応している。なお、ベース側の AE センサから検出され

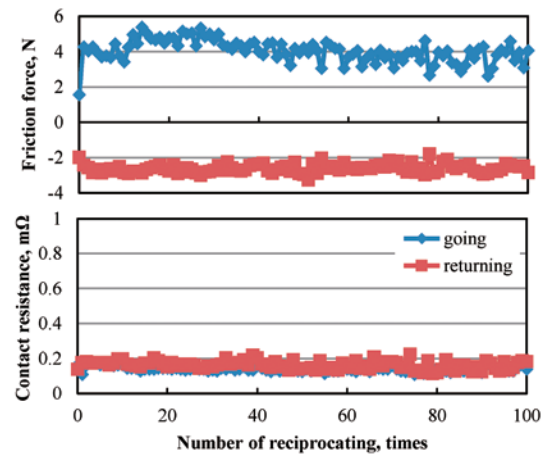


Fig. 6 Changes in the friction force and the electrical contact resistance (t 0.64 mm, Ag plating 5 μm , $W=3.0$ N, $v=200$ mm/min).

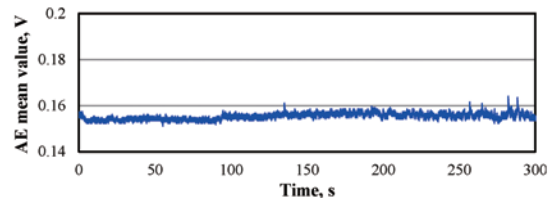


Fig. 7 Change in the AE mean amplitude value measured by the base side AE sensor corresponding to the experimental data in Fig. 6 (HPF: 100 kHz).

た信号変化を示している。図 6 の結果から、初期なじみの後は摩擦力および接触電気抵抗の変化が安定していることがわかる。

図 8 の摩耗面の観察結果から、ベース上には銀白色の移着粒子、インデント側にも銀白色の凝着が確認できる。また、ベース摩耗痕の断面形状測定結果から、摩耗深さは $5\ \mu\text{m}$ 程度であり、銀めっき層が所々で残留していると思われる。そのため、下地ニッケル層による接触電気抵抗の上昇はみられなかったと考える。摩耗痕深さが深い領域では、局所的な銅の露出も観察された。したがって、図 4 のような銅の露出が明確でない場合は、摩擦力および接触電気抵抗の上昇は生じないと言える。

図 7 に示すように、銀めっき層（ニッケル層も含む）の摩耗過程で計測される AE 平均値電圧変化は、後述する銅露出時とは異なり、大きな突発型 AE 信号の発生がみられない。AE 信

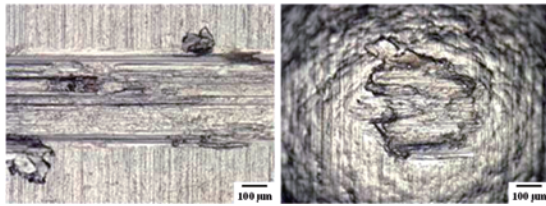


Fig. 8 Micrographs of the worn surface for base (left) and indent (right) specimens ($t = 0.64\ \text{mm}$, Ag plating $5\ \mu\text{m}$, $W = 3.0\ \text{N}$, $v = 200\ \text{mm/min}$, $n = 100$ times).

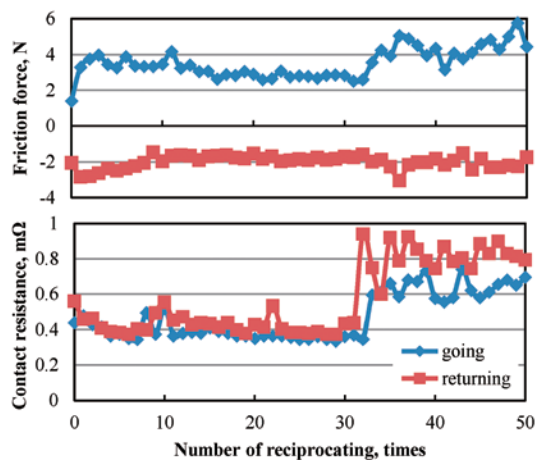


Fig. 9 Changes in the friction force and the electrical contact resistance ($t = 0.2\ \text{mm}$, Ag plating $1\ \mu\text{m}$, $W = 3.0\ \text{N}$, $v = 200\ \text{mm/min}$).

号振幅は、わずかではあるが摩耗の進行に伴い上昇している。さらに、最後の方でみられる小さな突発型 AE 信号は、小規模の移着成長によるものとする。

図 9~11 は、銀めっき厚み $1\ \mu\text{m}$ を使用して摺動実験を行った結果であり、3.1 節で述べた結果と同様であることがわかる。図 10 は、ベース側 AE センサから計測された AE 平均値電圧の変化であり、図 9 の実験に対応する。ここで、図 10 における $0 \sim 20\ \text{s}$ の区間は、先に図 6~8 で示した銀めっき層が摺動面上に残っている状態とみられる。図 11 の摩耗面の観察結果から、ベース上に銅の露出が認められ、インデント側にも凝着が観察できる。この銅の露出によって表面が粗くなり、接触電気抵抗および摩擦力が上昇すると考える。

図 9 における遷移点 (30 回往復付近) は図 10 の $100\ \text{s}$ 付近に対応する。よって、AE 信号の変化後に接触電気抵抗が変化する傾向があることがわかる。これは、微視的な摩耗過程を AE 計測で捉えているためである。異なる摩擦条件 (荷重, 摩擦速度) の実験においても、突

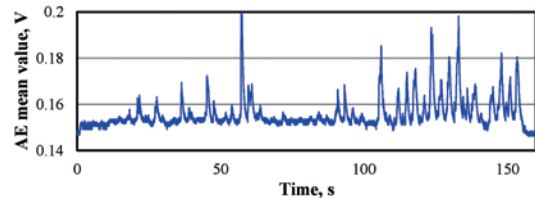


Fig. 10 Change in the AE mean amplitude value measured by the base side AE sensor corresponding to the experimental data in Fig. 9 (HPF: $100\ \text{kHz}$).

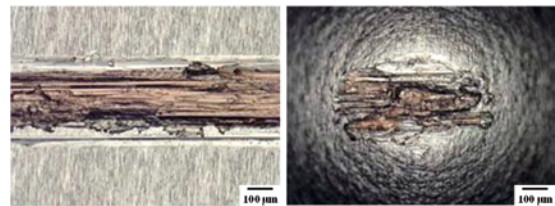


Fig. 11 Micrographs of the worn surface for base (left) and indent (right) specimens ($t = 0.2\ \text{mm}$, Ag plating $1\ \mu\text{m}$, $W = 3.0\ \text{N}$, $v = 200\ \text{mm/min}$, $n = 50$ times).

発型 AE 信号の活性化とその直後の低下時に、接触電気抵抗が上昇する傾向が確認された。この AE 平均値電圧の変化は、移着成長過程に伴う AE 信号の活性化および移着粒子脱落時に伴う低下^{7,8)} と考える。

3.2.2 インデント側 AE 信号の変化

50 回の往復摺動実験（銀めっき厚み 1 μm を使用）で得られた二つの結果を比較しながら、インデント側の AE 信号変化について述べる。摩擦力および接触電気抵抗の変化は、図 3 や図 9 とほぼ同様であったため省略する。図 12 は、インデント側 AE センサから計測された AE 平均値電圧の変化である。この二つの実験結果における AE 信号レベルの差は、摩耗の進行状態の差であると考ええる。

図 13 は、これら二つの実験後のインデント

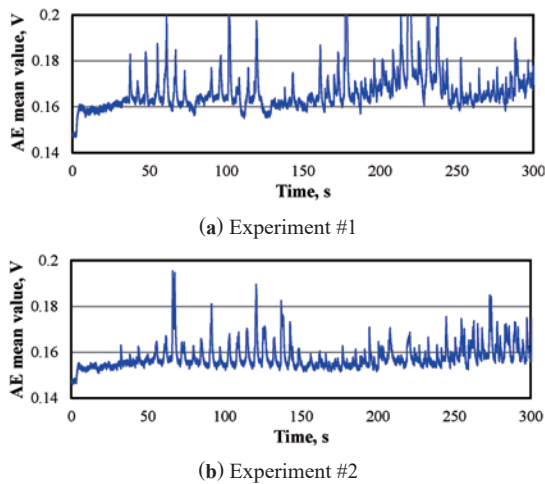


Fig. 12 Change in the AE mean amplitude value measured by the indent side AE sensor ($t=0.2$ mm, Ag plating 1 μm , $W=3.0$ N, $v=100$ mm/min, $n=50$ times, HPF: 100 kHz).

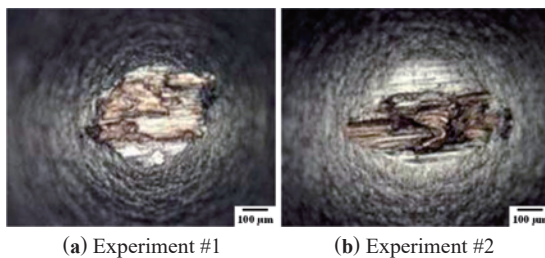


Fig. 13 Micrographs of the worn surface for indent specimens corresponding to the experimental data in Fig. 12(a) and (b).

摩耗面の顕微鏡観察結果である。実験後の摩耗面観察および摩耗痕断面の形状測定の結果から、実験 #1 の摩耗痕幅（摩耗体積）が大きく、損傷に差があることが確認された。そのため、図 12(a) 実験 #1 においては、(b) 実験 #2 よりも早期に AE 信号が活発化している。また、ベース側に AE センサを取り付けて検出された AE 信号変化との違いとして、インデント側の AE 信号変化は後半上昇傾向にあることがわかった。これは、繰返し摩擦によるインデント側の損傷状態を捉えていると考えることができる。移着量によって AE 信号振幅が変化することから、各めっき層の移着成長過程の諸相⁹⁾ に基づいた AE 信号変化を呈すると考える。

3.3 AE 信号変化に基づく摩耗フェーズ

図 14 は、150 回の往復摺動実験（銀めっき厚み 5 μm を使用）で得られた摩擦力、接触電気抵抗、AE 平均値電圧の変化である。摩擦力は、摺動回数 100 回付近から上昇し、最終的に変動が大きくなっていくことが確認できる。接触電気抵抗は、摩擦力が上昇する前の摺動回数 96 回で急激に上昇している。これは、基材の銅が露出して銅同士の摩擦が生じ、摺動面が大きく荒れた影響と考える。

デュアルセンシングした二つの AE 信号の変化を比べてみると、基本的に同様の変化を示しているが、部分的に異なる変化を示す箇所がある。これは、塑性変形や移着現象がどちらの表面で進行しているかを捉えているものと考ええる。また、摺動回数 20 回付近で突発型 AE 信号が検出されており、摩擦力や接触電気抵抗からは判断が困難な初期の現象変化も AE 計測では捉えられていると言える。

AE 信号の変化の特徴から、大きな突発型 AE 信号が発生しない領域（フェーズ I）、大きな突発型 AE 信号が発生して徐々に変動が大きくなる領域（フェーズ II）、大きな突発型 AE 信号の発生が活発になり大きな変動が現れる領域（フェーズ III）という三つのフェーズに分類した。このフェーズごとの違いを明確にするため、フェーズ I およびフェーズ II 初期でそれぞれ試験を停止し、その摩耗面を EDS

(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 分析した結果を図 15 に示す. この元素マッピングの結果から, (a) フェーズ I では最表面の銀のみであることがわかる. 一方, (b) フェーズ II 初期に停止した場合, 下地めっきのニッケルが微小領域で存在していることがわかる. したがって, 突発型 AE 信号の発生が大きな移着に伴い

生じたものと説明できる. この際, フェーズ II 初期のベース側で大きな突発型 AE 信号が検出された時点で試験を停止しており, ベース側からインデント側に移着した際の AE 信号を検出したと考える.

以上の結果から, めっき層の摩耗過程を AE センシングで認識できる可能性が示された.

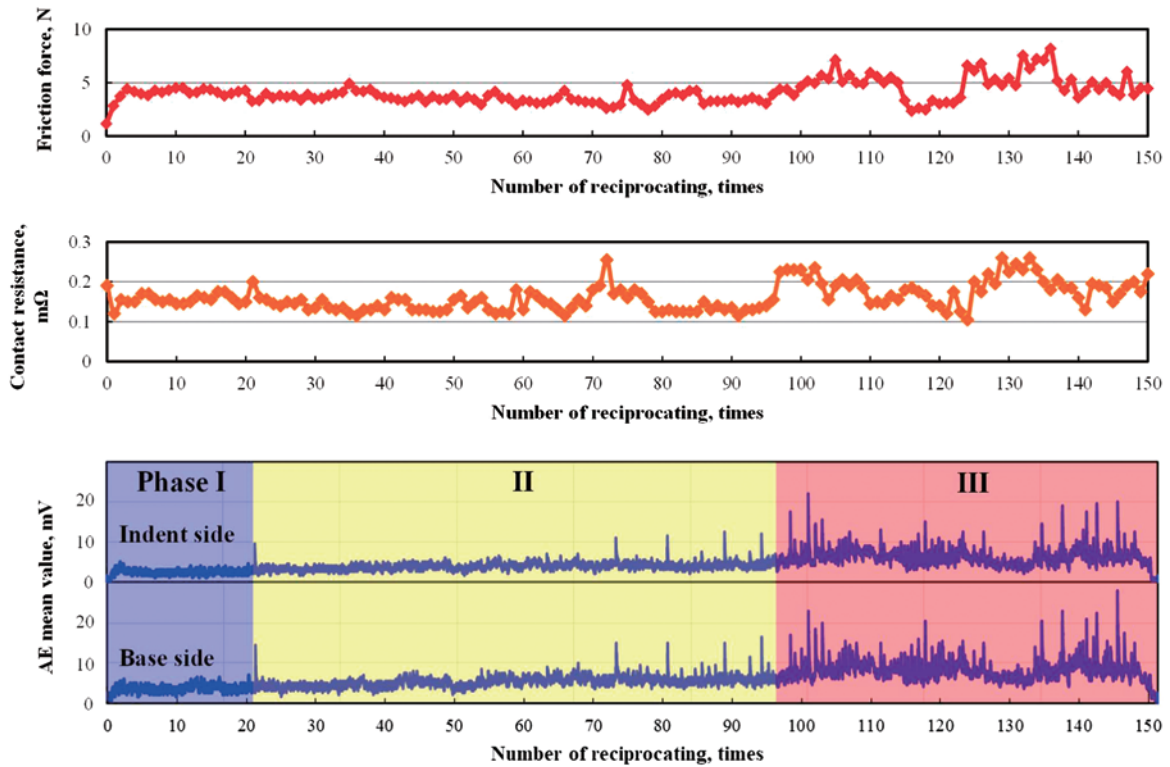


Fig. 14 Changes in the frictional force, contact electrical resistance and AE signals for the three phases of wear (t 0.64 mm, Ag plating 5 μm , W = 3.0 N, v = 200 mm/min, HPF: 50 kHz).

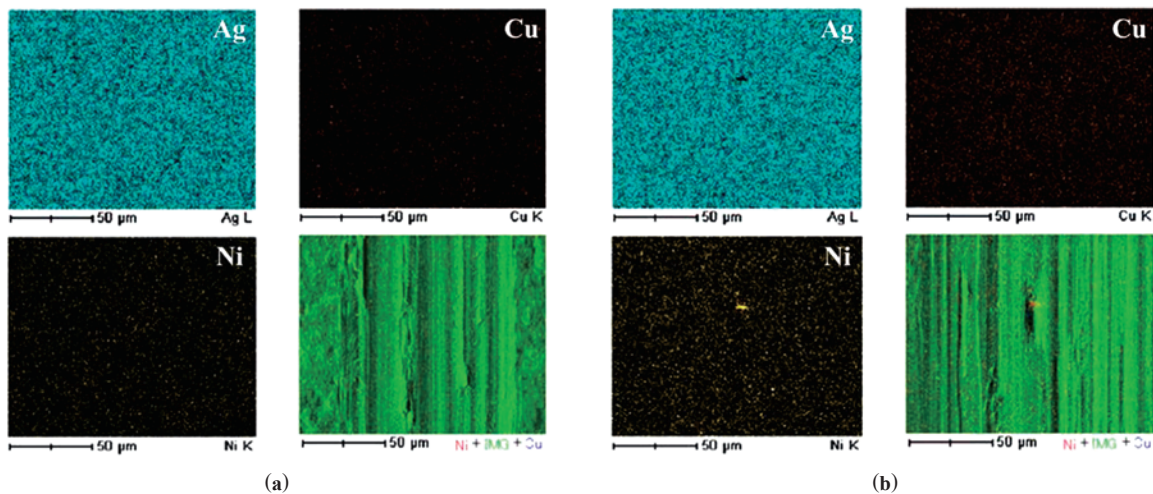


Fig. 15 Elemental mapping images by EDS analysis for the worn surfaces of the base specimens obtained at (a) phase I and (b) phase II.

4. 結 言

本研究では、ピン・オン・プレート型往復摺動試験機を用いて、銀めっきが施されたインデントおよびベース試験片の双方にAEセンサを取り付け、AE信号のデュアルセンシングを行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 接触電気抵抗や摩擦力の上昇前にAE信号の変化が確認されることがわかった。
- (2) 突発型AE信号の活性化とその直後の低下時に接触電気抵抗が上昇する傾向がみられた。
- (3) 同時計測した二つのAE信号の変化は基本的に同様の傾向を示すが、どちらの摩擦面で塑性変形や移着現象が進行しているかによって、異なる変化を示す箇所があることがわかった。
- (4) AE信号の変化を三つのフェーズに分類できることがわかった。表面観察およびEDS分析から、フェーズⅠでは銀めっき層の摩耗進行過程、フェーズⅡではニッケル下地が露出してニッケルの摩耗が進行していく過程、フェーズⅢでは接触電気抵抗が上昇し銅基材が露出している過程であることが確認された。これらにより、摩擦力や接触電気抵抗の変化からでは把握できない銀めっき層の摩耗過程をAE信号変化から認識できる。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金〔基盤研究(C) 課題番号19K04154〕による補助のもとで行われたことを付記し、ここに謝意を表す。また、実験補助いただいた埼玉工業大学工学部機械工学科 山中颯馬 氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 長谷亜蘭：摩耗計測の進化と可能性，トライボロジスト，**64**，5 (2019) pp.277-281.
- 2) 長谷亜蘭：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) pp.856-861.
- 3) 長谷亜蘭，佐藤陽介，篠原圭介，荒井健太郎：デュアルAEセンシングを用いた接点材料の摩耗機構解明（第1報）—単一センサによる摩耗現象把握—，第18回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集，(2020) pp.142-143.
- 4) 長谷亜蘭，佐藤陽介，篠原圭介，荒井健太郎：デュアルAEセンシングを用いた接点材料の摩耗機構解明（第2報）—AEセンサ取り付け位置の検討—，第18回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集，(2020) pp.144-145.
- 5) T. Sasada, S. Norose: The Formation and Growth of Wear Particles through Mutual Material Transfer, Proc. JSLE-ASLE Int. Lubrication Conf., Amsterdam 1975, (1976) pp.82-91.
- 6) A. Hase, H. Mishina: Wear Elements Generated in the Elementary Process of Wear, Tribology International, Vol.42 (2009) pp.1684-1690.
- 7) 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, Vol.3, No.4 (2009) pp.333-344.
- 8) 大御堂智，長谷亜蘭，三科博司，小林 晋：高速 in situ 観察・アコースティックエミッション計測による移着膜形成過程の評価・診断，第15回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集，(2016) pp.69-71.
- 9) 三科博司，蒔田裕之，笹田 直，野呂瀬進：純金属間摩耗粉形成における移着成長過程の諸相，潤滑，**24**，7 (1979) pp.466-472.