

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560134
 研究課題名（和文） アコースティックエミッションを用いたトライボロジー現象の認識・評価
 研究課題名（英文） Recognition and Evaluation of Tribology Phenomena Using Acoustic Emission Techniques
 研究代表者
 氏名（ローマ字）：三科 博司（MISHINA HIROSHI）
 所属機関・部局・職：千葉大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50142641

研究成果の概要：トライボロジー（摩擦・摩耗）現象下で生じるアコースティックエミッション（AE）を AE センサにより AE 信号として検出・監視することで、トライボロジー現象の認識・評価への応用を図る。本研究では、すべり摩擦下の凝着摩耗とアブレシブ摩耗に関して、巨視的現象から微視的現象までの摩擦・摩耗現象と AE 信号の対応関係を調査した。本研究の結果、各摩耗現象における AE 源を明らかにし、様々なトライボロジー特性と AE 信号の関係を見いだした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー，アコースティックエミッション，モニタリング，摩擦，摩耗，移着，in-situ，摩耗素子

1. 研究開始当初の背景

アコースティックエミッション（以下、AE）は、固体が変形・破壊するときに生じる弾性波である。この AE 技術を用いて、機械要素間における接触・相対運動をともなう動的部分のトライボロジー現象（摩擦・摩耗現象）の認識および評価が可能と考えられる。定常的に進行していく機械劣化の大部分は摩耗によるものであり、焼け付きなどの突発的な機械の破壊に至る場合もある。現在、潤滑剤やトライボマテリアルなどを考慮したトラ

イボ設計により、潜在的な寿命の延長はある程度可能であるが、トライボロジー現象自体を制御することまでは不可能とされている。したがって、摩擦系におけるトライボロジー現象を監視することで、異常の早期検出および異常に至る以前の定常的な摩耗進行などの認識・評価が重要となる。

一般に、トライボロジー現象の異常診断法には、振動法、温度法、電気抵抗法、油分析診断法などが用いられている。しかし、これらの方法はトライボロジー現象の副次的評

価であり、必ずしもトライボロジー現象に関する情報が十分であるとはいえない。対して、AE は変形・破壊現象に対する検出感度が高く、金属材料分野では材料評価や破壊機構評価などのミクロ的な現象解明にも幅広く用いられている。AE は変形・破壊に付随して生じることから、上述の診断方法に比べ摩擦・摩耗現象に密接な情報を多く含んでおり、直接的な評価が可能と思われる。また、AE は現在の状況を動的にリアルタイムで調べることができるため、トライボロジー現象（摩耗形態、摩耗量、表面損傷など）のインプロセス計測に非常に有効と考えられる。

2. 研究の目的

AE 法を用いたトライボロジー現象の認識および評価の実現のためには、摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関関係を見いだすことが必須となる。摩擦・摩耗現象は少しずつ解明されつつあるが、いまだ解明されない複雑な現象を含んでいる。この問題を回避するために、一般的に行われる繰返し摩擦による実験だけでなく、微視的な現象を追究するための in-situ 観察（その場観察）実験や微小すべり摩擦実験を試みる。これら様々な摩擦方式の実験を行い、すべり摩擦における凝着摩耗（くっついて千切れる摩耗）とアブレシブ摩耗（削り取る摩耗）に関して、巨視的現象から微視的現象までの摩擦・摩耗現象と AE 信号の対応関係（特に、最も重要な摩耗形態の一つである凝着摩耗を対象として、その凝着摩耗の素過程と AE 信号との相関関係）を明らかにすることを本研究の目的とする。そして、これによって得られた結果に基づき、AE 技術を用いたトライボロジー現象の認識と評価を行うための総合的な評価方法の検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、巨視的レベルから微視的レベルまでの摩擦・摩耗過程で発生する AE 信号とトライボロジー現象の関係を調べるため、数種類の金属（Fe, Cu, Al などの純金属および黄銅やりん青銅などの合金）を用いて、次に述べる三つの摩擦試験を行った。

(1) 繰返し摩擦（ピン・オン・シリンダ方式）により（図1）、生成・脱落した摩耗粒子や摩耗面の表面粗さ、摩耗量などと AE 信号との関係を調査した。

摩擦条件は、垂直荷重：20 N、摩擦速度：0.5 m/s および 1.0 m/s、無潤滑および潤滑（流動パラフィン）下で行った。AE 計測は、共振型 AE センサ（共振周波数：1 MHz）を使用し、AE 増幅率：60 dB、ハイパスフィルタ：500 kHz、ローパスフィルタ：なしとした。

(2) 顕微鏡観察部に摩擦系を組み込んだ実験装置（in-situ 観察装置、ピン・オン・ブロック

方式）を用いて（図2）、摩擦・摩耗現象の素過程をリアルタイムで観察しながら AE 信号および AE 波形を計測した。そして、AE 信号の大きさだけでなく、AE 波形の周波数解析を行い、現象や材料と周波数特性との相関関係を調査した。

摩擦条件は、垂直荷重：2.4~9.8 N、摩擦速度：0.02 mm/s、無潤滑（アブレシブ摩耗実験のみ潤滑）下で行った。AE 計測は、広帯域型 AE センサ（周波数特性：500 kHz~4 MHz）を使用し、AE 増幅率：86 dB、ハイパスフィルタ：100 kHz、ローパスフィルタ：なしとした。

(3) 微小すべり摩擦試験（ピン・オン・ブロック方式）を行い（図3）、試験片の摩擦表面

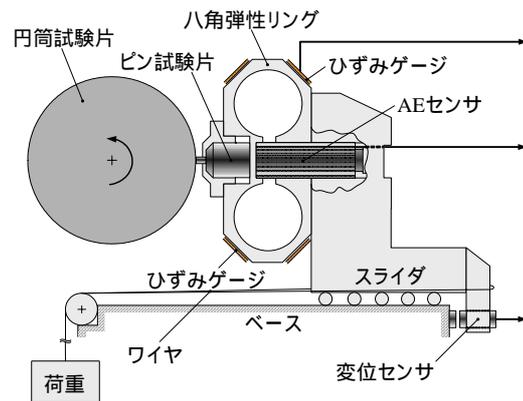


図1 繰返し摩擦実験装置

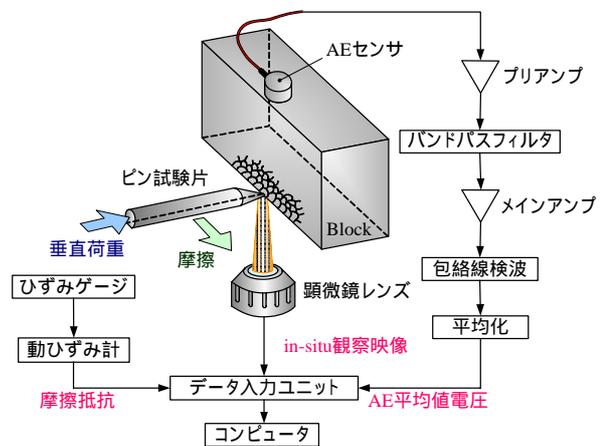


図2 in-situ観察実験装置（摩擦面顕微鏡）

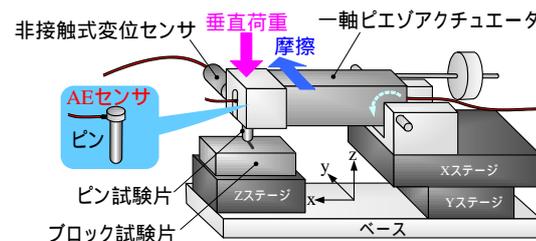


図3 微小すべり摩擦実験装置

に凝着し残留した摩耗素子（摩耗粒子のもっとも素となる粒子）の大きさや分布状況を原子間力顕微鏡（AFM）で観察した。そして、計測したAE信号の大きさとの対応を調べ、用いた金属の材料特性がAE信号に及ぼす影を調べた。

摩擦条件は、垂直荷重：0.49 N、摩擦速度：100 $\mu\text{m/s}$ 、無潤滑（アプレシブ摩耗実験のみ潤滑）下で行った。AE計測は、広帯域型AEセンサ（周波数特性：500 kHz～4 MHz）を使用し、AE増幅率：90 dB、ハイパスフィルタ：500 kHz、ローパスフィルタ：3 MHzとした。

4. 研究成果

本研究で明らかになった事柄を以下にまとめる。

- (1) AE法は、摩擦係数の変化から検出できない摩耗粒子の脱落などのトライボロジー現象を把握することができる。
- (2) 無潤滑繰返し摩擦下で計測されるAE信号は、摩擦界面に介在する摩耗粒子の生成過程およびその振舞いの影響を大きく受ける。
- (3) 摩擦界面の損傷（両摩擦表面粗さ Ra の和）は、摩耗粒子（移着粒子）の生成過程における凝着や摩耗粒子の摩擦界面での振舞いの結果であり、AE信号の変動幅とよい相関を示

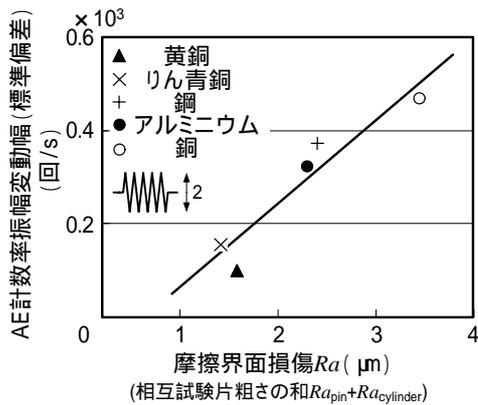


図4 摩擦界面損傷とAE信号変動幅の関係

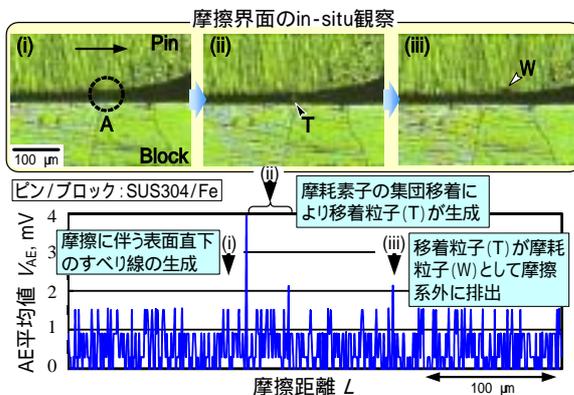


図5 移着粒子生成時のAE信号変化

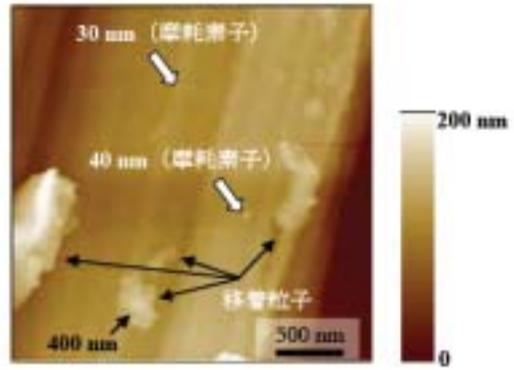


図6 摩耗素子および移着粒子のAFM画像例（Cu/Cu摩擦時）

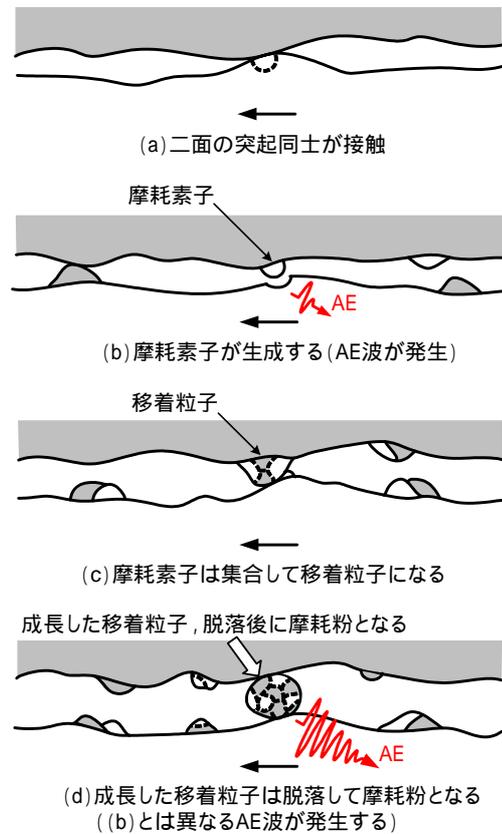


図7 摩耗粒子生成（移着成長）過程とAEの発生

す（図4）.(4) AE平均値やAE計数総数の計測から、摩耗粒子の数や大きさを評価できる可能性を示唆することができる。

(5) 摩擦に伴うすべり線（帯）の生成によって定常的にAEが発生する。

(6) 摩擦表面の塑性変形や摩耗（摩耗粒子の生成・移着）に起因したAE信号レベルの上昇や突発型AEが確認できる（図5）. 図5 (i) のA部分に注目していくと、まず移着粒子(T)の生成時にAE平均値が大きく上昇する〔図5 (ii)〕. これは、凝着部のせん断時に摩耗素

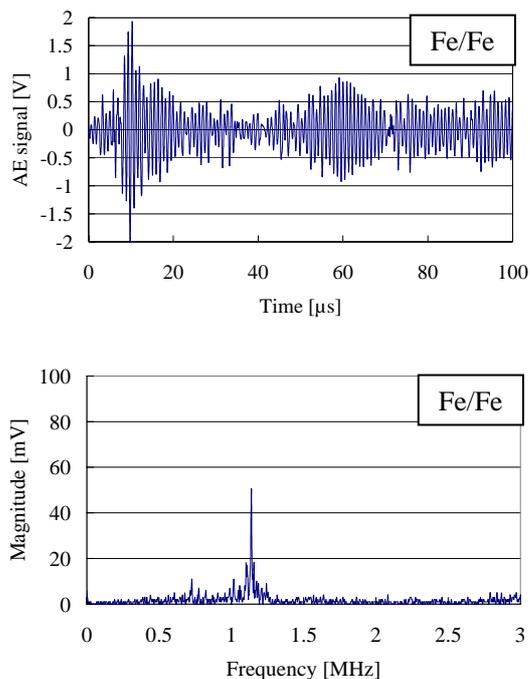


図8 凝着摩耗時の AE 信号波形 (上) と周波数分布 (下) (Fe/Fe 摩擦時)

子の集団移着で発生した突発型 AE 信号である。一つの摩耗素子の移着で生じる AE 波はとても小さいが、それらが集団で移着することで AE 波の位相がそろい、検出可能な大きさの AE 信号となるのである。また、移着粒子が摩耗粒子 (W) として摩擦系外に排出されるときにも、AE 平均値の上昇が認められた〔図 5 (iii)〕。これは、摩耗粒子自身に蓄えられた弾性ひずみエネルギーの解放によるものである。

(7) 凝着摩耗では、図 6 に示すような摩耗素子および移着粒子の生成時に、信号密度の高い高周波の突発型 AE 信号が検出される (図 7)。その AE 信号の周波数分布は、材料に関係なく高周波領域 (約 1.1 MHz 付近) に周波数ピークが存在した (図 8)。

(8) AE パルス (突発型 AE 信号) は、摩耗素子の集団移着によって生じる。この AE パルスエネルギー (最大振幅値と継続時間の積) の大きさは、摩耗素子の生成量と比例関係にあり、摩擦させた材料同士の凝着力が関係している。

(9) アブレブ摩耗では、信号密度の低い低周波の突発型 AE 信号が検出される。その AE 信号の周波数分布は、低周波領域 (0.25 ~ 1 MHz 付近) に周波数ピークをもつ信号成分が存在した (図 9)。この AE 周波数のピークは、塑性変形、き裂の生成・進展、破断時に検出される AE 信号の特徴である。

本研究成果より、AE 信号レベルやその変動の計測から、摩耗粒子形態やその数・大きさ、摩擦界面の損傷状態などを認識・評価でき

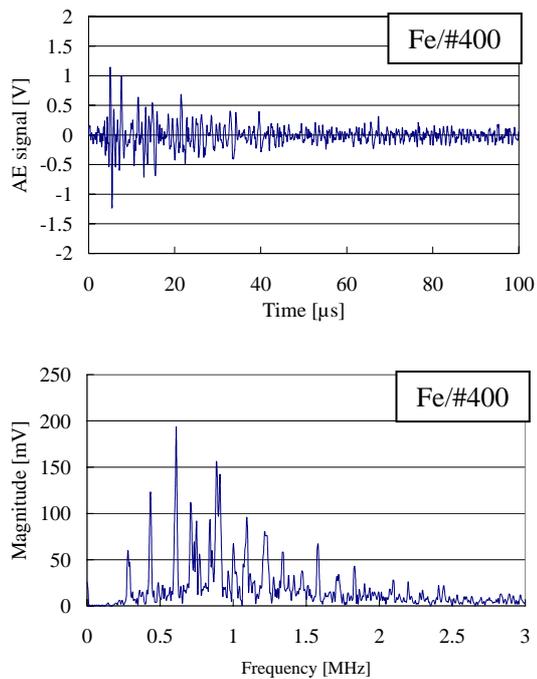


図9 アブレブ摩耗時の AE 信号波形 (上) と周波数分布 (下) (Fe/#400 研磨紙摩擦時)

ると考える。また、AE 信号の周波数分布の特徴から、AE 信号の周波数フィルタ処理を用いて摩耗形態の弁別も可能といえる。以上のように、摩耗粒子の脱落のような巨視的な現象から、直径 10 ~ 30 nm 程度の摩耗素子生成のような微視的な現象まで、トライボロジー現象の認識・評価に有効な対応関係を見いだすことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

三科博司, 長谷亜蘭, トライボロジー特性の評価と摩擦・摩耗試験機, 月刊トライボロジー, 第 8 号, 20-23, (2008), 査読無

A. Hase, M. Wada, H. Mishina, Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition, Tribology Online, Vol.3, No.5, 298-303, (2008), 査読有

長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司, 摩擦・摩耗の素過程で生じるアコースティックエミッション(摩擦面の in-situ 観察と AE 信号), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.748, 3042-3049, (2008), 査読有

三科博司, 長谷亜蘭, AE 法による摩擦・摩耗現象の認識と評価, 潤滑経済, No.523, 33-39, (2009), 査読無

A. Hase , H. Mishina , Wear Elements
Generated in the Elementary Process of
Wear , Tribology International ,(in-press) ,
査読有

〔学会発表〕(計6件)

長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司, AE 法に
よる摩擦・摩耗現象の認識と評価, トライ
ボロジー学会 (2008年5月12日),
東京

長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司, シビア・
マイルド遷移における摩耗現象と AE 信
号, トライボロジー学会 ,(2008年5月
14日), 東京

長谷亜蘭, 三科博司, 摩耗素子の生成に
及ぼす影響因子, トライボロジー学会,
(2008年9月16日), 名古屋

佐藤悠樹, 長谷亜蘭, 三科博司, 和田正
毅, 摩擦・摩耗の素過程で生じるアコー
スティックエミッション(第2報) 摩
耗素子生成時の AE 信号 , トライボロ
ジー学会 ,(2008年9月16日), 名古
屋

A. Hase, H. Mishina , Wear Elements
Generated in the Elementary Process of
Wear , the 35th Leeds-Lyon Symposium on
Tribology (2008年9月12日), England

A. Hase, Y. Sato, H. Mishina, M. Wada ,
Acoustic Emission Generated in the
Elementary Process of Wear , the 2nd Int.
Conf. on Advanced Tribology ,(2008年12
月3日), Singapore

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://www.em.eng.chiba-u.jp/~lab4/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三科 博司(Hiroshi Mishina)・千葉大学・
大学院工学研究科・准教授・50142641

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者