

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360066

研究課題名(和文) SPM-AEシステムを用いた摩耗基礎過程の総合的究明

研究課題名(英文) Studies in prime process of adhesive wear by means of SPM-AF system

研究代表者

三科 博司 (Hiroshi, Mishina)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50142641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、凝着摩耗の素になる粒子，すなわち「摩耗素子」の生成を観察し，その生成機構を解明するため原子間力顕微鏡(AFM)などの走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用いるとともに，摩耗素子の生成過程をアコースティックエミッション(AE)の発生によって検出する装置を製作し，それらの測定によって摩耗の基礎過程を明らかにし，凝着摩耗の摩耗式を提案した．

研究成果の概要(英文)：This investigation was revealed the prime process of adhesive wear from the generation of wear elements to wear particles by means of SPM-AE system. From the experimental results we established wear equation for adhesive wear through the elementary process of wear.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・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 走査型プローブ顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

凝着摩耗は移着成長過程を経て摩耗粉が発生することは知られている。しかしながら、移着成長過程の素となる粒子(摩耗素子と呼ばれる)の生成過程についての研究はその端緒が開かれたばかりである。摩耗過程を正確にかつ精密に究明するためには、最も基本的な素過程からの解明が必要であり、ナノメートルレベルの観察なくしてはその解明は成り立たない。他方、アコースティックエミッション(AE)法は、一般的には機械の運転状態を検知し、そのメンテナンスに適用されているが、摩耗素過程を含めた摩耗過程への直接的な関係の議論はなされていない。こうした背景のもと、摩耗の最も素になる現象の摩耗素子生成基礎過程を明確にすることが求められ、その摩耗素過程を観察・検知することが可能な装置として、「SPM-AE システム装置」を構築する必要があった。

2. 研究の目的

現在の凝着摩耗機構に関する研究から、マクロなレベルの摩耗現象については、多くの実験・観察から明らかにされているが、摩耗の起源となる摩耗素過程の解明は未解決な重要なテーマである。筆者らは、凝着摩耗の素になる粒子、すなわち摩耗素子として数 nm ~ 数十 nm の粒子の生成を提案しているが、その発生機構の解明には原子間力顕微鏡(AFM)などの走査型プローブ顕微鏡(SPM)が重要な手段となる。しかしながら、SPM の観察を凝着摩耗の素過程の解明に役立たせる方法の研究は着手されていないのが現状である。本研究は、凝着摩耗現象の起源を見だし、そこから最終的なマクロな摩耗までの過程を解明するため、SPM と AE 法を組み合わせた装置を構築し、それを用いて摩耗の素過程を総合的に解明することを目的とした。

3. 研究の方法

走査型プローブ顕微鏡(SPM)を購入し、そのステージ上にピエゾアクチュエータによって駆動する摩擦摩耗試験装置を設置し、摩耗の素過程とくに摩耗素子を測定・観察できる SPM を用いた装置を構築した。次いで、摩擦・摩耗試験系に、摩耗によって発生するアコースティック・エミッション(AE)信号を検知する測定系を設置した。SPM と AE を組み合わせた装置により、摩耗素子そして摩耗粉生成過程で発生する AE 波の波形、エネルギー分布、周波数などを解析し、摩耗基礎現象を SPM 観察と分析により解明した。

図 1 がピン/ブロック型の微小すべり摩擦試験機である。これを用いて摩擦実験を実施し、その直後に摩擦面の SPM 観察を行った。AE センサは、ピン試験片に取り付けられ、摩擦・摩耗によって発生した AE 信号を計測し

た。AE センサからの出力信号は、約 90 dB の増幅を行った後、主としてノイズ信号を除去する目的で、ハイパスフィルタ処理をした。AE 波は、高速波形デジタイザを用いて AE 生波形の検出・記録を行い、実験後に周波数解析を行った。この摩擦中に計測された AE 信号波形と SPM で観察した摩耗素子の生成量との相関係について検討を行った。

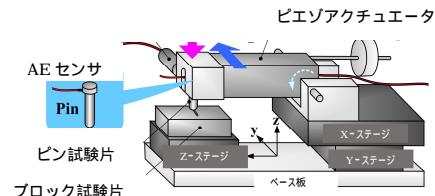


図 1 微小すべり摩擦試験機

4. 研究成果

本研究では、まず凝着摩耗の起源となる摩耗素子の生成を AFM によって観察した。図 2 は、Fe の摩擦によって発生した摩耗素子と移着粒子の AFM 観察結果である。摩耗素子のサイズは、数 nm ~ 数十 nm である。摩耗素子のサイズは金属の種類には依存しない。図 2 に黒い矢印で示した粒子は移着粒子である。移着粒子はさらに小さい粒子、すなわち摩耗素子の集合した粒子であることがわかる。

図 3 に摩耗素子生成時の AE 波形の周波数特性を示す。凝着摩耗の摩耗素子生成時には、1.1MHz 付近に突発的な AE 波が発生する。本研究では、いくつもの金属について摩耗素子

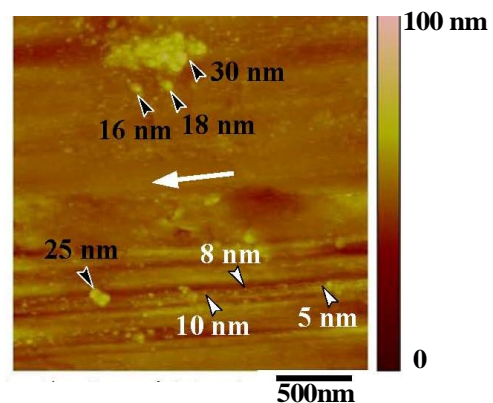


図 2 Fe における摩耗素子(白い矢印)と移着粒子(黒い矢印)

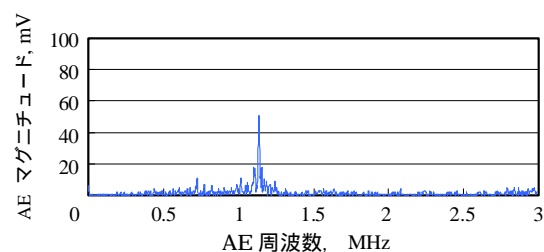


図 3 摩耗素子生成時の AE 周波数特性

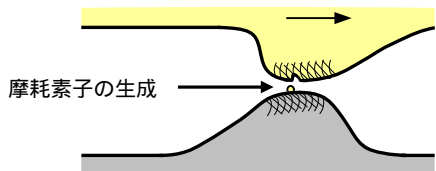


図4 摩耗素子が発生する凝着摩耗の素過程

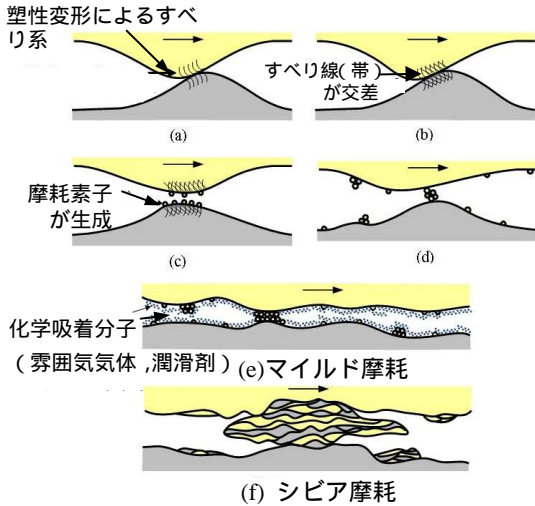


図5 凝着摩耗のメカニズムのモデル

を観察し、同時に摩擦面直下の塑性変形を観察することによって、図4に示す摩耗素子の生成機構、つまり摩耗の素過程を明らかにした。摩耗素子はジャンクションの塑性変形によって起こるすべり系が交叉した表面部から発生すること。さらに、摩耗素過程の後に図5(d)~(f)のような摩耗過程を経る凝着摩耗のメカニズムを明らかにした。

以上のような凝着摩耗のメカニズムと同時に凝着摩耗において発生するAE信号を解析した。いくつもの摩擦材料について実験した結果、摩擦材料の組み合わせによって、AE信号の発生頻度およびAE信号の振幅が異なることがわかった。図6は、凝着力とAE計数率(単位摩擦距離当たりのAE発生数)の関係である。図6からわかるように、両者は比例関係にある。これは、凝着力の違いによって、摩耗素子の生成量が異なるためといえる。図7は、摩耗素子生成量とAEパルスエネルギーの関係を示している。これより、最大振幅値と継続時間の積で求められるAEパルスエネルギー(突発型AE信号のAEエネルギー)の大きさは、摩耗素子の生成量とよい相関を示すことがわかる。この微視的な対応関係が、巨視的な長距離の摩擦実験で得られる摩耗量とAE信号の定量的関係の根底となっていると考える。これらの結果から、摩耗素子の集団移着で突発型AE信号が発生するモデルを提案した。それとともに、AE信号計測によって、摩耗の素過程に関わる凝着力や摩耗素子生成量など微視的なトライボロジー特性評価が可能であることを示すことができた。

SPM-AEシステムを用いた観察と解析の結

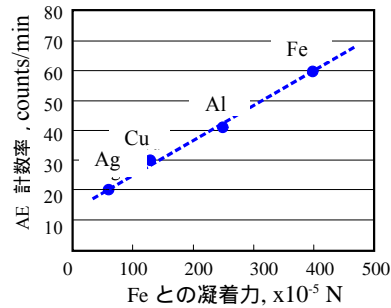


図6 凝着力とAE計数率の関係

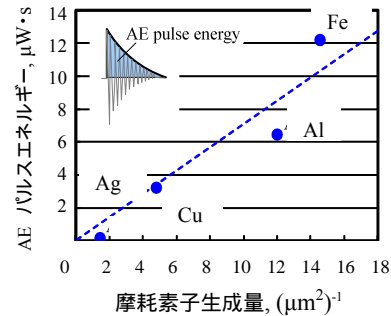


図7 摩耗素子生成量とAEパルスエネルギーの関係

果から、摩耗素子が発生する素過程から最終的な凝着摩耗の摩耗粉発生メカニズムを明らかにすることができたことから、物理的、化学的作用を考慮した新たな凝着摩耗の摩耗式を導いた。すなわち、固体表面間のジャンクションから発生する摩耗素子の数が固体間の凝着力に依存すること。さらに、摩耗形態が雰囲気物質の化学吸着活性に依存することから、摩耗量(あるいは、摩耗体積)がこれらの因子によって決定することを示した。

凝着摩耗の摩耗式は、上述した作用を考慮して以下のような式となる。ジャンクションの平均半径を a 、摩耗素子の平均半径を b とし、ひとつの摩耗素子を半球体と考えその集合体が摩耗粉と考える。ここで、摩擦条件として、荷重を P 、摩擦距離を l 、軟らかい方の材料の降伏応力を p_m とすると、ジャンクションの単位面積あたりに生成する摩耗素子の個数を n とするとき、 n は固体間の凝着力に依存する物理量となる。また、摩耗状態を決める化学的因子として λ を導入する。この化学的因子 λ は雰囲気物質の固体表面への化学吸着活性に依存しており、凝着摩耗の摩耗形態を決定する。

以上の物性値を用いたときの凝着摩耗の摩耗体積 V が、

$$V = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{n}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^3 \cdot \left(\frac{P \cdot l}{p_m}\right)$$

と表すことができることを本研究で提案することができた。

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 8 件)

1. A. Hase, M. Wada, T. Koga, H. Mishina: The Relationships between Acoustic Emission Signals and Cutting Phenomena in Turning Process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 70, pp. 947-935 (2014) 査読有 DOI:10.1007/s00170-013-5335-9
2. A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Microscopic Study on the Relationship between AE Signal and Wear Amount, Wear, Vol.308, pp.142-147(2013)査読有 DOI: 10.1016/j.wear.2013.08.005
3. H. Mishina, A. Hase: Wear Equation for Adhesive Wear Established through Elementary Process of Wear, Wear, Vol.308, pp.186-192 (2013) 査読有 DOI:10.1016/j.wear.2013.06.016
4. H. Mishina, T. Kaji, H. Ikegami, R. Ohishi, A. Hase: Mechanical and Biotribological Properties of Ceramic-metal Composites (TiC/Ti-15Mo and SiC/Ti-15Mo) for Joint Prostheses and the Effects of Additive Metallic Elements of W, Nb, and Ir, Materials Science and Engineering A, Vol. 549, pp. 36-42 (2012) 査読有 DOI:10.1016/j.msea.2012.03.113
5. A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, Wear, Vol.292-293, pp.144-150 (2012) 査読有 DOI:10.1016/j.wear.2012.05.019
6. 三科博司: 摩耗理論の確立に向けた摩耗メカニズム研究, トライボロジスト, 57 巻, pp.303-308 (2012) 査読有
7. A. Hase, H. Mishina: Magnetization of Frictional Surfaces and Wear Particles by Tribological Processes, Wear, Vol. 269, pp.185-189 (2010) 査読有 DOI:10.1016/j.wear.2009.07.011
8. H. Mishina, H. Iwase, A. Hase: Generation of Wear Elements and Origin of Tribomagnetization Phenomenon, Wear, Vol. 269, pp.491-497 (2010) 査読有 DOI:10.1016/j.wear.2010.05.004

〔学会発表〕(計 15 件)

1. 市本大和・小林秀樹・新井里実・大森達夫・三科博司・長谷亜蘭: AFM=FC による金属間凝着力の測定, トライボロジー会議 2013 秋福岡 2013-10 (2013.10.23 福岡)
2. H. Mishina, A. Hase: Generation of Ammonia during Wear Processes in Adhesive Wear, 5th World Tribology

Congress (2013.9.11 Torino, Italy)

3. A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Recognition of Wear State for Early Detection of Seizure in Slide Bearing using Acoustic Emission Technique, 5th World Tribology Congress (2013.9.11 Torino, Italy)
4. A. Hase, M. Wada, H. Mishina: SEM Observation Study for Recognition of Wear Mechanism using AE Technique, 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology & Tribochemistry Forum (2013.9.6 Lyon, France)
5. A. Hase, H. Mishina, M. Wada: Quantitative Evaluation of MicroNano-Adhesion by AE Technique, International Conference on Acoustic Emission Symposium 21 (2012.11.22 那覇)
6. 長谷亜蘭・三科博司・和田正毅: AE 法を用いたトライボロジー現象の診断・評価 摩耗量のインプロセス計測を目指して, トライボロジー会議予稿集 東京 2012-5, pp.341-342 (2012.5.14 東京)
7. 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, pp.115-118(2011.9.14 東京)
8. A. Hase, H. Mishina: Recognition of Wear Mechanisms by Acoustic Emission Signal Analysis, International Tribology Conference-2011 (2011.10.31 広島)
9. A. Hase, H. Mishina: Design and Manufacture of Compact Frictional Surface Microscope, International Tribology Conference-2011 (2011.10.31 広島)
10. H. Mishina, A. Hase: Fabrication and investigation of Mechanical and Biotribological Properties of Ceramics-metal Composites for Joint Prostheses, The International Conference on BioTribology (2011.9.19 London, United Kingdom)
11. 長谷亜蘭・遠藤豪輝・三科博司・和田正毅: 摩擦・摩耗現象と AE 周波数の相関, トライボロジー会議予稿集 東京, pp.51-52 (2011.5.25 東京)
12. A. Hase, H. Mishina: Study on the Elementary Process of Adhesive Wear: Influence Factors for the Generation of Wear Elements and the Formation of Transfer Particles, ASIATRIB International Congress (2010.12.6 Perth, Australia)
13. 長谷亜蘭・遠藤豪輝・三科博司: AE 信号波形解析による摩擦・摩耗現象診断, 日

本非破壊検査協会平成 22 年度秋季講演
大会講演概要集，pp.285-286（2010.9.2
東京）

14. 遠藤豪輝・長谷亜蘭・三科博司：摩擦・
摩耗現象下におけるアコースティックエ
ミッションと接触電圧の計測，日本機械
学会 2010 年度年次大会（2010.9.7 名古
屋）
15. 長谷亜蘭・三科博司：AE 法を用いた通電
下の摩擦・摩耗現象の認識に関する研究，
トライボロジー会議 福井（2010.9.15 福
井）

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・教授

研究者番号：50142641

(2)研究分担者

長谷 亜蘭 (Alan Hase)
埼玉工業大学・工学部・講師

研究者番号：10552953