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)

長谷亜蘭^{*1}, 和田正毅^{*2}, 三科博司^{*3}

Acoustic Emission in Elementary Processes of Friction and Wear (In-Situ Observation of Friction Surface and AE Signals)

Alan HASE^{*4}, Masaki WADA and Hiroshi MISHINA

^{**} Graduate School of Science and Technology, Chiba University,
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

The relationship between acoustic emission (AE) signals and tribological phenomena in the elementary processes of friction and wear is examined. The elementary processes of friction and wear were observed by a frictional surface microscope which installed a friction system into the view of an optical microscope. In this paper, the elementary processes are focused on the plastic deformation of the friction surface and the formation of wear particles between friction surfaces. In-situ experiments with the frictional surface microscope were performed by a pin-on-block type sliding test for iron and zinc. The friction surface and its side face were also observed by an atomic force microscope. The results show that two kinds of AE signals, a continuous AE signal of low amplitude and a burst AE signal of high amplitude, are detected in the elementary processes of friction and wear. The continuous AE signal of low amplitude is detected by the generation of slip-lines and wear elements. The burst AE signal of high amplitude is detected by the formation of a transfer particle.

Key Words: Tribology, Acoustic Emission, Wear, Friction, Transfer, Slip Line, In-Situ Observation, Atomic Force Microscope

1. 結 言

アコースティックエミッション (Acoustic Emission, AE) は、固体が変形あるいは破壊する際に、それまで蓄えられていたひずみエネルギーが解放されて、その一部が弾性波として放射される現象である。摩擦・摩耗現象いわゆるトライボロジー現象は、一種の変形・破壊現象であり、摩擦および摩耗過程で AE が発生する。これを AE センサにより AE 信号として検出・監視することで、摩擦界面の摩擦・摩耗現象の認識・評価が可能になる。

この AE 法は、軸受の異常状態の検出能力が高く⁽¹⁾、危険予知としての有用性が認められている⁽²⁾⁽³⁾。これは、AE が変形・破壊部から直接生じることから、トライボロジー現象下で計測される AE 信号には、摩擦・摩耗現象に密接な情報を多く含むためと考えられる。また、AE 法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、逐次的に変化するトライボロジー特性のインプロセス計測に大変有効である。AE を利用したトライボロジー現象の認識・評価を考えるうえで、摩擦・摩耗現象と AE 信号との関係を見出すことは必要不可欠であり、これまでの先駆的研究により、摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関がいくつか報告されている⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾。しかしながら、その摩擦・摩耗現象と AE 信号との対応は確立されていない。

従来の研究は、筆者の知るかぎり、すべて繰返し摩擦によって実験が行われている。特に無潤滑の繰返し摩擦では、摩耗粒子の生成過程や摩擦界面での振舞い(衝突や脱落)が AE 信号へ大きく影響する⁽¹¹⁾。そのため、繰返し摩擦下では両摩擦面および摩擦界面の摩耗粒子による多体問題(厳密には、雰囲気も含める)となり、摩擦・摩耗現象と AE 信号の定量的な相関を見出すのが困難である。そこで、筆者らは片処女面摩擦方式を用いた摩擦実験により、単純化した現象下において摩擦・摩耗現象と AE 信号との関係を検討してきた⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。しかしながら、摩擦界面における微小な摩擦・摩耗現象との対応に関しては明確にできていない。

一般に、摩擦面の評価は摩擦前後の摩擦痕の観察・分析により行われる。しかし、その摩擦面は摩擦・摩

* 原稿受付 2008 年 4 月 15 日。

^{*1} 正員、千葉大学大学院自然科学研究科(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)。

^{*2} 職業能力開発総合大学校精密機械システム工学科(〒229-1196 相模原市橋本台 4-1-1)。

^{*3} 正員、千葉大学大学院工学研究科。

E-mail: alan_hase@graduate.chiba-u.jp

耗過程によって常に逐次変化している。したがって、摩擦面をリアルタイムでその場観察 (in-situ 観察) することは、摩擦・摩耗現象の解明に重要な方法の一つである。そこで本論文では、凝着摩耗に関してさらなる基礎的な摩擦・摩耗現象と AE の対応関係の究明のために、摩擦界面で起こる摩擦・摩耗現象を in-situ 観察し、その素過程で生じる AE 信号の計測を行った。そして、摩擦面の塑性変形や摩耗粒子の生成過程と AE 信号との関係について議論を行う。

2. 実験方法

2・1 実験装置および計測システム 本実験では、光学顕微鏡観察部に摩擦系を組み込んだ摩擦面顕微鏡 (in-situ 観察装置) を用い⁽¹⁵⁾、摩擦・摩耗の素過程をリアルタイムで観察しながら AE 信号の計測を行った。その摩擦系と AE 計測システムの構成を図 1 に示す。摩擦方式は、ピンオンブロック型である。AE センサは、治具を用いてブロック試験片に取り付けられ、摩擦部での摩擦・摩耗により生じる AE 信号を検出する。このとき、接触摩擦部と AE センサ間の距離は約 15 mm である。AE センサは、PZT 圧電セラミックス製の広帯域型 (周波数特性: 500 kHz~4 MHz) のものを使用している。

AE センサからの出力信号の電圧レベルは非常に微弱であるため、プリアンプおよびメインアンプによって総合利得で 86 dB の増幅を行った。また、ノイズ除去の目的で 100 kHz のハイパスフィルタ処理を行っている。この AE 信号の包絡線検波 (放電時定数: 0.1 ms)

を行い、包絡線検波波形を平均化回路によって平均化した電圧信号を AE 平均値として計測し評価に用いた。また、ピン保持部の板ばねのひずみゲージにより摩擦抵抗の計測を行い、摩擦係数に換算し評価した。さらに、in-situ 観察装置により摩擦界面の変化の動画記録も同時に行うことができる。

2・2 実験条件 供試材として、ピン試験片にはステンレス鋼 (SUS304, 190 HV)、ブロック試験片には鉄 (純度 99.5%, 97.3 HV) と亜鉛 (純度 99.99%, 32.9 HV) を用いた。ブロック試験片の観察面および摩擦面は、共にバフ研磨仕上げし、観察面を鉄はナイトール、亜鉛は 5% 硝酸によってそれぞれエッチングした。両試験片の摩擦面は、 $R_z 0.1 \mu\text{m}$ 以下の表面粗さである。

本実験では、二種類のピン先端形状を用いて (a) 摩擦に焦点を当てた実験と (b) 摩耗に焦点を当てた実験の二つの摩擦実験を行った。これらの実験により、両試験片の接触状態を線接触もしくは面接触に変化させ、表面の変形過程 (摩擦過程) もしくは摩耗粒子の生成過程 (摩耗過程) を観察する。表 1 は、それぞれの実験に関する摩擦条件およびピン先端形状をまとめたものである。ピン試験片は直径 4 mm であり、摩擦部となるその先端を次のように成形した。(a) 摩擦に関する実験では、約 90° の頂角に半径約 $60 \mu\text{m}$ の曲面をとした。(b) 摩耗に関する実験では、摩擦方向に幅 0.5 mm の平面とした。これらの紙面方向の幅は、どちらも約 0.2 mm である。これより、観察面における接触状態は、円筒または平面 (ピン側) と平面 (ブロック側) の二次元接触状態とみなすことができる。

Fig. 1 Friction system and the block diagram of instrumentation for signal acquisition.

Table 1 Sliding conditions and the nose shape of a pin for two experiments

	(a) For friction process	(b) For wear process
Normal load	2.4, 4.8 N	2.4 N
Sliding velocity	0.02 mm/s	
Sliding distance	3 mm	1 mm
Repeated frequency (same direction)	5 times	20 times
Nose shape of the pin		

摩擦実験は、表1の摩擦条件を用い、ブロック試験片の同一表面上の一定摩擦距離を同一方向に繰り返し摩擦させて行った。実験はすべて室温、大気中、無潤滑で行った。

3. 実験結果

3・1 摩擦に伴う表面の変形の in-situ 観察 トライボロジー現象において最初に考えなければならないのが、2 固体表面の真実接触部（凝着部）での摩擦に伴う表面の変形過程である。まず、先端が曲面のピン試験片〔表1 (a)〕を用いた摩擦現象に焦点を当てた実験結果について述べる。

図2は、in-situ 観察された鉄ブロック摩擦表面下の変形の様子である。ここで、図2 (a) ~ (c) は、摩擦1回目（荷重2.4 N、無潤滑）の変形過程を示しており、(d) は (c) A 部分を拡大観察したものである。なお、図中▼印はピン先端位置を示し、ピンは左から右へ進行している。これより、摩擦に伴ってピンの摩擦進行方向に対して垂直下方向に円弧を描くようにすべり線（または、すべり帯）が生成していくことが確認できる。摩擦を繰り返すことによって、すべり線が交錯していき、摩擦表面近傍のすべり線密度が増加していく。結晶粒ごとに現象のばらつきはあるが、すべり線の交錯と共に表面の塑性変形が生じ、その変形した表面結晶の粒内破壊による摩耗現象も一部で観察された。

3・2 表面の変形過程と AE 信号の変化 本実験環境下では、常に1 mV 以下のバックグラウンドノイズが存在したため、それ以上を有意の AE 信号と考える。なお、本研究で評価する AE 平均値は、あらかじめバックグラウンドノイズの直流成分は減算している。

図3は、図2で示したすべり線の生成過程における AE 平均値の変化を示している。また、AE 平均値の変

化の傾向を移動平均による近似曲線によって示した。この近似曲線に注目すると、AE 信号レベル（移動平均値）が低下する場所が結晶粒界に一致することがわかる（図2および図3の G_1 , G_2 が対応）。図2の観察視野外でも同様に、AE 平均値の移動平均が低下する場所（図3点線部分）には結晶粒界が存在していた。鉄に関して低荷重（0.48 N）で実験を行ったところ、摩擦表面下のすべり線の生成はほとんど観察されず、有意

Fig. 2 In-situ observation of the frictional interface for the Fe block in the first rubbing (Dry, $W = 2.4$ N): (d) enlarged view of A in (c).

Fig. 3 Fluctuation of the AE mean value and its moving average deviation on the Fe block in the first rubbing (Dry, $W = 2.4$ N).

Fig. 4 Fluctuations of the AE mean value and the coefficient of friction on the Fe block (Dry, $W = 4.8$ N).

Fig. 5 Fluctuation of the AE mean value and its moving average deviation on the Zn block in the first rubbing (Dry, $W = 2.4$ N).

Fig. 6 Deformation of the sliding surface of the Zn block in the first rubbing (Dry, $W = 2.4$ N). → shows direction of sliding.

な AE 信号も計測されなかった。なお、摩擦 1 回目における $1 \sim 2$ mV の AE 事象数は、 $6 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ であり、図 2 の光学顕微鏡で観察されるすべり線の本数と近い値を示すことがわかった。したがって、この定常的に発生している $1 \sim 2$ mV の AE 信号は、摩擦に伴うすべり線（帯）の生成に起因するものと考えられる。

図 4 は、荷重 4.8 N、無潤滑における摩擦 1 回目 [図 4 (a)] と摩擦 5 回目 [図 4 (b)] の AE 平均値およ

び摩擦係数の変化である。図 4 の結果からわかるように、摩擦の繰り返し数 1 回に比べ 5 回では、AE 信号レベルが増加した。この結果は、亜鉛を用いた場合や潤滑下においても同様の傾向であった。これは、摩擦表面下でのすべり線の交錯によるひずみ硬化の影響と考えられる。ここで、図 3 で示したすべり線（帯）の生成による定常的に発生する AE 信号以外に、5 mV を超える大きな突発型の AE 信号が発生している。これは摩擦表面の急激な塑性変形や後述する摩耗に起因するものと推測する。

一方、亜鉛に関する AE 平均値の変化および摩擦表面下の変化の結果をそれぞれ図 5 および図 6 に示す。これは、摩擦 1 回目で得られた結果である。亜鉛は鉄に比べ結晶粒が微細であったため、ピン先端でいくつかの結晶降伏が同時に起こる。中でも図 6 (b) のように大きな塑性変形が生じた場合、AE 信号レベルの移動平均値が上昇する傾向がみられた。

3・3 摩耗粒子生成過程の in-situ 観察 次に、先端が平面のピン試験片 [表 1 (b)] を用いた摩耗現象に焦点を当てた実験結果について述べる。図 7 に、in-situ 観察された鉄ブロック摩擦界面における摩耗粒子生成過程を示す。この図 7 (a) ~ (d) は、摩擦 14 回目（荷重 2.4 N、無潤滑）で観察された結果である。図中の B 部分において、次のような摩耗粒子の生成様子が確認できた。まず、(a) ~ (b) ピンおよびブロック試験片に移着（凝着）している摩耗素子が集合して移着粒子 T が生成され、(c) その移着粒子がピン側に移着し、そして、(d) 摩耗粒子 W としてピンの側面に排出された。この摩耗粒子生成過程は、いわゆる凝着摩耗における移着成長過程といえる⁽¹⁶⁾。この移着粒子の大きさは約 $9 \mu\text{m}$ である。この他の場合にも、 μm オーダーの移着粒子や摩耗粒子が観察された。

3・4 摩耗粒子生成（移着成長）過程と AE 信号の変化 図 8 は、図 7 で示した鉄ブロックにおける摩耗粒子の生成時（移着成長過程）の AE 平均値の変化である。ここで、最初の約 4 mV の突発型 AE 信号は、図 7 (a) ~ (b) の移着粒子 T の生成時と対応している。そして、その後の約 2 mV の二つの突発型 AE 信号は、それぞれ移着粒子の移着時 [図 7 (c)] と排出時 [図 7 (d)] に対応している。また、 $1 \sim 2$ mV に連続的な AE 信号が発生していることがわかる。これは、摩擦表面での微小なすべり線の生成と摩耗素子の生成によるものと考えられる。この確認のために、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、鉄ブロックの 1 回摩擦後の摩擦側面 (in-situ 観察方向面) および摩擦面を調べた結果を図 9 に示す。図中の点線は摩擦面とその側面の境

Fig. 7 In-situ observation of the frictional interface for the Fe block in the fourteenth rubbing (Dry, $W = 2.4$ N). T and W indicate a transfer particle and a wear particle respectively. $\rightarrow$ shows direction of sliding.

Fig. 8 Fluctuation of the AE mean value on the Fe block in the formation a wear particle through a mutual transfer and growth process (Dry, $W = 2.4$ N).

Fig. 9 AFM images of the Fe block in the first rubbing (Dry, $W = 2.4$ N): (a) the side face of the friction surface; (b) the friction surface. Dotted line shows the ridge line. E and T indicate a wear element and a transfer particle respectively. $\rightarrow$ shows direction of sliding.

界である稜線を示す。図9 (a) より、1回の摩擦で微小なすべり線が摩擦面の極表層部に生成していることがわかる。さらに図9 (b) より、摩擦面上には摩耗素子 E (矢印を付記していないものも含めて約56個) や移着成長途中の移着粒子 T (2個) が観察された。

図10および図11は、亜鉛ブロックを用いた場合の摩耗粒子生成過程の様子と AE 平均値の変化をそれぞ

Fig. 10 In-situ observation of the frictional interface for the Zn block in the second rubbing (Dry, $W = 2.4$ N). T and W indicate transfer particle and wear particle respectively. $\rightarrow$ shows direction of sliding.

Fig. 11 Fluctuation of the AE mean value on the Zn block in the formation a wear particle through a mutual transfer and growth process (Dry, $W = 2.4$ N).

れ示している。図10は、摩擦2回目 (荷重2.4 N、無潤滑) で観察された結果である。ここで、亜鉛に関しても鉄と同様にして、約5 μmの移着粒子 T が生成し、ピン側へ移着していく様子が観察された。このときに二つの突発型 AE 信号が発生している [図11 (b), (c)]。また、約20 μmの摩耗粒子 W の排出によって、図11における最初の約8 mVの突発型 AE 信号が発生した。このように、移着粒子が生成・移着する際には、図8や図11のように大きな突発型の AE 信号が発生することが確認できる。ただし、亜鉛は鉄に比べ摩擦の繰り返し数が少ないにもかかわらず、AE 信号レベルが大きい。これは、図2と図6の比較からも明らかのように、塑性変形域の大きさが異なるためと思われる。また、材料の AE 特性の違いも影響しているであろう。

4. 論 議

摩擦顕微鏡を用いた摩擦界面の in-situ 観察下において、摩擦・摩耗の素過程である摩擦面結晶粒の塑性変形および摩耗粒子の生成過程に対応する AE 信号を計測することができた。本節では、その摩擦・摩耗の素

過程で生じる AE 源について議論を展開する。

摩擦・摩耗の素過程は、図 2 および図 6 に見られる接触点直下の摩擦面結晶粒の塑性変形に始まる。これは、摩擦による圧縮応力がピン前方に作用することによって生じるすべり変形である。本実験結果より、この光学顕微鏡で観察できるオーダーでのすべり線（帯）の生成は、小さな振幅（1~2 mV）の AE 信号の発生と対応付けることができる。AE パルスの発生は、位相のそろった転位群の集団運動より構成される⁽¹⁷⁾。そのため、転位群の運動で生じたすべりによって AE パルスが生じることが理解できる。また、結晶粒界上を摩擦する際に AE 信号レベルが低下したのも、そこで転位群の加速運動が妨げられたためといえる。

さらに、すべり線（帯）の生成により定常的に発生する AE 信号以外に大きな突発型（5 mV 以上）の AE 信号が発生する（図 4）。これは、摩擦表面の急激な塑性変形（結晶粒内の微視的き裂生成も含む）や後述する摩耗に起因したものであり、局所的な不均一変形が短時間で生じたためと解釈できる。亜鉛に関しても摩擦・摩耗による変形・破壊過程は鉄と同様であり⁽¹⁸⁾、鉄ほど明確にすべり線は観察できないが、結晶粒内のすべり線の生成によって AE パルスが発生すると考えられる。亜鉛では、表面直下の結晶粒がいくつか同時に塑性変形したため、AE パルスの発生が密になり、AE 平均値の移動平均が上昇したと思われる。その傾向は、図 8 と図 11 の比較からもわかる。ただし、体心立方型金属の鉄と最密六方型金属の亜鉛では、その結晶構造の違いによる材料の AE 特性の影響がある。引張試験において、最密六方型は他の結晶構造の金属に比較して振幅の大きな AE 信号が発生するため⁽¹⁹⁾、図 8 と図 11 のように AE 信号レベルに差が生じる。

次に、摩擦繰返し数と AE 信号レベルとの関係について考える。摩擦繰返し数の増加に伴って摩擦表面のすべり密度は増加し、塑性変形すると同時に加工硬化が生じる。この塑性変形域の深さは、おおむね一定値へと収束する⁽²⁰⁾。摩擦による変形のみを考えるのであれば、これ以上摩擦繰返し数を増やしてもカイザー効果により AE は発生しないように思われる。しかし実際は、表面結晶粒の塑性変形の直後に摩耗過程へとつながるため、図 4 のように AE 信号レベルは上昇する。図 4 (b) の摩擦係数に注目すると、その変動幅が摩擦 1 回目には比べ大きくなっている。これは摩擦繰返し数の増加に伴い凝着摩耗が進行して生成した摩擦界面の移着粒子などの影響と考える。図 9 (b) の AFM 観察結果から、1 回のみの摩擦で摩耗素子や移着粒子が生成することがわかる。このため、上述した塑性変形に

よって連続的に生じる AE 信号に加え、摩耗に起因する AE 信号の割合が増加していき、AE 信号レベルが上昇するものと考えられる。そして、後述する摩耗（移着）の程度により AE 信号レベルが決定するのであろう。

さて、摩擦に伴う表面のすべり変形が進行することで転位密度が増加する。転位密度が増加すると、これらの転位が絡み合ったセル構造あるいは面欠陥等の微細組織が形成されることが知られている⁽²¹⁾。この過程では、変形が均一な状態となるため一般的に AE 信号レベルは低下する。ところが、そのセルあるいは微細組織が真実接触点においてせん断され、ピン表面へ移着（離脱）するとき、微視的粒内破壊に伴う大きな AE パルスが生じるであろう。これを摩耗素子生成・移着時の AE 源と考える。0.48 N の低荷重で実験を行った場合、摩擦表面下のすべり線の生成は摩擦面顕微鏡では直接観察できなかった。しかし、摩擦表面下では図 9 (a) で示されるような極表層部ですべり変形が生じているはずである。このとき、1 mV 以上の有意な AE 信号は発生していなかったことから、図 8 において連続的に発生している小さな振幅（1~2 mV）の AE 信号は、すべり系の進展に起因するものではなく、主として摩耗素子の生成・移着に起因するものと考えられる。

しかしながら、摩耗素子は 15 nm~40 nm と微細な金属微粒子サイズの大きさであるため⁽²²⁾、1 個の摩耗素子の生成・移着では AE の検出には至らないと思われる。図 9 (b) の AFM 観察より、摩擦面 $2.5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$ の範囲に約 56 個の摩耗素子の移着が確認できた。ここで、接触面積全域で均一に摩耗素子の移着が生じると仮定すると、先端が平面のピンとブロックの摩擦面（見かけの接触面積 1mm^2 ）において、一度に 9×10^6 個の摩耗素子が生成することになる。この 10^6 個オーダーの摩耗素子が集団移着すれば、既報で概算した AE 検出分解能を大きく上回る⁽¹²⁾。したがって、真実接触点から摩耗素子が集団で移着（離脱）することで AE パルスが発生し、そのミクロ的な摩耗による AE 信号を検出していることになる。

最後に、摩耗粒子の生成時の AE 信号について述べる。ブロック側から移着（離脱）した摩耗素子は、摩擦界面において集合・合体して移着粒子を形成する。特に、この移着粒子が形成される際に、大きな突発型 AE 信号が発生している（図 8 (b) および図 11 (b)）。これは、移着粒子が形成される接触部において局所的に摩耗素子の集団移着が生じるためと考える。そして、移着粒子が再度移着・排出される際にも突発型 AE

信号が発生している [図 8 (c), (d) および図 11 (b)]. この突発型 AE 信号は, 摩耗素子生成時のようにバルクからの直接破壊ではないため, 移着粒子形成時よりも小さい傾向にある. これは, 移着粒子自体に蓄えられていた弾性ひずみエネルギーの解放により生じるものと考えられる⁽¹¹⁾.

以上より, 摩擦・摩耗過程で計測される AE 信号は, 摩擦に伴う表面結晶粒内のすべり系の進展および摩耗素子生成・移着に起因する小振幅の連続型 AE 信号と, 摩耗粒子生成 (移着粒子形成・移着・排出) に起因する大振幅の突発型 AE 信号より構成されると結論づけることができる.

5. 結 言

摩擦・摩耗素過程の in-situ 観察実験により, 摩擦界面で起こる表面の変形や破壊と AE 信号の対応関係を鉄と亜鉛に関して調査した. その結果, 摩擦に伴う摩擦表面のすべり線 (帯) の生成および摩耗素子生成・移着によって, 小さな振幅の連続型 AE 信号が検出されることを明らかにした. また, 摩耗粒子生成時に大きな振幅の突発型 AE 信号が検出されることが明らかになった.

本研究の課題として, 摩擦・摩耗の素過程で生じる AE 波形の観測・解析や摩耗素子の移着の程度と AE 信号の対応関係の検討などを考えている.

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 19560134] による補助のもとで行われたことを付記し, ここに謝意を表する.

また, 本実験遂行にあたり, 原子間力顕微鏡の使用にご便宜を図っていただいた理化学研究所ビームアプリケーションチーム 渡辺 剛 氏に厚く御礼申し述べます.

文 献

- (1) Norose, S., *Analysis and Countermeasure of Wear Mechanism*, (1992), p. 549, Techno System.
- (2) Wada, M., Mizuno, M., and Sasada, T., Study on the In-process Measurement of the Friction and Wear with AE Technique: Monitoring of Seizure Process through AE Analysis, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 56, No. 10 (1990), pp. 1835-1840.
- (3) Yoshioka, T., Korenaga, A., Mano, H., and Yamamoto, T., Diagnosis of Rolling Bearing by Measuring Time Interval of AE Generation, *Transactions of the ASME Journal of Tribology*, Vol. 121, No. 3 (1999), pp. 468-472.
- (4) Belyi, V.A., Kholodilov O.V., and Sviridyonok, A.I., Acoustic Spectrometry as Used for the Evaluation of Tribological Systems, *Wear*, Vol. 69, No. (1981), pp. 309-319.
- (5) Lingard, S. and Ng, K.K., An Investigation of Acoustic Emission in Sliding Friction and Wear of Metals, *Wear*, Vol. 130, No. 2 (1989), pp. 367-379.
- (6) Wada, M., Mizuno, M., and Sasada, T., Study on Friction and Wear Utilizing Acoustic Emission: Wear Mode and AE Spectrum of Copper, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 56, No. 8 (1990), pp. 1474-1479.
- (7) Jiaa, C.L. and Dornfeld, D.A., Experimental Studies of Sliding Friction and Wear via Acoustic Emission Signal Analysis, *Wear*, Vol. 139, No. 2 (1990), pp. 403-424.
- (8) Hanchi, J. and Klamecki, B.E., Acoustic Emission Monitoring of the Wear Process, *Wear*, Vol. 145, No. 1 (1991), pp. 1-27.
- (9) Boness, R.J. and McBride, S.L., Adhesive and Abrasive Wear Studies Using Acoustic Emission Techniques, *Wear*, Vol. 149, No. 1-2 (1991), pp. 41-53.
- (10) Takuma, M., Sinke, N., Nishiura, T., and Okamoto, S., Evaluation of Wear Conditions with AE Method: 1st Report, Application of Wavelet Transform Results, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A*, Vol. 70, No. 694 (2004), pp. 802-809.
- (11) Hase, A., M. Wada, M., and Mishina, H., The Relationship between Acoustic Emissions and Wear Particles for Repeated Dry Rubbing, *Wear*, Vol. 265, No. 5-6, (2008) pp. 831-839.
- (12) Hase, A., Wada, M., and Hirota, H., Correlation of Material Transfer Phenomenon and AE Signals in Adhesive Wear, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 50, No. 11 (2005), pp. 808-815.
- (13) Hase, A., M. Wada, M., and Mishina, H., Correlation of Abrasive Wear Phenomenon and AE Signals, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 51, No. 10 (2006), pp. 752-759.
- (14) Hase, A., M. Wada, M., and Mishina, H., Correlation of Acoustic Emission Signals and Tribological Characteristics, *Proc. of the 3rd Asia Int. Conf. on Tribology* (2006), pp. 123-124.
- (15) Mishina, H., Surface Deformation and Formation of Original Element of Wear Particles in Sliding Friction, *Wear*, Vol. 215, No. 1-2 (1998), pp. 10-17.
- (16) Sasada, T. and Norose, S., The Formation and Growth of Wear Particles Through Mutual Material Transfer, *Proc. JSLE-ASLE Int. Lubrication Conf.* (1976), pp. 82-91.
- (17) Kuribayashi, K. and Kishi, T., Metallography of Acoustic Emission (III): Generation and Propagation of AE Pulse, *Metals & Technology*, Kinzoku, Vol. 47, No. 6 (1977), pp. 43-47.
- (18) Mishina, H., Kanakama, I., and Kohno, A., Surface Deformation in Frictional Behavior and Original Process of Wear, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 41, No. 4 (1996), pp. 332-339.
- (19) Imelda, H., Kusanagi, H., Kimura, H., and Nakasa, H., Acoustic Emission Characteristics during Tensile Tests of Various Metals with Several Types of Crystal Structures, *Proc. of the 3rd AE Symp. Tokyo* (1976), pp.492-512.
- (20) Mishina, H. and Kondoh, S., In-situ Observation of Original Wear Process: Deformation of Surface Crystal Grains and Origin of Elemental Wear Debris in Pure Iron, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol. 44, No. 7 (1999), pp. 528-535.

- (21) The Japan Institute of Metals ed., *Plasticity of Crystal*, (1977), p. 448, Maruzen.
  - (22) Mishina, H., Kohno, A., and Akamatsu, Y.,
Discovery of Elemental Debris of Adhesive and
Primary Process of Wear, *Journal of Japanese
Society of Tribologists*, Vol. 48, No. 4 (2003), pp.
307-314.
-