

(千葉大学学位申請論文)

アコースティックエミッション法による  
摩擦・摩耗現象の認識と評価に関する研究

2009年1月

千葉大学大学院 自然科学研究科  
人工システム科学専攻 機械物理システム講座  
機械機能工学分野

長谷 亜蘭

# Research on Recognition and Evaluation of Friction and Wear Phenomena Using Acoustic Emission Method

By  
Alan HASE

## Abstract

Acoustic Emission (AE) is the elastic stress wave caused by the deformation and fracture of a material. Since friction and wear phenomena involve deformation and fracture, AE is generated during the friction and wear processes. By measuring the AE signals with an AE sensor, it is possible to perform the in-process monitoring of tribological characteristics (e.g., the mode of wear, type of wear particles, surface damage at the frictional interface, and amount of wear).

Almost all of the mechanical system is a dynamic machine. Friction and wear phenomena occur between the dynamic parts. From the viewpoint of monitoring and maintenance (especially condition-based maintenance) of machinery, it is extremely important to recognize and quantify friction and wear phenomena, such as the progress of wear and the state of friction at interfaces. Methods based on electrical resistance, temperature, vibration methods, or oil analyses are generally used in tribological estimates to diagnose abnormal states. However, these methods give secondary estimations of friction and wear phenomena and the information that they provide is insufficient. In contrast, AE is intimately related to the deformation and fracture of materials and the AE-based method is useful in obtaining large quantities of information relating to friction and wear phenomena. Accordingly, the AE method, unlike other estimation methods in current use, permits direct estimations and is very effective for the in-process monitoring of the state of rubbing surfaces.

For the recognition and quantification of friction and wear phenomena, it is

necessary to elucidate the relationship between AE signals and friction and wear phenomena. The effectiveness of AE in recognizing and quantifying transient phenomena (e.g., the detection of the failure of a lubricant, the prediction of seizure, and the detection of cracks in bearings) has already been identified. Also, several investigations have demonstrated a correlation between AE signals and tribological characteristics. However, little is known regarding the relationship between AE and friction and wear phenomena, because of the complexity of such phenomena. The friction and wear phenomena encompass the complex phenomena that are still being clarified little by little. In order to mitigate the complexity, not only experiments by repeated rubbing (a typical experimental method), but also experiments with the simplified friction systems have been performed.

In this study, the relationship between AE signals and friction and wear phenomena, from a macro-scale to a micro-scale, have been examined by the following various rubbing methods for the principal wear mechanisms of adhesive wear (severe wear and mild wear) and abrasive wear. Experiments by repeated dry rubbing have been performed to investigate the relationship on a macro-scale. Also, experiments by single-side virginal rubbing have been performed to simplify macroscopic friction and wear phenomena. In-situ observed experiments and micro-sliding friction experiments have been performed to investigate the relationship on a micro-scale. After that, physical modeling for each wear phenomenon was attempted, and the quantitative relationship with AE signals was discussed. Furthermore, the AE source and the features of the AE parameters and the AE frequencies were revealed for each wear mechanism and wear mode. Consequently, based on the experimental results, the correlation between the AE parameter and the amount of wear is summarized, and a set of guideline is discussed to recognize and evaluate friction and wear phenomena by using an AE method.

# アコースティックエミッション法による 摩擦・摩耗現象の認識と評価に関する研究

長谷 亜蘭

## 概 要

アコースティックエミッション (AE) は、固体の変形・破壊の際に、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弾性波が生じる現象である。摩擦・摩耗現象は一種の変形・破壊現象であり、摩擦および摩耗過程で AE 波が発生する。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・摩耗現象の認識・評価に応用できると考えられる。

機械システムのほとんどは、機械要素間において接触・相対運動を伴う動的機械であり、その動的部分には摩擦・摩耗現象が介在する。機械システムの保全という観点から、摩耗の進行状態や摩擦界面の状況などの摩擦・摩耗現象の認識・評価を行うことはとても重要である。摩擦・摩耗現象の異常診断法としては、振動法、温度法、電気抵抗法、油分析診断法などによって主に評価されている。しかし、これらの方法は、摩擦・摩耗現象の副次的評価であり、必ずしも摩擦・摩耗現象に関する情報が十分であるとはいえない。一方、AE 波は変形・破壊に付随して生じることから、これらの評価方法に比べ摩擦・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るため、摩擦・摩耗現象のインプロセス計測に非常に有効である。

AE 法を用いた摩擦・摩耗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。これまでに、AE 信号と摩擦・摩耗現象に関する様々な研究がなされているが、明確な対応づけがなされていない。また、ほとんどが過渡現象（潤滑剤油膜破断、焼付き、フレーキングなど）の検出といった定性的な評価にとどまっており、表面損傷や摩耗量などの定量的評価を行っている研究が少ない。これらの理

由の一つとして、摩擦・摩耗現象の複雑さが挙げられる。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に加え、実用に近い形で現象の単純化を図った片処女面摩擦、微視的な現象を追究するための in-situ 観察実験や微小すべり摩擦実験を試みた。

本研究では、すべり摩擦における凝着摩耗（シビア摩耗およびマイルド摩耗）とアブレイブ摩耗に関して、上記の様々な摩擦方式の実験を行い、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。巨視的現象は無潤滑繰返し摩擦および片処女面摩擦により検討し、微視的現象は in-situ 観察実験および微小すべり摩擦実験により検討した。そして、それぞれの摩耗形態の物理モデル化を試み、AE 信号との定量的評価を意識した論議展開を行っている。その定量的評価に関する論議は、今までリアルタイムでの計測が困難とされてきた摩耗量に関するトライボロジー特性との相関関係を中心に検討を行った。また、各摩耗形態における AE 源や AE パラメータおよび AE 周波数の特徴を明らかにしている。さらに、得られた結果に基づき、AE 法による摩擦・摩耗現象の認識および評価を確立するため、認識・評価方法の検討・総括を行っている。

本論文は、以下に示す全 9 章より構成される。

第 1 章「緒 論」では、メンテナンストライボロジーの重要性と AE 法の有用性および本研究分野の現状を述べている。また、摩擦・摩耗現象と AE 信号に関係する影響因子を検討した。そして、これらの背景と検討を踏まえたうえで、本研究の目的および研究指針と本論文の構成について述べている。

第 2 章「シビア・マイルド摩耗遷移における摩耗現象と AE 信号」では、凝着摩耗において摩擦・摩耗現象が劇的に変化するシビア・マイルド摩耗遷移過程の認識・評価のために、シビア摩耗およびマイルド摩耗現象と AE 信号の対応関係について検討した。その結果、摩耗遷移点を認識するために有効な AE 評価パラメータなどについて言及している。また、微分比摩耗量と AE 平均値の間に線形関係が認められることがわかった。

第 3 章「無潤滑繰返し摩擦における摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関」で

は、加速的かつマクロ的な凝着摩耗現象と AE 信号との相関について検討した。そして、材料の違いに起因した摩耗粒子形態の違いは、AE 評価パラメータから識別が可能であることが明らかになった。さらに、AE が移着粒子の脱落によって発生すると仮定したときの弾性ひずみエネルギーを計算したところ、移着粒子の脱落、その生成過程や摩擦界面での振舞い（衝突や転動）が AE に影響することが確認できた。

第 4 章「凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関」では、凝着摩耗の初期過程である移着現象に注目し、凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関を検討した。また、摩耗素子の移着モデルを考案し、移着現象において発生する AE の理論的考察を加えている。その結果、移着現象における AE 総エネルギーと摩耗量の関係式を導出した。

第 5 章「アブレシブ摩耗における切削現象と AE 信号の相関」では、アブレシブ摩耗現象を再現させ、そこで生じる切削現象と AE 信号の相関を検討した。そこで、アブレシブ摩耗における AE 源が、摩耗粒子が生成されるせん断領域にあることを明らかにした。そして移着現象と同様、アブレシブ摩耗における AE 総エネルギーと摩耗量の関係式を導出した。

第 6 章「摩擦・摩耗素過程の in-situ 観察と AE 信号の対応」では、摩擦界面の現象をその場観察（in-situ 観察）することにより、摩擦・摩耗素過程で計測される AE 信号の AE 源を明らかにした。

第 7 章「微小すべり摩擦における摩耗現象と AE 信号」では、微小すべり摩擦実験によって凝着摩耗およびアブレシブ摩耗における微細な摩耗現象と AE 信号の関係について調査した。その結果、摩耗形態により AE 信号波形および AE 周波数の特徴が現れることがわかった。また、凝着摩耗に関して摩耗素子の生成に及ぼす影響因子や摩耗素子の大きさを明らかにした。

第 8 章「AE 法による摩擦・摩耗現象の認識および評価の総括」では、得られた結果を踏まえ、凝着摩耗とアブレシブ摩耗に関して摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関関係を検討・総括した。ここでは、比摩耗量などのトライボロジー特性と AE 信号の関係を述べ、摩耗-AE 相関図によって AE 平均値から比摩耗量または摩耗係数の評価が可能であることを明らかにした。さらに、

摩擦・摩耗現象に対する AE 計測の指針についてまとめた。

第 9 章「結 論」では、各章での結言をまとめ、AE 法を摩擦・摩耗現象の認識・評価へ用いる際の評価パラメータ等の提言ならびに問題点や今後の課題について展望している。

# アコースティックエミッション法による 摩擦・摩耗現象の認識と評価に関する研究

## < 目 次 >

主な記号 .....	I-III
<b>第1章 緒 論</b>	
1.1 背 景 .....	1
1.2 摩擦・摩耗現象および AE 信号に関する影響因子の検討 .....	4
1.3 目的と研究指針 .....	6
1.4 本論文の構成 .....	7
参考文献 .....	9
<b>第2章 シビア・マイルド摩耗遷移における摩耗現象と AE 信号</b>	
2.1 緒 言 .....	11
2.2 実験装置および実験方法 .....	11
2.2.1 実験装置 .....	11
2.2.2 AE 評価パラメータおよび計測システム .....	14
(1) AE 評価パラメータ .....	14
(2) 計測システム .....	15
2.2.3 実験条件 .....	17
2.3 実験結果 .....	18
2.3.1 シビア・マイルド摩耗遷移における AE 平均値の変化 .....	18
2.3.2 シビア・マイルド各摩耗現象下の摩耗現象と AE 信号の特徴 .....	20
2.3.3 摩擦・摩耗現象と AE 評価パラメータの相関 .....	24
2.4 論 議 .....	26
2.5 結 言 .....	29
参考文献 .....	30
<b>第3章 無潤滑繰返し摩擦における摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関</b>	
3.1 緒 言 .....	32
3.2 実験装置および実験方法 .....	32

3.2.1	実験装置および計測システム	32
3.2.2	実験条件	33
3.3	実験結果	34
3.3.1	摩耗形態および円筒の摩耗	34
3.3.2	摩耗粒子形態による AE 評価パラメータの特徴	38
3.3.3	摩擦・摩耗現象と AE 評価パラメータの相関	41
3.4	論議	43
3.5	結言	50
	参考文献	51

#### 第4章 凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関

4.1	緒言	53
4.2	実験方法	53
4.2.1	摩擦方式	53
4.2.2	計測システム	55
4.2.3	実験条件	56
4.3	実験結果	57
4.3.1	摩耗形態	57
4.3.2	表面損傷と AE 平均値の関係	58
4.3.3	摩耗量と AE エネルギーの関係	61
4.3.4	潤滑の有無による AE 信号への影響	63
4.3.5	摩擦速度の変化による AE 信号への影響	66
4.4	論議	67
4.5	結言	73
	参考文献	74

#### 第5章 アブレシブ摩耗における切削現象と AE 信号の相関

5.1	緒言	75
5.2	実験方法	75
5.2.1	円筒摩擦面の表面性状	75
5.2.2	実験条件	78
5.3	実験結果	79
5.3.1	摩耗形態	79

5.3.2	表面損傷と AE 平均値の関係	82
5.3.3	摩耗量と AE エネルギーの関係	83
5.3.4	押付荷重の変化による AE 信号への影響	85
5.4	論議	89
5.5	結言	94
	参考文献	95

## 第6章 摩擦・摩耗素過程の in-situ 観察と AE 信号の対応

6.1	緒言	96
6.2	実験方法	96
6.2.1	実験装置および計測システム	96
6.2.2	実験条件	98
6.3	実験結果	100
6.3.1	摩擦に伴う表面の変形過程と AE 信号の変化	100
6.3.2	摩耗粒子生成 (移着成長) 過程と AE 信号の変化	103
6.3.3	切削過程と AE 信号の変化	107
6.4	論議	108
6.5	結言	112
	参考文献	113

## 第7章 微小すべり摩擦における摩耗現象と AE 信号

7.1	緒言	114
7.2	実験方法	114
7.2.1	実験装置および計測システム	114
7.2.2	実験条件	116
7.3	実験結果	117
7.3.1	摩耗素子生成の確認とその影響因子	117
7.3.2	摩耗素子生成時の AE 信号	123
7.3.3	アブレイブ摩耗粒子生成時の AE 信号	128
7.4	論議	130
7.5	結言	134
	参考文献	135

---

## 第8章 AE 法による摩擦・摩耗現象の認識および評価の総括

8.1 緒言 .....	136
8.2 AE 信号によるトライボロジー特性の評価 .....	136
8.3 摩耗-AE 相関図の作成・検討 .....	139
8.4 AE 周波数による摩耗形態判別 .....	143
8.5 摩擦・摩耗現象に対する AE 計測の指針 .....	145
8.6 結言 .....	147
参考文献 .....	148

## 第9章 結論

9.1 本研究の成果 .....	150
9.2 今後の課題および展望 .....	155

謝辞 .....	156
----------	-----

論文目録 .....	158
------------	-----

主な記号

$A$	: 移着粒子と摩擦面の接触面積	[mm <sup>2</sup> ]
$A_c$	: 削り取られた面積	[mm <sup>2</sup> ]
$A_r$	: 真実接触面積	[mm <sup>2</sup> ]
$a$	: 真実接触点半径	[mm]
$b$	: 溝傾斜部長さ	[mm]
$c$	: 切れ刃存在数	
$\bar{c}$	: 単位摩擦距離あたりに切れ刃と出会う数	[m <sup>-1</sup> ]
$d$	: 摩耗粒子径	[μm]
$d_{50}$	: メディアン径	[μm]
$e$	: 一つの移着粒子に蓄えられる弾性ひずみエネルギー	[J]
$E$	: 縦弾性係数 ( $E_p$ : ピン材料, $E_c$ : 円筒材料)	[GPa]
$E_{AE}$	: AE 総エネルギー	[V·s]
$E_f$	: 摩擦に起因する AE エネルギー	[V·s]
$E_t$	: 摩耗粒子の脱落により放出される弾性波動エネルギー	[J]
$E_w$	: 摩擦に起因する AE エネルギー	[V·s]
$e_{AE}$	: 単位摩擦距離あたりの AE エネルギー	[V·s/mm]
$e_p$	: AE パルスエネルギー	[V·s]
$e_s$	: 単位せん断領域面積あたりの AE エネルギー	[V·s/mm <sup>2</sup> ]
$H$	: 押し込み硬さ	[N/mm <sup>2</sup> ]
$h$	: 切込み量 (切取り厚さ)	[mm]
$i$	: 一つの真実接触点で集団移着していく摩耗素子数	
$K$	: 摩耗係数	
$k$	: 破壊確率	
$L$	: 摩擦距離	
$l$	: 溝長さ	[m]
$N$	: 表面突起の出会いの総数	[mm]
$N_{cc}$	: AE 計数総数	

$N_{cr}$	: AE 計数率	[cps]
$N_w$	: 総摩耗粒子数	
$n$	: 真実接触点数	
$n_t$	: 摩擦界面に介在する移着粒子数	
$p_m$	: 軟らかい方の塑性流動圧力	[MPa]
$r$	: 摩耗素子半径	[mm]
$S$	: せん断領域総面積	[mm <sup>2</sup> ]
$t$	: 摩擦時間	[s]
$V$	: 摩耗体積 ( $V_p$ : ピン試験片, $V_c$ : 円筒試験片)	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{AE}$	: AE 平均値	[V]
$V_H$	: AE 計数時のハイレベルしきい値電圧	[mV]
$V_L$	: AE 計数時のローレベルしきい値電圧	[mV]
$V_{out}$	: AE 信号校正時出力電圧値	[V]
$V_{pencil}$	: シャープペンシル用芯の圧折時に計測された電圧値	[V]
$\Delta V_{AE}$	: AE 信号校正值	
$v$	: 摩擦速度	[m/s]
$v(x)$	: 摩耗粒子径 $x$ の摩耗粒子一つの体積	
$W$	: 垂直荷重	[N]
$w_s$	: 比摩耗量	[mm <sup>2</sup> /N]
$w_{sr}$	: 微分比摩耗量	[mm <sup>2</sup> /N]
$X$	: 摩耗粒子数	
$x$	: 粒径	
$\alpha$	: 切れ刃すくい角	[°]
$\theta$	: 切れ刃頂角	[°]
$\phi(x)$	: 確率密度関数	
$\nu$	: ポアソン比 ( $\nu_p$ : ピン材料, $\nu_c$ : 円筒材料)	
$\pi$	: 円周率	
$\sigma$	: 垂直応力	[MPa]
$\sigma_s$	: 降伏応力	[MPa]

$\sigma_{SD}$  : 標準偏差

$\tau$  : 移着率

# 第1章 緒論

## 1.1 背景

トライボロジー (tribology) いわゆる摩擦, 摩耗, 潤滑の意義は, 1966年にイギリスで発表された Jost 報告<sup>1)</sup>によって摩擦・摩耗防止と潤滑のあるべき姿と近代的役割が明確化されたのが大きな始まりである. この報告は, トライボロジー改善による経済効果が年々5.15億ポンド(当時で約5,000億円)ほどの節約を生むという驚くべきものであった. また, 1986年度の日本の経済活動において, トライボロジー技術を有効に利用すれば国民総生産(GNP)の約3%を節約できるという調査もなされている<sup>2)</sup>. これらのように, トライボロジーと経済とは密接に関係しており, メンテナンストライボロジーの重要性が浮き彫りにされている.

機械システムには, 機械要素間において接触・相対運動をともなう動的部分が数多く存在する. その動的部分には摩擦・摩耗現象が必ず介在する. 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へ至る場合もある. これらの主な原因は, 摩擦部における潤滑不良によるものである. 機械部品の接触部には常に多くの負荷要因(不純物, 潤滑剤不良, 外部リーク, 異常負荷など)が加わっており, これらの要因によって潤滑剤の油膜破断が生じてしまうと急激に摩耗が進行する. さらに, 摩耗は摩擦面における表面粗化やすきまの増大を進行させ, 摩擦やリーク, ガタの増大を招く. その結果, 機械の精度や効率を低下させるだけでなく, 油漏れや振動, 損傷などの機械トラブルの原因となる. 端的にいうと, 摩擦の増大は主にエネルギーロスにつながり, 摩耗はマテリアルロスおよび摩擦増大という悪循環のフィードバックへとつながる. このように, 機械システムには摩擦・摩耗現象による損失が大きい.

摩耗量の計測は, 重量変化測定と形状変化測定によって主に評価されている<sup>3)</sup>が, どちらも計測の際には機械システムの停止を余儀なくされてしまう.

実際の機械システムでは、その計測のために被測定物を取り外すということは構造的にも不可能なことが多い。インプロセスで摩耗量を計測する方法としては、変位や摩耗粒子量から算出する方法があるが、正確な値は求めることができない。このように、インプロセスでの摩耗量の計測が困難であることから、摩擦・摩耗現象下における機械要素などの寿命診断の判定は非常に難しい。このような場合、故障防止のための予防処置として定期的な修理を行うタイムベースの保全（TBM）がなされるが、オーバーメンテナンスとなり効率が悪い。そこで近年、機械の状態を監視し、異常があれば修理を行うコンディションベースの保全（CBM）が要求されている。実際に、Jost 報告でのトライボロジー改善による年間の経済効果の内訳は Fig. 1.1 のようになっている<sup>4)</sup>。潤滑技術やトライボマテリアル技術などの進歩によりトライボロジー技術は発展しているが、現在でもこの内訳は大きく変わっていないと考えられる。この中でも、(a) 保守、部品交換コストの低減、(b) 破損によるコストの節減、(c) 機械の寿命延長による投資額の節減で占められる 90% 近くは、摩擦・摩耗現象の認識・評価による CBM によって改善できるものである。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、摩擦・摩耗現象そのものを制御することまでは不可能である。したがって、摩擦系における摩擦・摩耗現

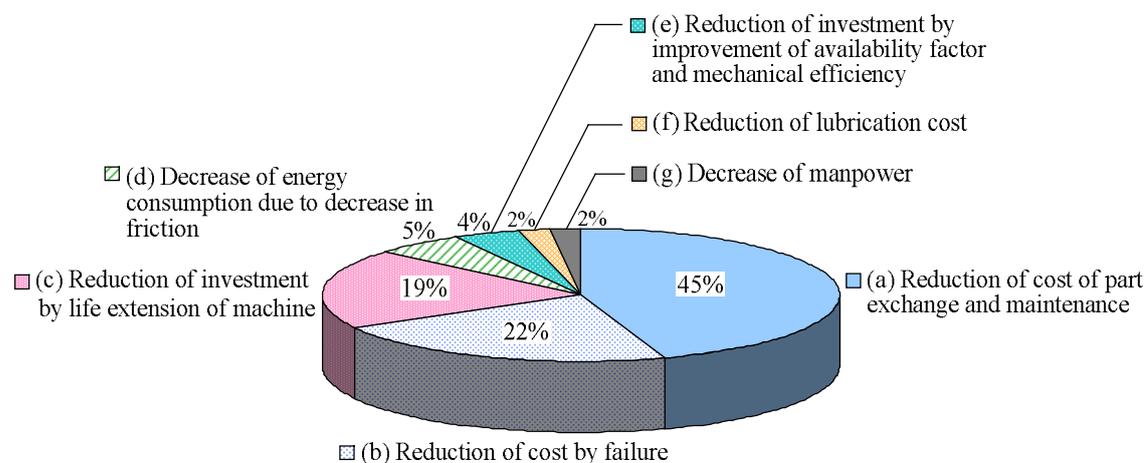


Fig. 1.1 Amount of the reduction during year by the improvement on tribology, total: 515 million £.

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・評価が大切になってくる。

以上に述べてきたように、機械システムにおけるメンテナストライボロジーという観点から、摩耗の進行状態（例えば、摩耗量や比摩耗量）や摩擦界面の状況（例えば、摩耗形態や表面損傷）など摩擦・摩耗現象の認識・評価は必要不可欠である。摩擦・摩耗現象の異常診断法には、(1) 振動法、(2) 温度法、(3) 電気抵抗法、(4) 油分析診断法などがある<sup>5)</sup>。(1) 振動法および(2) 温度法は、摩耗に対する間接的な検出であり、早期検出は困難であるが、異常がある程度大きくなってからの異常部位の同定能力は高い。この異常検出時には、すでに危険な状態にあり、機械システム自体を損なわないためにも早期検出が望ましい。(3) 電気抵抗法は、電気抵抗変化によって潤滑剤の油膜破断を検出するものであるが、潤滑剤中の異物を通して通電する場合があるため注意が必要である。(4) 油分析診断法には、油汚染分析法、SOAP法、フェログラフィ法などがあり、潤滑剤中に混入した汚染粒子（機械外部から侵入した粒子や機械内部から発生した摩耗粒子など）の量、成分、大きさを評価するものである。このため、摩耗の直接的な検出方法ではあるが、循環給油の場合は異常部位の同定能力は低い。これらの方法は、摩擦・摩耗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。

ところで、異常診断法の一つとしてアコースティックエミッション(acoustic emission, AE)法がある。AEとは、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(AE波)として放射される現象である。AE法は変形・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<sup>6-8)</sup>。また、感度が高いためにノイズの影響を受けやすいのが欠点であるが、適切なノイズ対策を行うことで解消できる<sup>9)</sup>。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である。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

るため、トライボロジー特性のインプロセス計測に非常に有効と考えられる。

これまでの先駆的な研究により、トライボロジー特性と AE 信号との関係に関する基礎研究がいくつか行われている<sup>10-13)</sup>。その応用研究として、焼付け<sup>14)</sup>、軸受<sup>15,16)</sup>、歯車<sup>17,18)</sup>、工具摩耗<sup>19-21)</sup>など、様々な摩擦・摩耗現象に関して AE 法を用いた現象診断の試みがなされている。最近では、AE 波形のウェーブレット変換を用いて、ウェーブレット係数の時間変動波形の特徴などから摩耗状態を評価する研究なども行われている<sup>22)</sup>。このように様々な見地から研究が行われているが、肝心の摩擦・摩耗現象と AE 信号との対応付けが未だ明確にされていない。また、ほとんどが定性的な評価にとどまっておき、定量的評価を行っている研究が少ない。これらの理由の一つとして、摩擦・摩耗現象の複雑さが挙げられる。摩擦・摩耗現象は、少しずつ解明されつつあるが、未だ解明されない非常に複雑な現象を含んでいる。さらに、検出された AE 信号はセンサの周波数特性や計測系などにより異なってしまうという問題がある。摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関を定量的に検討するためには、これらの問題点を検討する必要がある。

## 1.2 摩擦・摩耗現象および AE 信号に関する影響因子の検討

AE は変形・破壊に付随して生じることから、一種の変形・破壊現象である摩擦・摩耗過程においても AE が発生する。これらを同時に考えていく場合、以上で述べた摩擦・摩耗現象と AE との複雑さが絡み合うことになる。そこで、影響因子の分析を行い、相互関係を明らかにするとともに、本実験に影響する因子の検討を行う。

摩擦・摩耗現象は大きく摩擦条件、表面、雰囲気、材料の影響を受ける<sup>23)</sup>。対して AE 信号は、破壊形態、計測条件、材料、雑音（環境）の影響がある<sup>24)</sup>。これらの影響因子を踏まえ、Fig. 1.2 に示すようなトライボロジーと AE に関する影響因子の特性要因図が考えられる。ここでは、上記のトライボロジーと AE に関する因子を大きく分類し、その各因子に関わると考えられる詳細な因子をまとめた。Fig. 1.2 より、摩擦・摩耗現象および AE 信号には数

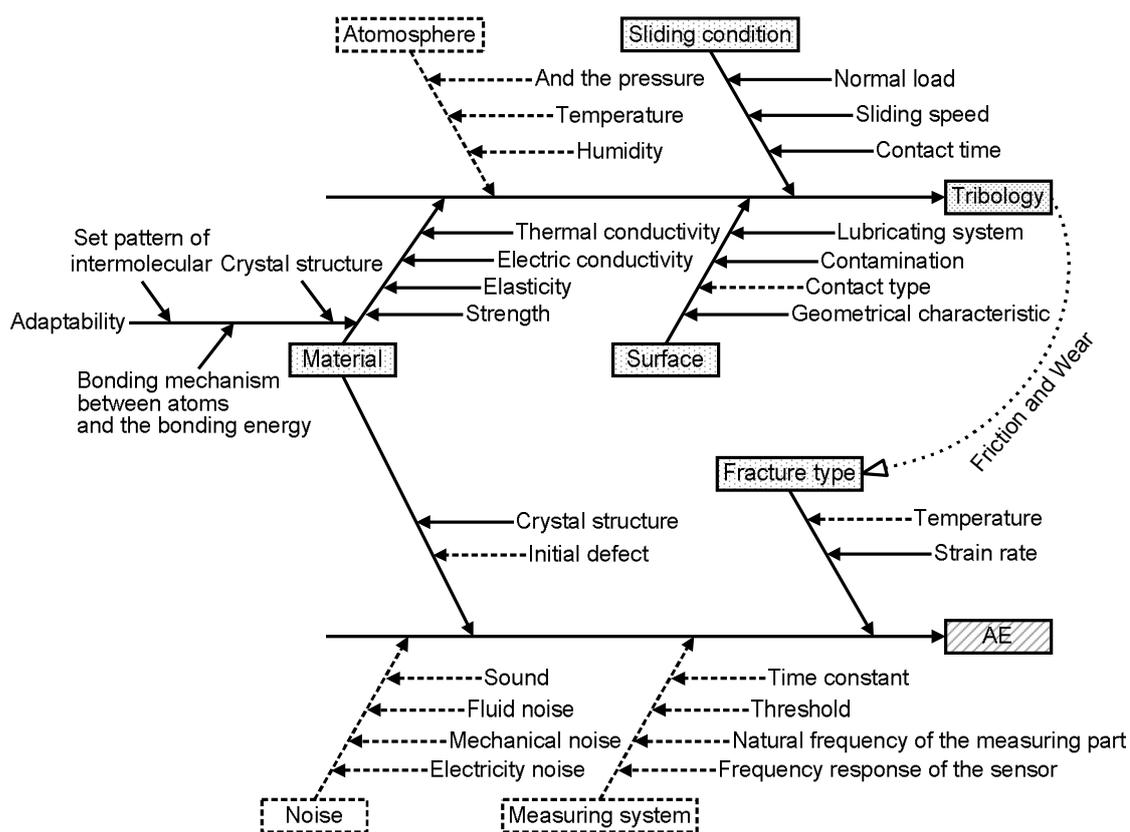


Fig. 1.2 Fishbone diagram showing the influence factor between tribology and acoustic emission.

多くの影響因子が関わり，その複雑さが認識できる．介在してくる要因をできるかぎり最小にするため，実験系および計測系を統一して実験を行う必要がある．また，AE 計測で重要なセンサの取り付けや計測機器のノイズ対策を十分に行わなければならない．これらの対策によって，これらに関する因子の影響は極力抑えられると思われる (Fig. 1.2 破線部分)．摩擦・摩耗現象は，AE の影響因子である破壊形態を経由して AE へ影響を与えると考えることができる．したがって，AE に関わる影響因子は，AE の材料特性と破壊の形態 (摩擦・摩耗現象) となる．そして材料は，トライボロジーおよび AE の双方に影響を与える．単純な同一破壊現象下で発生する AE やその伝播のみを考えるうえでは，AE の材料特性の重要性は高い．しかし，材料の変化により破壊現象そのものが大きく変化してしまうと，その現象と関連のある材料特性の重要性が高くなる．よって，摩擦・摩耗現象下で計測される AE

信号にどのような材料特性が影響するのかを明確にすることは重要と思われる。

### 1.3 目的と研究指針

AE法を摩擦・摩耗現象の認識および評価に応用するためには、AE信号と摩擦・摩耗現象との相関関係を見いだすことが必要不可欠である。先にも述べたように、トライボロジーとAEとに混在している複雑さのため定量的評価が妨げられてきた。Fig. 1.2で示す特性要因図で明らかにしたように、特に摩擦・摩耗現象に関わる因子は数多く、現象自体を制御することは不可能に近い。しかし、摩擦条件や表面性状などを極端に変化させることにより摩耗形態を再現させることが可能である。そこで、摩擦条件（荷重、摩擦速度、相対湿度）、表面（表面性状、潤滑形態）、材料を変化させ、そこで得られる様々な現象の十分な観察と分析を行う。そして、摩擦・摩耗現象の特徴（トライボロジー特性）からAE信号との相関関係を検討し、AE法による摩擦・摩耗現象の認識・評価への応用を図る。

最初に述べたように、“摩耗”は機械システムに大きな影響を及ぼす劣化要因の一つである。この摩耗の形態は、凝着摩耗（adhesive wear）いわゆる“くっついて千切れる現象”とアブレシブ摩耗（abrasive wear）いわゆる“切削現象”の二つが主体であると考えられる。本研究では、主たる摩耗形態である凝着摩耗とアブレシブ摩耗に焦点を当て、これらの摩耗現象を意図的に再現する。そのため、摩擦方式や摩擦条件等を工夫することで凝着摩耗とアブレシブ摩耗を再現させる。そして、そこで発生するAE信号と摩擦・摩耗現象について検討を行う。また、それぞれの摩耗現象のモデル化を試み、AE信号との定量的評価を意識した論議展開を加える。その定量的評価に関する論議は、今までリアルタイムでの計測が困難とされてきた摩耗量に関するトライボロジー特性との相関関係を中心に検討していく。その中で、どのような材料特性が大きく関与するのかを検討し、AE法によるトライボロジー特性評価の糸口とする。そして、これらによって得られた結果に基づき、AE法を

用いた摩擦・摩耗現象の認識と定量的評価を行うための総合的な評価方法の検討を行うことを本研究の目的とする。

## 1.4 本論文の構成

本論文では、摩擦・摩耗時に発生する AE 信号を計測し、AE 信号と摩擦・摩耗現象との相関についての検討を行い、AE 法を用いた摩擦・摩耗現象の認識・評価のために有効な評価パラメータ等の提案および検討を行っている。本論文は、以下の全 9 章より構成される。

第 1 章「緒 論」では、メンテナンストライボロジーの重要性と AE 法の有用性および本研究分野の現状を述べている。また、摩擦・摩耗現象と AE 信号に関係する影響因子を検討している。そして、これらの背景と検討を踏まえたうえで、本研究の目的および研究指針と本論文の構成について述べている。

第 2 章「シビア・マイルド摩耗遷移における摩耗現象と AE 信号」では、実機でよく問題となる摩擦・摩耗現象が劇的に変化する摩耗遷移過程の認識・評価のために、シビア摩耗およびマイルド摩耗現象と AE 信号の対応関係について検討している。ここでは、摩耗遷移点を認識するために有効な AE 評価パラメータなどについて言及している。

第 3 章「無潤滑繰返し摩擦における摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関」では、無潤滑繰返し摩擦において加速的かつマクロ的な凝着摩耗現象と AE 信号との相関について検討している。また、材料の違いに起因した摩耗粒子形態判別に有効な AE 評価パラメータの検討を行っている。さらに、AE が移着粒子の脱落によって発生すると仮定したときの弾性ひずみエネルギーから理論的考察を加えている。

第 4 章「凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関」では、凝着摩耗の基本現象である移着現象に注目し、凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関を検討している。また、摩耗素子の移着モデルを考案し、移着現象において発生する AE の理論的考察を加えている。

第5章「アブレシブ摩耗における切削現象と AE 信号の相関」では、アブレシブ摩耗現象を再現させ、そこで生じる切削現象と AE 信号の相関を検討している。また、アブレシブ摩耗における AE 源やアブレシブ摩耗モデルを用いて AE 信号との理論的対応などについて述べている。

第6章「摩擦・摩耗素過程の in-situ 観察と AE 信号の対応」では、摩擦界面の現象をその場観察 (in-situ 観察) することにより、摩擦・摩耗素過程で計測される AE 信号の AE 源を明らかにしている。

第7章「微小すべり摩擦における摩耗現象と AE 信号」では、微小すべり摩擦実験によって凝着摩耗およびアブレシブ摩耗における微細な摩耗現象と AE 信号 (AE 信号波形およびその AE 周波数分布) の関係について調査している。また、凝着摩耗に関して摩耗素子の生成に及ぼす影響因子や摩耗素子の大きさを明らかにしている。

第8章「AE 法による摩擦・摩耗現象の認識および評価の総括」では、得られた結果を踏まえ、凝着摩耗とアブレシブ摩耗に関して摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関関係を検討・総括している。ここでは、比摩耗量などのトライボロジー特性と AE 信号の関係を述べ、摩耗-AE 相関図の作成・検討を行っている。さらに、摩擦・摩耗現象に対する AE 計測の指針についてまとめている。

第9章「結論」では、各章での結言をまとめ、AE 法を摩擦・摩耗現象の認識・評価へ用いる際の評価パラメータ等の提言ならびに問題点や今後の課題について展望している。

## ＜参考文献＞

- 1) P.H. Jost: “Lubrication (Tribology)”, A Report on the Present Position and Industry's Needs, Department of Education and Science, H.M. Stationery Office, London (1966).
- 2) 眞武弘道：「潤滑剤からトライボロジーへのアプローチ 潤滑の経済効果について」，月刊トライボロジー，17（1989）pp. 31-33.
- 3) 野呂瀬 進：「摩耗量の計測技術」，トライボロジスト，35，11（1990）pp. 775-778.
- 4) 曾田範宗：トライボロジについて—イギリスにおけるトライボロジ活動と潤滑の近代的意義—，日本機械学会誌，74，624（1971）pp. 12-18.
- 5) 野呂瀬 進：「摩耗機構の解析と対策」，株式会社テクノシステム（1992）pp. 545-548.
- 6) R.M. Fisher, J.S. Lally: “Microplasticity Detected by an Acoustic Technique”, Can. J. Phys., 45, 2 (1967) pp. 1147-1159.
- 7) 羽田野はじめ・田中 博・堀内 良・丹羽 登：「アルミニウムの引張試験における応力波発生」，日本金属学会誌，39，7（1975）pp. 675-679.
- 8) 岸 輝雄・栗林一彦・堀内 良・加藤 明：「塑性変形における AE の振幅分布」，日本金属学会誌，41，9（1977）pp. 897-904.
- 9) 吉岡武雄：「機械システムのメンテナンスへの AE 法の応用」，トライボロジスト，47，2（2002）pp. 109-115.
- 10) 和田正毅・水野萬亀雄：「AE による摩擦・摩耗の観測—危険予知について—」，精密工学会誌，52，10（1986）pp. 1719-1724.
- 11) R.J. Boness, S.L. McBride, M. Sobczyk: “Wear Studies Using Acoustic Emission Techniques”, Tribology International, 23, 5 (1990) pp. 291-295.
- 12) J. Hanchi, B.E. Klamecki: “Acoustic Emission Monitoring of the Wear Process”, Wear, 145 (1991) pp. 1-27.
- 13) 久角輝正・横山和秀・関 春彦：「AE による摩擦損傷監視システムの基礎的研究」，トライボロジスト，37，8（1992）pp. 660-666.

- 14) 和田正毅・水野萬亀雄・笹田直：「摩擦・摩耗の AE によるインプロセス計測に関する研究—焼付き過程の AE 計測—」, 精密工学会誌, 56, 10(1990) pp. 1835–1840.
- 15) 藤原孝誌・吉岡武雄：「転がり軸受とアコースティック・エミッション」, 機械の研究, 34, 1 (1982) pp. 133–138.
- 16) 間野大樹・吉岡武雄・是永敦・山本隆司：「AE 観測によるラジアル転がり軸受の異常診断の研究 (第 1 報) —転がり疲れクラックの発生・進展による AE の発生位置標定法の提案と数値計算シミュレーションによる確認—」, トライボロジスト, 45, 4 (2000) pp. 329–336.
- 17) 小田 哲・宮近幸逸・小出隆夫・会見賢一：「歯車の曲げ疲労損傷の AE 特性」, 日本機械学会論文集 (C 編), 58, 551 (1992) pp. 2219–2225.
- 18) 灰塚正次：「歯車における AE 計測」, トライボロジスト, 48, 12 (2003) pp. 971–976.
- 19) S. Dolinsek, J. Kopac: “Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification”, Wear, 225/229, Pt. 1 (1999) pp. 295–303.
- 20) 小島浩二・稲崎一郎・三宅亮一：「アコースティックエミッションを利用した旋削プロセスの監視」, 日本機械学会論文集 (C 編), 52, 474 (1986) pp. 799–805.
- 21) 長谷垂蘭・和田正毅：「アコースティックエミッション法の旋削加工状態認識への適用」, 2006 年度精密工学会春季大会学術講演論文集 (2008) pp. 377–378.
- 22) 宅間正則・新家 昇・西浦隆夫・岡本真一：「AE 法による摩耗状態の評価 (第 1 報, ウェーブレット変換結果の適用)」, 日本機械学会論文集 (A 編), 70, 694 (2004) pp. 802–809.
- 23) 山本雄二・兼田禎宏：「トライボロジー」, 理工学社 (2001) p. 7.
- 24) 日本非破壊検査協会編：「アコースティック・エミッション」, 日本非破壊検査協会 (1990) pp. 1–77.

## 第2章 シビア・マイルド摩耗遷移における 摩耗現象と AE 信号

### 2.1 緒言

すべり摩擦における摩耗の形態は、アブレシブ摩耗と凝着摩耗に大きく分類できると考えられる。アブレシブ摩耗は切削現象と同様であり、その現象自体はほぼ明確にされている<sup>1-3)</sup>。摩耗現象の大半は凝着摩耗であるといっ  
てよいが、凝着摩耗に関しては、凝着部におけるジャンクション成長<sup>4)</sup>、移  
着成長過程<sup>5)</sup>、摩耗粒子の脱落形態<sup>6)</sup>、シビア・マイルド摩耗遷移<sup>7)</sup>などの現  
象が複雑に絡み合っている。そのため、摩擦・摩耗過程は常に動的であり、  
その進行に伴い摩擦系のトライボロジー特性は逐次変化している。AE 計測  
による摩擦・摩耗現象の認識および評価を確立するためには、この逐次変化  
を正確に把握することが必要不可欠である。特に、シビア・マイルド摩耗遷  
移（もしくは、その逆遷移）は、摩耗率が突然 1 桁～3 桁変化し、劇的な摩  
擦・摩耗現象の変化をもたらす。したがって、その遷移現象の認識・評価は、  
実機や摩耗試験における摩耗量評価や焼け付き等の異常状態の予知のために  
極めて重要となる。本章では、その極端な変化といえる金属間の摩擦で生じ  
るシビア・マイルド摩耗遷移に関して、その摩耗現象と AE 信号の関係につ  
いて検討を試みる。

### 2.2 実験装置および実験方法

#### 2.2.1 実験装置

Fig. 2.1 は、本実験で使用した実験装置の外観である。実験装置は CCD カ  
メラおよびマイクロフォンを含み、摩擦部の状況を監視することができる。  
その実験装置の概略図を Fig. 2.2 に示す。摩擦方式は、ピンオンシリンダ型  
である。ピン試験片摩擦部は  $\phi 4$  mm、円筒試験片の外径は  $\phi 50$  mm である。

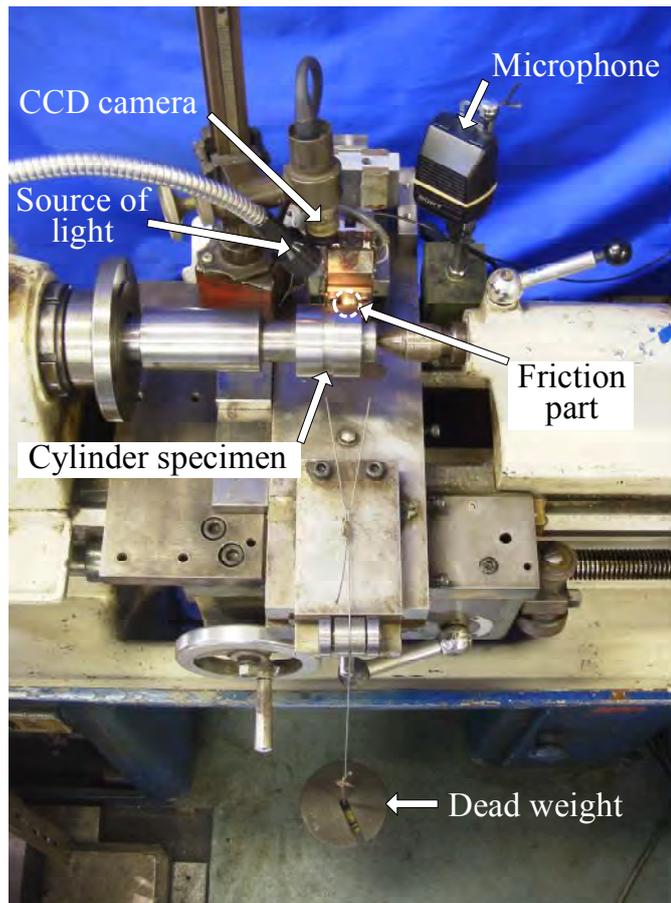


Fig. 2.1 Photograph of the experimental apparatus.

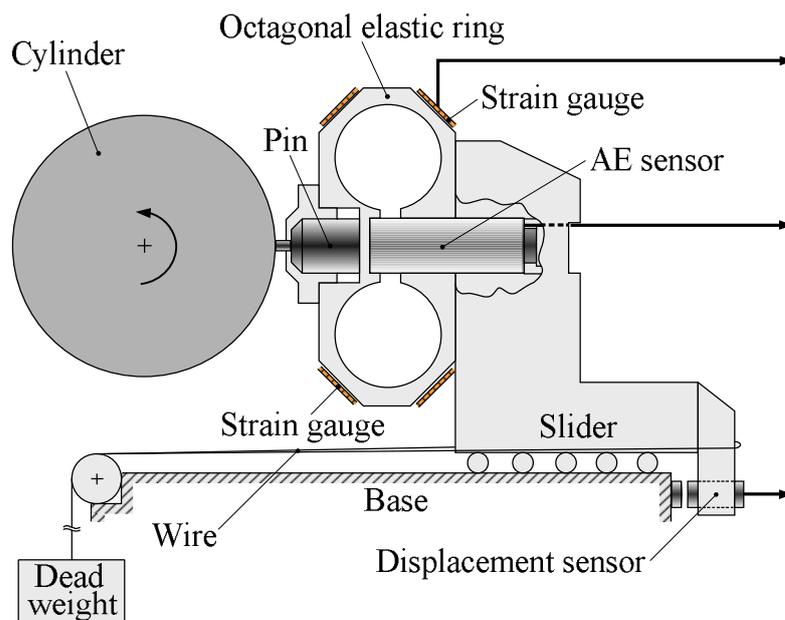


Fig. 2.2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

ピン試験片は力検出用の八角弾性リングに取り付けられ、回転する円筒試験片と接触して摩擦される。その摩擦部で摩擦・摩耗により発生する AE 波は、ピン試験片の摩擦面と反対側に取り付けられた AE センサにより AE 信号として検出される。押付け荷重は、ワイヤを介したおもりによって与えられ、八角弾性リングにより摩擦係数（摩擦抵抗）が計測される。また、スライダ部に取り付けられた非接触式変位センサにより変位を計測し、摩耗の進行状態を簡易的に観測する。

ここで、AE センサの取付け方法について述べる。AE 波が微弱振動であることから、被測定物の正確な情報を得るためにも AE センサの取り付けは重要な問題である。Fig. 2.3 は、本研究における AE センサの取付け方法の詳細を示したものである。AE 波の計測は、被測定物に AE センサを固定・接触させて行うが、センサの感度は接触面積の影響を大きく受ける。被測定物表面には多少の凹凸が存在するため、伝達の補助のためにワセリンを塗付している。AE センサの固定は、絶縁物であり弾性体であるゴムを介し、止めねじで機械的に押し付けている。さらに電氣的雑音を除去するため、センサのケース部分を絶縁物（絶縁テープなど）で保護している。以上のように、本研究ではノイズ対策に十分留意し、摩耗の伴わない良好な流体潤滑下では AE 信号が検出されないことを確認している。

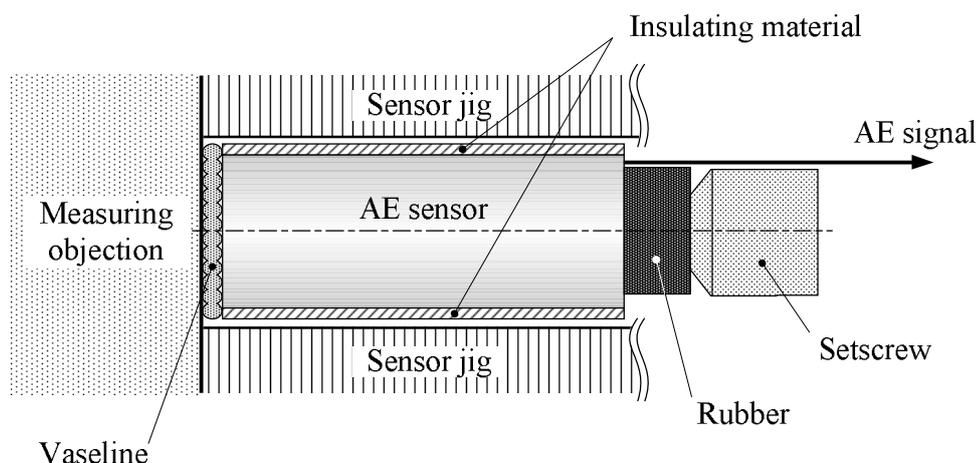


Fig. 2.3 Schematic diagram of the AE sensor installation.

## 2.2.2 AE 評価パラメータおよび計測システム

### (1) AE 評価パラメータ

本研究で用いる主な AE 評価パラメータは、

- (i) AE 計数率 (AE count rate) :  $N_{cr}$  [cps]
- (ii) AE 計数総数 (AE cumulative count) :  $N_{cc}$  [counts]
- (iii) AE 平均値 (AE mean value) :  $V_{AE}$  [V]

である。(i) AE 計数率は、単位時間あたりに発生した AE 事象数である。AE 波には、単発で発生する突発型 AE と次々に発生する連続型 AE がある。摩擦・摩耗で発生する AE は主に連続型 AE であり、その発生数は事象計数法で計数される。本研究では、この事象計数法に 2 レベル方式を用いており、この詳細については以下で述べる。(ii) AE 計数総数は、AE 計数率の時間による積分値であり、過去の履歴を観測するのに便利である。(iii) AE 平均値は、時々刻々と変化する AE 信号の振幅値を示しているといえる。次に、AE 平均値の信号処理方法と AE 信号の計数法について述べる。

Fig. 2.4 は、AE 波形とその包絡線検波波形および AE 計数方法の概略図である。Fig. 2.4 (a) は、電圧信号として計測される AE 信号波形 (AE 波形) である。これを半波整流して包絡線検波した波形が (b) の包絡線検波波形である。AE 平均値は、包絡線検波波形 (放電時定数 : 0.1 ms) にローパスフィルタ (遮断周波数 : 0.32 Hz) を通したものである。AE 信号の計数法は、AE 信号の包絡線検波波形をしきい値によって弁別する事象計数法を用いている。

(c) は、2 レベル方式の事象計数法による計数パルスを示している。従来の 1 レベル方式では、反射波や雑音の影響により多数のイベントを計数 (誤カウント) してしまう場合がある。一方、2 レベル方式は、 $V_H$  (ハイレベルしきい値電圧) を越え、 $V_L$  (ローレベルしきい値電圧) 以下に減衰するまでを 1 イベントとする方式である (Fig. 2.4 (b) の○印を参照)。この場合、 $V_L$  のみを越える信号は計数されない。本研究では、この反射波や雑音による誤カウントを大幅に削減できる 2 レベル方式を採用した。

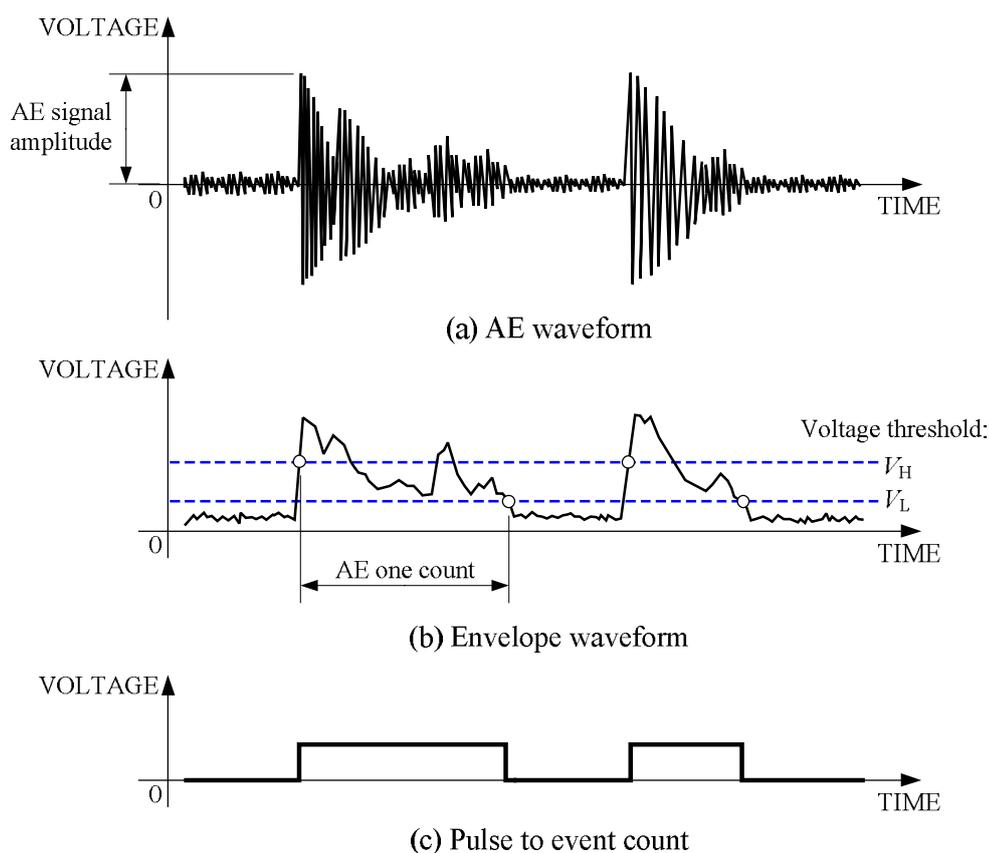


Fig. 2.4 Schematic diagram showing the AE waveform, the envelope waveform and counting way of the event count.

## (2) 計測システム

Fig. 2.5 は、本実験における計測システムの概略である。AE 計測システムは、AE 波を検出し AE 信号に変換する AE センサ、微弱な AE 信号を増幅する増幅器、必要な周波数帯域の信号を取り出すフィルタ、信号処理によって有効な情報に変える信号処理器、そして処理されたデータを表示・保存するコンピュータから構成される。本実験において使用した AE センサは、共振型（共振周波数：1 MHz）の PZT 圧電セラミックス製（センサ寸法： $\phi 12 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ）である。その周波数特性曲線を Fig. 2.6 に示す。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で総合利得 60 dB の増幅を行った。また、摩耗に起因する AE 信号が 500 kHz 以上の周波数成分に特徴を示す<sup>8)</sup>ことから、本実験では 500 kHz のハイ

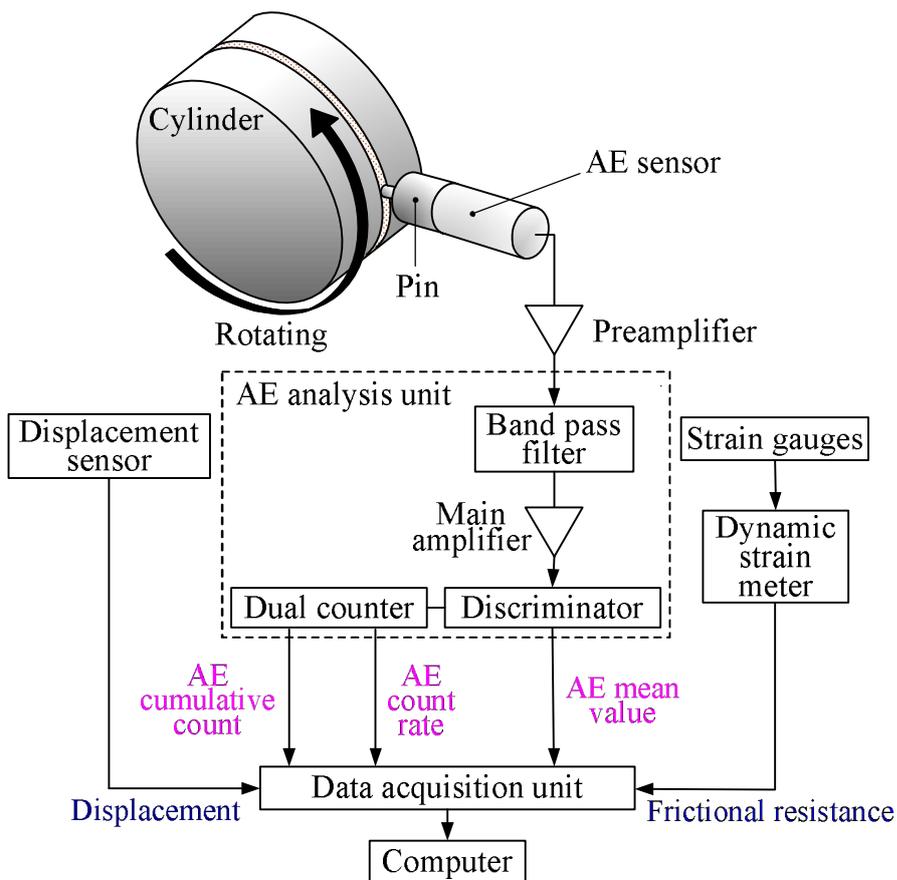


Fig. 2.5 Friction system and the block diagram of instrumentation for signal acquisition.

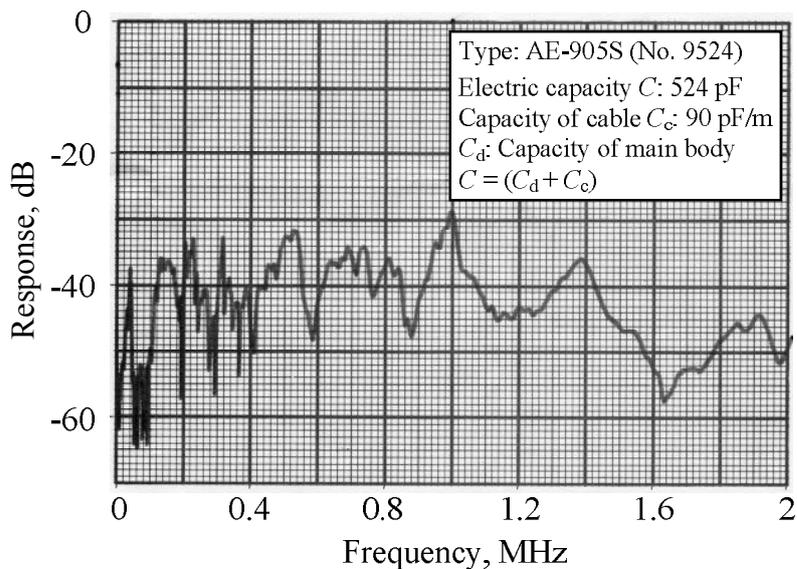


Fig. 2.6 Frequency response curve of the AE sensor (resonant type).

パスフィルタ処理した信号の計測を行っている。

本実験で計測する AE パラメータは、AE 平均値、AE 計数率、AE 計数総数である。各種信号は、計測機器によって処理され、PC にて表示・記録が行われる。

### 2.2.3 実験条件

供試材として、ピン試験片には低炭素鋼 (S15C ; 275 HV)、円筒試験片には焼入れ処理したクロムモリブデン鋼 (SCM435 ; 700 HV) を用いた。円筒試験片摩擦面は、焼入れ処理後に円筒研削 ( $Rz$  1.2  $\mu\text{m}$  前後) により仕上げた。また、ピン試験片の初期表面粗さは、 $Ra$  0.4  $\mu\text{m}$ 、 $Rz$  3.0  $\mu\text{m}$  とした。両試験片の摩擦表面を研磨紙 (#1000) により研磨しなじませ、エチルアルコール中で超音波洗浄した後に実験を行った。本実験の摩擦条件を Table 2.1 に示す。実験は、押付け荷重 20 N (平均接触面圧 : 1.6 MPa)、摩擦距離 1800 m として、摩擦速度と湿度の異なる条件下で各 2 回ずつ行った。比摩耗量の速度特性<sup>9,10)</sup>より、比摩耗量が極大および極小を示す摩擦速度 (0.5 m/s および 1.0 m/s 付近) を選択し比較を行った。また、摩擦速度 1.0 m/s に関して、高湿度下 (80% RH) との比較も行った。これら摩擦速度および湿度の条件設定は、摩耗率の高いシビア摩耗と摩耗率の低いマイルド摩耗をそれぞれ再現させるためである。実験はすべて室温 (約 20°C)、大気中、無潤滑下で行った。

Table 2.1 Summary of the experimental conditions

Normal load $W$ , N	20
Sliding velocity $v$ , m/s	0.5, 1.0
Humidity, % RH	20, (50), 80
AE amplification factor, dB	60
AE band-pass filter, kHz	HPF: 500 LPF: non-filter
Voltage threshold, mV	$V_H$ : 50 $V_L$ : 30

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 シビア・マイルド摩耗遷移における AE 平均値の変化

Fig. 2.7 は、シビア・マイルド遷移が生じた場合のピン変位、摩擦係数、AE 平均値の経時変化の一例である。AE 計数率に関しては、AE 平均値とほぼ同様の変化を示したため、本章では AE 平均値を用いて論議を進める。また Fig. 2.8 と Fig. 2.9 は、摩耗粒子および円筒試験片の摩耗痕断面形状の変化をそれぞれ示している。

摩耗初期過程（摩擦距離 0～300 m）では、摩擦係数および AE 平均値の振幅変動が大きく、この領域では摩擦音が確認された。このとき、摩耗粒子は Fig. 2.8 (a) のような金属色の大きなシビア摩耗粒子であったことから、この領域はシビア摩耗形態といえる。次に、この初期摩耗の後、摩擦係数および AE 平均値の振幅変動は減少し、黒色砂状の小さな摩耗粒子が観察され始

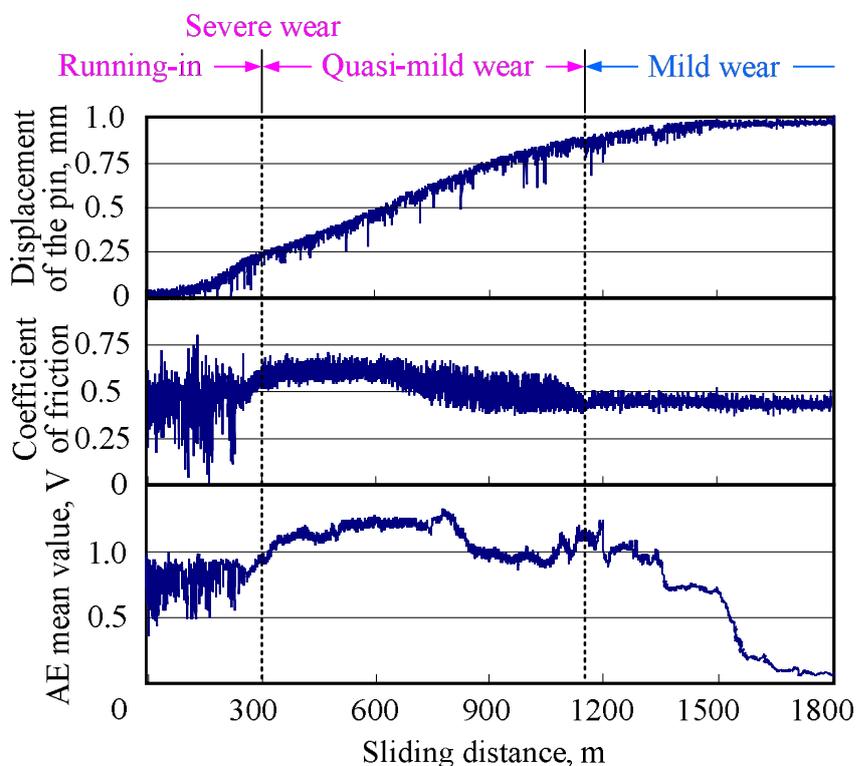


Fig. 2.7 Fluctuations in the displacement of the pin, coefficient of friction, and AE mean value ( $W = 20$  N,  $v = 0.5$  m/s, dry, 50% RH).

めた。しかし、このとき円筒試験片摩擦面の表面粗さは大きく、摩擦距離 1100 m 付近まで Fig. 2.9 (a) のように荒れていた。また Fig. 2.8 (b) において、黒色砂状の摩耗粒子の中に金属色のシビア摩耗粒子がいくつか確認できる。これらの観察結果より、この第二の領域をマイルド摩耗に遷移する途中過程（準マイルド摩耗<sup>11)</sup>）と考える。そして最終的に、摩耗形態が完全にマイルド摩耗へと遷移する。この過程では、摩耗率（Fig. 2.7 におけるピン変位の傾きに相当）および AE 平均値が劇的に減少することがわかる。また、摩擦係数および AE 平均値の振幅変動は、1200 m 付近よりさらに減少している。摩耗粒子は、Fig. 2.8 (c) のように黒色砂状の微細なマイルド摩耗粒子が主となっている。さらに Fig. 2.9 (b) より、円筒試験片摩擦面の損傷が Fig. 2.9 (a) と比べて小さくなっていることが明らかである。

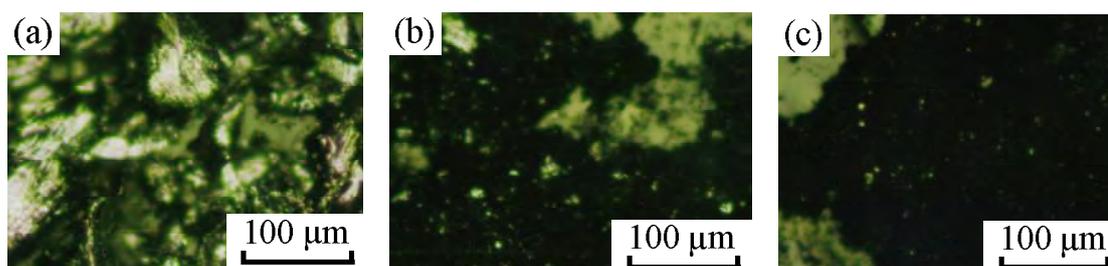


Fig. 2.8 Changes in the wear particles for different wear modes ( $W = 20$  N,  $v = 0.5$  m/s, dry, 50% RH): (a) severe wear mode; (b) quasi-mild wear mode; and (c) mild wear mode.

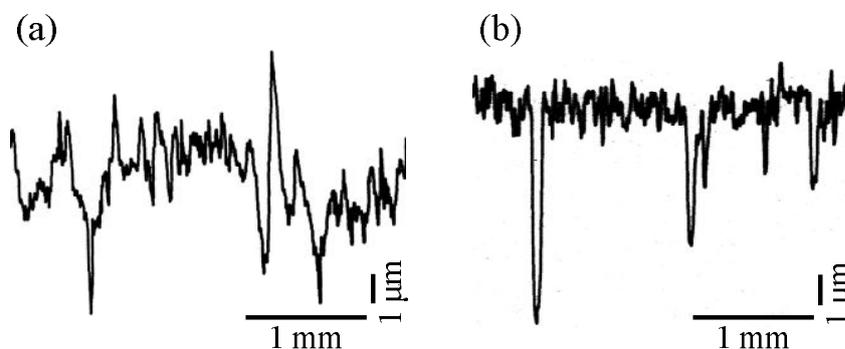


Fig. 2.9 Profile curves of the wear tracks of the cylindrical specimens: (a) in quasi-mild wear mode and (b) in mild wear mode.

本研究では、マイルド摩耗の必要十分条件<sup>12)</sup>（：摩擦面が滑らかであり、大きな摩耗粒子が存在しない。摩耗粒子の大きさが数十 $\mu\text{m}$ 以下と微細である。比摩耗量が $10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ 以下と低い。）に基づき、初期摩耗過程から準マイルド摩耗までをシビア摩耗領域とみなす。

### 2.3.2 シビア・マイルド各摩耗現象下の摩耗現象と AE 信号の特徴

Fig. 2.10 は、本摩擦条件から得られたピン変位、摩擦係数、AE 平均値の経時変化である。また、Fig. 2.11 (a) および (b) は、それぞれ各摩耗形態における摩耗粒子とピン摩耗面の観察結果を示している。Fig. 2.10 において、摩擦速度  $v = 0.5 \text{ m/s}$  では摩耗率が大きく、対して  $v = 1.0 \text{ m/s}$  では摩耗率が非常に小さい（比摩耗量で  $10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$  以下）。また Fig. 2.11 より、その摩耗の激しさの違いが摩耗粒子および摩耗面にあらわれていることがわかる。したがって、前節で述べたシビア摩耗およびマイルド摩耗の摩耗形態の条件を考慮すると、摩擦条件  $v = 0.5 \text{ m/s}$ , 20% RH ではシビア摩耗（初期摩耗過程＋準マイルド摩耗過程）、 $v = 1.0 \text{ m/s}$  の 20% RH および 80% RH ではマイルド摩耗と判断できる。これは、比摩耗量の速度特性から意図したように、シビア摩耗とマイルド摩耗の各摩耗形態を、摩擦速度の違いによって再現できたといっている。

Fig. 2.12 は、生成した摩耗粒子の粒径分布曲線を、摩擦条件の違いにより示したものである。この分布曲線は、摩耗粒子の走査型電子顕微鏡（SEM）画像から 100 個の粒子をランダムに選択して得たものである。なお、摩擦条件  $v = 0.5 \text{ m/s}$ , 20% RH に関しては、初期摩耗過程と準マイルド摩耗過程を区別して粒径分布曲線を求めた。また、各摩耗形態の分布曲線から次の摩耗粒子メディアン径が得られた：10.8  $\mu\text{m}$ （シビア摩耗）、1.3  $\mu\text{m}$ （準マイルド摩耗）、0.9  $\mu\text{m}$ （マイルド摩耗, 20% RH）、0.9  $\mu\text{m}$ （マイルド摩耗, 80% RH）。この結果より、シビア摩耗からマイルド摩耗の遷移が進行するにつれて摩耗粒子径が減少していることがわかる。マイルド摩耗における湿度の影響は、摩耗粒子径にはみられなかったが、生成した酸化物に以下の相違がみられた。低湿度条件下（20% RH）では、Fig. 2.11 (ii) のように摩耗粒子および摩擦

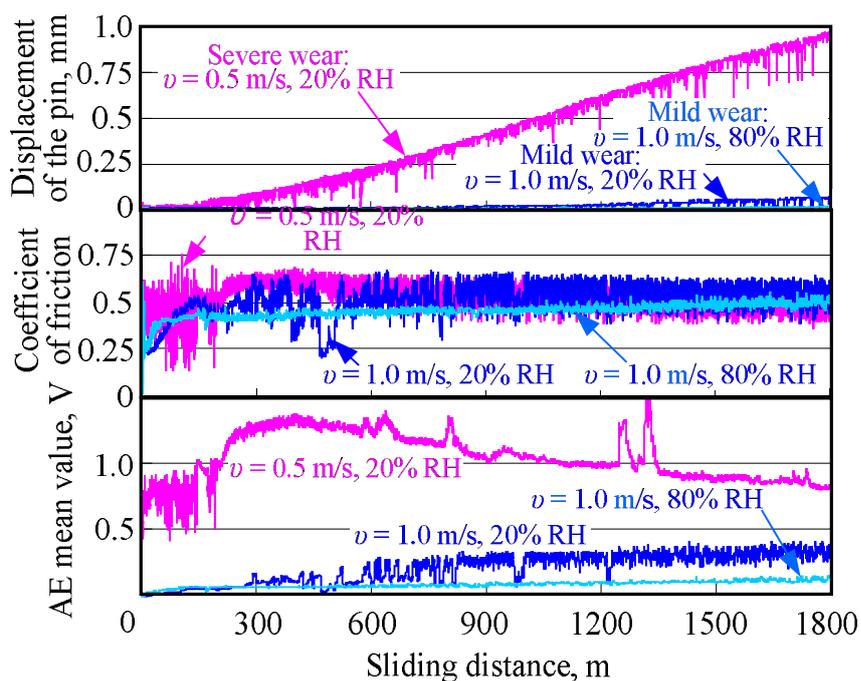
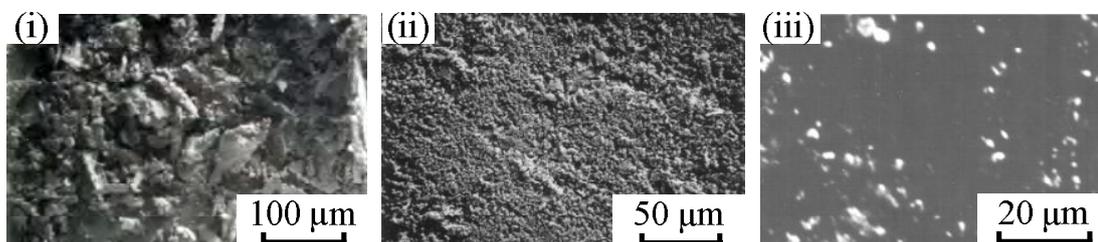
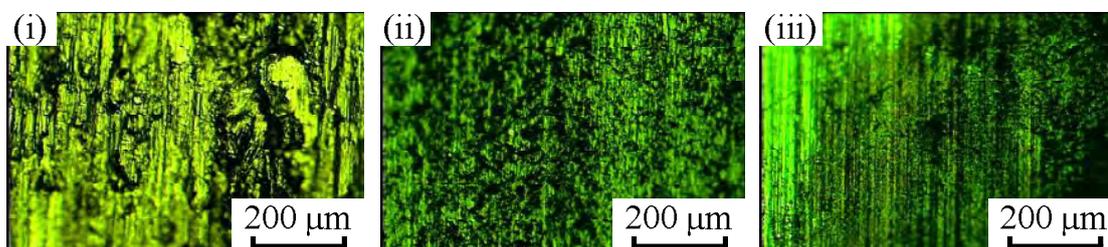


Fig. 2.10 Fluctuations in the displacement of the pin, coefficient of friction, and AE mean value for different sliding conditions ( $W = 20$  N, dry).



(a) Scanning electron micrographs of the wear particles.



(b) Micrographs of the worn surfaces of the pins: the sliding direction is ↓.

Fig. 2.11 Observations for wear mode: (i) severe wear,  $v = 0.5$  m/s, 20% RH; (ii) mild wear,  $v = 1.0$  m/s, 20% RH; and (iii) mild wear,  $v = 1.0$  m/s, 80% RH.

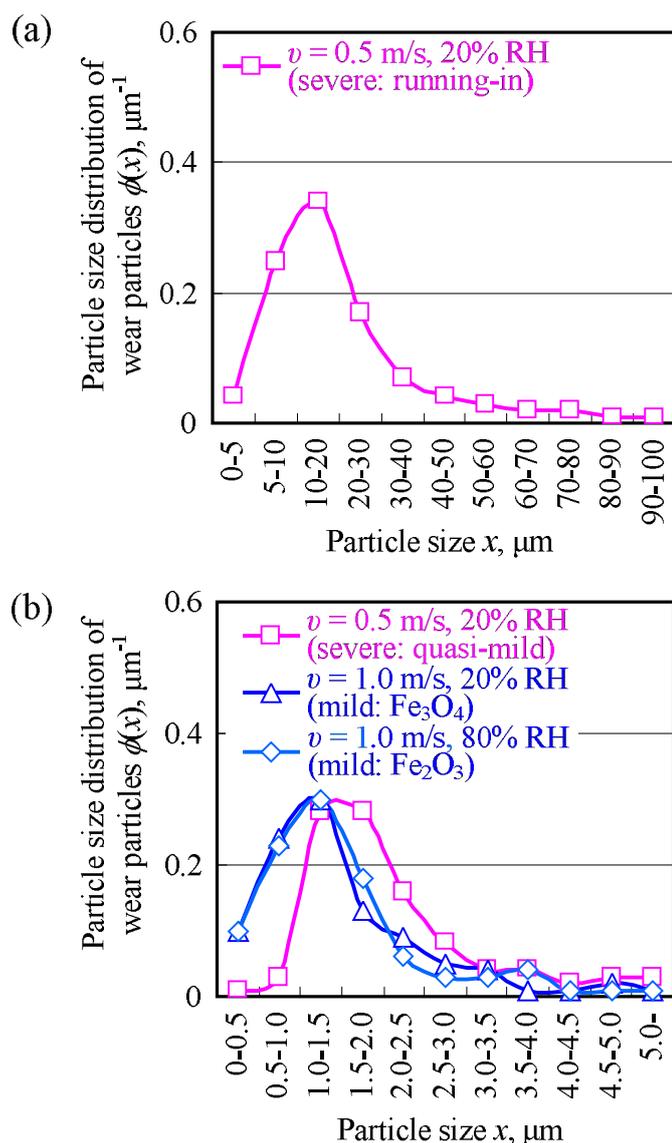


Fig. 2.12 Particle size distributions of wear particles for each wear mode: (a) for severe wear and (b) mild wear and quasi-mild wear.

面上の酸化膜は黒色を呈していた。一方、高湿度条件下（80% RH）では、Fig. 2.11 (iii) のように摩耗粒子および摩擦面上の酸化膜は赤褐色を呈していた。これら生成した酸化物の色から判断すると、前者はマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) であり、後者はヘマタイト ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) であると推察される。特に、高湿度条件下で生じた摩耗粒子の数はごくわずかであった。

Fig. 2.13 は、マイルド摩耗における円筒試験片摩擦面の SEM 画像である。これは、摩擦実験後にエチルアルコール中で超音波洗浄して観察しているが、

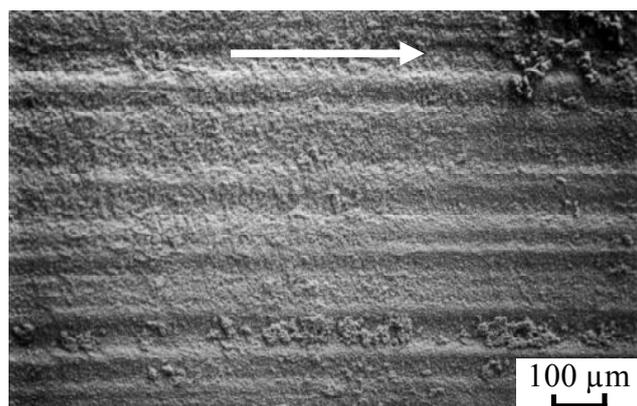


Fig. 2.13 Scanning electron micrograph of transfer particles adhered to the friction surface of the cylindrical specimen ( $W = 20$  N,  $v = 0.5$  m/s, dry, 20% RH). The arrow indicates the sliding direction.

表面上に無数の移着粒子（transfer particle：摩擦面上に介在し、摩擦系外に排出される前の摩耗粒子）が凝着し残留している様子が確認できる。マイルド摩耗時には、ピン摩擦面の酸化変色部分において同様の様子を観察することができた。なお、シビア摩耗時には Fig. 2.11 (b) (i) のように金属色の大きな移着粒子が摩擦面に存在し、Fig. 2.13 のような微細な移着粒子の付着は認められなかった。この微細化された移着粒子の摩擦界面での滞留が、摩耗遷移を引き起こす原因であり<sup>13)</sup>、さらに AE 信号レベルに影響を与えていると考える。

Fig. 2.10 において、以上に述べた摩擦条件の違いによる差異は、摩擦係数の大きさにあまりあらわれていないが、その振幅変動にあらわれていることが確認できる。ところが、摩擦係数の振幅変動からは、相対湿度の違いによる摩耗現象の差異は判別できても、摩擦速度の違いによる摩耗形態の差異までは判別することができない。これは単に、相対湿度の違いに起因した潤滑効果の違いが摩擦抵抗にあらわれた影響と考えられる。対して、AE 平均値に関しては、その大きさに明確な差があらわれており、摩擦条件の違いによる摩耗現象の差異をよくとらえている。また、AE 平均値の振幅変動にも差異があることがわかる。これらは、摩耗粒子の大きさや表面損傷および摩耗量の違いなど摩擦界面における変形・破壊現象をよくとらえているためである。したがって、AE 信号の変化は摩擦条件の違いによる摩耗現象の相違を、

摩擦係数よりも明確に認識・評価できる。

### 2.3.3 摩擦・摩耗現象と AE 評価パラメータの相関

摩擦・摩耗現象における AE 計測では、AE センサを取り付けた測定対象の相手の損傷が大きい場合、相手の変形・破壊による AE 波が摩擦面を介して伝播することが考えられる。このような場合〔例えば、Fig. 2.9 (a) のような場合〕、計測される AE 信号に円筒の損傷の影響が含まれるであろう。本摩擦系において、その影響を AE 標準音源（シャープペンシル用芯の圧折によって発生する AE 波）を用いて調べたところ、円筒摩擦面からの AE 信号量は、ピン摩擦面からの AE 信号量の 1/10 であった。したがって、円筒の損傷が無視できない場合には、トライボロジー特性（表面損傷や比摩耗量など）をピンと円筒試験片の両者の和を用いる。

Fig. 2.14 は、摩擦界面の損傷と AE 平均値の振幅変動幅の関係を示している。この摩擦界面の損傷は、ピン試験片および円筒試験片の摩擦面の算術平均粗さ  $Ra$  の和により評価している。また、AE 平均値の振幅変動幅は、AE 平均値の標準偏差  $\sigma_{SD}$  により評価している。これらは、各摩擦条件で 2 回ずつ行った実験の平均値をプロットしたものである。Fig. 2.14 より、AE 平均

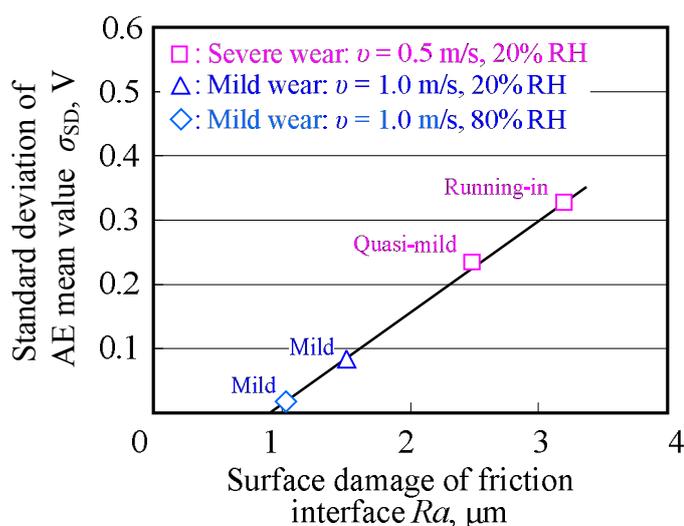


Fig. 2.14 Relationship between the standard deviation of the AE mean value  $\sigma_{SD}$  and the surface damage at the friction interface  $Ra$ .

値振幅変動幅と摩擦界面の損傷の間に非常によい相関関係があることがわかる。これは、摩擦界面における凝着の激しさが AE 平均値の変動成分に関係するためと考える。

Fig. 2.15 は、各摩擦条件において微分比摩耗量 (differential specific wear あるいは specific wear rate) と AE 平均値の関係を示したものである。微分比摩耗量  $w_{sr}$  は、

$$w_{sr} = \frac{1}{W} \frac{dV}{dL} \quad (2.1)$$

で定義される<sup>14,15)</sup>。ここで、 $W$  は押付け荷重、 $V$  は摩耗体積、 $L$  は摩擦距離である。また、比摩耗量 (specific wear)  $w_s$  は、単位荷重・単位摩擦距離あたりの摩耗体積であり、

$$w_s = \frac{V}{WL} \quad (2.2)$$

で定義される<sup>16)</sup>。現在、この比摩耗量の値を用いて耐摩耗性の指標などを表現するのが一般であるが、摩耗遷移のような急激に摩耗量が増加する場合には厳密ではない。そこで本研究では、摩耗遷移が起こらず単一の摩耗形態が

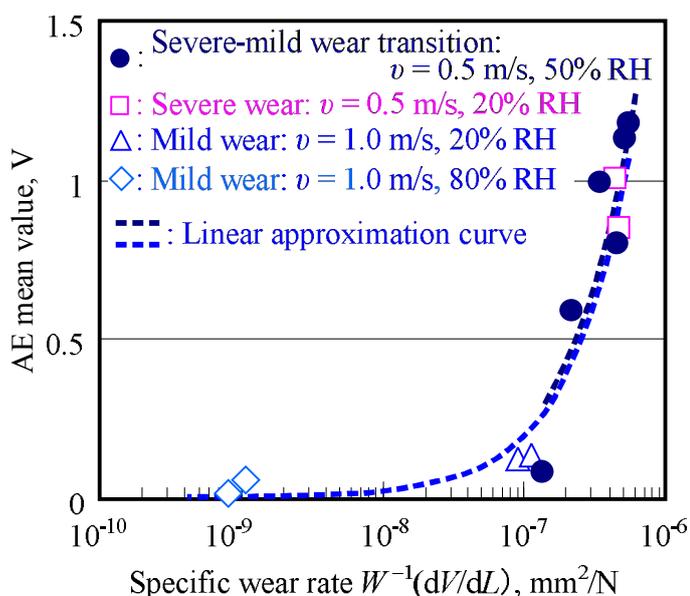


Fig. 2.15 Relationship between the specific wear rate and the AE mean value for different sliding conditions.

継続する場合には比摩耗量を，摩耗遷移によって摩耗の進行が大きく変化する場合は微分比摩耗量を用いて評価する．これを踏まえて Fig. 2.15 では，摩擦条件の違いより得られた単一の摩耗形態の場合（Fig. 2.10）には，摩耗量の最終値から算出される比摩耗量を微分比摩耗量としてプロットした．また，シビア・マイルド摩耗遷移の伴う場合（Fig. 2.7）には，摩擦距離 300 m ごとの微分比摩耗量をプロットした．なお，ここで示す微分比摩耗量は，ピンと円筒試験片の両者の和である．Fig. 2.15 より，これらに関して引いた線形近似曲線がほぼ等しく，微分比摩耗量と AE 平均値に線形関係が認められる．よって，Fig. 2.15 の関係から微分比摩耗量を監視できれば，常に摩耗量の変化を追うことができる．実機等において微分比摩耗量を求めることは容易ではないが，AE 平均値の計測によって，微分比摩耗量すなわち摩耗量の逐次経過の監視が可能になると考える．

## 2.4 論 議

摩擦速度および相対湿度が異なる摩擦条件によって，摩耗状態の異なるシビア摩耗とマイルド摩耗をそれぞれ再現することができた．ここでは，シビア・マイルド摩耗遷移における摩耗現象と AE 信号との対応について論議を行う．そして，AE 法を用いたシビア・マイルド摩耗遷移（あるいは逆遷移）現象を認識・評価のための指針を述べる．

まず，シビア摩耗とマイルド摩耗における摩耗現象と AE 信号の対応について考察する．シビア摩耗時は，激しい凝着によって大きな移着粒子が形成されるため，表面の損傷も大きく，検出される AE 信号レベルが大きい．これは，凝着摩耗で計測される主要な AE 信号が，固体同士の直接接触部（true area of contact）における移着（transfer）の規模と関係するためである．つまり，直接接触部で生じる凝着・破断の大きさと数が，解放されるひずみエネルギーすなわち AE 波の大きさに影響するためと考える．この移着によって生じる AE 信号に関しては，第4章で詳しく論じる．対して，マイルド摩耗時は，生成する移着粒子は小さくなり，表面の損傷も少なく，検出される AE

信号レベルは小さい。マイルド摩耗遷移の原因は、摩擦の繰り返しによる摩擦表面の機械的活性化が気体吸着を促進させるためといわれている<sup>17)</sup>。材料同士の直接接触部は、表面突起の接触部である真実接触部 (real area of contact) 内において、気体吸着分子を介して部分的に形成される<sup>18)</sup>。すなわち、摩擦界面における気体の吸着や酸化膜の形成によって直接接触部が減少していくと考えられる。したがって、凝着によって発生するマイルド摩耗時の AE はシビア摩耗時に比べて小さくなるといえる。

次に、マイルド摩耗において相対湿度の違いが AE 信号に与える影響について考察する。これは、摩擦界面に介在する摩耗粒子の影響と関係しており、準マイルド摩耗からマイルド摩耗に遷移する過程での AE 信号レベルの減少 (Fig. 2.7 および Fig. 2.10 を参照) と関連付けられる。Fig. 2.12 (b) からわかるように、相対湿度 80% RH および 20% RH における摩耗粒子の粒径分布曲線はほぼ一致した。また、両湿度条件下で生成した摩耗粒子のメディアン径は  $0.9 \mu\text{m}$  と同じであった。さらに、相対湿度の違いによって摩擦面および摩耗粒子表面に  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の異なる酸化物が生成した。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  のモース硬さは、ほぼ同値である<sup>19)</sup>。これら摩耗粒子の大きさと強度から推察すると、上記の場合に関しては、移着粒子に蓄えられる弾性エネルギーの値に差はないであろう。この場合、弾性エネルギーの大きさは、摩擦界面に介在する摩耗粒子の数に依存する。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  は  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  に比べ摩擦特性に優れるという報告<sup>20)</sup>があるが、本実験の場合は相対湿度が異なるため、摩擦界面における水蒸気の影響が大きいと思われる。高湿度下では、水蒸気によって微細な摩耗粒子が凝集し、摩耗粒子が摩擦界面に滞留すると考えられる。よって、Fig. 2.13 のように数多くの移着粒子が摩擦界面に介在し、垂直荷重の大半を支えるため、摩擦面と移着粒子間に作用する垂直応力は小さくなる。その結果、移着粒子に蓄えられる弾性ひずみエネルギーが減少し、脱落する摩耗粒子数 (摩耗量) および AE 信号レベルが減少する。これは、Rabinowicz の摩耗粒子生成モデル<sup>21)</sup>より説明することができる。摩擦界面に介在する移着粒子の影響は、次章で詳しく論議する。

本実験において、シビア摩耗時に対するマイルド摩耗時の AE 平均値の比

の値は、約 1/10 であった。この初期摩耗時の AE 平均値の値が 1/10 に変化する点がシビア・マイルド摩耗遷移点と評価できるであろう。また、なじみの破綻<sup>22)</sup>が生じてマイルド摩耗からシビア摩耗への逆遷移が生じる場合は、AE 平均値が 10 倍になると考えてよい。シビア・マイルド摩耗遷移時に AE 平均値が減少するのは、先に述べた直接接触部における凝着の減少、そして移着粒子の微細化と垂直応力の減少に伴う移着粒子内の弾性エネルギーの減少の結果といえる。これらの結果は、発生する AE 信号だけでなく摩耗量にも関係するため、AE 平均値と微分比摩耗量により相関が得られたといえる (Fig. 2.15)。また、AE 平均値の振幅変動幅と摩擦界面の損傷の間により相関関係があるのは、摩擦界面における移着粒子の振舞いや移着の規模が AE 信号の変動成分に関係するためと考える (Fig. 2.14)。摩擦・摩耗現象の評価・認識において重要なのは、摩耗形態の認識、摩擦界面の損傷評価、摩耗量の評価である。摩擦係数は、単に摩擦抵抗を知るためのパラメータであるため、摩擦界面の現象を十分に把握できるとはいえない。しかし、AE 法を適用すれば、AE 信号レベルおよび AE 信号の振幅変動幅より、摩耗遷移点、微分比摩耗量、摩擦界面の損傷（両摩擦面の算術平均粗さ  $Ra$  の和）をリアルタイムで評価することが可能である。

ここで、摩擦速度の影響について補足しておく。引張試験のような単純な変形・破壊過程では、変形速度の増加に伴い AE の発生は一般に増加する<sup>23)</sup>。本実験でみられたように摩擦・摩耗現象に関しては、摩擦速度の影響は摩耗形態の変化としてあらわれ、その影響が AE 信号の変化としてあらわれた。これは、摩擦速度により摩耗形態や摩耗粒子形態が変化する場合には、AE 信号はその現象変化（変形・破壊形態）を優先して変化するということである。もし、移着現象のみが生じるような単一現象を考える場合、摩擦速度の影響は AE 信号に直接あらわれるであろう。

## 2.5 結 言

本章では、摩擦速度および相対湿度の異なる条件により、シビア摩耗およびマイルド摩耗現象を再現させた。そこで、AE 法によるシビア・マイルド摩耗遷移現象の認識・評価のために、それぞれの摩耗現象と AE 信号の対応について論議を行った。本章で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) AE 平均値の変化は、摩擦係数の変化に比べ、シビア摩耗およびマイルド摩耗現象の相違をよく認識できる。これは、摩擦係数（摩擦抵抗）ではとらえきれない微細な摩擦・摩耗現象を AE 法がとらえているためである。
- (2) シビア・マイルド摩耗遷移における AE 信号の特徴は、シビア摩耗時は AE 信号レベルおよび AE 信号の変動幅が大きく、マイルド摩耗時はその逆の傾向を示す。これは、直接接触部における凝着、摩擦界面の移着粒子内の弾性エネルギーが大きく関係していると考えられる。
- (3) AE 平均値の振幅変動幅（標準偏差）と摩擦界面の損傷（両摩擦面の算術平均粗さ  $Ra$  の和）に比例関係が認められた。この関係から、AE 平均値の振幅変動幅の計測により摩擦界面の損傷状態を監視することができる。
- (4) シビア摩耗またはマイルド摩耗の単一現象およびシビア・マイルド摩耗遷移の生じた場合に関して、微分比摩耗量と AE 平均値の間に線形関係が認められた。これは、AE 平均値の計測から微分比摩耗量すなわち摩耗量の逐次経過を監視できる可能性を示唆している。
- (5) 摩擦速度によって摩耗形態や摩耗粒子形態などの摩耗現象が変化する場合、その摩耗現象の変化が AE 信号に大きな影響を与える。

< 文 献 >

- 1) E. Rabinowicz, A. Muiis: “Effect of Abrasive Particle Size on Wear”, *Wear*, 8 (1965) pp. 381–390.
- 2) 笹田 直・尾池 守・江森信彦:「遊離粒子をはさんだすべり摩擦における摩耗過程」, *潤滑*, 27, 12 (1982) pp. 922–929.
- 3) 笹田 直・尾池 守:「アブレイブ摩耗に対する潤滑効果」, *潤滑*, 27, 9 (1982) pp. 703–708.
- 4) D. Tabor: “Junction Growth in Metallic Friction”, *Proc. Roy. Soc., A* 251 (1959) pp. 378–393.
- 5) 笹田 直:「凝着と摩耗」, *潤滑*, 24, 11 (1979) pp. 700–705.
- 6) 笹田 直:「球状およびころ状摩耗粒子の形成」, 千葉工業大学研究報告理工編, 46 (1999) pp. 49–56.
- 7) 笹田 直:「凝着摩耗の研究 (1) —空中および真空中における金属の摩耗—」, *潤滑*, 9, 2 (1964) pp. 89–99.
- 8) 和田正毅・水野萬亀雄:「AE による摩擦・摩耗の研究—摩耗形態と AE 信号—」, *精密工学会誌*, 55, 4 (1989) pp. 673–678.
- 9) 笹田 直・野呂瀬 進・志村好男:「摩耗進行曲線と速度特性」, *潤滑*, 20, 10 (1975) pp. 719–726.
- 10) 曾田範宗・森 正緑:「 $10^{-1}$  m/s から  $10^2$  m/s にわたる広範囲速度下の炭素鋼の摩耗の基本特性」, *潤滑*, 31, 4 (1986) pp. 245–251.
- 11) H. Goto, Y. Amamoto: “Effect of varying load on wear resistance of carbon steel under unlubricated conditions”, *Wear*, 254 (2003) pp. 1256–1266.
- 12) 三科博司:「マイルド摩耗の必要条件・十分条件」, *トライボロジー会議予稿集*, 東京 2003-5 (2003) pp. 9–10.
- 13) K. Hiratsuka, K. Muramoto: “Role of Wear Particles in Severe-Mild Wear Transition”, *Wear*, 259, 2005, pp. 467–476.
- 14) 大越 諄・佐田登志夫・水野万亀雄:「じん速摩耗試験機の考案とそれによる摩耗機構の検討」, *日本機械学会論文集*, 21, 107 (1955) pp. 555–561.

- 15) 笹田 直：「摩耗 (1)」，機械の研究，57，1 (2005) pp. 29–33.
- 16) 山本雄二・兼田禎宏：「トライボロジー」，理工学社 (2001) p. 189.
- 17) 笹田 直・野呂瀬 進・小沢哲雄・三科博司：「異種金属間の摩擦によって生ずる摩耗粉の組成について—亜鉛/銅および亜鉛/銀における  $\epsilon$  相合金の生成—」，潤滑，24 (1979) pp. 447–453.
- 18) 笹田 直：「シビア・マイルド摩耗遷移機構」，千葉工業大学研究報告 理工編，No. 51 (2004) pp. 33–38.
- 19) C. Klein, C.S. Hurlbut, A.D. Dana: “Manual of Mineralogy”, 21<sup>st</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1993) pp. 379–388.
- 20) 山本義樹・近藤康雄・小幡文雄・宮近幸逸・小出隆夫・福田太一：「酸化鉄皮膜の摩擦・摩耗特性」，日本機械学会講演論文集 中国・四国支部，41 (2003) pp. 281–282.
- 21) E. Rabinowicz: “Friction and Wear of Materials”, John Wiley & Sons, Inc., New York (1965) pp. 151–154.
- 22) 笹田 直，三好章洋：「凝着摩耗におけるなじみ状態の破綻」，千葉工業大学研究報告 理工編，No. 47 (2000) pp. 43–51.
- 23) H. Imaeda, H. Kusanagi, H. Kimura, H. Nakasa: “Acoustic Emission Characteristics during Tensile Tests of Various Metals with Several Types of Crystal Structures”, in: 3<sup>rd</sup> AE Symposium, Japan Industrial Planning Assoc., Tokyo (1976) pp. 492–512.

## 第3章 無潤滑繰返し摩擦における 摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関

### 3.1 緒言

実機材料や開発材料のトライボロジー特性を評価するための加速試験として、無潤滑下の繰返し摩擦による摩擦試験がよく行なわれている<sup>1-3)</sup>。また、本研究のように AE 信号と摩擦・摩耗現象の関係を追究する研究分野では、ほとんどが無潤滑の繰返し摩擦下で検討されている<sup>4-8)</sup>。しかし、主としてどのような現象が検出される AE 信号に関わるかまでは検討されていない。また、その定量的な相関関係が見出されていないのも現状である。これは、摩擦界面における様々な現象が複雑に絡み合っているためである。その中でも無潤滑の繰返し摩擦下では、特に摩擦界面で成長する移着粒子が大きく関係すると思われる。そこで本章では、凝着摩耗現象の全体をとらえるため、無潤滑繰返し摩擦における加速的かつマクロ的な摩耗現象と AE 信号の相関について検討を試みる。

### 3.2 実験装置および実験方法

#### 3.2.1 実験装置および計測システム

本実験では、Fig. 2.2 および Fig. 2.5 に示した第2章における実験と同様の実験装置および計測システムを使用した。また、AE センサも共振型（共振周波数：1 MHz）の同一のものを使用した（Fig. 2.6）。摩擦方式は、ピンオンシリンダ型である。ピン試験片摩擦部は $\phi 4$  mm、円筒試験片の外径は $\phi 50$  mm である。ピン試験片支持部の八角弾性リングにより摩擦係数（摩擦抵抗）が計測される。また、スライダ部に取り付けられた非接触式変位センサによりピンの変位を計測し、摩耗の進行状態を簡易的に観測する。ピン試験片の摩耗量は、実験前後の重量変化より求められる体積減にて評価を行った。AE

センサは、ピン試験片の摩擦面と反対側に取り付けられ、ピンと円筒の摩擦・摩耗で発生する AE 信号を計測する。AE センサからの出力信号は、総合利得で 60 dB の増幅を行い、500 kHz のハイパスフィルタ処理を行っている。本実験で計測する AE パラメータは、AE 平均値、AE 計数率、AE 計数総数である。各種信号は、計測機器によって処理され、PC にて表示・記録が行われる。

### 3.2.2 実験条件

本実験条件を Table 3.1 に示す。供試材は、軸・軸受を想定した材料と純金属材料とを選択している。ピン試験片には、りん青銅 (C5341 ; 250 HV)、銅 (C1020 ; 121 HV)、黄銅 (C3604 ; 181 HV)、アルミニウム (A2017 ; 109 HV)、鋼 (S15C ; 275 HV) の 5 種類の材料を用いた。円筒試験片には、クロムモリブデン鋼 (SCM435) を用いている。円筒試験片は、焼入れ処理 (700 HV) した後に円筒研削 ( $R_z$  1.2  $\mu\text{m}$  前後) により仕上げた。両試験片の摩擦表面を研磨紙 (#1000) により研磨しなじませ、エチルアルコールで超音波洗浄した後に実験を行った。ピン試験片の初期表面粗さは、すべての材料において  $R_a$  0.4  $\mu\text{m}$ ,  $R_z$  3.0  $\mu\text{m}$  に統一した。実験は、押付け荷重 20 N (平均接触面圧 : 1.6 MPa)、摩擦速度 0.5 m/s、摩擦距離 1800 m として、各材料 4 回ずつ行っている。なお、実験はすべて室温 (約 20°C)、大気中 (相対湿度 : 40% RH) で行った。

Table 3.1 Summary of the experimental conditions

Normal load $W$ , N	20
Sliding velocity $v$ , m/s	0.5
AE amplification factor, dB	60
AE band-pass filter, kHz	HPF: 500 LPF: non-filter
Voltage threshold, mV	$V_H$ : 50 $V_L$ : 30

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 摩耗形態および円筒の摩耗

Fig. 3.1 は、各種材料に関する摩耗の進行曲線である。ここでは、ピン変位より換算した摩耗体積を用いている。そのため、円筒の摩耗による変位を含み単純ではない。円筒の摩耗（損傷）に関しては後で述べる。Fig. 3.1 より、大きな摩耗遷移がなく、摩擦距離にほぼ比例して摩耗が進行していることが確認できる。

Fig. 3.2 (a) – (e) は、摩擦系外へ脱落した摩耗粒子の SEM 観察結果である。これらは、実験中期から後期に採取したものであり、摩耗粒子の形状の大きな変化は実験中みられなかった。この SEM 観察と光学顕微鏡観察の結果から、次の二つの摩耗粒子形態に分類できる。(a) 黄銅および (b) りん青銅では金属色の大きな鱗片状摩耗粒子 (flake-like wear particles) であり、(c) 鋼、(d) アルミニウム、(e) 銅では黒色の砂状摩耗粒子 (black sand-like wear particles) である。Fig. 3.2 (f) は、円筒摩擦表面に脱落せず残留した銅の移着粒子である。この移着粒子の大きさは、 $5\ \mu\text{m}$  程度 (A) の大きな粒子や  $0.5$

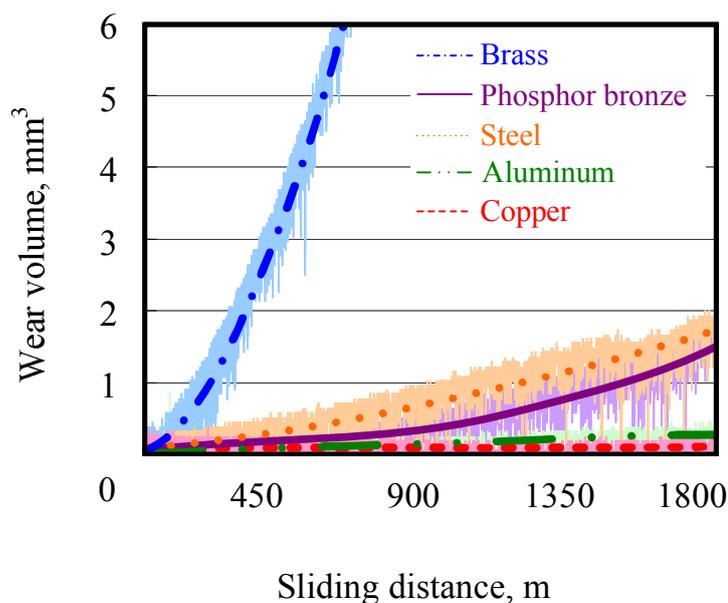


Fig. 3.1 Wear versus sliding-distance curves for various materials.

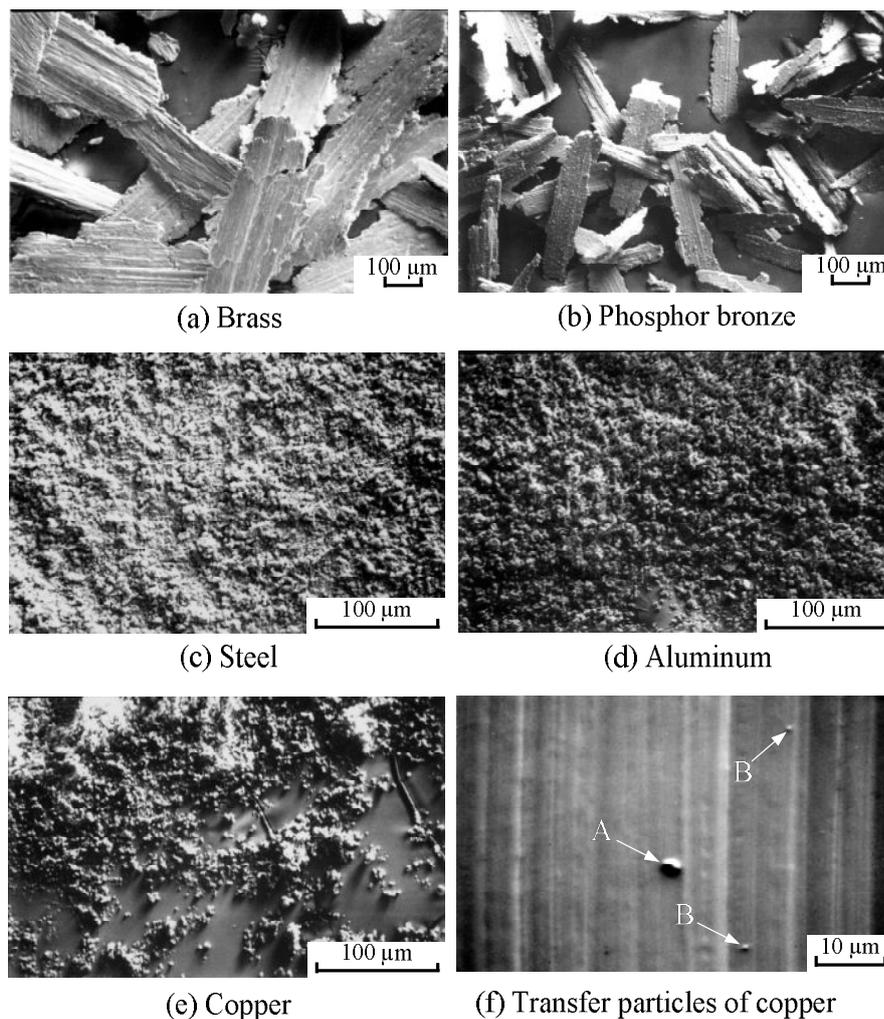


Fig. 3.2 Scanning electron micrographs of the wear particles and transfer particles.

μm 程度 (B) の小さい粒子が確認できる。この移着粒子は、銅の移着粒子とはいっても銅のみの組成ではなく、相互移着により円筒材料との混合物となっている<sup>9)</sup>と推定される。

Fig. 3.3 は、円筒試験片の摩耗痕の断面曲線を示している。これより、(a) 黄銅と (b) りん青銅では、円筒の損傷はほとんどみられないことがわかる。むしろピン材料が、円筒の摩擦痕上に付着していることが光学顕微鏡観察より確認できた。一方、(c) 鋼、(d) アルミニウム、(e) 銅は、円筒表面の損傷が明確であり、特に鋼に関しては損傷が著しいのがわかる。円筒の損傷の大きさは、ピン材料との相性である相互溶解度などの影響<sup>10)</sup>により、同種材

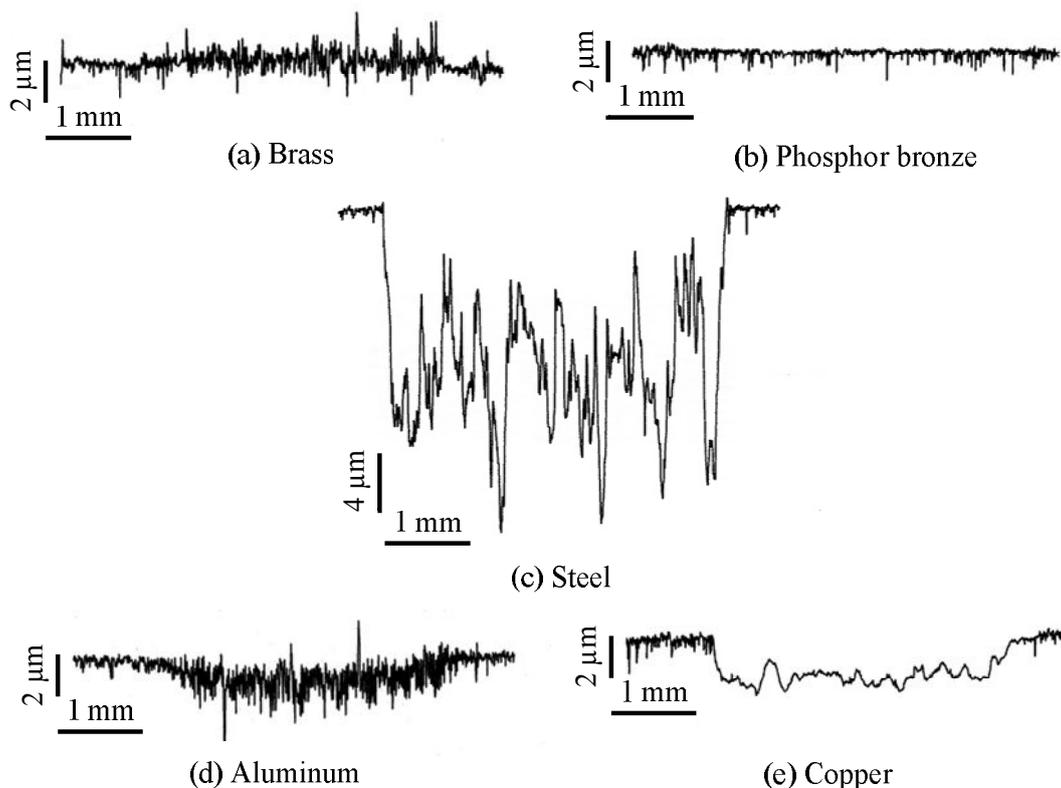


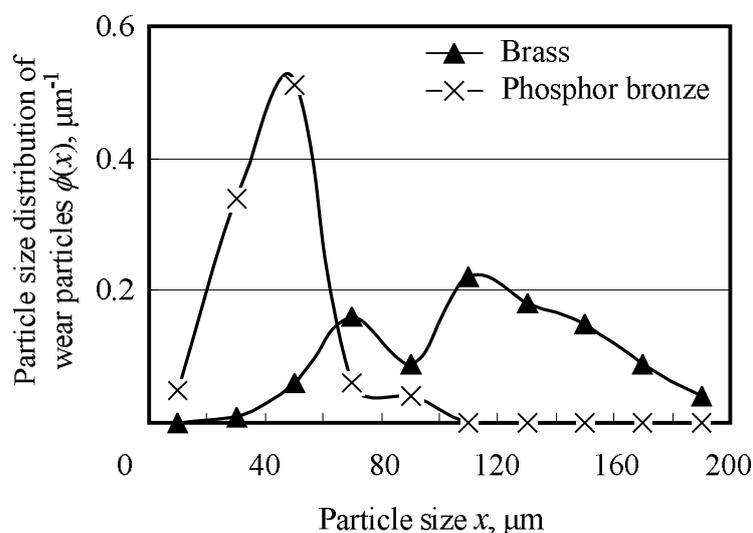
Fig. 3.3 Profile curves of the worn surfaces of the cylinders.

Table 3.2 Specific wear to pin specimens and cylindrical specimens

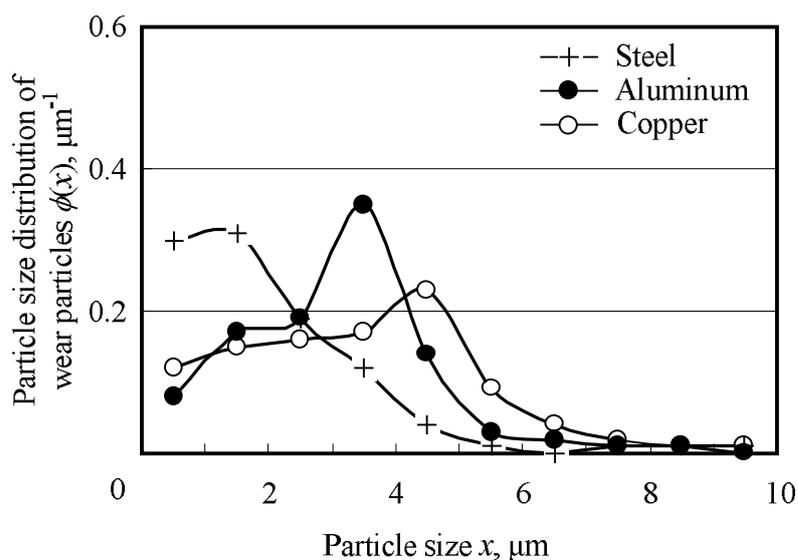
Pin material	Specific wear $w_s$ , $\text{mm}^2/\text{N}$	
	Pin side	Cylinder side (chromium-molybdenum steel)
Brass	$7.0 \times 10^{-7}$	$-7.9 \times 10^{-9}$
Phosphor bronze	$1.0 \times 10^{-7}$	$8.7 \times 10^{-10}$
Steel	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$
Aluminum	$7.0 \times 10^{-8}$	$5.8 \times 10^{-9}$
Copper	$4.4 \times 10^{-9}$	$1.7 \times 10^{-8}$

料の鋼では損傷が特に大きくなると考える。このように、材料によって円筒の摩耗の様相が異なる。

ここで、ピンおよび円筒の両試験片の比摩耗量の値を Table 3.2 に示す。円筒試験片の比摩耗量に関しては、摩耗痕の断面積より概算した摩耗体積から算出した。これらの値はすべて、凝着摩耗における比摩耗量の範囲<sup>11)</sup>にある。よって、比摩耗量の値および摩耗粒子の形状から、本実験での摩耗形態は主



(a) Flake-like wear particles



(b) Black sand-like wear particles

Fig. 3.4 Particle size distributions of wear particles for each type of wear particle.

として凝着摩耗であると断定できる。摩耗粒子の形状のみから判断すると、鱗片状摩耗粒子はシビア摩耗の特徴を示し、黒色砂状摩耗粒子はマイルド摩耗の特徴を示している。一方、摩擦面の損傷や後述する摩擦係数の値からは、黒色砂状摩耗粒子の場合がシビア摩耗であり、鱗片状摩耗粒子の場合がマイルド摩耗という逆の印象を受ける。明確な判別は難しいが、マイルド摩耗の必要十分条件を満たさないことから、シビア摩耗と判別することができよう。ただし、本章では摩耗粒子形態によって論議を進めることにする。

Fig. 3.4 は、摩耗粒子の粒径分布曲線を摩耗粒子形態に関して示している。このデータは、摩耗粒子の SEM 画像における 100 個のサンプルから得たものである。この横軸の粒径は、二つの摩耗粒子形態の粒子形状をそれぞれ板状と半球状として得た投影面積円相当径を用いた。ここで、摩耗粒子径の大きさ（粒径分布曲線におけるピーク時の粒径）は、Fig. 3.1 における摩耗率の大きさの傾向と必ずしも一致しない。これは、摩耗量が摩耗粒子の大きさとその脱落数によって定まるためである。したがって、これら両方の因子の決定が摩耗量の推測に必要となる。後の論議では、この粒径分布曲線より得られるメディアン径  $d_{50}$  を摩耗粒子径の代表値として用いる。

### 3.3.2 摩耗形態による AE パラメータの特徴

前節で述べたように、本実験における摩耗形態は凝着摩耗（シビア摩耗）であり、鱗片状摩耗粒子と黒色砂状摩耗粒子の二つの摩耗粒子形態に分類できた。摩耗粒子形態の違いにより、計測される AE パラメータの傾向も異なった。Fig. 3.5 は、りん青銅と銅をそれぞれの摩耗粒子形態の代表として、摩擦係数および AE パラメータ（AE 平均値、AE 計数率、AE 計数総数）の経時変化である。摩擦距離 900 m までに対して結果を示した。Fig. 3.1 および Table 3.2 で示したように、黄銅の摩耗率（ピン試験片側）は大きく、銅の摩耗率は非常に小さい。対して、AE パラメータは摩耗量と逆の傾向を示している。これは、各摩耗粒子形態の AE 信号が摩擦係数と相関があることから、摩擦界面における摩耗粒子生成過程が、AE 信号に大きく関与しているためと考える。また、AE 平均値および AE 計数率の変動（振幅変動）に特徴がみ

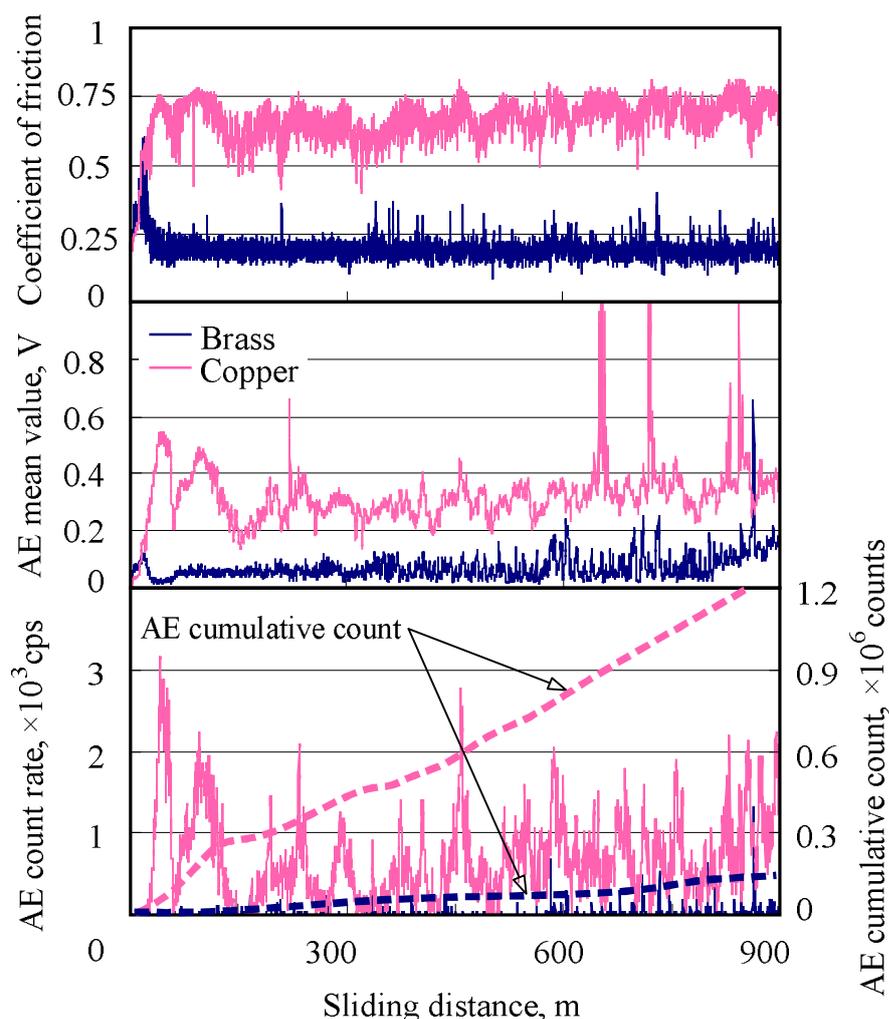


Fig. 3.5 Fluctuations in the friction coefficient and the AE parameters for different types of wear particle.

られる。黒色砂状摩耗粒子形態である銅においては、振幅変動が大きく、うねり変動をしているのがわかる。AE 平均値において銅は黄銅の約 4 倍、AE 計数総数では約 10 倍近く大きい。このように、摩耗粒子形態の違いにより信号レベルの違いが大きくあらわれている。以上に述べた黄銅にみられる特徴は、同じ鱗片状摩耗粒子形態であったりん青銅においても同様であった。また、銅にみられた特徴は、同じ黒色砂状摩耗粒子形態であったアルミニウム、鋼においても同様であった。したがって、これらの AE パラメータの特徴は、摩耗粒子形態の違いによってあらわれるといえる。

材料の違いによる AE 計数パラメータの傾向は、AE 平均値における傾向と

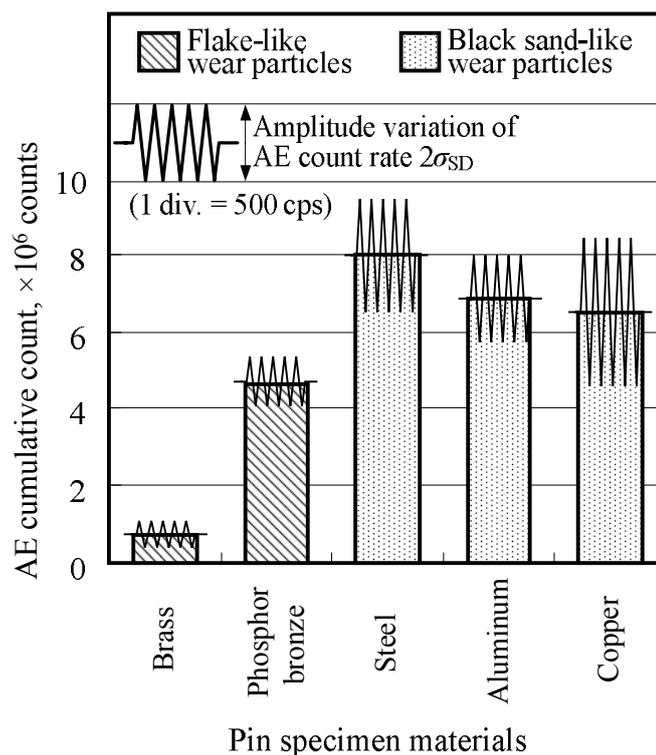


Fig. 3.6 Comparisons of the AE cumulative count and the amplitude variation of AE count rate  $2\sigma_{SD}$  ( $\sigma_{SD}$ : standard deviation of AE count rate) for different materials.

ほとんど同じであった。しかし、Fig. 3.5 からわかるように AE 計数率は AE 平均値に比べ材料間の違いが明確である。よって本章では、主に AE 計数パラメータを AE 信号の評価に使用する。Fig. 3.6 は、AE 計数総数と AE 計数率の振幅変動幅を材料の違いに関して比較したものである。AE 計数率の振幅変動幅（全振幅）は、その標準偏差  $\sigma_{SD}$  を用いて評価した。なお、これらの値は 4 回の実験の平均値を示している。Fig. 3.6 より、黒色砂状摩耗粒子が生成された場合の AE 計数総数の値は、鱗片状摩耗粒子が生成される場合に比べ大きいことがわかる。りん青銅の AE 計数総数が黄銅よりも大きいのは、りん青銅の初期摩耗時に生成していた微量の黒色砂状摩耗粒子の影響と考える。AE 計数率の振幅変動幅は、摩耗粒子形態の違いで 2~6 倍異なることがわかる。これらの結果は、摩耗粒子形態つまり摩耗粒子の生成過程が AE パラメータの大きさや変動に影響することを示す。したがって、材料の相違に関わらず、AE 計数率（または AE 平均値）の大きさや AE 計数率の振幅変動

の特徴から摩耗粒子形態やその規模が判断可能と考える。しかし、一つの材料における摩耗の過程にも様々な変化があり、正確な摩耗粒子形態判断のためには、様々な摩耗現象下（例えば、フレッチング摩耗のような摩擦機構の異なる摩耗現象下、通電や外部地場などを伴う摩耗現象下など）での実験・検討が必要である。

### 3.3.3 摩擦・摩耗現象と AE 評価パラメータの相関

Fig. 3.3 および Table 3.2 からわかるように、黒色砂状摩耗粒子形態に関しては、円筒の損傷を無視することができない。そのため、摩擦界面の損傷は Fig. 2.14 と同様、ピンと円筒試験片の両摩擦面の算術平均粗さ  $Ra$  の和により評価する。この摩擦界面の損傷と AE 計数率の振幅変動幅の関係を Fig. 3.7 に示す。なお、AE 計数率の振幅変動幅は、AE 平均値の標準偏差  $\sigma_{SD}$  により評価している。この結果より、材料および摩耗粒子形態に関係なく、AE 計数率の振幅変動幅が摩擦界面の損傷に比例することがわかる。表面損傷は、摩耗粒子（移着粒子）の生成過程における凝着、生成した摩耗粒子の摩擦面での振舞いの結果である。これは、AE 計数率の現象の振幅変動幅が、摩擦界面で起こる損傷の激しさを反映する優れた評価パラメータであることを示

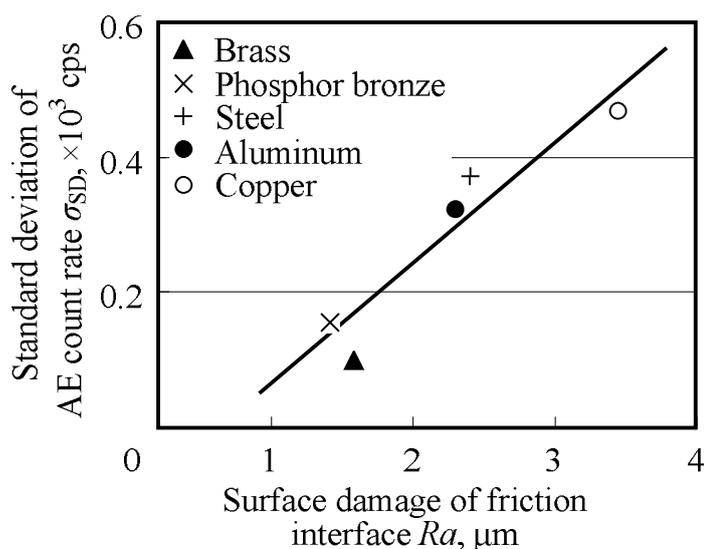


Fig. 3.7 Relationship between the standard deviation of the AE count rate  $\sigma_{SD}$  and the surface damage at the friction interface  $Ra$ .

している。

次に、摩擦界面より脱落した総摩耗粒子数を計算してみる。すべての摩耗粒子の形状を摩耗粒子形態に関わらず半球状と仮定すると、摩耗粒子の総数  $N_w$  は摩耗粒子の粒径分布曲線とピンおよび円筒の摩耗体積から、以下の式を用いて算出できる。

$$N_w = \frac{V_p + V_c}{\int v(x)\phi(x)dx} \quad (3.1)$$

ここで、 $V_p$  はピン試験片の摩耗体積、 $V_c$  は円筒試験片の摩耗体積、 $\phi(x)$  は確立密度関数、 $v(x)$  は粒径  $x$  における摩耗粒子一つの体積である。この総摩耗粒子数と AE 計数総数の関係を Fig. 3.8 に示す。これより、各摩耗粒子形態に関して AE 計数総数と摩耗粒子数の間に相関関係が認められそうである。様々な摩耗粒子形態に関して詳細な調査が必要であるが、Fig. 3.8 の関係より脱落した摩耗粒子数を把握できる可能性があるといえる。

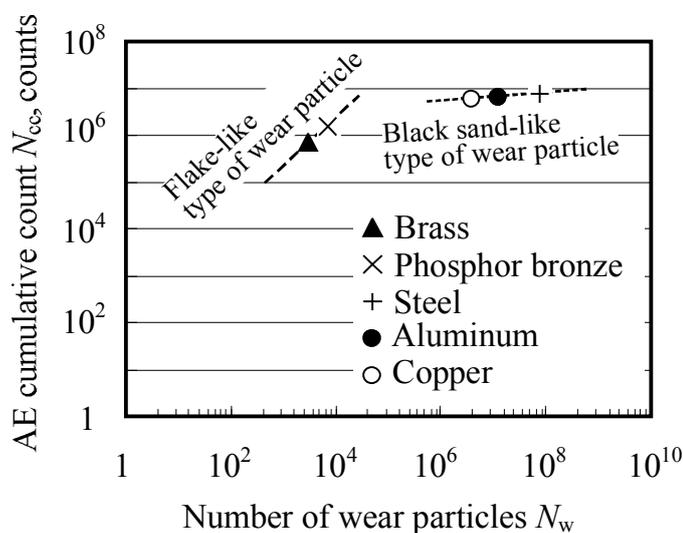


Fig. 3.8 Relationship between the AE cumulative count and the number of wear particles.

### 3.4 論 議

摩擦界面における摩擦・摩耗現象は摩耗過程によって異なり、その現象の変形および破壊に関する特徴が AE 評価パラメータに反映される。これは、摩擦・摩耗現象に起因した多くの情報が AE 信号に含まれるためである。実験結果より、特に摩耗粒子形態の違いが AE パラメータへ影響していることがわかった。ここでは、生成される摩耗粒子に焦点を当て、無潤滑繰返し摩擦における AE 信号と摩擦・摩耗現象との関係を論議する。

比摩耗量の値、摩耗粒子形状、摩耗面の状態より、本実験における摩耗形態が凝着摩耗（シビア摩耗）であると判断できた。凝着摩耗過程は、摩耗素子（wear element）〔移着素子（transfer element）と呼ばれることもある〕と呼ばれる十数 nm～数十 nm サイズ<sup>12)</sup>の非常に小さな粒子が移着（凝着）していく移着現象に始まる。そして、その移着素子が合体・成長していく移着成長過程<sup>13)</sup>で移着粒子が形成される。それが、摩擦系より摩耗粒子として脱落し排出されることにより、摩擦系全体で摩耗が生じたということになる。このような摩耗過程では、摩擦させる材料の組合せによって摩耗粒子形態が変化する。Fig. 3.9 は、本実験でみられた二種類の摩耗粒子形態に関して、移着粒子の生成過程の違いを示した概略図である。鱗片状摩耗粒子形態では、円筒表面にはピン材料が凝着しており、大きく成長した移着粒子が摩擦界面で押し延べられている〔Fig. 3.9 (a)〕。一方、黒色砂状摩耗粒子形態では、気体の吸着分子が移着粒子が大きく成長する前にその周囲を覆い、移着成長が妨げられる〔Fig. 3.9 (b)〕。さらに、その砂状摩耗粒子は非常に微細であるため、摩擦熱の影響などにより酸化膜が形成され、黒色の砂状摩耗粒子となると考えられる。

黒色砂状摩耗粒子が生成する場合の AE パラメータの値は、鱗片状摩耗粒子が生成する場合に比べ大きかった（Fig. 3.6）。鱗片状摩耗粒子形態では、大きな摩耗粒子が生成されるが AE 信号レベルが小さい。これは、AE として放出される弾性ひずみエネルギーが、均一変形時に比べ不均一変形時の方が大きいためである<sup>14)</sup>。鱗片状摩耗粒子は、摩擦界面において押し延べられ塑

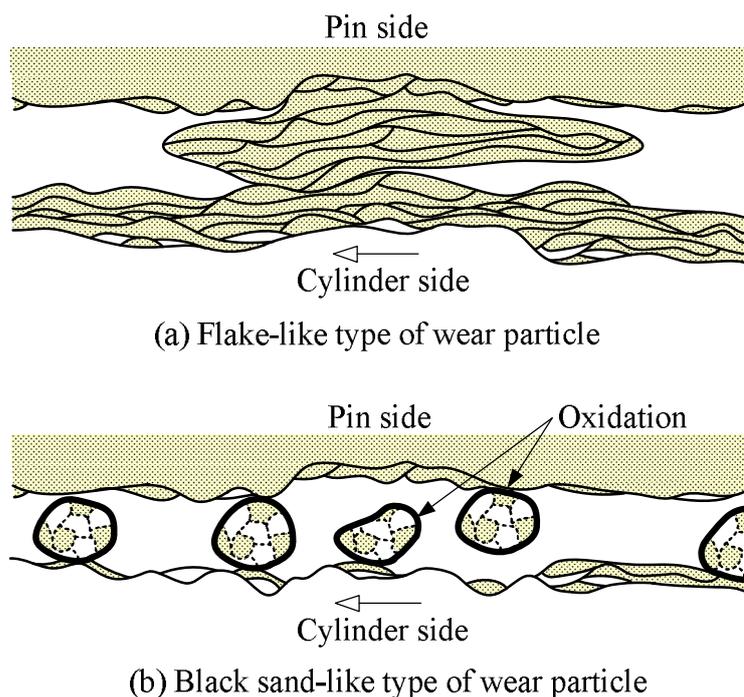


Fig. 3.9 The process for formation and removal of transfer particle in this experiment.

性変形（均一変形）することで生成する．したがって，このときに発生する AE は小さいと考える．対して黒色砂状摩耗粒子は，摩耗粒子の表面は酸化しているため，硬く脆くなっていると考えられる．そのため，摩耗粒子の表面突起への衝突，摩擦界面での転動・粉砕の際にも AE が発生するであろう．本実験では，500 kHz のハイパスフィルタ処理を行うことにより，摩耗に直接関わらない AE 信号（機械的ノイズのような低周波信号）は除去している．しかし，黒色砂状摩耗粒子形態では摩擦界面に無数の摩耗粒子が存在するため，その影響は無視できないと思われる．よって，黒色砂状摩耗形態では，鱗片状摩耗粒子形態の場合に比べ AE 信号レベルが高くなり，その振幅変動も大きくなるものとする．これらの摩耗粒子の生成過程における現象（移着粒子の生成・脱落などの現象）は，摩擦係数の変化にはほとんど現れない（Fig. 3.5）．これを AE 法により検出できるのは，AE 法が摩擦・摩耗現象に対して高感度であるためである．

各摩耗粒子形態に関して，AE 計数総数総と摩耗粒子数の間により相関関

係があることが示された (Fig. 3.8). Fig. 3.8 における関係の傾きは, 摩耗粒子形態および材料の AE 特性に依存すると考える. 一つの摩耗粒子が生成するときに一つの AE イベントが生じると考えると簡単であるが, この関係は必ずしも 1 対 1 には対応していない. これは, 一つの摩耗粒子の生成過程において, 上述した複数の AE 源が存在するためである.

無潤滑繰返し摩擦下で計測される AE 源に対する原理は, 以下のように考えることができる. 様々なノイズ信号を完全に除去したとき, 純粋な摩擦・摩耗現象で計測される AE 信号は, 摩擦に起因した AE 信号と摩耗に起因した AE 信号から構成される. この摩擦に起因した AE 信号は, 塑性変形, 摩耗粒子と表面突起の衝突などによって生じる. 凝着摩耗における摩耗に起因した AE 信号は, 直接接触部での移着, 移着粒子の形成やその脱落によるものであろう. 無潤滑繰返し摩擦における摩擦・摩耗現象は非常に激しい. そのため, 摩耗の素過程 (極めて微細な粒子の破断や集合) で生じる小さな AE 信号は, 摩耗粒子の衝突や脱落のような大きな AE 信号に隠れてしまう可能性がある. よって, ここでは無潤滑繰返し摩擦で発生する AE 信号が, 主に摩耗粒子の生成によるものとする.

ここで, 移着粒子に蓄えられる弾性ひずみエネルギーを考え, それが摩耗粒子の生成時 (移着粒子の脱落時) に解放されるとして理論的考察を展開してみる. 解放される弾性ひずみエネルギーは, 発生する弾性波の大きさに関係し, 結果として計測される AE 信号振幅値に関係すると思われる. Fig. 3.10 は, Rabinowicz の摩耗粒子生成モデル<sup>15)</sup>の概略図である. これは, 移着粒子に蓄えられている弾性ひずみエネルギーが移着粒子と摩擦面の凝着仕事よりも大きい場合に, 移着粒子が摩擦面より脱落して摩耗粒子となる機構である. まず, 接触域において成長した移着粒子に作用する圧縮応力が, 材料の降伏応力  $\sigma_s$  に等しいとする. また, 移着粒子の形状が直径  $d$  の半球状であると仮定する. このとき, 一つの移着粒子に蓄えられている弾性ひずみエネルギー  $e$  は,

$$e = \left( \frac{v^2 \sigma_s^2}{2E} \right) \left( \frac{\pi d^3}{12} \right) \quad (3.2)$$

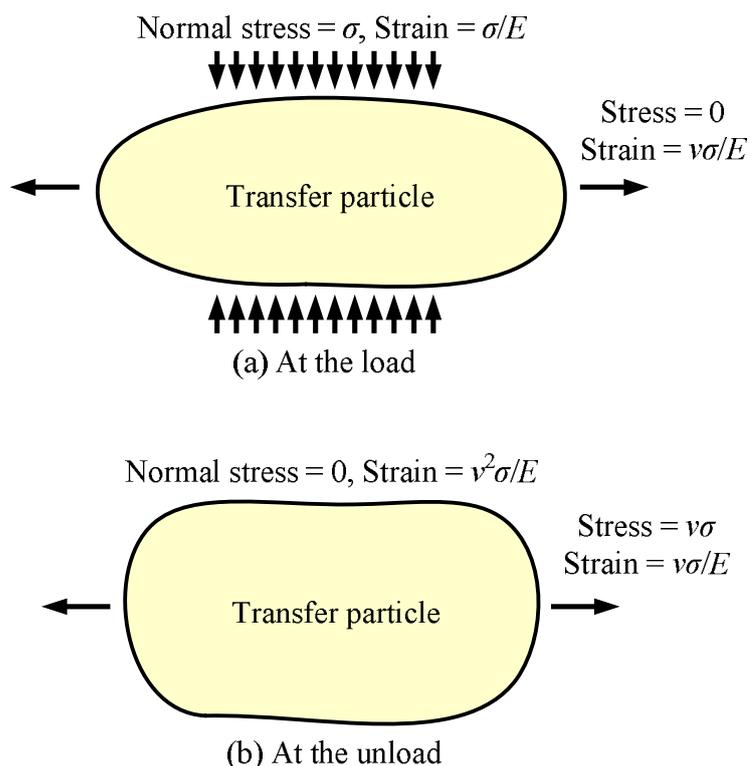


Fig. 3.10 The model of generation mechanism of wear particle by Rabinowicz.

とあらわせる．ここで， $E$  は縦弾性係数， $\nu$  はポアソン比である．なお，摩耗粒子径  $d$  には，Fig. 3.4 から得たメディアン径  $d_{50}$  を用いる．しかしながら，実際の移着粒子の機械的特性値を測定するのは難しい．移着粒子の組成が，摩擦させた両材料の混合物となることが X 線マイクロアナリシスにより，確認されている<sup>10,16)</sup>．このことから，双方の材料が均一に混合すると仮定して，その移着粒子の機械的特性値は複合則<sup>17)</sup>によって近似できる．したがって，縦弾性係数  $E$  は，

$$\frac{(V_p + V_c)}{E} = \frac{\nu_p}{E_p} + \frac{\nu_c}{E_c} \quad (3.3)$$

より算出できる．

降伏応力  $\sigma_s$  についても，同様に式 (3.3) から算出できる．また，ポアソン比  $\nu$  は，

$$\nu(V_p + V_c) = \nu_p V_p + \nu_c V_c \quad (3.4)$$

より算出できる。ここで、添え字の  $p$  および  $c$  はピン試験片と円筒試験片をそれぞれ意味している。これらの算出値を式 (3.2) に代入することによって、一つの移着粒子に蓄えられる弾性ひずみエネルギーが計算できる。本実験における試験片材料および移着粒子に関する特性値を Table 3.3 および Table 3.4 にそれぞれまとめた。実際は、移着粒子がいくつか摩擦界面に介在し（介在粒子数  $n_t$ ）、垂直荷重の大部分を支えている。それらが同時に脱落して摩耗粒子になると仮定すると、 $e \times n_t (= E_t)$  の弾性ひずみエネルギーが一度に放出

Table 3.3 Material characteristics of the specimens<sup>18-22)</sup>

Specimen	Material	Poisson's ratio	Modulus of elasticity	Yield stress
		$\nu$	$E$ , GPa	$\sigma_s$ , MPa
Pin	Brass	0.31	97	278
	Phosphor bronze	0.32	103	390
	Steel	0.29	205	380
	Aluminum	0.33	72	275
	Copper	0.31	115	300
Cylinder	Chromium-molybdenum steel (quenching)	0.29	205	785

Table 3.4 Material characteristics of transfer particles

Pin material	Median diameter of wear particle (dimensions)	Poisson's ratio	Modulus of elasticity	Yield stress	Number of wear particles	Number of lying wear particles
	$d_{50}$ , $\mu\text{m}$	$\nu$	$E$ , GPa	$\sigma_s$ , MPa	$N_w$	$n_t$
Brass	105 (419 × 150 × 15)	0.31	97	278	$3 \times 10^3$	1
Phosphor bronze	35 (131 × 45 × 9)	0.38	119	397	$7 \times 10^3$	9
Steel	1.0	0.29	206	537	$75 \times 10^6$	47488
Aluminum	2.7	0.32	88	332	$13 \times 10^6$	10542
Copper	3.0	0.29	194	718	$4 \times 10^6$	3941

される。摩擦界面に介在する移着粒子数  $n_t$  は、 $n_t = W/(\sigma_s A)$  より得ることができる。ここで、 $W$  は垂直荷重、 $A$  は移着粒子と摩擦面の接触面積である。この接触面積  $A$  は、二つの摩耗粒子形態における形状をそれぞれ長方形と円と仮定して、Table 3.4 に示される摩耗粒子の寸法から計算した。

以上のようにして求めた移着粒子の脱落により生じる弾性ひずみエネルギー  $E_t$  と計測された AE 平均値の関係を Fig. 3.11 に示す。この結果より、摩耗粒子生成による弾性ひずみエネルギーと AE 平均値が負の相関関係にあることが確認できる。また、これが正の相関を示さなかったことから、移着粒子の脱落以外の因子も大きく関わっていると考えられる。この  $E_t$  の値は、摩耗粒子径  $d$  と比例関係にあり、摩擦界面に介在する移着粒子の AE 特性値と言い換えることができる。そのため、移着粒子の脱落のみならず、その生成過程（移着成長過程）や摩擦界面における振舞い（衝突や転動）にも関係があり、Fig. 3.11 において相関が得られたものとする。この Fig. 3.11 の関係を利用して、AE 平均値の計測から摩擦界面の状況进行评估できる可能性について以下に述べる。

シビア摩耗形態では、摩耗粒子径  $d$  の減少（ $E_t$  値の減少）に伴い、摩擦界面での摩耗粒子の流動性の影響が大きくなる。そのため、移着（凝着）だけ

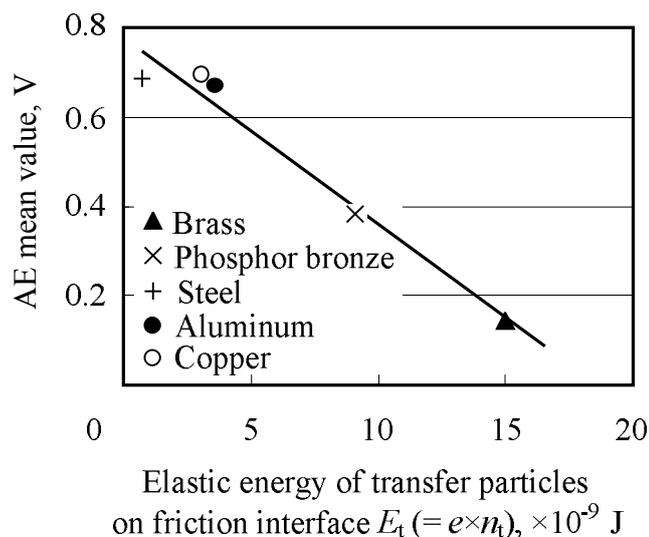


Fig. 3.11 Plot of the AE mean value measured as a function of the calculated elastic energy  $E_t$ .

でなく摩耗粒子の衝突や転動による表面損傷が大きくなる。その結果、摩耗粒子の衝突や転動によって発生する AE が増加する。このような AE は不規則に発生するため、AE 信号の振幅変動に変化があらわれる。このことから、摩擦界面の損傷と AE 計数率の振幅変動幅の相関関係が説明できる (Fig. 3.7)。また、摩耗粒子径  $d$  の違い ( $E_t$  値の違い) は、冒頭で述べた移着粒子の生成過程 (Fig. 3.9) に関係し、AE 信号レベルに差が生じるものと推察できる。さらに、第2章で述べたマイルド摩耗形態に関しても Fig. 3.11 の関係が適用できそうである。マイルド摩耗では、AE 信号レベルと表面損傷が小さかった。これは、摩擦界面に滞留する非常に多くの移着粒子によって接触圧力が分散され、摩擦界面の現象が緩和するためといえる。極端な場合を考えると、粒径  $1\ \mu\text{m}$  の摩耗粒子がピン摩擦面を完全に覆ったときの介在粒子数は約  $10^6$  個にもなる。このように、マイルド摩耗では介在粒子数  $n_t$  が非常に大きく、 $E_t$  の値が大きい場合に対応すると考えられる。したがって、Fig. 3.11 の関係に従い AE 平均値が減少する。以上のように、Fig. 3.11 にみられる相関は非常に興味深く、無潤滑繰返し摩擦で発生する AE が移着粒子の脱落のみならず、その生成過程や摩擦界面での振舞い (衝突や転動) の影響を受けていることが説明できる。

### 3.5 結 言

本章では無潤滑繰返し摩擦下で実験を行い、加速的かつマクロ的な凝着摩耗現象と AE 信号の相関について検討した。また、摩耗粒子形態の違いによる AE 信号の特徴と AE 信号の根源について検討を行った。さらに、定量的評価の試みとして Rabinowicz の摩耗粒子生成モデルを発展させ、摩耗粒子の生成により発生する弾性ひずみエネルギーを概算した。この結果を用いて、計測から得られた AE 平均値との比較・検討を行った。本章で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) 摩耗粒子形態は、AE 評価パラメータの大きさや変動を支配する影響因子の一つである。そのため、AE 計数率（または AE 平均値）の振幅値および AE 計数率の振幅変動幅の特徴から、摩耗粒子形態の判別が可能である。
- (2) AE 計数率の振幅変動幅（標準偏差）は、摩擦界面の損傷（両摩擦面の算術平均粗さ  $Ra$  の和）に比例する。この関係から、AE 計数率の振幅変動幅の計測により摩擦界面の損傷状態を監視することができる。
- (3) AE 法は、摩耗粒子の生成過程のような摩擦係数の変化にはほとんど現れない現象を検出することが可能である。
- (4) AE 計数総数は生成した総摩耗粒子数とよい相関関係が認められた。これは、無潤滑繰返し摩擦下で計測される AE 信号が、移着粒子の生成・脱落過程と密接な関係があるためである。
- (5) 算出される摩耗粒子の生成（移着粒子の生成・脱落）により生じる弾性ひずみエネルギーと計測される AE 平均値の間に負の相関関係が認められた。この関係から、AE 平均値の計測から摩擦界面の状況を評価できる可能性が示された。

< 文 献 >

- 1) P.N. Silva, J.P. Dias, A. Cavaleiro: “Performance of W-TI-(N) Coated Pins in Lubricated Pin-on-Disk Tests”, *Surface & Coating Technology*, 202 (2008) pp. 2338–2343.
- 2) S.G. Jia, P. Liu, F.Z. Ren, B.H. Tian, M.S. Zheng, G.S. Zhou: “Sliding Wear Behavior of Copper Alloy Contact Wire against Copper-Based Strip for High-Speed Electrified Railways”, *Wear*, 262 (2007) pp. 772–777.
- 3) M. Terheci, R.R. Manory, J.H. Hensler: “The Friction and Wear of Automotive Grey Cast Iron under Dry Sliding Part2. Friction and Wear, Particle Generation Mechanisms and Their Progress with Time”, *Wear*, 185 (1995) pp. 119–124.
- 4) Jun Sun, R.J.K. Wood, L. Wang, I. Care, H.E.G. Powrie: “Wear Monitoring of Bearing Steel Using Electrostatic and Acoustic Emission Techniques”, *Wear*, 259 (2005) pp. 1482–1489.
- 5) R.J. Boness, S.L. McBride: “Adhesive and Abrasive Wear Studies Using Acoustic Emission Techniques”, *Wear*, 149, 1/2 (1991) pp. 41–53.
- 6) C.L. Jiaa, D.A. Dornfeld: “Experimental Studies of Sliding Friction and Wear via Acoustic Emission Signal Analysis”, *Wear*, 139 (1990) pp. 403–424.
- 7) S. Lingard, K.K. Ng: “An Investigation of Acoustic Emission in Sliding Friction and Wear of Metals”, *Wear* 130 (1990) pp. 367–379.
- 8) 久角輝正・池田哲也：「AE 計数率による摩擦摩耗特性の評価」, 日本機学会論文集 (C編), 60, 579 (1994) pp. 348–353.
- 9) 野呂瀬 進・笹田 直・J. Lin：「ジャーナル軸受の焼けつき機構 焼けつきに関する新しい考え」, 機械の研究, 39, 4 (1987) pp. 485–488.
- 10) 笹田 直・野呂瀬 進・三科博司：「摩耗に対する金属間相互溶解度の影響」, 潤滑, 22 (1997) pp. 169–176.
- 11) T. Sasada, M. Oike, N. Emori: “The Effect of Abrasive Grain Size on the Transition between Abrasive and Adhesive Wear”, *Wear*, 97 (1984) pp. 291–302.
- 12) 三科博司・河野彰夫・赤松良信：「凝着摩耗のもっとも素になる粒子 (摩

- 耗素子)の発見と摩耗の素過程」, トライボロジスト, 48, 4 (2003) pp. 307–314.
- 13) 笹田 直: 「摩擦による固体表面の損傷について—とくに凝着摩耗について—」, 日本機械学会誌, 75 (1972) pp. 905–912.
- 14) 岸 輝雄: 「塑性変形により生ずるアコースティック・エミッション」, 塑性と加工, 19, 208 (1978) pp. 360–369.
- 15) E. Rabinowicz: “Friction and Wear of Materials”, John Wiley & Sons. Inc., (1965) p. 151.
- 16) 大越 諄・坂井秀春: 「磨耗機構の研究, 第3報, 鋳鉄及び鋼の磨耗機構」, 日本機械学会論文集 (第1部), 7 (1941) pp. 29–47.
- 17) 堂山昌男・山本良一: 「複合材料」, 東京大学出版会 (1984) pp. 42–44.
- 18) ASM International Handbook Committee (Ed.): “Metals Handbook 10th Ed. Vol. 1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys”, ASM International, Materials Park, OH, 1990.
- 19) ASM International Handbook Committee (Ed.): “Metals Handbook 10th Ed. Vol. 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials”, ASM International, Materials Park, OH, 1990.
- 20) P.D. Harvey: “Engineering Properties of Steels”, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1982.
- 21) W.F. Smith, “Structure and Properties of Engineering Alloys”, McGraw-Hill Inc., New York, 1993.
- 22) 日本機械学会編: 「技術資料 金属材料の弾性係数」, 日本機械学会 (1980).

## 第4章 凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関

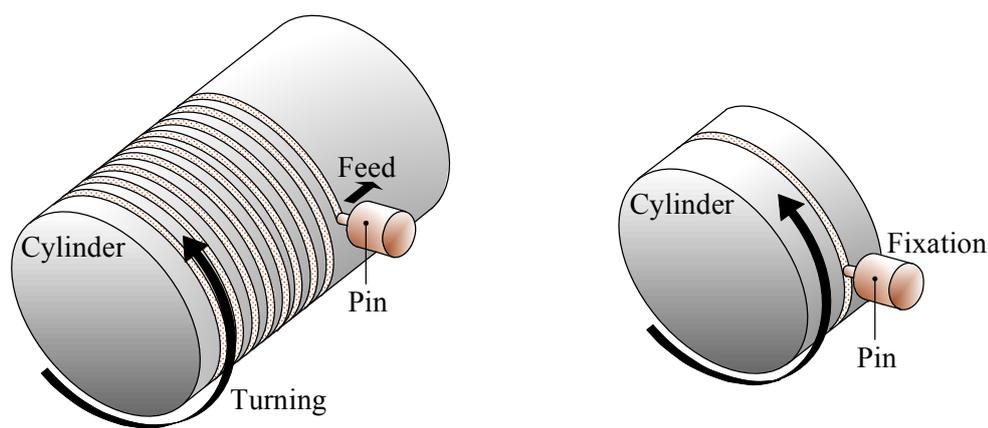
### 4.1 緒言

第2章および第3章では、無潤滑繰返し摩擦による加速的かつマクロ的な凝着摩耗の現象と AE 信号の相関について検討した。繰返し摩擦下の凝着摩耗は、摩耗素子の移着、移着粒子の成長、成長した移着粒子の脱落（摩耗粒子の生成）という移着成長過程を経る。この過程において、摩擦条件（摩擦速度、雰囲気、材料など）により生じる摩擦・摩耗現象（摩耗形態や摩耗粒子形態）を AE 法によって認識・評価できることを示した。また、無潤滑繰返し摩擦における AE 信号が、移着粒子の生成・脱落および摩擦界面での振舞い（衝突や転動）の影響を受けていることがわかった。しかし、摩擦界面での移着粒子（摩耗粒子）の振舞いが現象の複雑さを生じさせており、摩擦・摩耗現象と AE 信号の対応が把握しにくい。そこで本章では、移着成長の初期過程である移着現象に注目し、現象自体をできる限り単純化することにより、凝着摩耗現象と AE 信号の定量的関係について検討を試みる。そして、摩耗素子の移着モデルから移着現象と AE 信号との相関について理論的解釈を加える。

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 摩擦方式

本実験では、Fig. 2.2 に示した第2章および第3章における実験と同様の実験装置を使用した。また、AE センサも共振型（共振周波数：1 MHz）の同一のものを使用した（Fig. 2.6）。本章では、凝着摩耗現象をできる限り単純化するため、摩擦される材料の一方から相手側に移着していく移着成長の初期過程に注目した。この移着現象を再現するため、基本はピンオンシリンダ型の摩擦方式を用い、以下に示す（a）無潤滑片処女面摩擦と（b）潤滑繰返し



(a) Single side virginal rubbing (dry)

(b) Repeated rubbing (lub.)

Fig. 4.1 Rubbing forms used in this experiment.

摩擦の二つの摩擦方式で実験を行った。Fig. 4.1 は、それぞれの摩擦方式の概略図である。

#### (a) 無潤滑片処女面摩擦

ピン試験片摩擦部は  $\phi 4 \text{ mm}$ 、円筒試験片の外径は  $\phi 100 \text{ mm}$  としている。ピン試験片は、ベース部の送り機構により円筒試験片の回転方向に対して垂直方向に送り運動させることができる。これにより、円筒側は常に処女面で摩擦され、ピン側は常に同一面で摩擦される。これは、いわゆる片処女面摩擦である<sup>1)</sup>。本実験条件下では、1回の送りだけでは測定可能な摩耗量に至らなかったため、繰返し摩擦にならない程度数往復させた。なお、実験は無潤滑で行っており、これを本研究では、無潤滑片処女面摩擦と呼ぶ。

#### (b) 潤滑繰返し摩擦

ピン試験片摩擦部は  $\phi 4 \text{ mm}$ 、円筒試験片の外径は  $\phi 50 \text{ mm}$  としている。こちらは、ピン試験片を固定したままの繰返し摩擦であり、潤滑を行いながらの摩擦である。潤滑剤は、定量ポンプを用いて  $10 \text{ ml/hr}$  供給した。潤滑実験の場合、完全流体潤滑領域になってしまうと表面突起の接触が起こらず、摩耗も生じなければ AE も生じない状況となる。これでは評価が不可能であるため、境界混合潤滑領域で実験を行うのが望ましい。しかし、境界潤滑状態を維持するのは非常に困難なため、本実験では潤滑剤を供給しつつ、円筒表

面を拭くことで摩擦面の余分な潤滑剤および残留する摩耗粒子を除去しながら実験を行った。よって、潤滑剤の効果および摩耗粒子の滞留を防止したことにより、摩擦界面での移着成長がほぼ無視できるものと思われる。

#### 4.2.2 計測システム

Fig. 4.2 に計測システムの概略を示す。本実験では、第2章や第3章の無潤滑繰返し摩擦での現象とは異なり、主としてミクロ的な移着現象を計測対象としている。よって、移着現象で放出される AE 信号レベルは低いため、AE センサの出力信号を総利得で 70 dB 増幅した。また、500 kHz のハイパスフィルタ処理した信号の計測を行っている。AE 計数は、Fig. 2.4 に示したように設定したしきい値を超えた数である。したがって、信号レベルが低い移着現象では、しきい値の厳密な設定が必要となり、材料ごとにしきい値の変更が必要になると考えられる。そこで、AE 計数パラメータではなく AE 平均

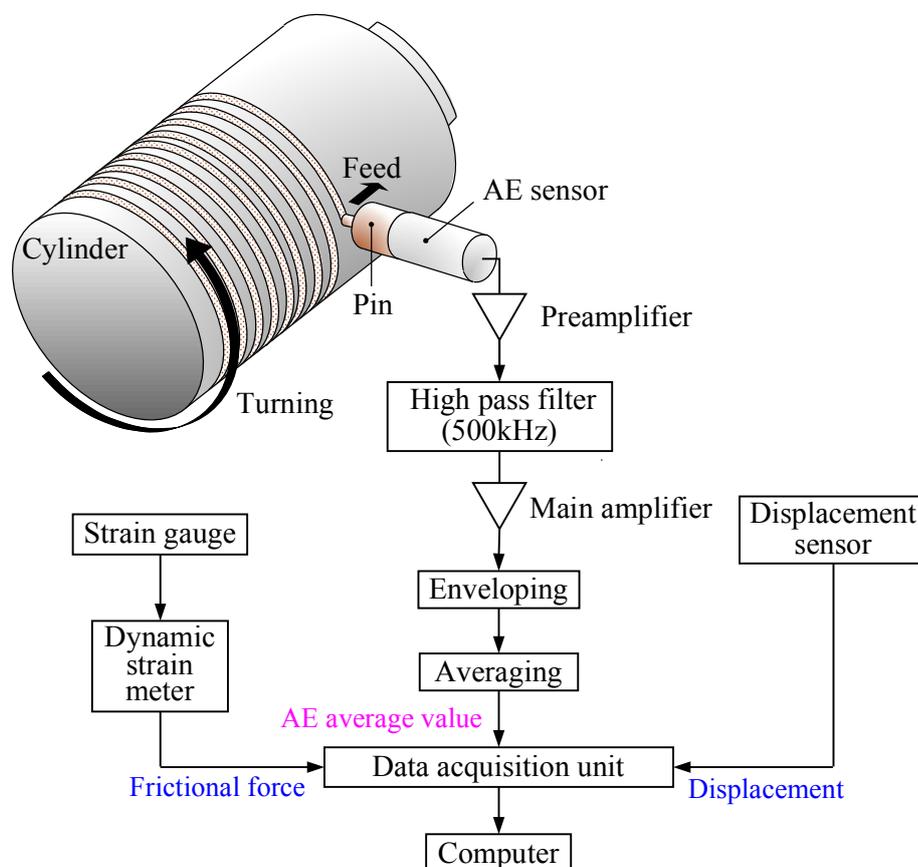


Fig. 4.2 Block diagram of the instrumentation for signal acquisition.

値を評価に用いるのが好ましいと思われる。よって、本実験では主として AE 平均値を評価に用いる。

#### 4.2.3 実験条件

Table 4.1 は、無潤滑片処女面摩擦（以下、無潤滑実験：dry）および潤滑繰返し摩擦（以下、潤滑実験：lub.）の実験条件を示している。摩擦速度に関しては、潤滑実験では摩耗量が微少であるため、潤滑実験の摩擦速度を大きく設定した。供試材としてピン試験片には、りん青銅（C5341；250 HV）、銅（C1020；121 HV）、黄銅（C3604；181 HV）、アルミニウム（A2017；109 HV）、鋼（S15C；275 HV）の5種類の材料を用いた。また、無潤滑実験の円筒試験片には合金工具鋼（SKS3）を、潤滑実験の円筒試験片にはクロムモリブデン鋼（SCM435）を用いた。円筒試験片は、焼入れ処理（750 HV 前後）した後に円筒研削（ $Rz$  1.2  $\mu\text{m}$  前後）により仕上げた。両試験片の摩擦表面を研磨紙により研磨しなじませ、エチルアルコールで超音波洗浄した後に実験を行った。ピン試験片の初期表面粗さは、すべての材料について  $Ra$  0.4  $\mu\text{m}$ 、 $Rz$  3.0  $\mu\text{m}$  に統一している。なお、実験はすべて室温（約 20°C）、大気中（相対湿度：40% RH）で行った。

Table 4.1 Summary of the experimental conditions

	Dry	Lub.
Normal load $W$ , N	100	100
Sliding velocity $v$ , m/s	0.25	2.0
Feed per revolution of the pin, mm/rev	3	–
Lubricant	–	Paraffin (10 ml/hr)
AE amplification factor, dB	70	
AE band-pass filter, kHz	HPF: 500 LPF: non-filter	

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 摩耗形態

Fig. 4.3 は、実験より得られた各種材料の摩耗進行曲線である。無潤滑実験の結果は実線、潤滑実験は破線で示している。すべての材料において摩擦距離に比例して摩耗が進行している。また Table 4.2 は、それぞれの比摩耗量の

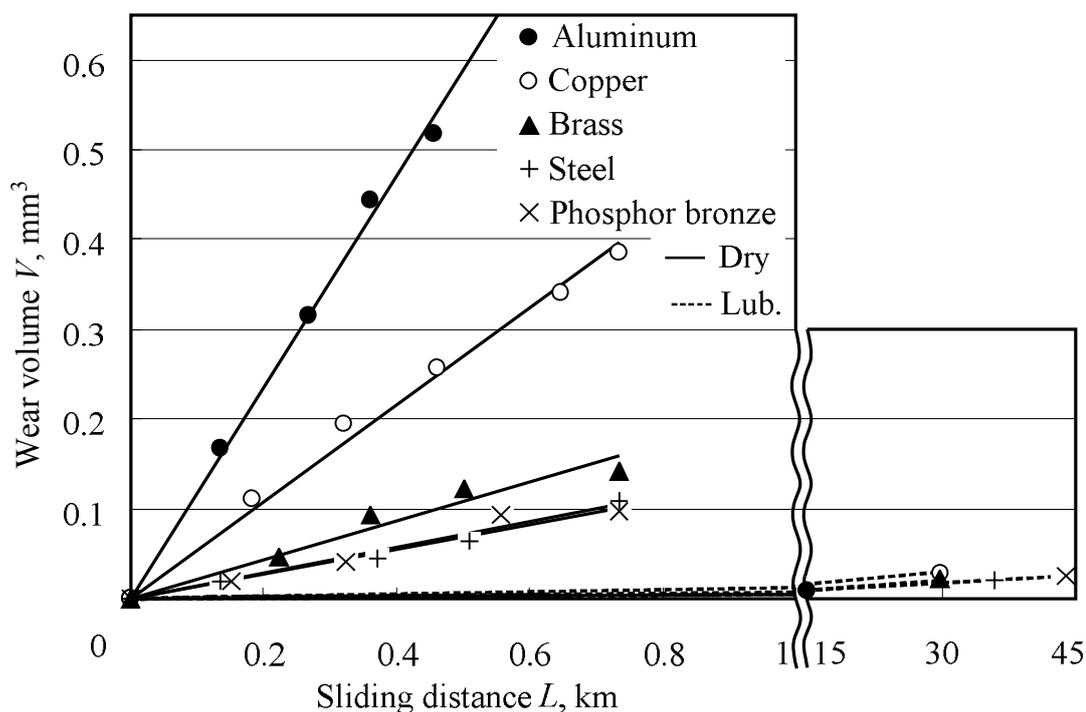


Fig. 4.3 Relation between wear volume and sliding distance.

Table 4.2 The specific wear  $w_s$  (unit:  $\text{mm}^2/\text{N}$ )

	Dry	Lub.
Steel	$1.5 \times 10^{-9}$	$4.4 \times 10^{-12}$
Phosphor bronze	$1.4 \times 10^{-9}$	$7.0 \times 10^{-12}$
Brass	$2.1 \times 10^{-9}$	$9.8 \times 10^{-12}$
Copper	$5.3 \times 10^{-9}$	$7.7 \times 10^{-12}$
Aluminum	$1.1 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-10}$

値である。これらより、潤滑実験では摩耗量が微少であり、無潤滑に比べ摩耗現象が減速的に進行しているのが確認できる。まずは、現象が大きく移着現象と AE 信号との関係が把握しやすいと思われる無潤滑実験の結果について先に述べる。そして無潤滑実験の結果を踏まえ、潤滑の有無に関する比較結果を 4.3.4 で述べることにする。したがって、以下に無潤滑実験の結果を述べる。

Fig. 4.3 において黄銅、鋼、りん青銅の摩耗量は、 $0.1 \text{ mm}^3$  付近と小さいが、アルミニウム、銅はそれに比べ大きい。これらの比摩耗量の大きさは  $1.38 \times 10^{-9} \sim 1.25 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$  にあり、摩耗形態は凝着摩耗であると判断できる。Fig. 4.4 は、各種材料について実験後のピン摩擦面観察結果である。摩擦面は、摩擦による塑性流動を受け、所々に損傷を受けていることが確認できる。その損傷の程度は材料によって異なり、(c) 黄銅は比較的損傷が少なく、(a) アルミニウムや (e) りん青銅では損傷が大きく見える。これらの損傷部分は、凝着摩耗（移着）によって材料が持ち去られたり、移着粒子が残留した跡と考えられる。また、基本的にすべての材料において、摩耗粒子の摩擦系外への脱落は見られなかった。片処女面摩擦であっても相互移着は生じるが、円筒試験片は焼入れ処理により硬さが大きいため、円筒の摩耗はほとんど無視できるであろう。実際に円筒表面を観察したところ、表面の損傷は見られなかった。

以上より、本実験における摩耗形態が凝着摩耗であり、ピンから円筒への移着現象が主であるといえる。

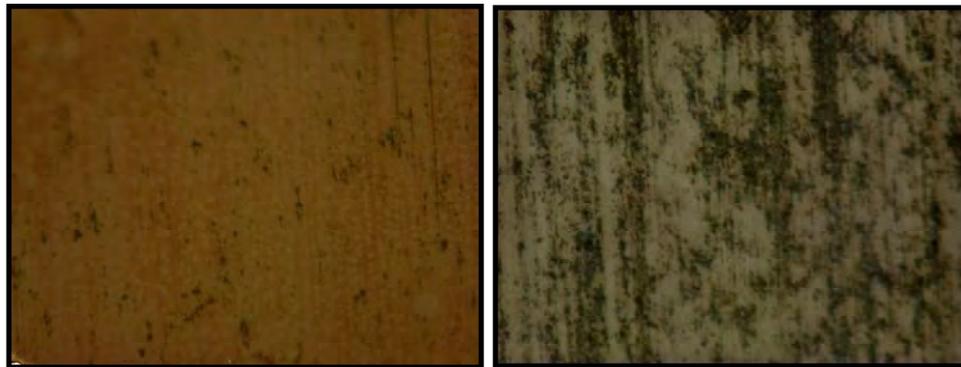
#### 4.3.2 表面損傷と AE 平均値の関係

Fig. 4.5 は、各材料における AE 平均値の値を比較したものである。各ピン材料につき、それぞれ 4 回の実験の平均値とばらつきを示している。本実験における摩耗形態は、凝着摩耗であり、ピンから円筒への移着という単一現象であった。Fig. 4.5 のように、同一現象下であっても発生する AE 平均値は材料により異なることがわかる。また、Fig. 4.3 で示した摩耗量の大きさと AE 平均値の大きさには直接的な相関はみられない。これは、同じ摩耗量で



(a) Aluminum

(b) Copper



(c) Brass

(d) Steel



(e) Phosphor bronze

Fig. 4.4 Worn surface of the pin specimen (single side virginal rubbing under unlubricated condition).

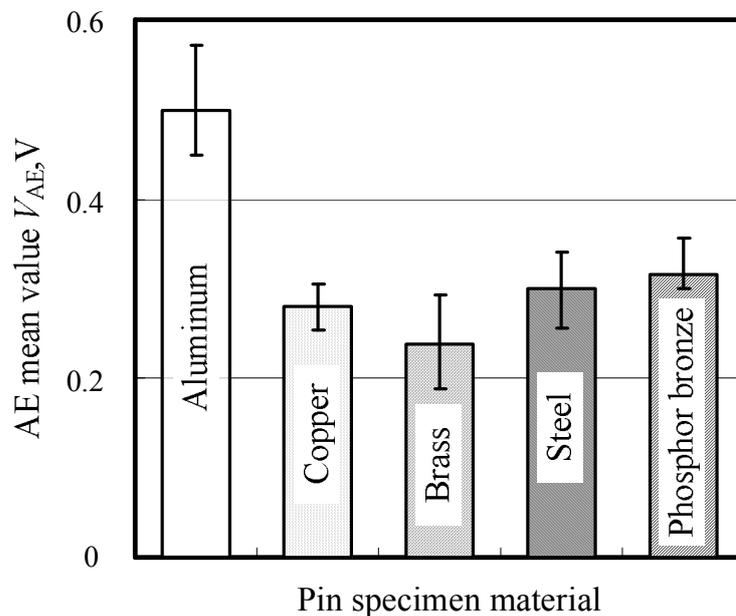


Fig. 4.5 Comparison of the AE mean value for the pin specimen material.

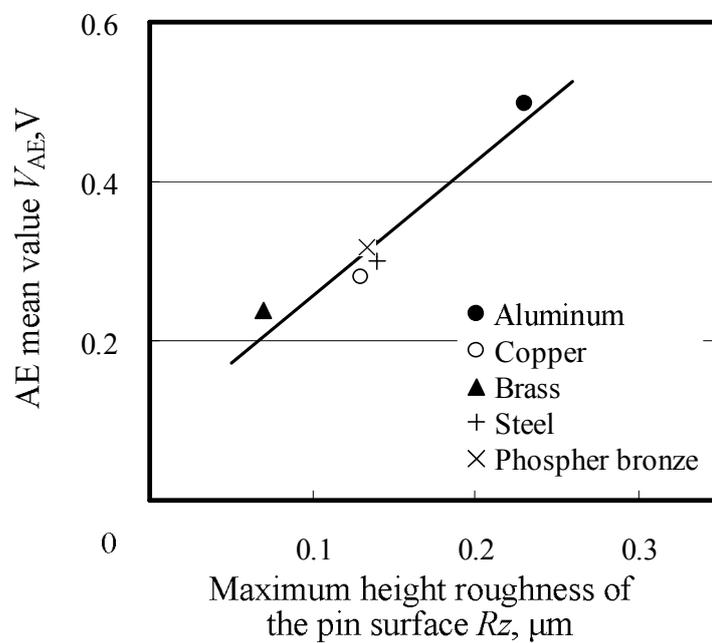


Fig. 4.6 Relation between the AE mean value and the maximum height roughness of the pin specimen.

あったとしても、材料によって移着する粒子の大きさやその数などが異なることと材料の AE 特性によるものと思われる。

Fig. 4.6 は、AE 平均値と摩擦後のピン表面の表面粗さの最大高さ  $Rz$  との関係である。それぞれ 4 回の実験の平均値で示している。これより、 $Rz$  と AE 平均値に比例関係があることがわかる。AE 平均値は、AE 信号の振幅の変化を電圧値で示している。無潤滑下の摩擦・摩擦現象で計測される AE 信号の変動は大きい。そこで、表面損傷のような大局的な評価を行う場合、AE 平均値の低周波成分である AE 平均値でその評価を行うことが望ましいと考える。

AE の発生原理より、均一変形の延性破壊に比べ不均一変形の不安定破壊では発生する AE 信号が大きい<sup>2)</sup>。このことから、AE として放出されるひずみエネルギーは、塑性流動によるエネルギーに比べ凝着で引き千切られるエネルギーの方が高いといえる。塑性流動によって表面はならされるが、凝着では荒らされる。摩擦後のピンの表面粗さは、Fig. 4.4 の摩擦面の損傷具合と一致しており、摩擦界面における摩擦・摩擦現象の過酷さの指標となると思われる。また、発生する AE 信号の大きさは変形・破壊の際のひずみエネルギーの大きさに従うと考えられる。したがって、AE 平均値は摩擦界面における現象の大きさをよくとらえているといえる。これより、AE 平均値の監視によって摩擦界面の損傷状態のモニタリングが可能であろう。

#### 4.3.3 摩擦量と AE エネルギーの関係

AE 平均値は、AE 信号の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であった。ここでは摩擦量と AE 信号との関係を考えるために、AE 平均値の時間による積分値を AE 総エネルギー (AE total energy)  $E_{AE}$  [V・s] と定義して評価に用いる。

Fig. 4.7 は、各種材料の摩擦量と AE 総エネルギーとの関係を示したものである。これより摩擦量と AE 総エネルギーとの間に線形的関係があることがわかる。この近似直線の傾きは、AE 信号のエネルギー量と摩擦量との比をあらわし、これを単位摩擦量あたりの AE エネルギーと定義する。この値は、

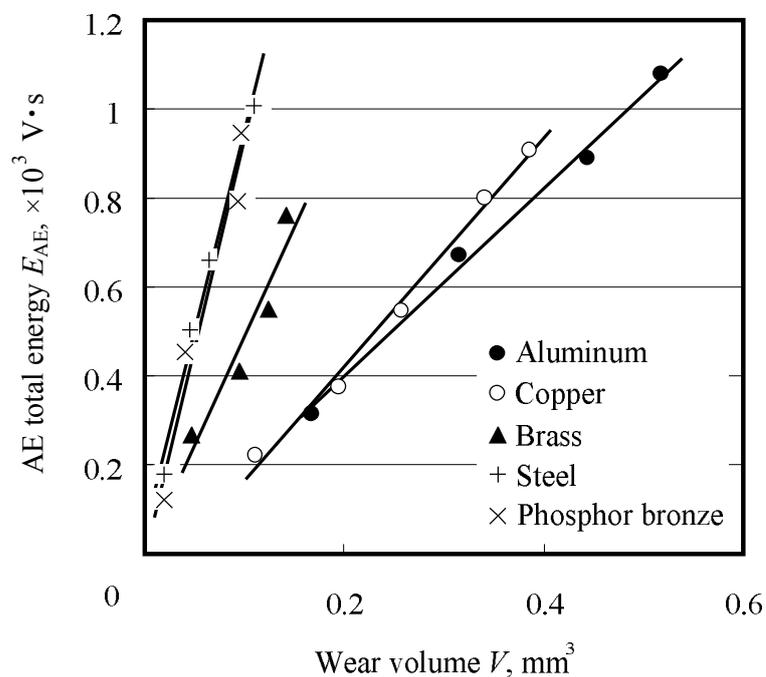


Fig. 4.7 Relation between the AE total energy and wear volume.

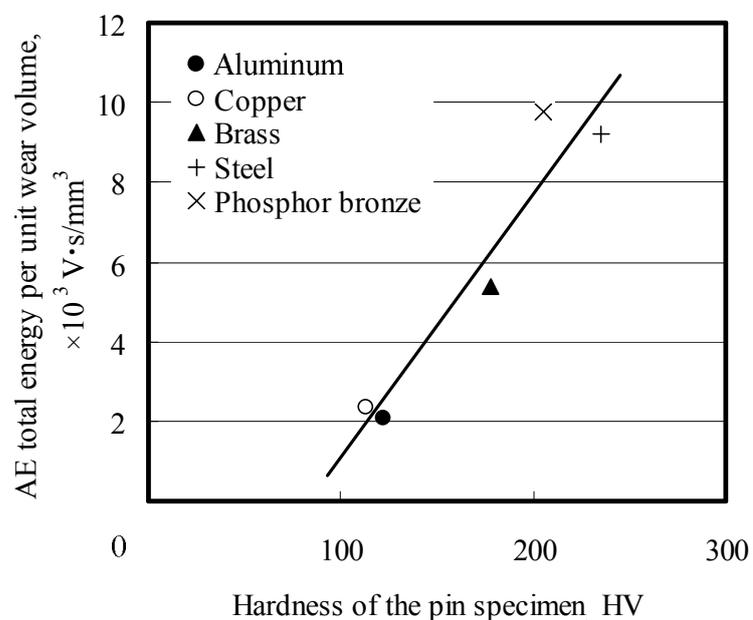


Fig. 4.8 Relation between AE energy per unit wear volume and Vickers hardness of the pin specimen.

ピン材料の硬さの影響を大きく受けることが予測される。

そこで Fig. 4.8 は、ピン材料のビッカース硬さと単位摩耗量あたりの AE エネルギーとの関係を示したものである。これより、硬さと単位摩耗量あたりの AE エネルギーとの間に正の相関関係があることがわかる。これは、硬さが摩耗に大きく影響し、摩擦材料の性質をあらわすパラメータの一つとして用いられ、摩耗に大きく関与しているためと考えられる。

#### 4.3.4 潤滑剤の有無による AE 信号への影響

Fig. 4.9 は、AE 平均値と摩擦後のピン表面の表面粗さの最大高さ  $Rz$  および算術平均粗さ  $Ra$  との関係である。潤滑実験では、摩耗量が微少であり表面損傷も小さい。そのため、潤滑実験後の表面粗さは、ピンの初期粗さ ( $Ra$  0.4  $\mu\text{m}$ ,  $Rz$  3.0  $\mu\text{m}$ ) の影響が残り、無潤滑実験の結果に比べ大きいと考えられる。しかしながら、Fig. 4.6 と同様に、潤滑実験においても表面粗さと AE 平均値に比例関係があることがわかる。なお、潤滑下では接触が生じずに AE 平均値が 0 V となる摩擦時間が存在し、そこでは表面損傷に関与しない。よって、Fig. 4.9 に用いた AE 平均値は、AE 平均値が 0 V でない摩擦時間の平均値を

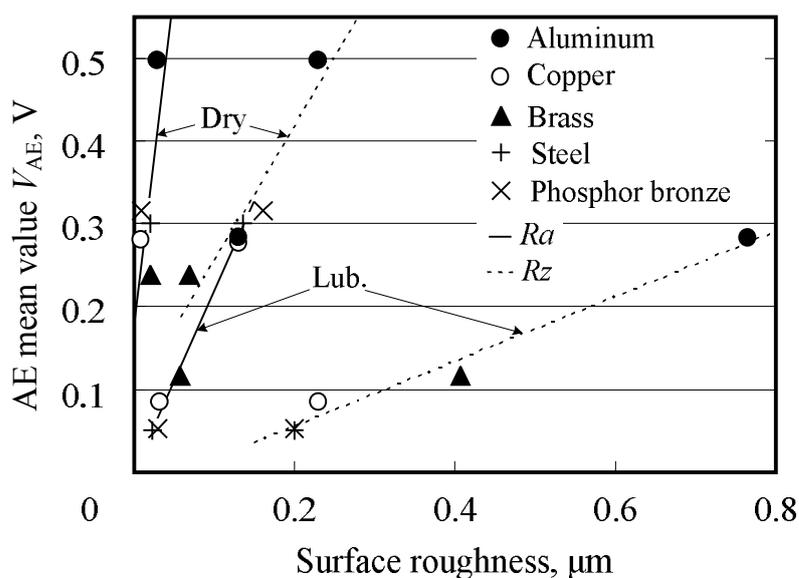


Fig. 4.9 Relation between the AE mean value and the surface roughness of the pin specimen.

とっている。

Fig. 4.10 は、無潤滑実験と潤滑実験における各種材料の単位摩耗量あたりの AE エネルギーの値とそのばらつきの範囲を示したものである。無潤滑実験は 4 回、潤滑は 3 回の実験結果の平均で示している。潤滑実験では摩耗量が非常に少ないため、ばらつきが大きいものの、材料による傾向があることが確認できる。

Fig. 4.11 は、単位摩耗量あたりの AE エネルギーとピン材料のビッカース硬さとの関係を示したものである。これより、硬さと単位摩耗量あたりの AE エネルギーとの間に比例関係があることがわかる。これは、硬さが摩擦材料の性質を表すパラメータの一つとして用いられ、摩耗に大きく関与することからと考えられる。また、潤滑実験ではすべての材料において単位摩耗量あたりの AE エネルギーが大きくなっている。この原因は、摩擦速度が異なるためと思われる。

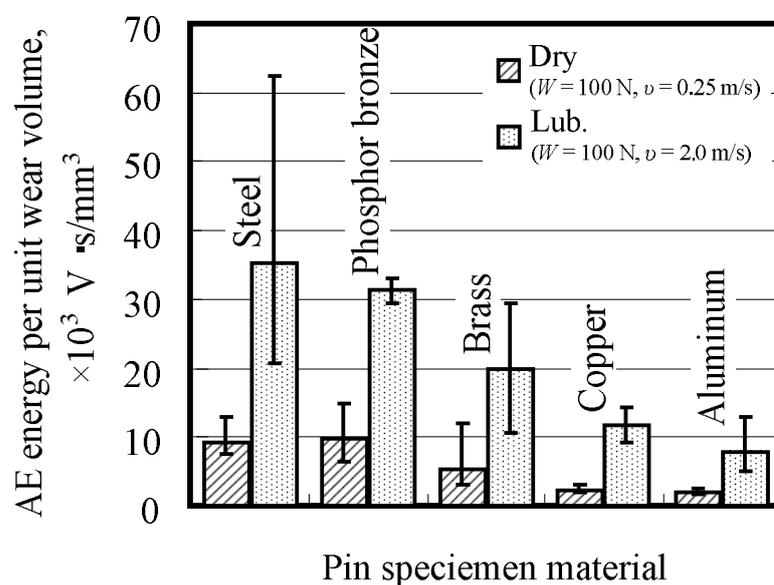


Fig. 4.10 Comparison of the AE energy per unit wear volume for the pin specimen.

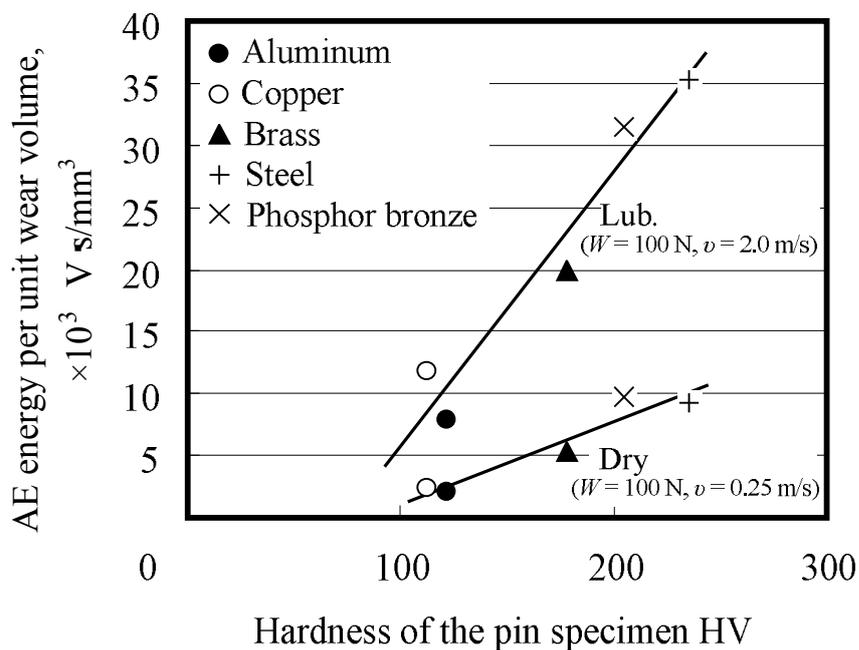


Fig. 4.11 Relation between the AE energy per unit wear volume and the Vickers hardness of the pin specimen.

## 4.3.5 摩擦速度の変化による AE 信号への影響

Fig. 4.12 は、潤滑において単位摩耗量あたりの AE エネルギーに対する摩擦速度の影響を、アルミニウムに関して調べたものである。また、潤滑における比摩耗量の変化を示している。摩擦速度が 0.25 m/s のとき、潤滑の有無

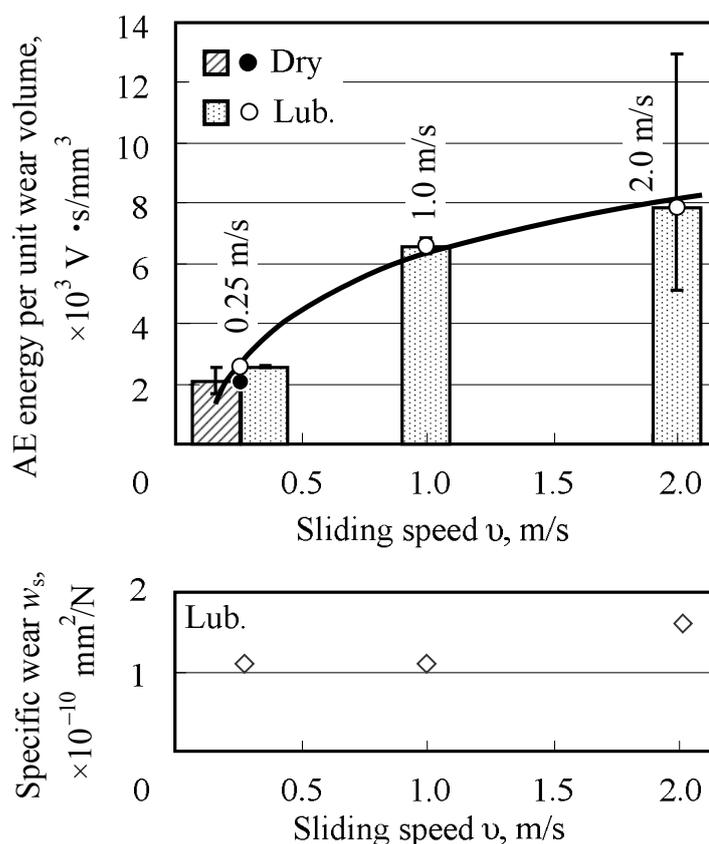


Fig. 4.12 Effect of the sliding speed on the AE energy per unit wear volume for aluminum, and the change of the specific wear rate under lubricated conditions.

に関わらず、単位摩耗量あたりの AE エネルギーの値がほぼ同じになることがわかる。これは、潤滑の有無に関わらず摩耗現象が同様の移着現象であるためと考えられる。潤滑実験では、摩擦速度の増加にともなって単位摩耗量あたりの AE エネルギーが大きくなり、摩擦速度の影響があることが確認できる。単位摩耗量あたりの AE エネルギーは、AE 総エネルギーと摩耗量との比であるが、Fig. 4.12 にあるように比摩耗量すなわち摩耗量の変化は小さい。したがって、移着にともなって発生する AE が大きくなったものと思われる。

## 4.4 論 議

AE から見た摩擦・摩耗現象は、摩擦に起因する（表面突起の相対すべりや衝突による）AE と摩耗に起因する（破壊による）AE とに分けることができる。本実験では、500 kHz のハイパスフィルタ処理により摩耗に起因する AE 信号の計測を主とした。本実験における摩耗現象は、ピンから円筒への移着現象が主体であった。この移着現象は、移着成長過程の初期段階にあたり、摩耗現象としては比較的単純化しやすい。そこで、その物理モデルを考え、摩耗量と AE 信号との対応について論議する。

まず、本実験における移着現象の物理モデルについて考えてみる。Archard は、凝着摩耗モデルとしての半球状摩耗粒子の脱落モデルを考案し、摩耗量  $V$  を次式であらわした<sup>3)</sup>。

$$V = \frac{2}{3} \pi a^3 \cdot k \cdot N \quad (4.1)$$

ここでは、摩擦面の突起接触部が半径  $a$  の円形接触点  $n$  個よりなるものと仮定し、突起の出会いの総数を  $N$ 、そのうちの  $k$  なる確率で破壊が生じるとしている。これは一つの接触点で、半径  $a$  の半球状摩耗粒子が一つ脱落するという考えである。Belyi ら<sup>4)</sup>は、鋼と重合体材料の繰返し摩擦において、摩耗量と AE エネルギーとの関係を、この半球状摩耗粒子の脱落モデルを用いて述べている。

ところが、摩耗素子の大きさは十数～数十 nm 程度であり<sup>5)</sup>、真実接触点の大きさは一般的に数～数十  $\mu\text{m}$  である<sup>6)</sup>といわれている。すなわち、摩耗素子が真実接触点に比べ 1/100～1/1000 倍の大きさであるということがいえる。そこで、Archard の半球状摩耗粉の脱落モデルを発展させ、Fig. 4.13 に示すような摩耗素子の移着モデルを考えた。

ここで、半径  $a$  の円形接触点で半径  $r$  の摩耗素子が  $i$  個移着するとする。摩耗素子の大きさは十数～数十 nm のばらつきをもつが、その平均半径  $r$  で一定と考える。ただし、摩耗素子の大きさは材料や摩擦条件によって、小さい範囲ではあるが変化することも考えられる。また、相手材料との相性によ

り移着量が増加すると想定されるため、移着率  $\tau$  を導入する。移着率  $\tau$  は、接触点面積に対する摩耗素子の総移着面積の割合をあらわし、次式の関係で定義する。

$$i \cdot \pi r^2 = \tau \cdot \pi a^2 \quad (4.2)$$

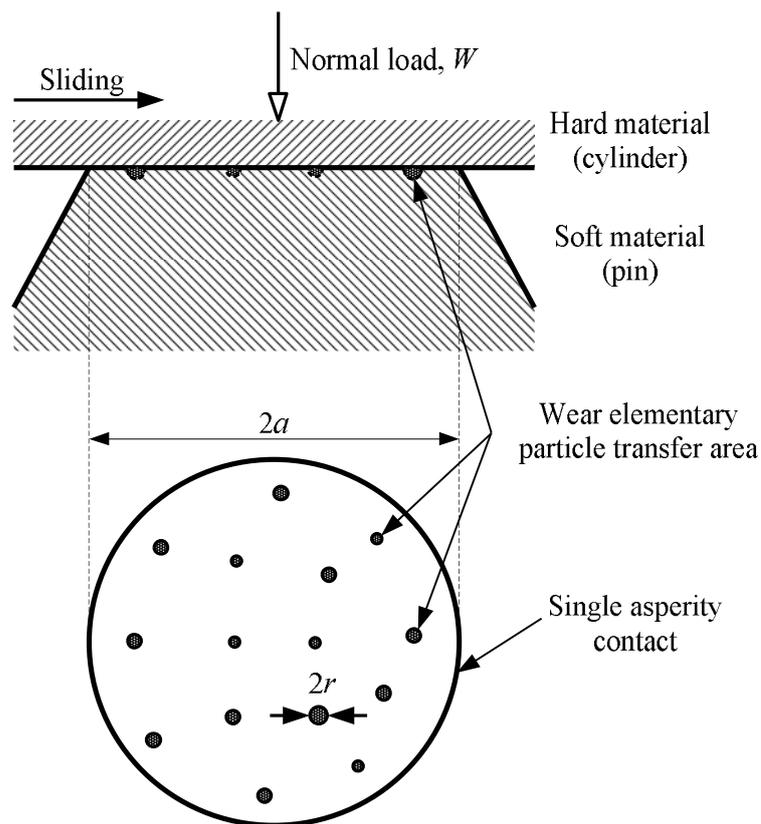


Fig. 4.13 Transfer model of wear elements.

次に、Fig. 4.13 の移着モデルから摩耗量と AE エネルギーの理論的關係について検討してみよう。摩耗素子形状を半径  $r$  の半球と仮定し、式 (4.1) と同様にして摩耗量  $V$  は、

$$V = \frac{2}{3} \pi r^3 \cdot i \cdot k \cdot N \quad (4.3)$$

とあらわされる。式 (4.2) と式 (4.3) より  $i$  を消去し、 $W = p_m A_r$ ,  $A_r = n \pi a^2$  から得られる  $a^2 = W/(n \pi p_m)$  を代入して、

$$V = \frac{2}{3} \cdot \frac{r\tau W}{np_m} \cdot k \cdot N \quad (4.4)$$

を得る。ここで、 $W$  は荷重、 $p_m$  は摩擦する 2 面の軟らかい方の押込み硬さ、 $A_r$  は真実接触面積である。

一方、摩擦・摩擦現象で計測される AE は摩擦に起因する AE と摩擦に起因する AE との和であると考えられる。よって、AE 総エネルギー  $E_{AE}$  は、次式であらわされる。

$$E_{AE} = E_w + E_f \quad (4.5)$$

ここで、 $E_w$ 、 $E_f$  はそれぞれ摩擦と摩擦に起因する AE エネルギーである。

本実験における片処女面摩擦では、すべての材料において摩擦素子の移着の単一現象とみなすことができた。摩擦に起因する AE 信号は、摩擦素子の移着(離脱)によって発生する突発型 AE パルスの連続であると考えられる。AE エネルギーは、その AE パルスエネルギーの集合とみなすことができる。そこで、AE パルスエネルギーの分解能について検討してみる。一般に、AE センサで検出される AE 信号の電圧レベルは数十～数百  $\mu\text{V}$  であり、その時間分解能は数  $\mu\text{s}$  程度である。これより、AE パルスエネルギーの分解能は  $10^{-11}$  ～  $10^{-9} \text{ V}\cdot\text{s}$  程度と考えられる。

本実験では 70 dB の増幅により、検出信号を約 3000 倍にしている。これを考慮して、摩擦素子一つの移着で生じる AE パルスエネルギーは、三科らの観測した摩擦素子直径 15～40 nm の値を用いて、AE エネルギーの実験値から  $6 \times 10^{-16}$  ～  $5 \times 10^{-14} \text{ V}\cdot\text{s}$  となった。これは AE パルスエネルギー分解能に比べ 3 桁～7 桁低く、摩擦素子一つの移着だけでは AE エネルギーとして検出できないことを示している。計算上では、AE エネルギーとして検出されるには、最低 300～1400 nm 程度の摩擦素子直径が必要と考えられる。しかし、実際は摩擦素子が生成されるまでに摩擦応力によって摩擦表面ですべり系が進展・交錯する<sup>7)</sup>。そのため、摩擦に起因する AE エネルギーは、摩擦表面におけるすべり系の進展・交錯と摩擦素子の移着とによって発生するものと考えられる。

AE に限らず、すべてのパルスの現象は多くの調和振動の位相定数を適当にそろえて重ね合わせることによって生じる<sup>8)</sup>。Fig. 4.13 のモデルのように真実接触点から摩擦素子が連続的に離脱することで AE パルスが発生し、ミクロ的な摩擦を連続的に検出していることになる。このことから、移着によって発生する AE パルスエネルギーを以下のように考える。半径  $r$  の  $i$  個の摩擦素子が集団で持ち去られるとき、すべり系の進展・交錯および摩擦素子の移着による AE パルスが混合的に発生するとする。また、これらは真実接触点上においてほぼ同位相で生じると考えられる。このとき、真実接触点におけるミクロの摩擦によって  $e_p$  の AE パルスエネルギーが発生すると仮定する。それが、表面突起の出会いの総数  $N$  のうち、 $k$  の破壊確率で生じるため、摩擦に起因する AE エネルギー  $E_w$  は、

$$E_w = e_p \cdot k \cdot N \quad (4.6)$$

とあらわされる。よって、式 (4.4), (4.5), (4.6) から AE 総エネルギーは、

$$E_{AE} = \frac{3ne_p}{2r\tau} \cdot \frac{p_m}{W} V + E_f \quad (4.7)$$

となる。

本実験では、500 kHz のハイパスフィルタ処理により摩擦に起因する  $E_f$  は、ほとんど無視できると考える。また、 $e_p$  は材料の AE 特性および AE 計測系に関係する定数と考える。移着率  $\tau$  は摩擦材料間の相互溶解度などに関するものと考えられる。 $p_m$  は、ピン材料のビッカース硬さに置き換えることができる。真実接触点数  $n$  は、接触状況を示し、今回のような単一現象であれば定数とみなすことができるであろう。

式 (4.7) より、AE エネルギーと摩擦量には線形関係が認められ、その傾きである単位摩擦量あたりの AE エネルギーは材料の硬さに比例することが示される。これは、Fig. 4.11 に示した相関と一致している。また、単位摩擦量あたりの AE エネルギーは単一現象であれば定数とみなすことができ、AE エネルギーの計測により、摩擦量の推測が可能であろう。これは、Fig. 4.7 で示した AE 総エネルギーと摩擦量との線形関係からも認めることができる。

AE エネルギーは、AE 平均値の時間による積分値であった。逆に、AE 平均値は摩擦に起因する AE エネルギーの微分値であると考えられ、式 (4.6) より AE 平均値は、破壊確率  $k$  と出会いの総数  $N$  に比例する。破壊確率  $k$  が材料で不変であるとしたとき、出会いの総数  $N$  によって AE 平均値が変動する。 $N$  の増加により、破壊を受けて発生する AE パルスエネルギーの発生間隔が小さくなる。このとき、AE パルスエネルギーは重なり合い、AE 平均値は大きくなる。このように、AE 平均値はミクロ的な摩擦の進行状況を示し、その結果として、AE 平均値が接触状況およびその破壊状況と相関があるものと考えられる。これより、Fig. 4.9 に示したように AE 平均値が表面粗さ  $Ra$ ,  $Rz$  と相関関係にあり、表面損傷状態の評価に利用できることがわかる。

以上を簡単にまとめると、Fig. 4.14 に示すような概念図で説明できる。まず、ピン摩擦面全体の中にいくつかの真実接触点が存在しており、そのうち

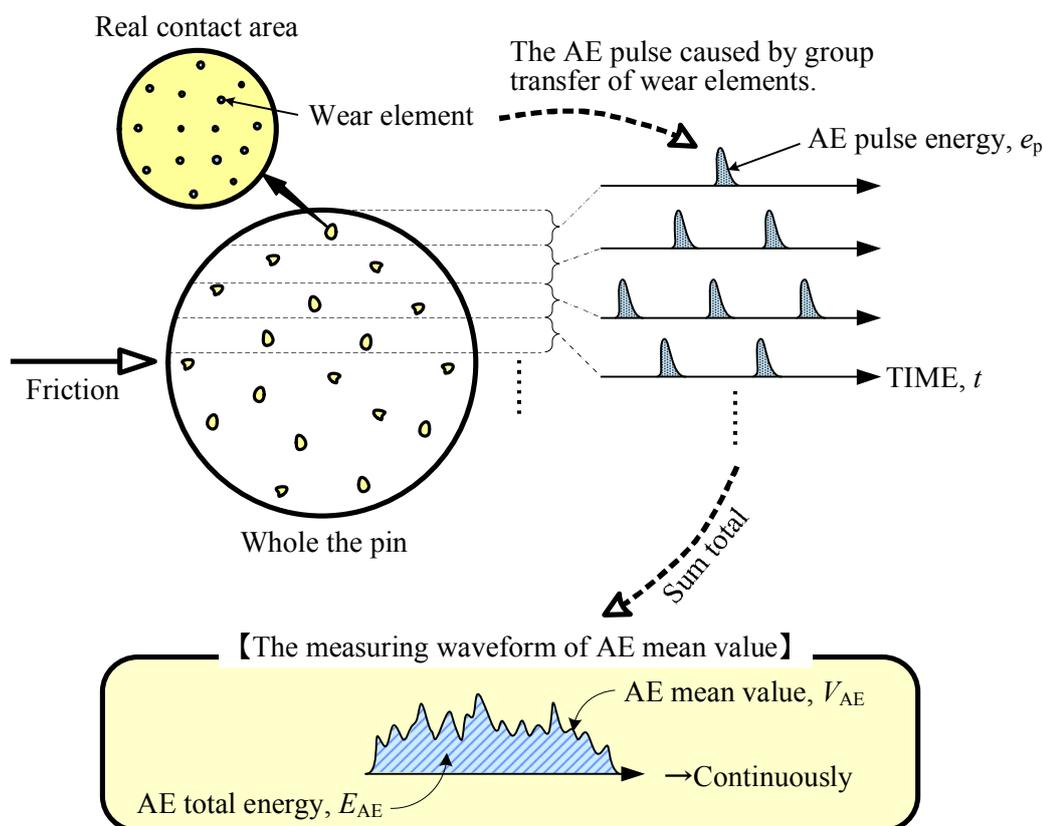


Fig. 4.14 Concept chart of the AE generated by transfer phenomenon.

の一つの破壊を受ける真実接触点において摩耗素子が集団で移着するときの一つの AE パルスが発生するとする。計測している AE 平均値は、各真実接触点で生じる AE パルスの総和である。表面損傷が大きくなるということは、破壊を受ける真実接触点が多くなり、AE パルスの分布密度が大きくなるため、結果として AE 平均値が上昇するのである。また、摩耗量は摩耗素子体積の総和であり、摩耗素子の集団移着で発生する AE パルスエネルギーの総和が AE 総エネルギーであることから、摩耗量と AE 総エネルギーのよい相関が得られるのだと考える。

最後に、摩擦速度の影響について述べる。これは、真実接触点での摩耗素子の移着で発生する AE パルス自体のパルス密度が摩擦速度の増加により密になり、AE パルスが大きくなるためと考えている。もちろん、摩擦速度が大きくなれば Fig. 4.14 に示すようなピン全体におけるパルス密度は増加し、AE 平均値は増加する。ところが、全体としての AE 総エネルギーは変わらない。上述したように、摩耗素子一つの移着で発生する AE の信号レベルは小さい。しかし、摩擦速度が大きくなることによって、個々の摩耗素子の移着で生じる AE パルスの位相がそろい、AE 事象として検出しうる信号レベルまで大きくなるであろう。その結果として、一つの真実接触点で発生する AE パルスエネルギーが大きくなり、Fig. 4.12 で示した結果が得られたと考えられる。

## 4.5 結 言

本章では、移着成長過程を含む複雑な凝着摩耗現象を回避するために、無潤滑下と潤滑下で二つの摩擦方式を利用して凝着摩耗現象の単純化を行った。ここでの現象は、ピンから円筒への移着現象が主であると考えられる。そこで定量的評価の試みとして、Archard の半球状摩耗粒子脱落モデルおよびその摩耗式を発展させ、摩耗素子の移着モデルの検討を行った。そして、この移着モデルを用いて移着現象と AE 信号との相関について理論的な展開を行った。本章で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) AE 平均値は、摩耗量との直接的な相関は得られにくいですが、表面粗さ  $Ra$ ,  $Rz$  と非常によい相関関係にあることがわかった。これは、同じ摩耗量であったとしても、材料によって移着する粒子の大きさや数などが異なることや材料の AE 特性などによるものと考えられる。よって、AE 平均値の監視は摩擦界面の表面損傷状態の評価に有効といえる。
- (2) 摩耗（移着）にともなって発生する AE が、摩擦速度の影響を受けることが確認された。これは、摩擦速度が大きくなることによって、個々の摩耗素子の移着で生じる AE パルスの位相がそろい、AE 事象として検出しうる信号レベルまで大きくなるためと考える。
- (3) AE 総エネルギーと摩耗量の間によい線形関係が認められた。この直線の傾きである単位摩耗量あたりの AE エネルギーは、材料硬さに比例する材料固有の値となり、これを用いて AE 総エネルギーの計測より摩耗量の推定が可能である。
- (4) 摩耗素子移着モデルから移着現象と AE 信号の相関について理論的に述べた。その結果、移着現象における AE 総エネルギーと摩耗量との関係式を導出することができた。

< 文 献 >

- 1) 笹田 直・和泉武士：「両処女面摩擦における移着と摩耗—凝着摩耗の成立と疲労説の否定—」, トライボロジスト, 49, 12 (2004) pp. 954–961.
- 2) 第3章の14)と同じ.
- 3) J.F. Archard: “Contact and Rubbing of Flat Surfaces”, J. Appl. Phys., 24 (1953) pp. 981–988.
- 4) V.A. Belyi, O.V. Kholodilov, A.I. Sviridyonok: “Acoustic Spectrometry as Used for the Evaluation of Tribological Systems”, Wear 69 (1981) pp. 309–319.
- 5) 第3章の12)と同じ.
- 6) 笹田 直：「摩耗」, 養賢堂 (2008) p. 11.
- 7) 三科博司・近藤真史：「摩耗素過程の In-Situ 観察—純鉄にみる表面結晶粒の変形と摩耗素子の生成—」, トライボロジスト, 44, 7(1999) pp. 528–535.
- 8) 栗林一彦・岸 輝雄：「AE パルスの発生と伝播」, 金属, 47, 6 (1977) pp. 43–47.

## 第5章 アブレシブ摩耗における 切削現象と AE 信号の相関

### 5.1 緒言

第2章～第4章において、凝着摩耗における摩擦・摩耗現象と AE 信号の関係について述べてきたが、もう一つの重要な摩耗形態としてアブレシブ摩耗がある。アブレシブ摩耗は、硬い表面突起（または、硬い遊離粒子）が相手面を削る、いわゆる切削現象と同様である。これまで様々なアプローチから切削現象の追究が行われており、Krystof<sup>1)</sup>による最大せん断応力説による解、Merchant<sup>2)</sup>による切削エネルギー最小説による解、Lee および Shaffer<sup>3)</sup>によるすべり線場理論による解などがある。これらの先駆的な研究により二次元切削モデルおよび切削理論式が明らかにされてきた。そのため現象が複雑な凝着摩耗と異なり、アブレシブ摩耗がせん断によってなされることが明確にされている。そこで本章では、アブレシブ摩耗現象を再現し、そこで発生する AE 信号とアブレシブ摩耗現象との相関について検討を試みる。

### 5.2 実験方法

#### 5.2.1 円筒摩擦面の表面性状

本実験では、第2章～第4章と同様の実験装置を使用した (Fig. 2.2)。AE センサも共振型（共振周波数：1 MHz）の同一のものを使用した (Fig. 2.6)。また、計測システムおよび計測条件は、項 4.2.2 で述べたものと同様である。ピン試験片摩擦部は  $\phi 4$  mm、円筒試験片の外径は  $\phi 100$  mm であり、片処女面摩擦方式で摩擦させた。

ここでは、アブレシブ摩耗現象を再現するため、円筒試験片の表面性状を工夫している。円筒表面突起に切削機能を持たせるためには、ある程度の硬さと切れ刃形状が必要である。そこで、円筒試験片を焼入れ処理（750 HV 前

後) した後、旋削加工によって表面に切れ刃をつくった。加工は、CBN 工具を用いて以下のように、往復加工の行きと帰りの切削条件を変えて行った。

行き：1 条溝加工

(工具先端ノーズ半径 0.4 mm, 溝リード 0.9 mm, 深さ 0.3 mm)

帰り：3 条溝加工

(工具先端ノーズ半径 0.2 mm, 溝リード 2.1 mm, 深さ 0.1 mm)

Fig. 5.1 は、上記の条件で加工した円筒表面に存在する切れ刃の分布図である。破線で示す部分は帰りに加工された工具軌跡であり、この加工によって切れ刃が形成されることになる。よって、実線で示す部分が切れ刃部分、○で示す部分が切れ刃先端部分となり、この切れ刃先端で切削が行われる。ピンの移動方向は Fig. 5.1 に示すように切れ刃に対向して進み、 $\phi 4$  mm のピン表面内には常に 4 個の切れ刃が存在することになる。なお、Fig. 5.1 に示した縦長さは円筒の円周長さであり、実際は円周方向には 4 個の切れ刃しか存在せず、一つの切れ刃が円周方向に長い範囲で存在している。Fig. 5.2 に円筒表面および切れ刃の詳細を示す。(a) は、円筒表面の立体模式図とピン試験片

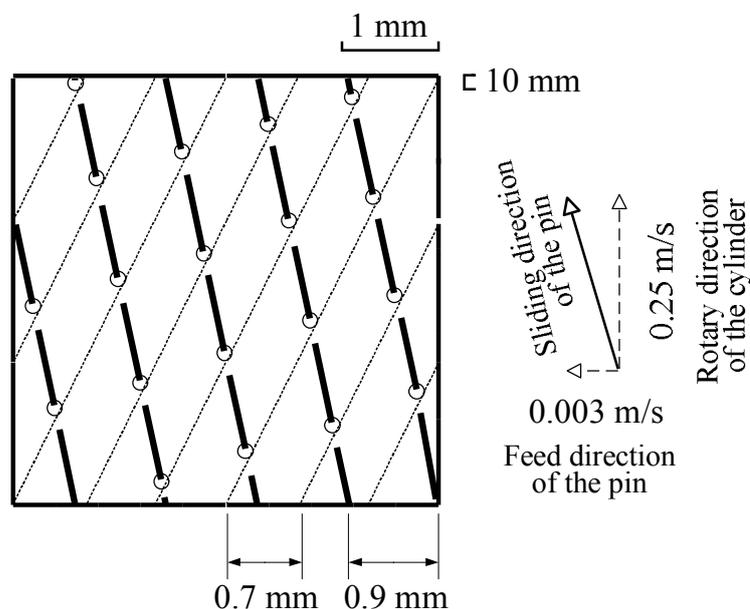
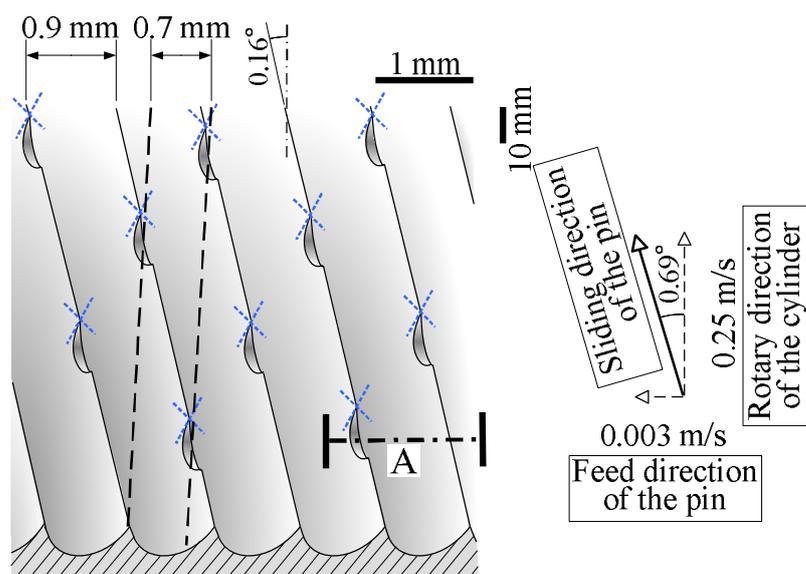
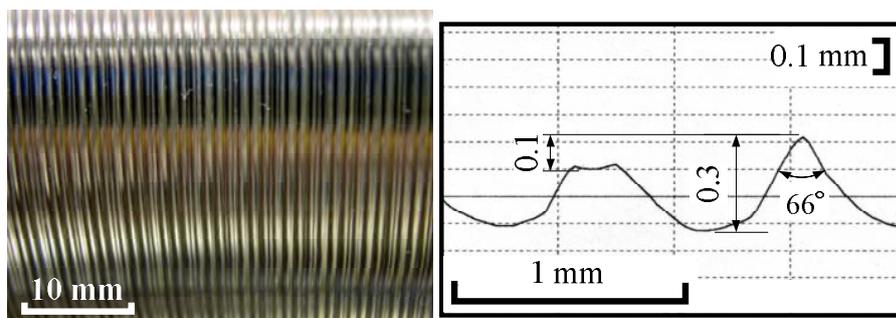


Fig. 5.1 Distribution diagram of cutting edge (solid line: part of the cutting edge, broken line: the track cut on tool's return, ○: part of the rake face), and traveling direction of the pin.



(a) Three-dimensional diagram of the cylinder surface



(b) Photography of the cylinder surface (c) Profile of the cutting edge

Fig. 5.2 Details of the cylinder surface and the cutting edge.

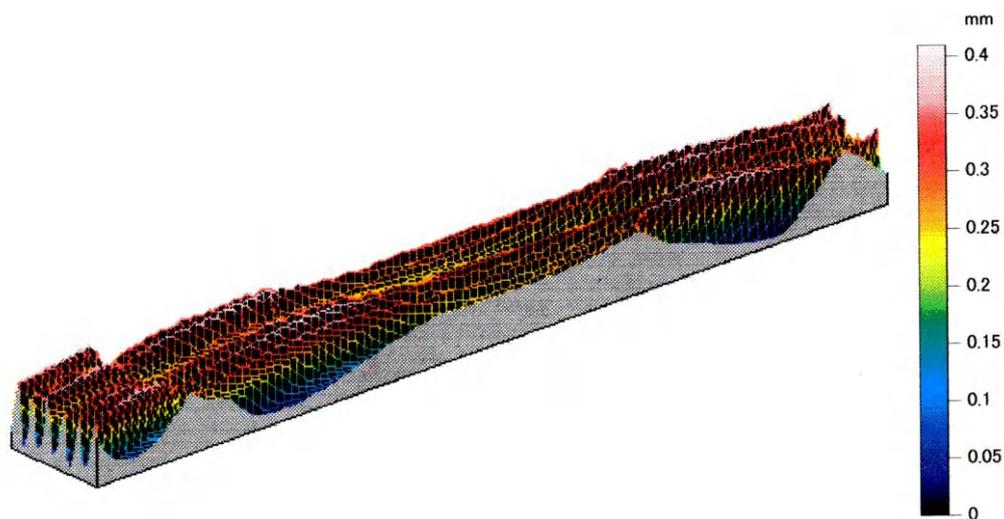


Fig. 5.3 Three-dimensional profile of the cylinder surface (measuring area: 5mm × 40mm).

の相対摩擦方向である。(b) は、実際の加工後円筒表面の観察結果である。また (c) は、円筒表面の一部 [Fig.5.2 (a) A 部分] の断面曲線である。これより、切れ刃部分の高さは約 0.3 mm であり、すくい面となる部分は約 0.1 mm の溝が形成されていることが確認できる。ピン試験片は、この切れ刃先端部 [Fig.5.2 (a) ×部分に相当] にほぼ対向して進行し、そこで切削がなされる。さらに Fig. 5.3 は、実際に形状測定機により円筒表面を計測した結果である。計測は、5 mm × 40 mm の領域を 0.5 mm 間隔で行った。以上のような円筒表面上の切れ刃によって、摩擦現象下での切削現象（ピン側のアブレシブ摩耗）を再現させる。

### 5.2.2 実験条件

Table 5.1 は、本実験における実験条件である。摩擦速度およびピン送り速度は、第4章の片処女面摩擦実験と同様である。供試材も同様にして、ピン試験片にはりん青銅 (C5341)、銅 (C1020)、黄銅 (C3604)、アルミニウム (A2017)、鋼 (S15C) の5種類の材料を用い、円筒試験片には合金工具鋼 (SKS3) を用いた。アブレシブ摩耗が主たる摩耗形態であったとしても、凝着摩耗が切れ刃との接触面などで生じる<sup>4,5)</sup>。そこで、純粋なアブレシブ摩耗を再現するために、流動パラフィンを潤滑剤として摩擦部に 50 ml/hr で滴下した。ピン試験片の摩擦表面をエメリー紙により研磨し、両試験片をエチルアルコールで洗浄した後に実験を行った。ピン試験片の初期表面粗さは、す

Table 5.1 Summary of the experimental conditions

Normal load $W$ , N	20 (10, 30, 40)
Sliding speed $v$ , m/s	0.25
Feed per revolution of the pin, mm/rev	3
Lubricant	Paraffin (50 ml/hr)
AE amplification factor, dB	70
AE band-pass filter, kHz	HPF: 500 LPF: non-filter

すべての材料について  $Ra$  0.4  $\mu\text{m}$ ,  $Rz$  3.0  $\mu\text{m}$  に統一している。摩擦距離は 200 m とし、摩擦距離 50 m ごとにピン試験片の重量測定を行っている。なお、実験はすべて室温（約 20°C）、大気中（相対湿度：40% RH）で行った。

### 5.3 実験結果

#### 5.3.1 摩耗形態

Fig. 5.4 は、各種材料の摩耗の進行曲線である。各材料とも再現性がよく、直線的に摩耗が進行していることが確認できる。また、Fig. 5.5 に摩擦後ピン摩擦面の観察結果、Fig. 5.6 に採取した摩耗粒子の観察結果を示している。さらに、Table 5.2 にピン試験片の比摩耗量の値を示す。これらより、摩耗面および摩耗粒子は典型的なアブレシブ摩耗の特徴を呈しており、本実験における摩耗形態はアブレシブ摩耗形態であるといえる。摩耗粒子の長さは、最大で 4 mm（ピンの直径の大きさ）であり、その形状から切れ刃すくい面で削られながら、切れ刃の溝部に排出されて生成されたと考えられる。

また、切れ刃の役割をする突起の頂角・硬さと削られる平面の硬さとの関係から、アブレシブ摩耗が発生するか否かの発生領域を表す摩耗形態図 (wear

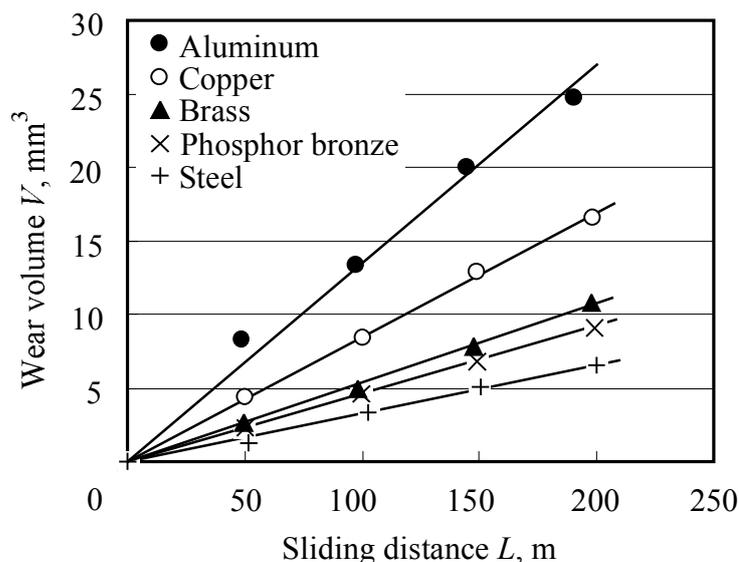
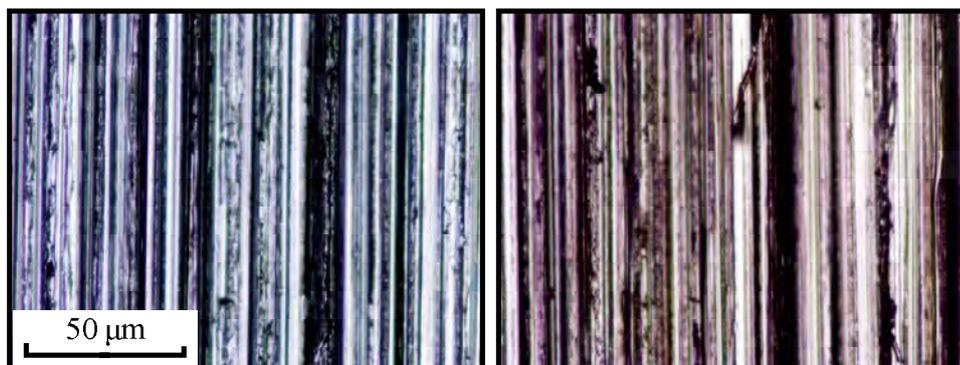
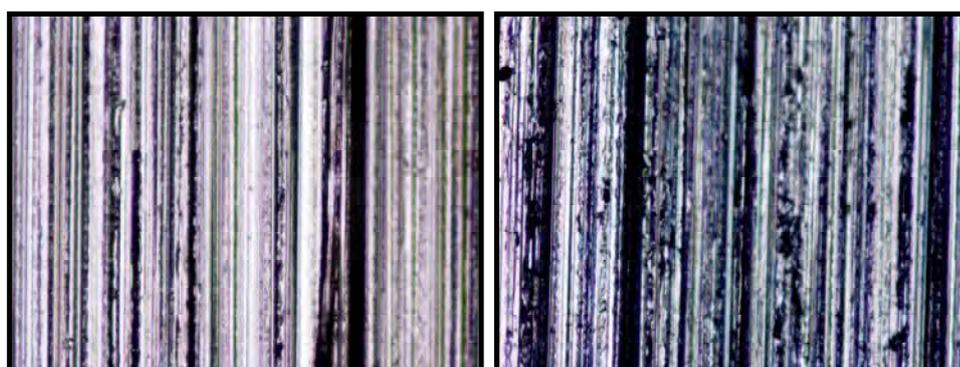


Fig. 5.4 Relation between wear volume and sliding distance.



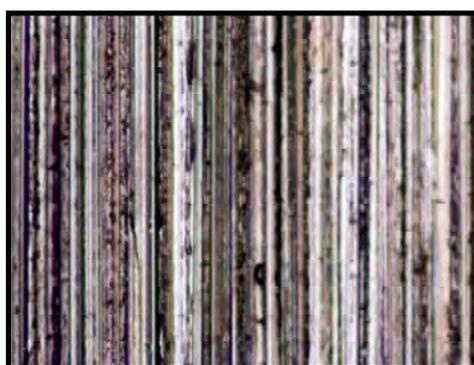
(a)Aluminum

(b)Copper



(c)Brass

(d)Steel



(e)Phosphor bronze

Fig. 5.5 Worn surface of the pin specimen (sliding direction: ↑).

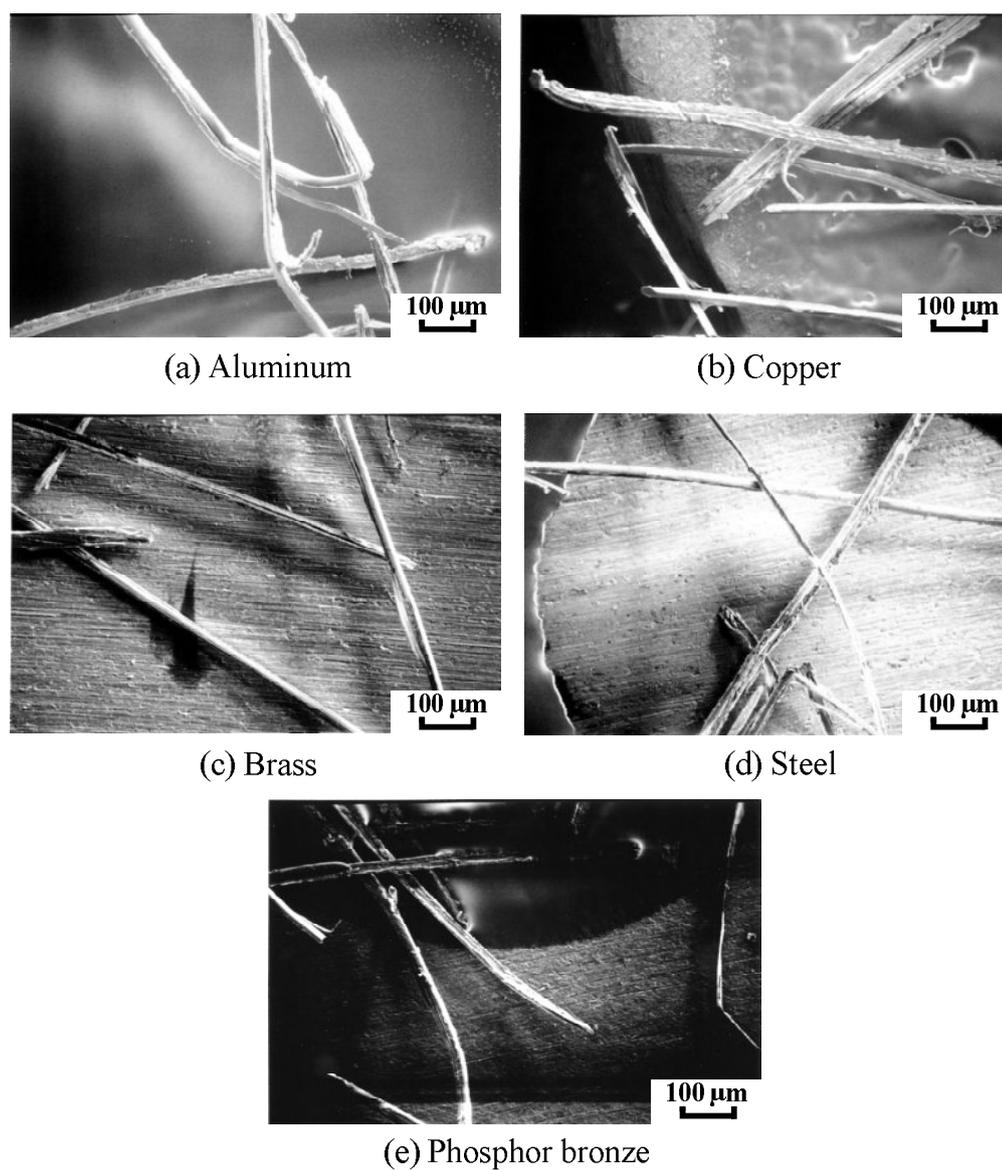


Fig. 5.6 SEM photography of the wear particles.

Table 5.2 The specific wear  $w_s$  (unit:  $\text{mm}^2/\text{N}$ )

Aluminum	$6.5 \times 10^{-6}$
Copper	$4.2 \times 10^{-6}$
Brass	$2.8 \times 10^{-6}$
Phosphor bronze	$2.3 \times 10^{-6}$
Steel	$1.6 \times 10^{-6}$

map) がある<sup>6)</sup>. この摩耗形態図より, 硬突起の塑性変形が生じるか軟平面の塑性変形が生じるかがわかる. これを用いて, 本実験における突起の頂角 (この頂角は, すくい面方向に関する頂角の角度を指し, ここでは前述した帰りの溝加工条件より幾何学的に約  $120^\circ$  である), 円筒材料硬さ, ピン材料硬さより, 本実験では突起の塑性変形が生じていないことが確認できる.

### 5.3.2 表面損傷と AE 平均値の関係

Fig. 5.7 は, 本実験における AE 平均値の平均値とそのばらつきの範囲を示したものである. Fig. 4.5 で示した移着現象の場合に比べ, AE 平均値が約 1/10 程度低い値となっている. これは AE の発生原理より, 不均一変形に比べ均一変形では発生する AE 信号が小さいことから説明できる. また AE 平均値の大きさは, Fig. 5.4 や Table 5.2 に示した摩耗量の大きさと比較しても直接的な関係はみられない.

Fig. 5.8 は, 摩擦後ピン摩擦面の表面粗さと AE 平均値との関係である. ここで, プロット点を結ぶ曲線は, 算術平均粗さ  $Ra$  と最大高さ粗さ  $Rz$  を区別するために示したもので, 傾向線を意味するものではない. また, 材料硬さの順位を軟らかい順に番号で示している. 本実験のような定圧切込みの切削

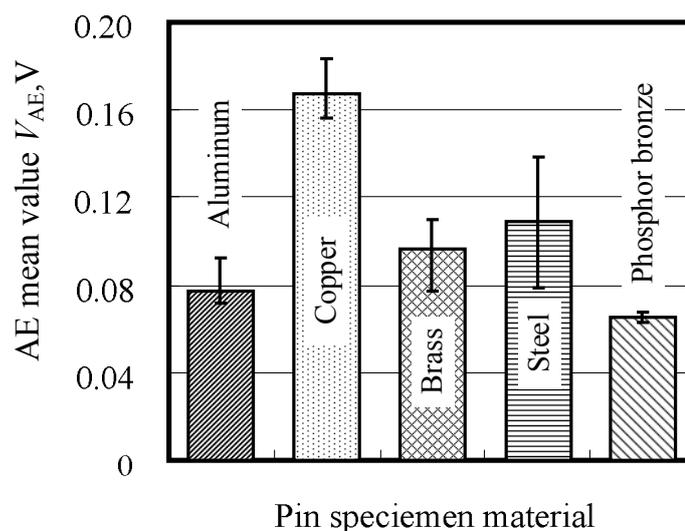


Fig. 5.7 Comparison of AE mean value for the pin specimen material.

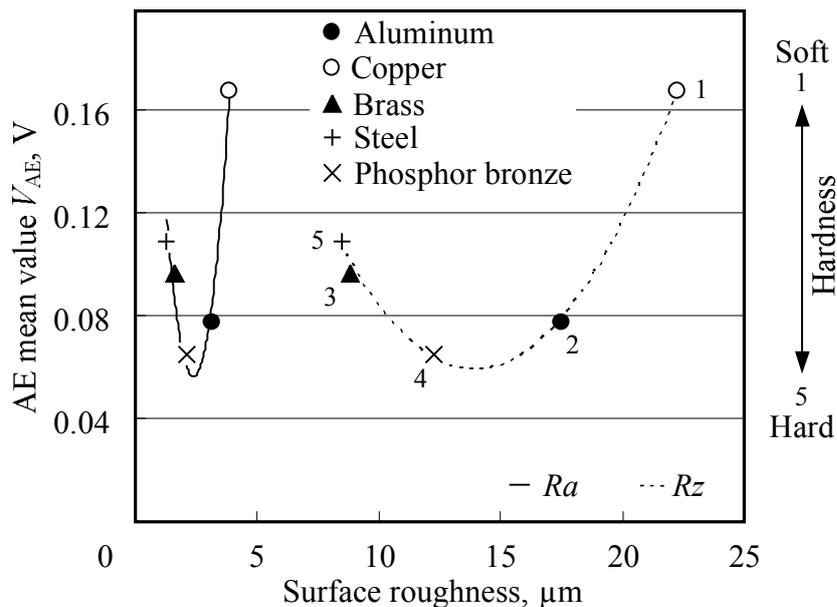


Fig. 5.8 Relation between AE mean value and surface roughness of the pin specimen.

現象では、材料硬さが切込みに影響するため、その表面損傷と硬さは比例関係にあると考えられる。ところが Fig. 5.8 では、必ずしも表面損傷と硬さに比例関係があるとはいえない。これは、測定誤差だけでなく加工硬化などの影響が大きいと考える。移着現象では Fig. 4.9 に示したように、材料に関係なく表面損傷と AE 平均値に相関が認められた。しかし、Fig. 5.8 では移着現象で得られた結果とは異なり、AE 平均値と表面損傷との相関が得られなかった。

以上のことは、移着現象と切削現象とで発生する根本的な AE 源の違い、また AE 信号レベルが低いことによる材料の AE 特性の影響などが関係してくるためと考えられる。

### 5.3.3 摩耗量と AE エネルギーの関係

Fig. 5.9 は、各種材料の摩耗量と AE 総エネルギーの関係である。これより摩耗量と AE 総エネルギーの間に線形関係があることが確認できる。移着現象の場合と同様、この直線の傾きである単位摩耗量あたりの AE エネルギーをピン材料のビッカース硬さで整理したものが Fig. 5.10 である。しかし、移

着現象における結果 (Fig. 4.8) と異なり, 単位摩耗量あたりの AE エネルギーと材料の硬さとの間に相関がみられない. これは, 移着現象と AE 総エネルギーの桁数が大きく異なることもあるが, むしろ切削現象で得られる AE 信号が材料硬さの影響を受けにくいいためと思われる. そこで, ピン試験片材

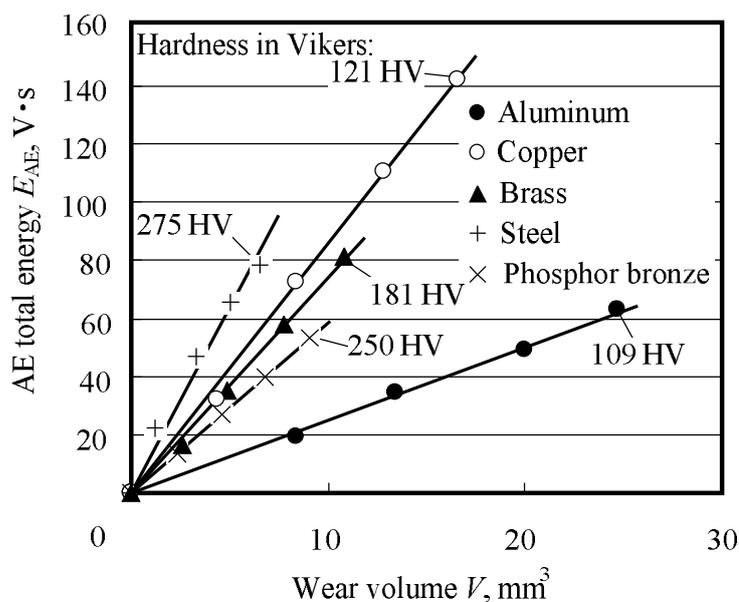


Fig. 5.9 Relation between AE total energy and wear volume.

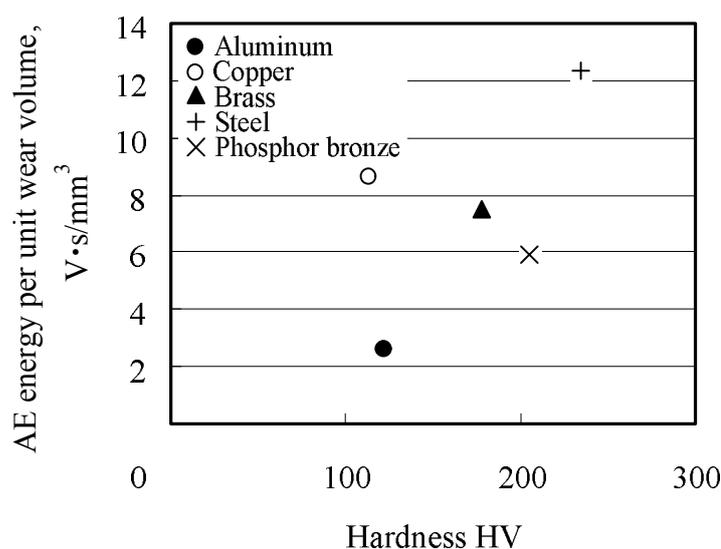


Fig. 5.10 Relation between AE energy per unit wear volume and Vickers hardness of the pin specimen.

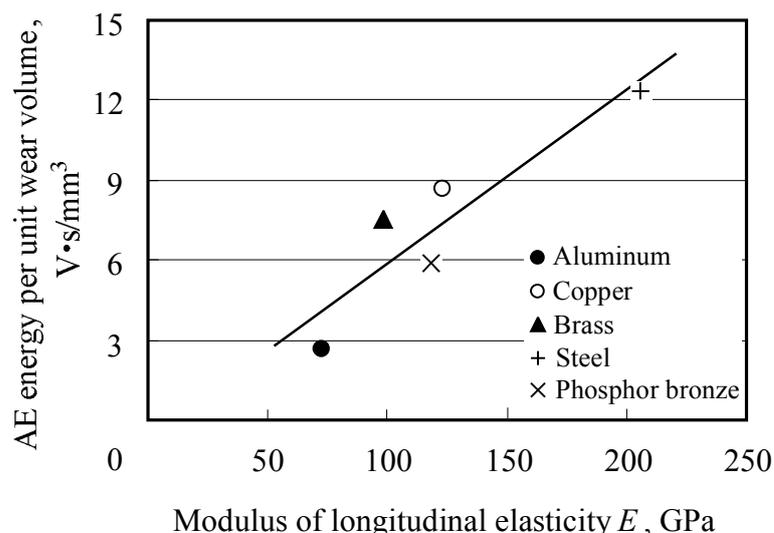


Fig. 5.11 Relation between AE energy per unit wear volume and modulus of longitudinal elasticity of the pin specimen.

料の縦弾性係数で整理したところ、Fig. 5.11 のような結果が得られた。この縦弾性係数は、切削現象におけるせん断過程に影響を与え、さらに弾性波の発生に大きく関与する因子の一つである。そのため、切削現象における単位摩耗量あたりの AE エネルギーは、縦弾性係数と相関があると考えられる。

#### 5.3.4 押付荷重の変化による AE 信号への影響

ここでは、りん青銅において押付荷重の変化による影響を調べた結果について述べる。押付荷重は 10 N~40 N において 10 N ごとに変化させ、実験条件および計測条件を同様にして行った。Fig. 5.12 は、その摩耗進行曲線を示している。摩耗は直線的に進行しており、かつ荷重に比例して摩耗量が大きくなっている。

Fig. 5.13 は、摩擦後ピン摩擦面の表面粗さと AE 平均値との関係である。これより、表面粗さと AE 平均値に比例関係が認められる。Fig. 5.8 では、表面損傷よりもむしろ材料の影響を受け、表面粗さと AE 平均値との相関が得られなかった。ここでは材料特性を無視し、押付荷重の変化による表面損傷と AE 平均値の間には相関が認められる。

Fig. 5.14 は、摩耗量と AE 総エネルギーの関係を示している。また Fig. 5.15

は、Fig. 5.14 の直線の傾きである単位摩耗量あたりの AE エネルギーと押付荷重との関係である。これより、20 N~40 N では単位摩耗量あたりの AE エネルギーが荷重に関係なくほぼ一定の値を示すが、10 N の低荷重になるとそれが大きい値となることがわかる。Fig. 5.14 より 10 N では、同じ摩耗量であ

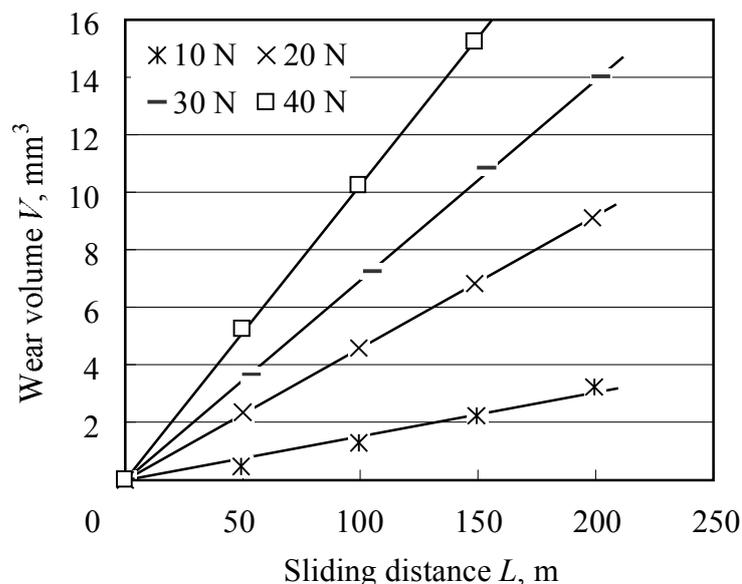


Fig. 5.12 Comparison of the AE mean value for the normal load on phosphor bronze.

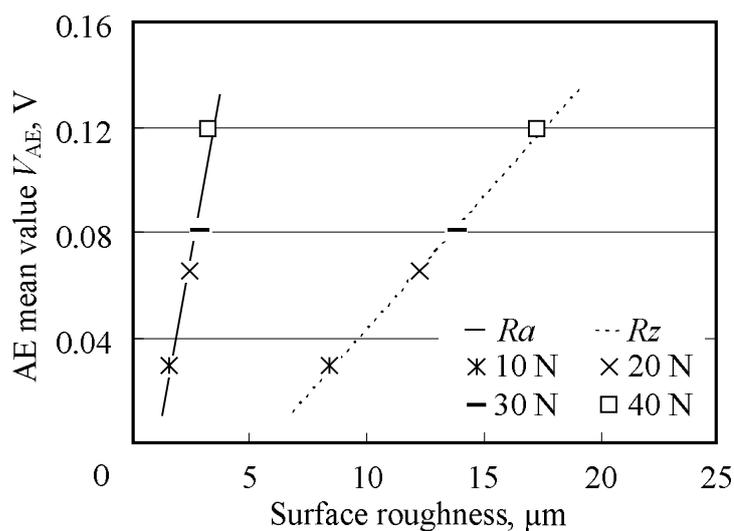


Fig. 5.13 Relation between the AE mean value and the surface roughness of the pin specimen on phosphor bronze.

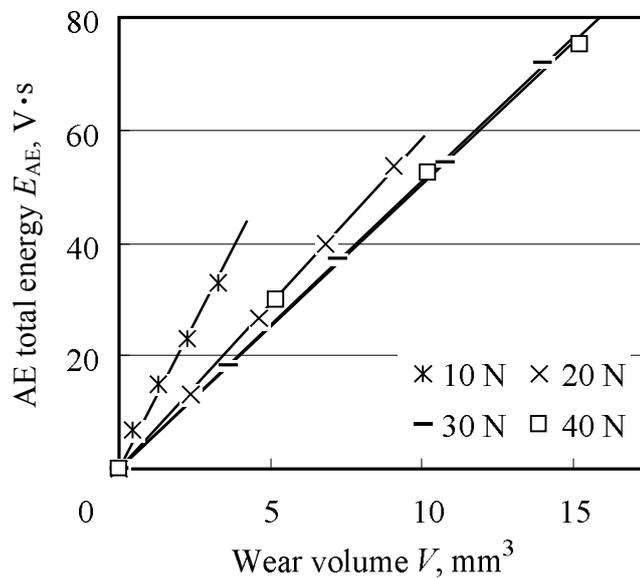


Fig. 5.14 Relation between the AE total energy and the wear volume for phosphor bronze.

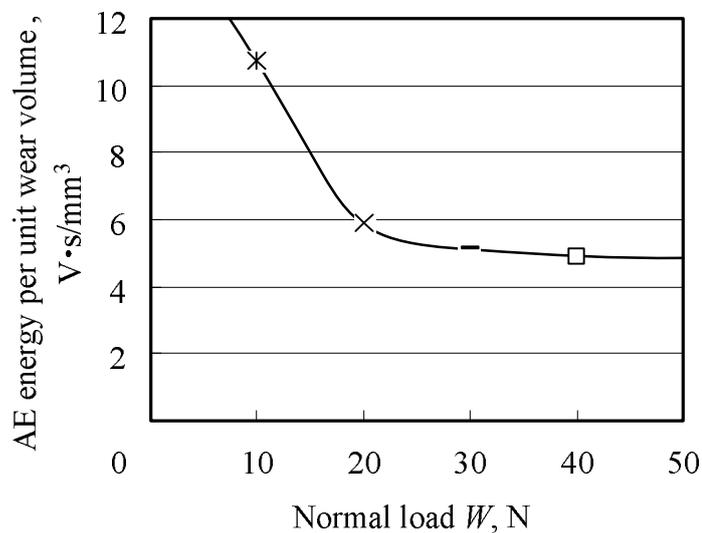
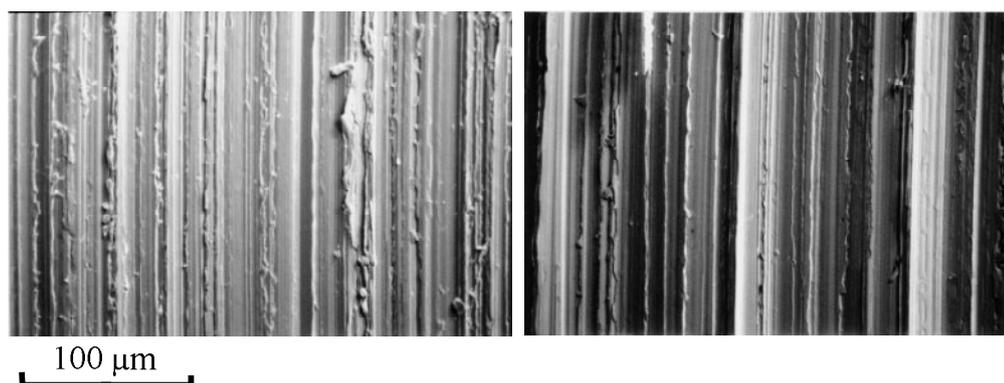


Fig. 5.15 Relation between the AE energy per unit wear volume and the normal load on phosphor bronze.



(a) Normal load: 10 N

(b) Normal load: 40 N

Fig. 5.16 SEM photography of worn surface of phosphor bronze (sliding direction: ↑).

っても AE 総エネルギーが大きい。これは、荷重が小さいことによって切れ刃が上すべりを起こし、切削現象 (cutting) に対して掘り起こし現象 (ploughing) の占める割合が増加したものと考えられる。Fig. 5.16 は、押付荷重 10 N と 40 N におけるピン摩耗面の SEM 観察結果である。この Fig. 5.16 (a) に示すように、低荷重では摩耗粒子として排出されない塑性流動部が観察される。また、アブレシブ摩耗粒子の微視的観察結果から、低荷重になると切削型から掘り起こし型に遷移することも確認されている<sup>7)</sup>。これらのことから、低荷重では掘り起こし作用が生じており、切削だけでなく掘り起こし作用による AE が発生し、AE エネルギーが大きくなったのであろう。

## 5.4 論 議

材料に関する特性は、摩擦・摩耗現象に影響を与えるとともに、材料の AE 特性として AE 信号にも影響を与える (Fig. 1.2 参照). したがって、計測している AE 信号は、材料の AE 特性から直接的に、また一方では摩耗現象 (破壊形態) を通じて間接的に材料特性の影響を受けることになる. 移着現象で得られる AE 信号レベルは高く、材料硬さと非常によく相関がみられた. 多くの摩耗式に硬さの因子が含まれているように、材料硬さは摩耗現象に大きく影響することが知られている. よって、凝着摩耗における AE 信号は現象に対する依存度が大きいために、現象に影響を与える材料特性との相関が得られるものと考えられる. 対して、切削現象で得られる AE 信号レベルは、AE 平均値で約 1/10、単位摩耗量あたりの AE エネルギーで約 1/1000 と低い. そのため、現象に影響を与える材料特性よりも、むしろ直接 AE 信号に影響を与える材料の AE 特性が支配的になると考えられる. 縦弾性係数は、AE 波の波動方程式<sup>8)</sup>に含まれるように、AE 波の発生に大きく関与する. また、アブレシブ摩耗における摩耗特性が縦弾性係数と相関があることも見出されている<sup>9)</sup>. 以上のことから、アブレシブ摩耗における AE 信号は、Fig. 5.10 で示した材料の硬さとの相関よりも、Fig. 5.11 で示した縦弾性係数とよい相関を示すと考えられる.

さて、ここで本実験におけるアブレシブ摩耗現象の近似的モデルを考え、その相関関係について検討する. Fig. 5.17 は、そのアブレシブ摩耗モデルである. 切れ刃形状は、Fig. 5.2 (c) の形状の計測結果を踏まえ三角形 (頂角  $66^\circ$ ) で近似している. なお簡単のため、すくい角  $\alpha = 0^\circ$  とした. また、 $h$  を切込み量 (切取り厚さ)、 $b$  を溝傾斜部長さ、 $l$  を溝長さ、 $\theta$  を切れ刃頂角とする. この Fig. 5.17 のモデルを用いて切込み量  $d$  および溝傾斜部長さ  $b$  は、

$$h = \frac{W \cos(\theta/2)}{c \cdot l \cdot p_m} \quad (5.1)$$

$$b = \frac{2h}{\cos(\theta/2)} = \frac{2W}{c \cdot l \cdot p_m} \quad (5.2)$$

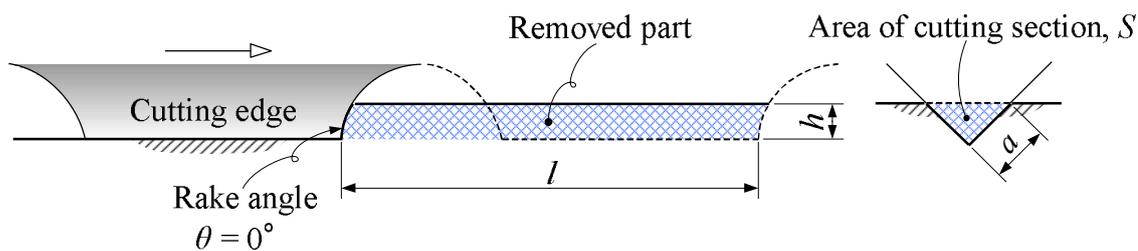


Fig. 5.17 Schematic diagram shows the cutting model on this experiment.

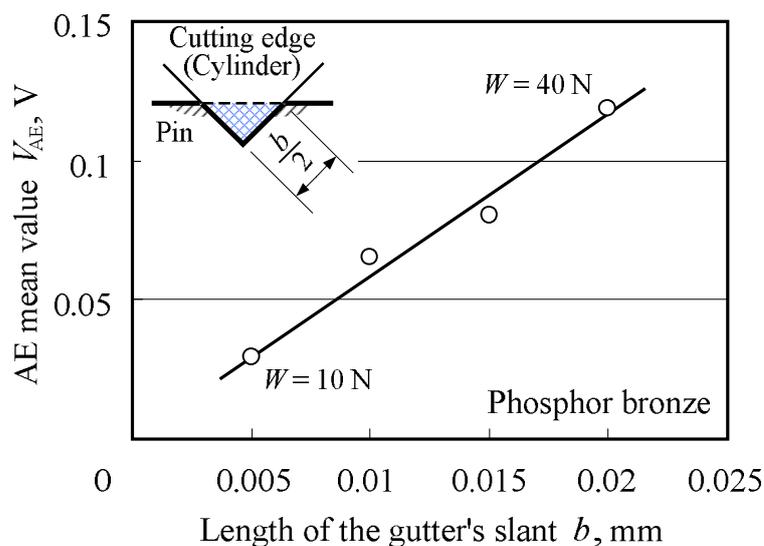


Fig. 5.18 Relation between the AE mean value and the length of the slant part of the gutter for phosphor bronze.

であらわすことができる。ここで、 $p_m$ は塑性流動圧力、 $W$ は押付荷重、 $c$ はピン内部に存在する切れ刃数である。なお、これらの算出過程では切れ刃存在数  $c = 4$ 、切れ刃頂角  $\theta = 66^\circ$ 、 $l \approx 4$  とした。溝傾斜部長さ  $b$  は、切削現象においてせん断変形がなされる領域であると考えられる。そこで、ピン摩擦面内部の溝傾斜部長さ  $b$  と AE 平均値の関係を Fig. 5.18 に示す。先にも述べたように、AE 信号には材料の AE 特性が支配的であると考えられる。よって、その影響を無視するべく、りん青銅を用いた 1 種類の材料下で荷重を変化させた実験結果を適用している。これより、せん断変形がなされる溝傾斜部長さと AE 平均値に比例関係があることがわかる。したがって、変形を受けるせん断領域が増増すれば、AE 平均値が上昇するため、Fig. 5.13 で示した表面

損傷と AE 平均値に相関があったと考えられる。

Fig. 5.19 は、溝傾斜部長さ  $b$  の摩擦距離での積分値をせん断領域総面積  $S$  として横軸にとり、AE 総エネルギーとの関係を示したものである。ここで、せん断領域総面積  $S$  は  $b \cdot l \cdot \bar{c} \cdot L$  であり、 $\bar{c}$  [個/m] は単位摩擦距離あたりに切れ刃と出会う数とした。なお、 $\bar{c}$  は Fig. 5.1 に示す円周上の切れ刃先端部分の数から  $\bar{c} \approx 54$  とした。Fig. 5.19 に示すように、せん断領域総面積と AE 総エネルギーとの間にもよい相関が認められる。摩耗量と AE 総エネルギーとの関係は、Fig. 5.14 に示したように掘り起こしの影響のため、低荷重側では相関が得られなかった。しかしながら、Fig. 5.19 では荷重に関わらず、よい相関が得られている。これは、切削および掘り起こしが切れ刃との接触面でなされるため、その接触領域で AE が発生するためであろう。

ここで、アブレシブ摩耗における AE 総エネルギーの関係式を考えてみる。式 (4.5) に挙げたように、摩擦・摩耗現象で計測される AE 信号は、摩擦に起因する AE と摩耗に起因する AE との和であると考えられる。アブレシブ摩耗において、摩耗に起因する AE エネルギー  $E_w$  は切削作用によるものであり、摩擦に起因する AE エネルギー  $E_f$  は掘り起こし作用など含めたものである。まず Fig. 5.19 において、せん断領域総面積と AE 総エネルギーと直線関係が

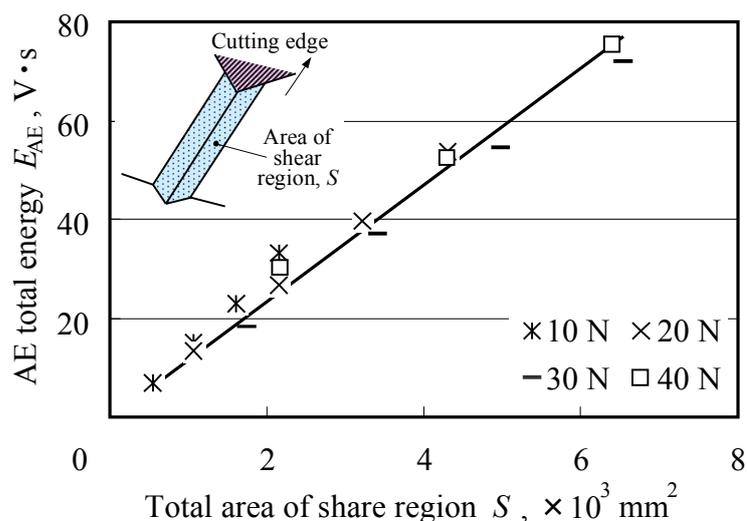


Fig. 5.19 Relation between the AE total energy and the total area of the shear region for phosphor bronze.

あったことから、その傾きである単位せん断領域面積あたりに発生する AE エネルギーを  $e_s$  と定義する。この単位せん断領域面積あたりの AE エネルギーは、材料定数であり材料の AE 特性および AE 計測系に関係するものとする。このとき、純粋な切削が行われたときに得られる AE エネルギー  $E_w$  は、

$$\begin{aligned} E_w &= e_s \cdot b \cdot l \cdot \bar{c} \cdot L \\ &= e_s \frac{2W}{cp_m} \cdot \bar{c} \cdot L \end{aligned} \quad (5.3)$$

とあらわせる。一方、切削作用によって除去される摩耗量は、

$$\begin{aligned} V &= A \cdot l \cdot \bar{c} \cdot L \\ &= h^2 \tan \frac{\theta}{2} \cdot l \cdot \bar{c} \cdot L \\ &= \frac{W^2 \sin \theta}{2c^2 l p_m^2} \cdot \bar{c} \cdot L \end{aligned} \quad (5.4)$$

とあらわせる。式 (4.5) および以上の式 (5.3)、式 (5.4) より  $\bar{c} \cdot L$  を消去して、アブレシブ摩耗における摩耗量と AE 総エネルギーの関係は、

$$E_{AE} = \frac{4e_s cl}{\sin \theta} \cdot \frac{p_m}{W} V + E_f \quad (5.5)$$

となり、移着現象における式 (4.7) と類似した式が得られる。これより、移着現象と同様、摩耗量と AE エネルギーの間に線形関係があることが確認される。また、この直線の傾きである単位摩耗量あたりの AE エネルギーは、溝形状の因子および材料特性に比例することが確認される。これまで述べてきたように、アブレシブ摩耗で計測される AE 信号は、材料の AE 特性が支配的な影響因子となる。すなわち、式 (5.5) では単位せん断領域面積あたりの AE エネルギー  $e_s$  が材料の AE 特性を示すものであり、これが重要な影響因子となるであろう。そこで、単位せん断領域面積あたりに発生する AE エネルギー  $e_s$  と縦弾性係数  $E$  の関係を Fig. 5.20 に示す。これより、Fig. 5.11 において単位摩耗量あたりの AE エネルギーが縦弾性係数とよい相関があったのは、この  $e_s \propto E$  の関係があるためと考える。この単位せん断領域あたりの AE エネルギーがわかっているならば、式 (5.5) を用いて AE 総エネルギー

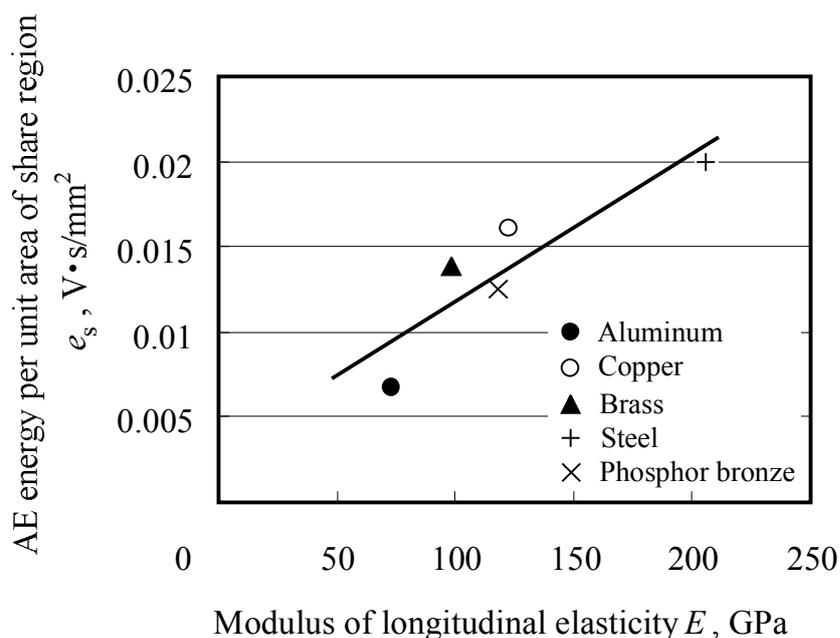


Fig. 5.20 Relation between the AE energy per unit area of share region and the modulus of longitudinal elasticity of the pin specimen.

一の計測から摩耗量の推測が可能である。ただし、摩擦に起因する AE エネルギー  $E_f$  の項の検討が必要となる。アブレシブ摩耗における摩擦に起因する AE 信号成分は、表面突起の衝突および掘り起こしによる塑性変形に起因するものが主であると考えられる。この表面突起の衝突による AE 信号成分は、500 kHz のハイパスフィルタにより、その大半の信号を除去できるであろう。しかし、AE 信号レベルの低いアブレシブ摩耗では、特に掘り起こしによる AE 信号成分の影響が無視できなくなり、その検討が必要となる。これは切削と掘り起こしの単独現象について、AE 信号の周波数特性を調べ、フィルタによる除去で解決できると思われる。この傾きである単位摩耗量あたりの AE エネルギーをパラメータに用いることで、今まで困難とされてきた摩耗量のインプロセス計測が可能になると考えられる。

## 5.5 結 言

本章では、円筒表面の加工方法を工夫して表面に切れ刃をつくり、アブレシブ摩耗現象を再現させた。そこで、アブレシブ摩耗で得られる AE 信号と切削現象の相関関係および AE 信号の根源について検討を行った。さらに、本実験におけるアブレシブ摩耗現象の切削モデルを考え、切削現象と計測された AE 信号について理論的考察を加えた。本章で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) 切削現象で得られる AE 信号レベルは、移着現象に比べ AE 平均値で約 1/10、単位摩耗量あたりの AE エネルギーで約 1/1000 と小さい。アブレシブ摩耗では、切削現象と同様のせん断による摩耗粒子生成である。くっついて千切れる凝着摩耗のような不均一変形と異なり、アブレシブ摩耗はせん断面において順々にすべりが生じる均一変形のためと考えられる。
- (2) アブレシブ摩耗における単位摩耗量あたりの AE エネルギーは、材料の縦弾性係数とよい相関を示す。これは、縦弾性係数が摩耗特性に影響を及ぼすとともに、切削現象では材料の AE 特性が支配的となり、その特性の一つである縦弾性係数が大きく関与するためと考える。
- (3) アブレシブ摩耗で得られる AE 信号は、形成される溝傾斜部長さの総和およびせん断領域総面積と相関があることがわかった。アブレシブ摩耗における切削および掘り起こしが、切れ刃との接触面でなされるため、その接触領域で AE が発生することからと考えられる。
- (4) 切削モデルから摩耗量と AE 総エネルギーについて理論的検討を行った。その結果、定量的評価の一つの例として、アブレシブ摩耗における AE 総エネルギーと摩耗量との関係式を導出することができた。

< 文 献 >

- 1) J. Krystof: “Grundlagen der Zerspanung”, VDI-Verlag GmbH (1939).
- 2) M.E. Merchant: “Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip”, J. App. Phys., 16, 5 (1945) pp. 267–275.
- 3) E.H. Lee, B.W. Shaffer: “The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining”, Trans. ASME, 73 (1951) pp. 405–413.
- 4) 尾池 守・笹田 直・野呂瀬 進: 「アブレイブ摩耗における切削性と凝着性」, 潤滑, 25, 10 (1980) pp. 691–696.
- 5) 第4章の1)と同じ.
- 6) T. Kayaba, K. Hokkirigawa, K. Kato: “Experimental Analysis of the Yield Criterion for a Hard Asperity Sliding on a Soft Flat Surface”, Wear, 96 (1984) pp. 255–265.
- 7) 水本宗男・加藤康司: 「アブレイブ摩耗粒子の発生機構 (第1報) —単一突起による摩耗現象の微視的観察—」, トライボロジスト, 37, 12 (1992) pp. 1018–1025.
- 8) 岸 輝雄・栗林一彦: 「Acoustic Emission の金属学 (1)」, 金属, 47, 4 (1977) pp. 16–21.
- 9) M.M. Khrushov: “Principles of Abrasive Wear”, Wear, 28, 1 (1974) pp. 69–88.

## 第6章 摩擦・摩耗素過程の in-situ 観察と AE 信号の対応

### 6.1 緒言

第4章および第5章では、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た。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が、その摩擦面は摩擦・摩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。そこで本章では、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。

### 6.2 実験装置および実験方法

#### 6.2.1. 実験装置および計測システム

本実験では、Fig. 6.1 に示す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) を用いた。この in-situ 観察装置を用いることによって、摩擦・摩耗の素過程をリアルタイムで観察しながら AE 信号の計測を行うことができる。その摩擦系と AE 計測システムの構成を Fig. 6.2 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、広帯域型 (周波数特性: 500 kHz~4 MHz) の PZT 圧電セラミックス製 (センサ寸法:  $\phi 5 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ ) のものを使用している。その周波数特性曲線を Fig. 6.3 に示す。

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

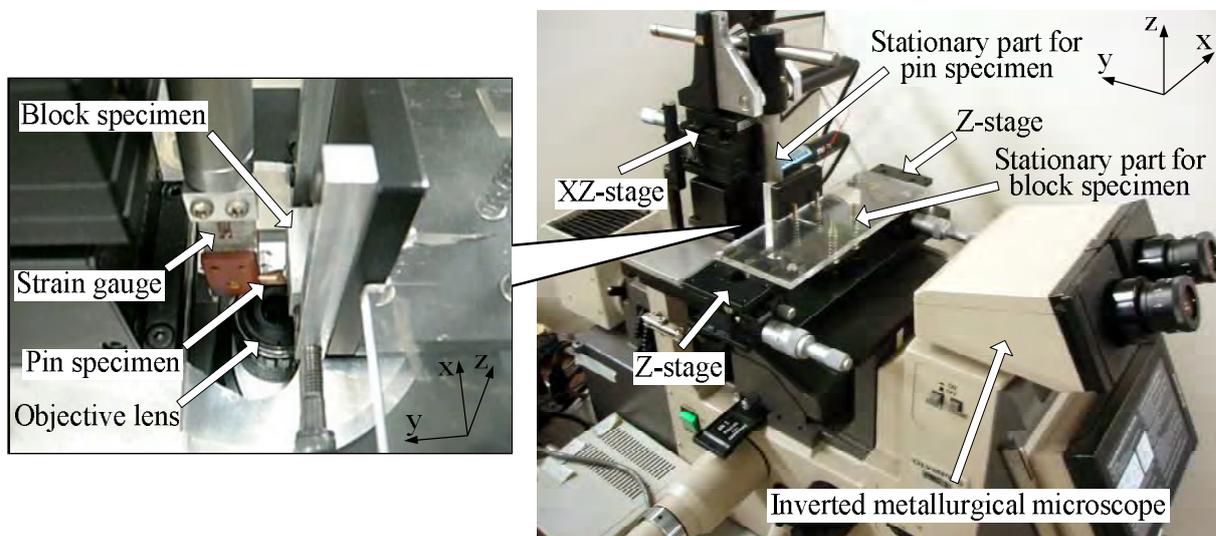


Fig. 6.1 Photograph of the frictional surface microscope.

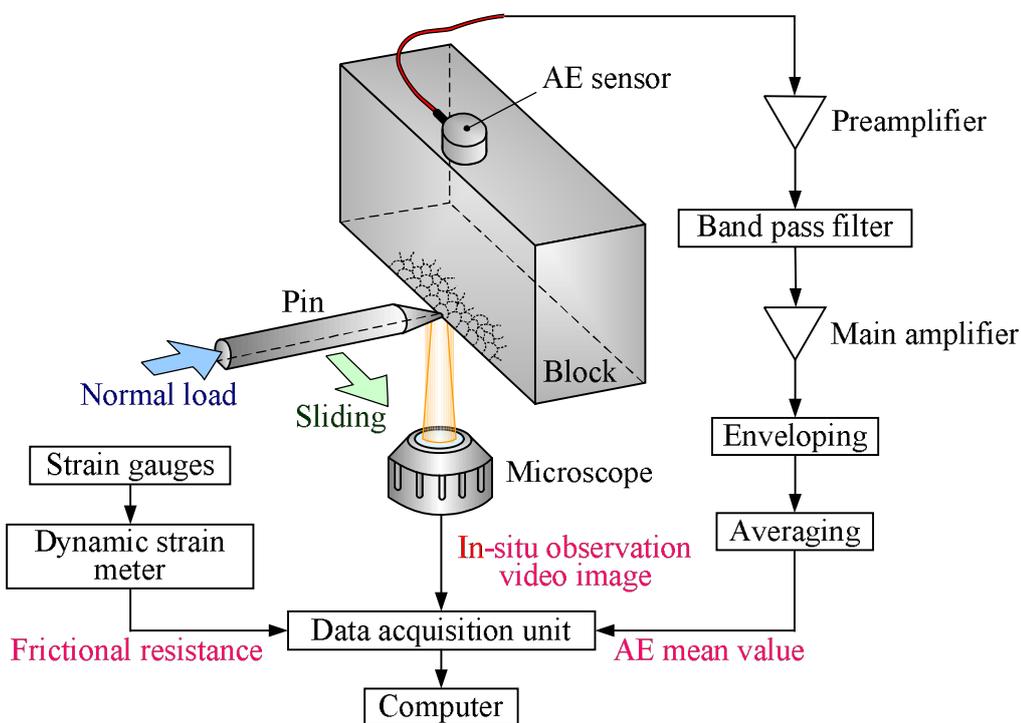


Fig. 6.2 Friction system and the block diagram of instrumentation for signal acquisition.

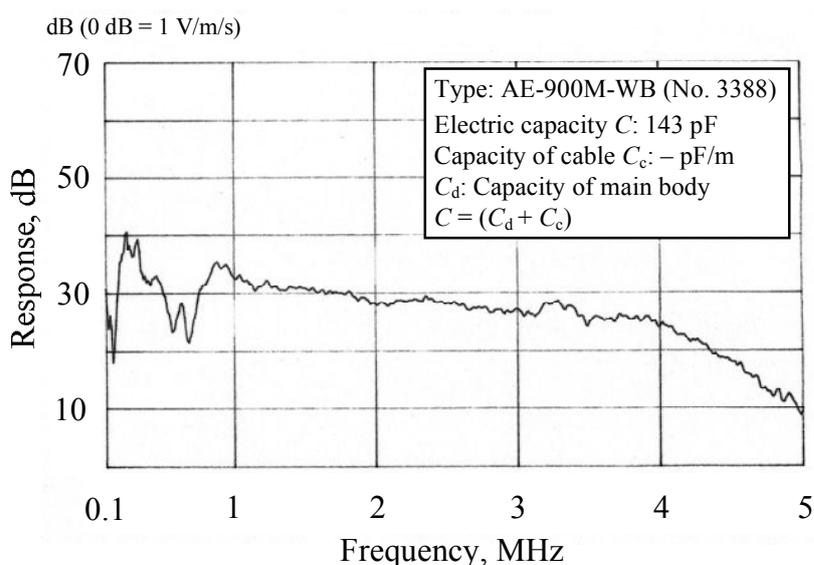


Fig. 6.3 Frequency response curve of the AE sensor (wideband type).

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。各種信号は、計測機器によって処理され、PC にて表示・記録が行われる。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。

### 6.2.2. 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（10 × 15 × 30 mm）の観察面および摩擦面は、共にバフ研磨仕上げし、観察面を鉄はナイタール、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、 $Rz$  0.1  $\mu\text{m}$  以下の表面粗さである。

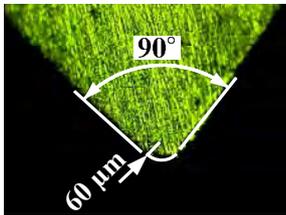
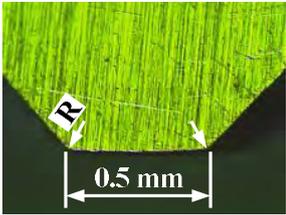
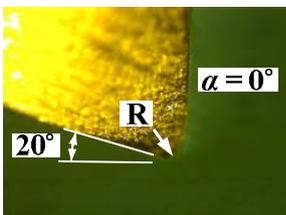
本実験では、3 種類のピン先端形状を用いて (a) 摩擦現象に焦点を当てた実験 (b) 摩耗現象（凝着摩耗）に焦点を当てた実験、(c) 切削現象（アブレ

シブ摩耗) に焦点を当てた実験の三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、(a) 表面の変形過程 (摩擦過程) もしくは (b) 摩耗粒子の生成過程 (摩耗過程) を観察および AE 信号の計測を行う。また、(a) 摩擦のみの変形過程と (c) それに切削過程が伴う場合との比較を行う。Table 6.1 は、それぞれの実験に関する摩擦条件、ピン先端形状、AE 計測条件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：約  $90^\circ$  の頂角に半径約  $60 \mu\text{m}$  の曲面
- (b) 摩耗に関する実験：摩擦方向に幅  $0.5 \text{ mm}$  の平面
- (c) 切削に関する実験：先端ノーズ半径数  $\mu\text{m}$ ，逃げ角約  $20^\circ$ ，すくい角  $0^\circ$  の工具切れ刃形状

これらの紙面方向の幅は、すべて約  $0.2 \text{ mm}$  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。

Table 6.1 Sliding conditions and the nose shape of a pin for three experiments

	(a) For friction process	(b) For wear process	(c) For cutting process
Normal load $W$ , N	2.4, 4.8	2.4	9.8
Sliding velocity $v$ , mm/s	0.02		
Sliding distance $L$ , mm	3	1	1
Repeated frequency, times (unidirectional)	5	20	1
Nose shape of the pin			
Lubricant	-	-	Paraffin
AE amplification factor, dB	86		
AE band-pass filter, kHz	HPF: 100 LPF: Non-filter		

### 6.3. 実験結果

#### 6.3.1. 摩擦に伴う表面の変形過程と AE 信号の変化

摩擦・摩耗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 [Table 6.1 (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。

Fig. 6.4 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、Fig. 6.4 (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

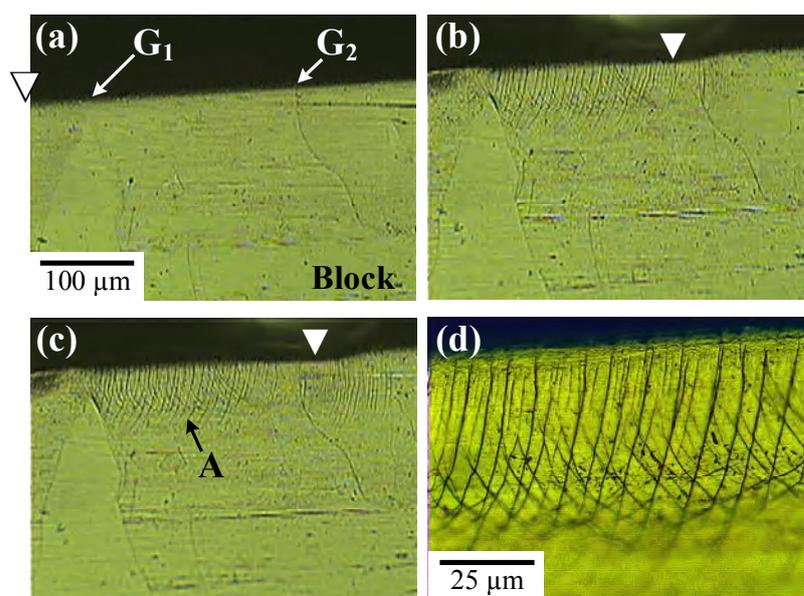


Fig. 6.4 In-situ observation of the frictional interface for the Fe block in the first rubbing (dry,  $W = 2.4$  N): (d) enlarged view of A in (c).

も一部で観察された。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。

Fig. 6.5 は、Fig. 6.4 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（Fig. 6.4 および Fig. 6.5 の  $G_1$ ,  $G_2$  が対応）。Fig. 6.4 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（Fig. 6.5 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 1~2 mV の AE 事象計数は、6~10  $s^{-1}$  であり、Fig. 6.4 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 1~2 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。

Fig. 6.6 は、荷重 4.8 N、無潤滑における摩擦 1 回目 [Fig. 6.6 (a)] と摩擦 5 回目 [Fig. 6.6 (b)] の AE 平均値および摩擦係数の変化である。Fig. 6.6 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。

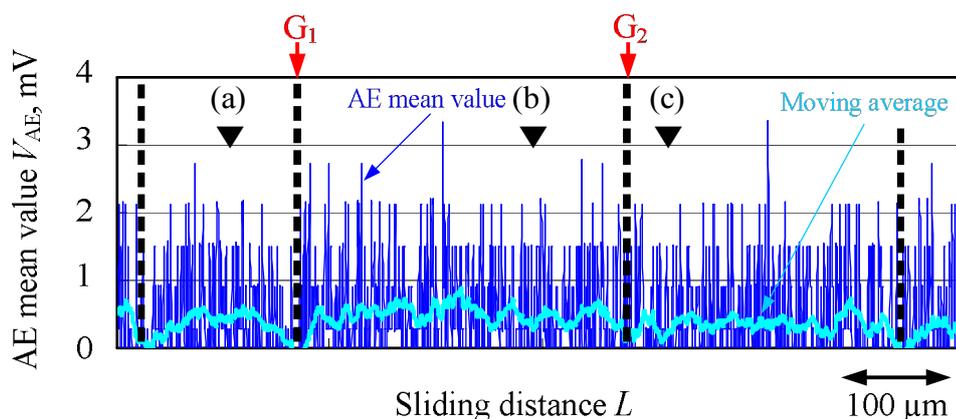
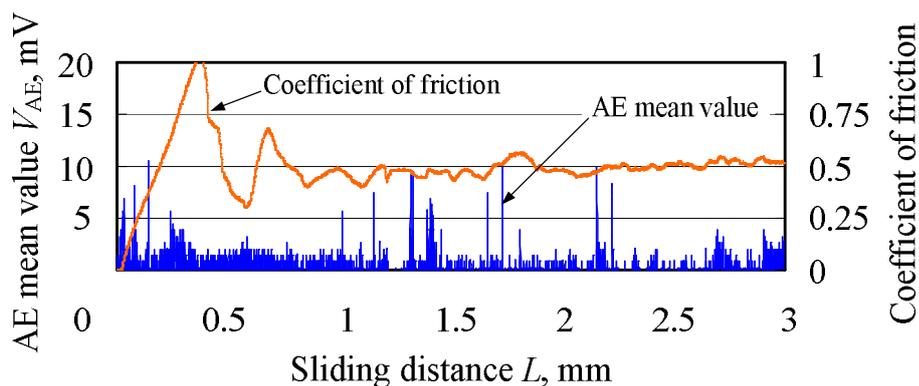
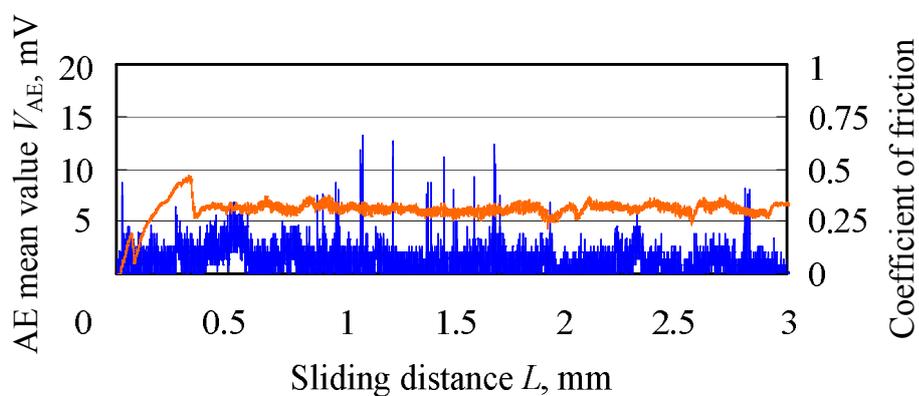


Fig. 6.5 Fluctuation of the AE mean value and its moving average deviation for the Fe block in the first rubbing (dry,  $W = 2.4$  N).



(a) The first rubbing



(b) The fifth rubbing

Fig. 6.6 Fluctuations of the AE mean value and the coefficient of friction for the Fe block (dry,  $W = 4.8$  N).

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、Fig. 6.5 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 Fig. 6.7 および Fig. 6.8 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。その中でも Fig. 6.8 (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。

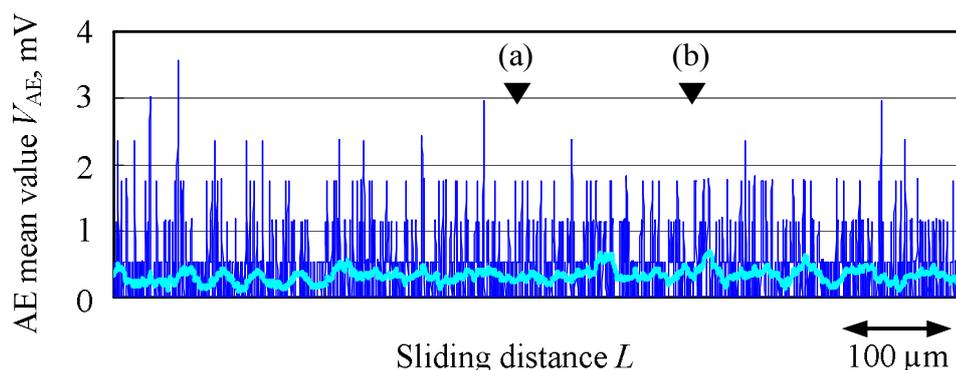


Fig. 6.7 Fluctuation of the AE mean value and its moving average deviation for the Zn block in the first rubbing (dry,  $W = 2.4$  N).

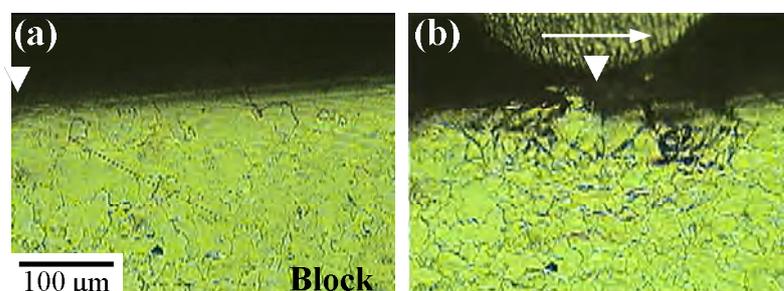


Fig. 6.8 Deformation of the sliding surface of the Zn block in the first rubbing (dry,  $W = 2.4$  N).  $\rightarrow$  shows the direction of sliding.

### 6.3.2. 摩耗粒子生成（移着成長）過程と AE 信号の変化

先端が平面のピン試験片 [Table 6.1 (b)] 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. Fig. 6.9 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（凝着摩耗）を示す. この Fig. 6.9 (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する様子が確認できた. 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. 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,  $\mu\text{m}$  オーダーの移着粒子や摩耗粒子が観察された.

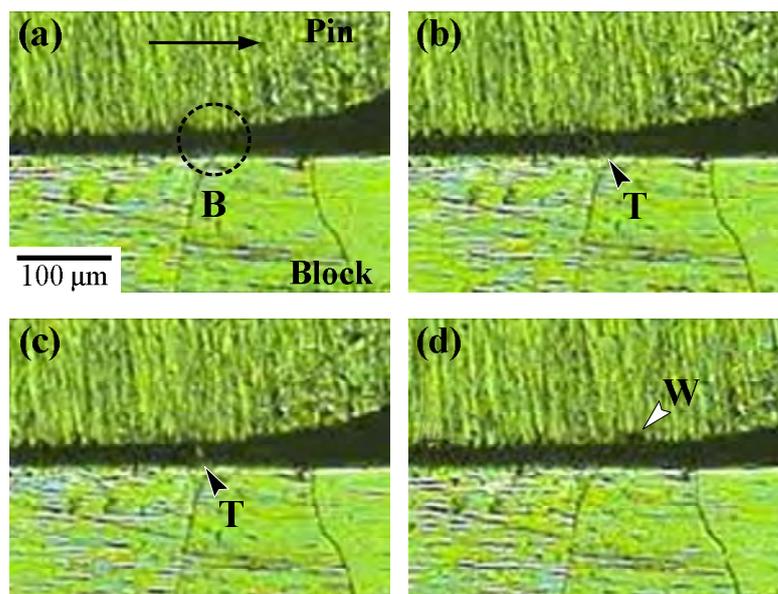


Fig. 6.9 In-situ observation of the frictional interface for the Fe block in the fourteenth rubbing (dry,  $W = 2.4$  N).  $T$  and  $W$  indicate a transfer particle and a wear particle respectively.  $\rightarrow$  shows the direction of sliding.

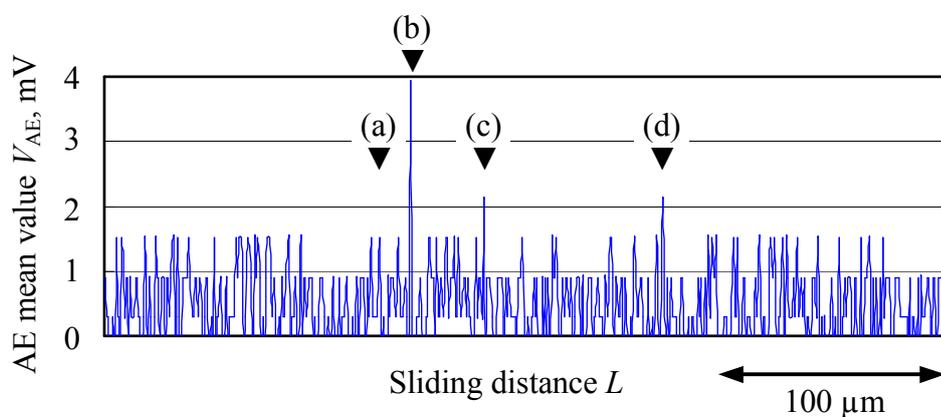


Fig. 6.10 Fluctuation of the AE mean value for the Fe block in the formation a wear particle through a mutual transfer and growth process (dry,  $W = 2.4$  N).

Fig. 6.10 は、Fig. 6.9 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、Fig. 6.9 (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 [Fig. 6.9 (c)] と排出時 [Fig. 6.9 (d)] に対応している。また、1~2 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 Fig. 6.11 に示す。図中の点線は摩擦面とその側面の境界である稜線を示す。Fig. 6.11 (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 Fig. 6.11 (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。

Fig. 6.12 および Fig. 6.13 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れ示している。Fig. 6.12 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  $\mu\text{m}$  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 [Fig. 6.13 (b), (c)]。また、約 20  $\mu\text{m}$  の摩耗粒子 W の排出によって、Fig. 6.13 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

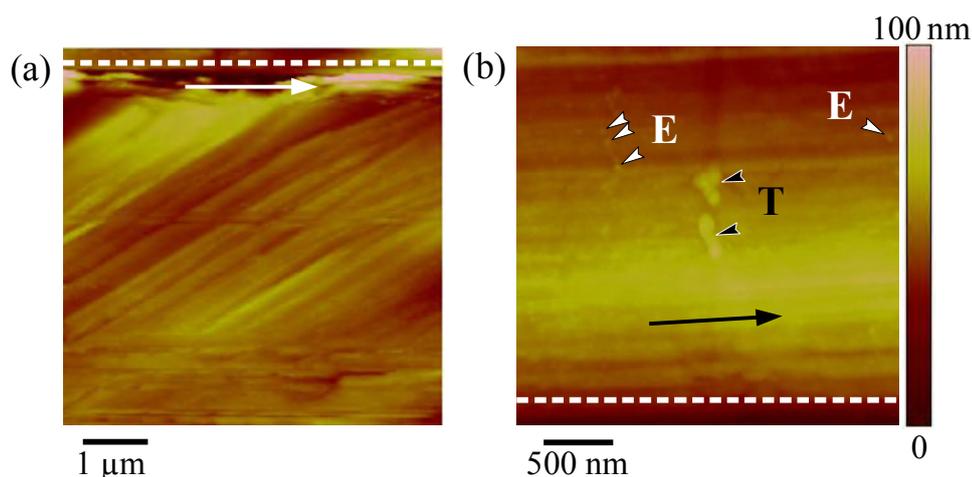


Fig. 6.11 AFM images of the Fe block in the first rubbing (dry,  $W = 2.4$  N): (a) the side face of the friction surface; (b) the friction surface. Dotted line shows the ridge line. *E* and *T* indicate a wear element and a transfer particle respectively.  $\rightarrow$  shows the direction of sliding.

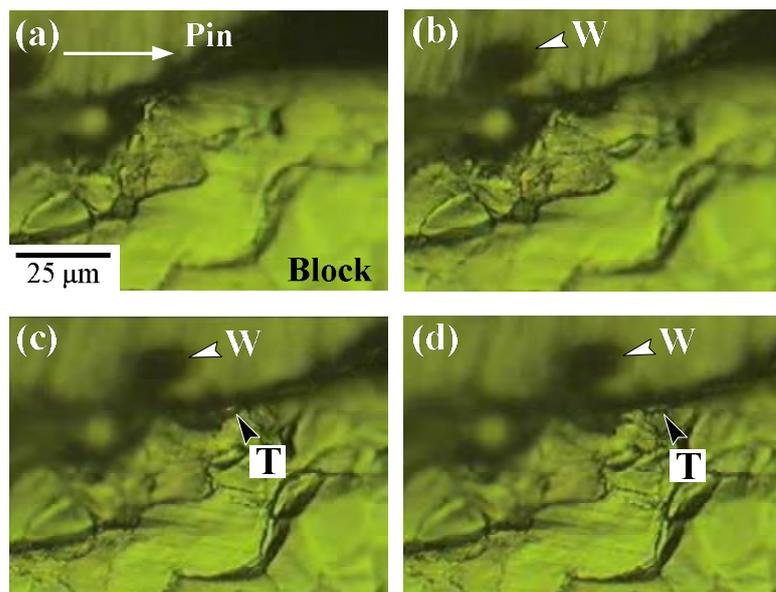


Fig. 6.12 In-situ observation of the frictional interface for the Zn block in the second rubbing (dry,  $W = 2.4$  N).  $T$  and  $W$  indicate transfer particle and wear particle respectively.  $\rightarrow$  shows the direction of sliding.

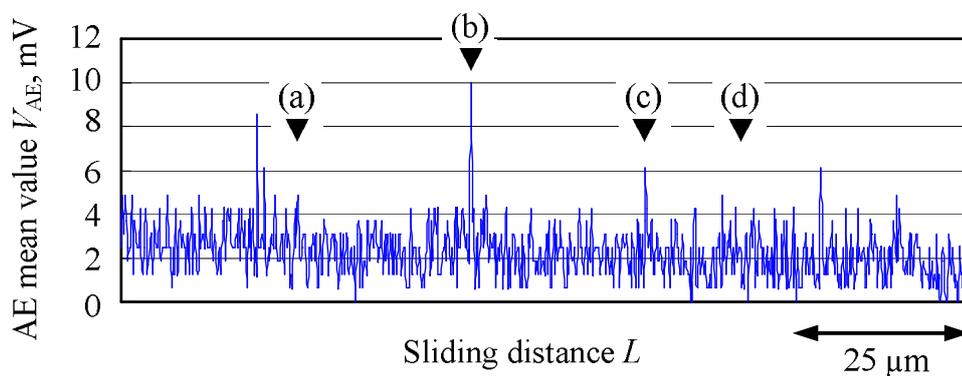


Fig. 6.13 Fluctuation of the AE mean value for the Zn block in the formation a wear particle through a mutual transfer and growth process (dry,  $W = 2.4$  N).

成・移着する際には、Fig. 6.10 や Fig. 6.13 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、Fig. 6.2 と Fig. 6.6 の比較からも明らかなように、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。

## 6.3.3 切削過程と AE 信号の変化

摩擦による変形過程に加えて切削過程が伴う場合を検討するため、先端が切れ刃形状のピン試験片 [Table 6.1 (c)] を用いた切削現象に焦点を当てた実験結果について述べる. Fig. 6.14 に, in-situ 観察された鉄ブロック摩擦界面における切削過程 (アブレイブ摩耗) を示す. この Fig. 6.14 (a) ~ (d) は, 摩擦 1 回目 (荷重 9.8 N, 潤滑) で観察された結果である. なお, 図中の

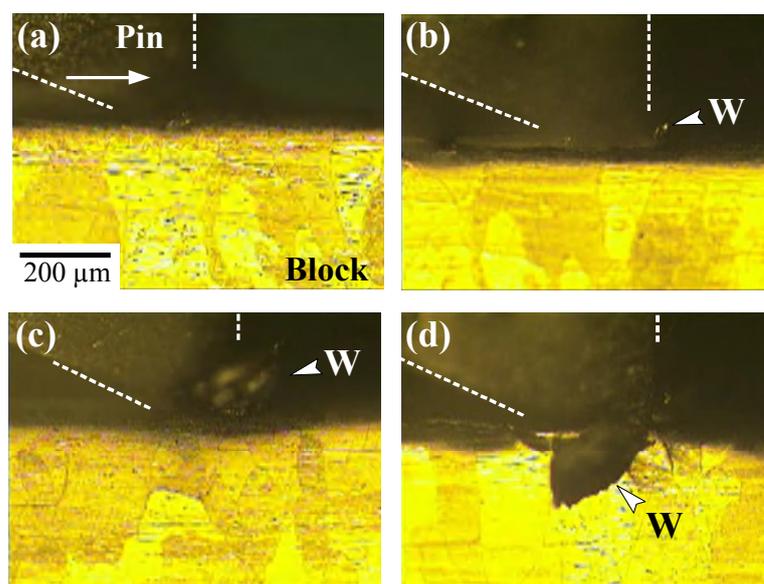


Fig. 6.14 In-situ observation of the frictional interface for the Fe block in the cutting process (wet,  $W = 2.4$  N).  $W$  indicates a wear particle.  $\rightarrow$  shows the direction of sliding.

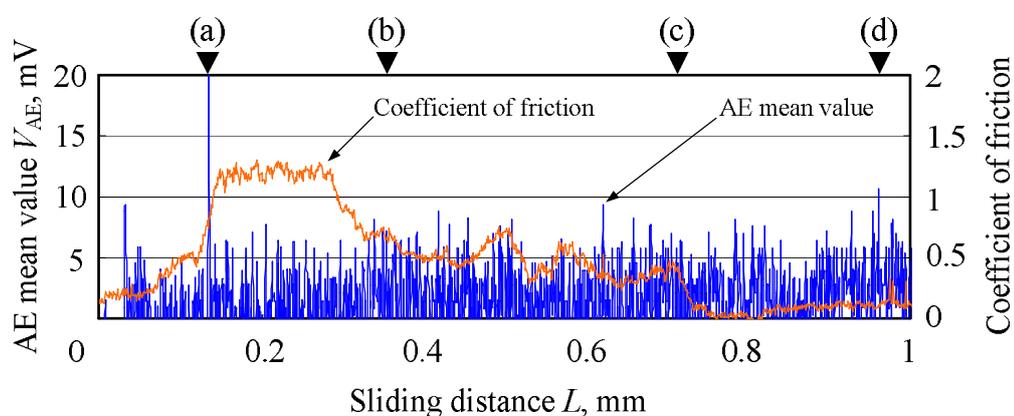


Fig. 6.15 Fluctuations of the AE mean value and the coefficient of friction for the Fe block in the cutting process (wet,  $W = 9.8$  N).

点線は、ピン試験片の位置を示している。本実験では、摩擦速度が極度に遅く切れ刃すくい角が  $0^\circ$  であるため、ピン試験片の切削性は非常に悪いと思われる。そのため、Fig 5.6 でみられたような細長い流れ型の摩耗粒子（切りくず）は生成せずに、Fig. 6.14 (d) にみられる大型のむしろ型<sup>1)</sup>の摩耗粒子 W が確認された。このように、ピン切れ刃すくい面前方において切りくず状の摩耗粒子が切削現象と同様のせん断変形により生成されることがわかる。この切削現象は、ピン先端が半球状であっても観察される典型的なアブレジブ摩耗<sup>2)</sup>といえる。なお、ピン切れ刃逃げ面との接触領域では、摩擦による 3.3.1 項で述べた塑性変形が生じていた。

Fig. 6.15 は、Fig. 6.14 (a) ~ (d) の過程に対応する AE 平均値および摩擦係数の変化である。ここで、摩擦係数が上昇した摩擦距離 0.1 mm 付近において、AE 平均値が約 20 mV と大きな値を示している。これは、Fig. 6.15 (a) から確認できるように、摩耗粒子 W が生成し始めた場所である。よって、切り込みの開始に伴う亀裂進展（破壊）に起因した突発型の AE が生じたものとする。その後の AE 平均値は、5 mV 付近を保持していることがわかる。これは、摩擦に伴うすべり線の生成に加え、摩耗粒子生成のためのせん断変形が起因していると考えられる。さらに、Fig. 6.15 (d) の摩耗粒子の脱落時には AE 平均値が 10 mV を超えていることがわかる。切削加工では、切りくずの分断時に弾性ひずみエネルギーが解放され、切りくずが飛散することを経験する。これと同様に、圧縮応力の違いはあるものの、このアブレジブ摩耗粒子の脱落時も弾性ひずみエネルギーが解放されることにより、一時的に AE 平均値が大きくなると説明できる。

## 6.4. 論 議

摩擦面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。

まず、摩擦過程における AE 源について論議する。摩擦・摩耗の素過程は、Fig. 6.4 および Fig. 6.8 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<sup>3)</sup>。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（Fig. 6.6）。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。これは、Fig. 6.15 (a) の切削現象における切り込み開始時に生じた突発型 AE においても同様であろう。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<sup>4)</sup>、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、Fig. 6.10 と Fig. 6.13 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<sup>5)</sup>、Fig. 6.10 と Fig. 6.13 のように AE 信号レベルに差が生じる。

次に、凝着摩耗の実験における摩擦繰返し数と 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<sup>6)</sup>。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、Fig. 6.6 のように AE

信号レベルは上昇する。Fig. 6.6 (b) の摩擦係数に注目すると、その変動幅が摩擦 1 回目に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。Fig. 6.11 (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ことができる。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<sup>7)</sup>。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）するときに、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 Fig. 6.11 (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、Fig. 6.10 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ことができる。

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<sup>8)</sup>、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。Fig. 6.11 (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  $1 \text{mm}^2$ ）において、一度に  $9 \times 10^6$  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、4.4 節で概算した AE 検出分解能を大きく上回る。

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。

さらに、摩耗粒子の生成時の AE 信号について述べる。凝着摩耗に関しては、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 [Fig. 6.10 (b) および Fig. 6.13 (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 [Fig. 6.10 (c), (d) および Fig. 6.13 (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。

最後に、アブレイブ摩耗で検出される AE 信号に関して得られた知見を補足する。切削現象下では、前述した摩擦に伴うすべり線の生成による AE に加え、アブレイブ摩耗粒子生成のためのせん断変形によって AE が生じる。これは、すくい面におけるせん断すべり<sup>9)</sup>であり、摩擦に伴い発生する AE と原理は同じと考える。すくい面での摩擦力による大きな圧縮応力が作用するために、摩擦による塑性変形時よりも大きな AE が発生すると考える。ただし、切削過程で生じる AE はせん断角の影響を受けるため<sup>10)</sup>、すくい角によっても AE 信号レベルの大きさが変化すると思われる。また、その圧縮応力が摩耗粒子の脱落時に解放されるため、アブレイブ摩耗粒子生成時においても突発型 AE 信号が発生する。

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、摩耗素子生成・移着（凝着摩耗）、せん断変形（アブレイブ摩耗）に起因する小振幅の連続型 AE 信号と、移着粒子形成・移着・排出（凝着摩耗）、摩耗粒子の脱落（アブレイブ摩耗）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。

## 6.5. 結 言

摩擦・摩耗素過程における AE 源を明らかにするため、3 種類のピン試験片先端形状を用いて、摩擦現象、摩耗現象（凝着摩耗）、切削現象（アブレシブ摩耗）にそれぞれ焦点を当てた in-situ 観察実験を行った。そこで、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。本章で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) 摩擦過程では、摩擦に伴う表面結晶粒内のすべり系の進展に起因する小振幅の連続型 AE 信号が生じる。これは、位相のそろった転位群の集団運動より生じた AE パルスに起因するものと考える。
- (2) 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、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）や摩耗に起因した大きな突発型 AE 信号が発生する。
- (3) 凝着摩耗過程では、主として摩耗素子の生成・移着に起因する小振幅の連続型 AE 信号が検出される。これは、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って検出された AE 信号といえる。
- (4) 摩擦界面において集合・合体して移着粒子が形成される際に、大きな突発型 AE 信号が発生する。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、移着粒子形成時より小さな突発型 AE 信号が発生する。これは、移着粒子自体に蓄えられる弾性ひずみエネルギーの解放によるものと考える。
- (5) アブレシブ摩耗過程では、摩擦に伴うすべり線の生成に加え、摩耗粒子生成時のせん断すべり変形に起因した小振幅の連続型 AE 信号が発生する。また、摩耗粒子の生成開始時および脱落時に大振幅の突発型 AE 信号が検出される。前者は摩擦過程のすべり線生成時と同様に説明でき、後者は凝着摩耗過程の移着粒子の排出時と同様に説明できる。

< 文 献 >

- 1) M. Okoshi: “Researches on the Cutting Force, II Cutting Action of Planning Tool”, Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Research, 14, 272 (1930) pp. 51–57.
- 2) 橋内浩之・加藤康司・堀切川一男・井上 滉: 「SEM・トライボシステムによる摩耗の微視機構の研究 (繰返しすべり摩擦における微視的摩耗形態の遷移とその予測)」, 日本機械学会論文集 (C 編), 57, 535 (1991) pp. 965–972.
- 3) 第4章の8)と同じ.
- 4) 三科博司・金釜雲巖・河野彰夫: 「摩擦にともなう表面の変形と摩耗の素過程」, トライボロジスト, 41, 4 (1996) pp. 332–339.
- 5) 第2章の23)と同じ.
- 6) 第4章の7)と同じ.
- 7) 日本金属学会編: 「結晶の塑性」, 丸善 (1977) p. 448.
- 8) H. Mishina: “Magnetization of Ferromagnetic Material Surfaces by Tribological Process”, J. Appl. Phys., 92, 11 (2002) pp. 6721–6727.
- 9) M.E. Merchant, M. Field: “Mechanics of Formation of Discontinuous Chip in Metal Cutting”, Trans. ASME, 71, (1949) pp. 421–57.
- 10) 長谷亜蘭・三科博司・和田正毅: 「旋削加工で生じるアコースティックエミッション」, 職業能力開発総合大学校紀要 A 理工学・技能編, 第37号 (2008) pp. 51–57.

## 第7章 微小すべり摩擦における摩耗現象と AE 信号

### 7.1 緒言

巨視的な摩耗現象は微視的な摩耗現象の延長上にあると考えることができる。凝着摩耗に関しては、摩耗素子の生成から移着成長過程を経て摩耗に至る。アブレイブ摩耗に関しては、摩耗現象の様相は大きく変化しないものと思われる。現在、凝着摩耗の素過程で生成した十数～数十 nm の摩耗素子の観察はなされているが、生成する摩耗素子の大きさや量に関する明確なデータはほとんど報告されていない。マイクロ・ナノマシンにおける微小な精密機械要素の摩耗を考えると、移着粒子や摩耗粒子のみならず摩耗素子の生成も無視できないであろう。摩耗素子の大きさや量が確定できれば、これまで困難とされてきた凝着摩耗機構の解明や摩耗式の確立に貢献できると考える。また、微小なアブレイブ摩耗で検出される AE 信号を調査により、AE 法を微小切削加工の評価に適用できる可能性がある。したがって、微小なすべり摩擦で生じる凝着摩耗とアブレイブ摩耗における AE 信号波形の観測を行い、その周波数分布や振幅値の調査を試みる。また、摩耗素子の生成機構に関しては解明されていない部分が多いため、摩耗素子の大きさ・量、影響因子、生成機構に関して、原子間力顕微鏡 (AFM) 観察より得られた知見をまとめている。

### 7.2 実験装置および実験方法

#### 7.2.1 実験装置および計測システム

本実験に使用した微小すべり摩擦試験機の外観と実験装置の概略図を Fig. 7.1 および Fig. 7.2 にそれぞれ示す。摩擦方式は、ピン・オン・ブロック型である。AE センサは、第 6 章における実験と同一の広帯域型（周波数特性：500 kHz～4 MHz）のものを使用した (Fig. 6.3)。摩擦は一軸ピエゾアクチュ

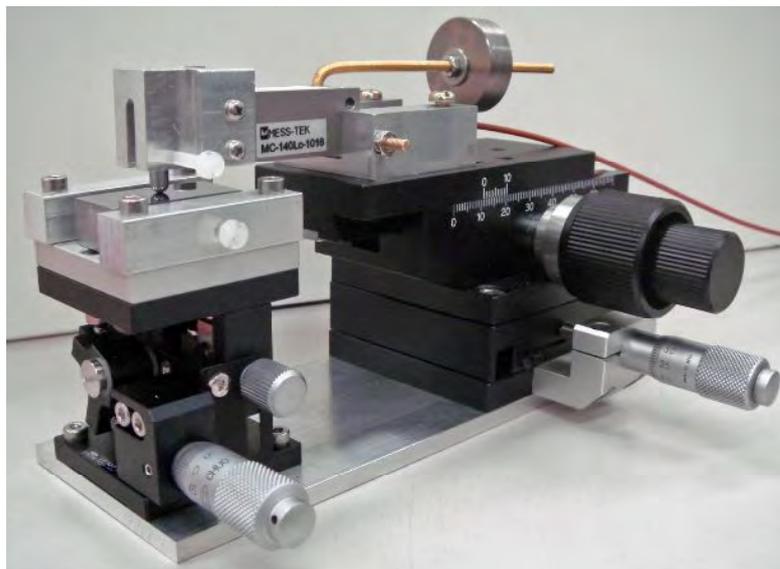


Fig. 7.1 Appearance of the micro-sliding friction tester.

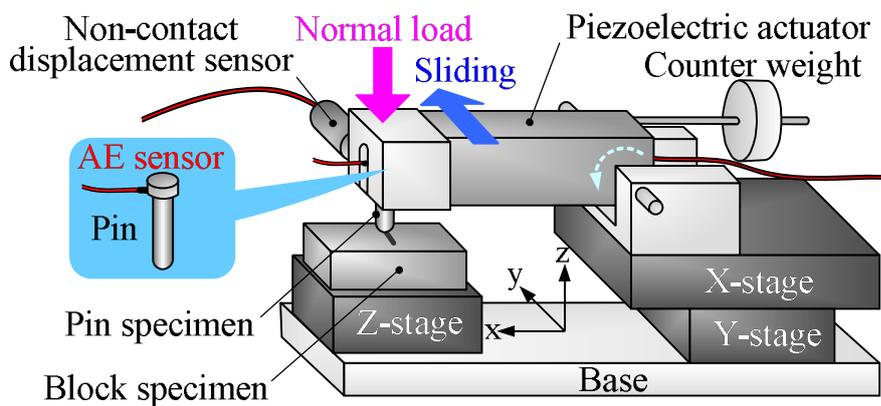


Fig. 7.2 Schematic showing of the experimental setup.

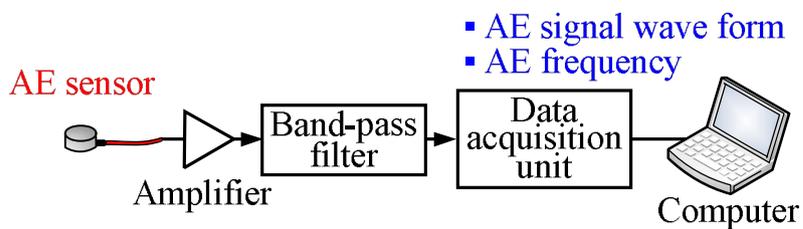


Fig. 7.3 Block diagram for AE measurement of the instrumentation used for AE signal acquisition.

エータにより行われる。その変位は、ピン保持部に設置した変位センサを用いて計測される。垂直荷重は、ピン試験片固定部品の上部に分銅を乗せることで与えられる。AE センサは、ピン試験片上部に取り付けられ、摩擦部の摩擦・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 10 mm である。ピン試験片先端は  $\phi 4$  mm の半球状とし、ブロック試験片の寸法は  $10 \times 15 \times 30$  mm とした。

Fig. 7.3 は本実験における AE 計測システムの構成図である。微小なすべり摩擦で生じる AE 信号は非常に微弱であるため、総合利得で 90 dB の増幅を行った。また、ノイズ除去の目的で 0.5~3 MHz のバンドパスフィルタ処理を行っている。本実験では、微小すべり摩擦で検出される AE 信号波形およびその周波数分布の評価を行なう。AE 信号波形の計測には、高速波形デジタルタイザ（サンプリング周波数：100 MHz，分解能：12 bits）を使用した。なお、本実験ではノイズ信号レベルより大きなトリガ電圧（200~500 mV）を設定し、それ以上の信号を検出・記録している。

### 7.2.2 実験条件

Table 7.1 は、本実験で使用した金属の純度および硬さをまとめたものである。ピン試験片には、Fe, Cu, Ag, Al, (Pb) の 5 種類の金属を用いた。ここで、Pb に関しては摩耗素子の調査のみ行い、AE 信号の計測は行っていない。凝着摩耗実験ではブロック試験片に Fe を用い、アブレシブ摩耗実験では研磨紙（#400, #800）を貼り付けたブロックを用いた。摩擦面は、バフ研磨

Table 7.1 Material properties

Material	Purity, %	Hardness HV
Fe	99.9	97.4
Cu	99.99	79.9
Ag	99.99	92.4
Al	99.99	32.4
Pb	99.9	5.7

Table 7.2 Summary of the experimental conditions

Normal load $W$ , N	0.49
Sliding speed $v$ , $\mu\text{m/s}$	100
Sliding distance $L$ , $\mu\text{m}$	50–500
AE amplification factor, dB	90
AE band-pass filter, MHz	HPF: 0.5 LPF: 3

により鏡面 ( $R_z$  50 nm 以下) に仕上げた。両試験片は、アルコール中で十分超音波洗浄した後に、摩擦実験を行った。実験は、50~500  $\mu\text{m}$  の摩擦距離を1回のみ摩擦させて行っている。実験条件を Table 7.2 に示す。実験はすべて室温 (約 20°C)、大気中 (相対湿度 40%) で行った。凝着摩耗実験は基本的に無潤滑下で行い、アブレイブ摩耗実験は潤滑下 (流動パラフィン) で行った。

凝着摩耗に関する実験では、摩擦実験後に再び表面のアルコール洗浄を十分に行い、ブロック試験片の摩擦面上 (摩耗痕中央部) に移着した摩耗素子を AFM (水平分解能: 1 nm) で観察・評価した。なお、AFM の計測モードは、タッピングモードを使用した。

## 7.3 実験結果

### 7.3.1 摩耗素子生成の確認とその影響因子

現時点で、凝着摩耗の素過程で生じる摩耗素子の大きさや生成量に関する明確なデータはほとんど報告されていない。したがって、摩耗素子に関するデータはトライボロジー研究分野に有益な情報を与えると考えられる。ここでは、後で AE 信号との対応を検討する際にも必要となる摩耗素子の AFM 観察から得られた結果をまとめる。

Fig. 7.4 は、微小すべり摩擦による摩耗痕である。また Fig. 7.5 は、Fe ブロック表面の (a) 摩擦前と (b) 摩擦後 (Fe/Fe) の AFM による表面形状像で

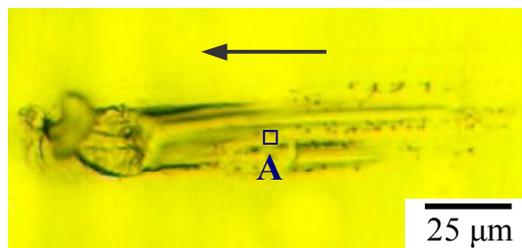


Fig. 7.4 Micrograph of the wear track (Fe/Fe, dry,  $W = 0.1$  N,  $v = 120$   $\mu\text{m/s}$ ,  $L = 120$   $\mu\text{m}$ ). The arrow indicates the direction of sliding.

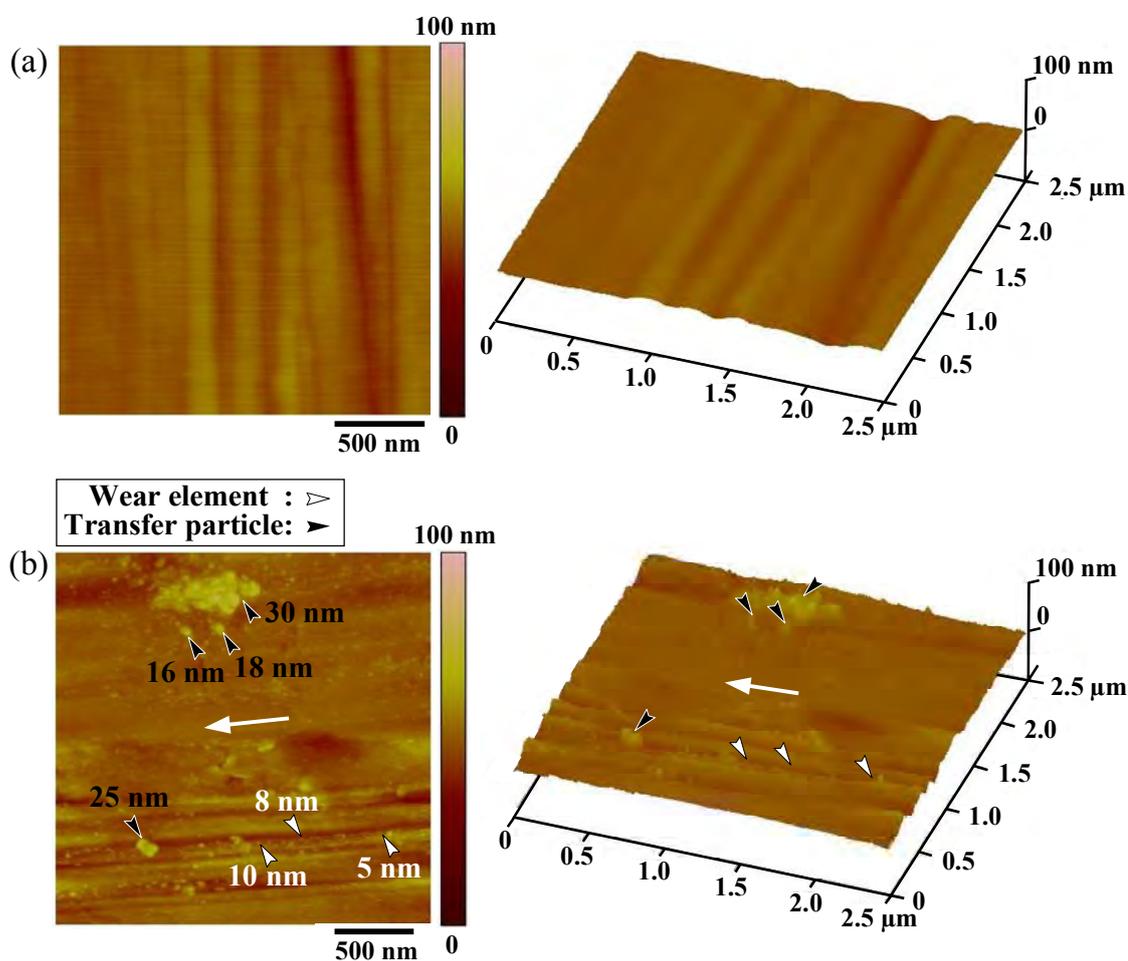


Fig. 7.5 AFM images of the surface of the iron block: (a) before the micro-sliding friction test and (b) after (Fe/Fe, dry,  $W = 0.1$  N,  $v = 120$   $\mu\text{m/s}$ ,  $L = 120$   $\mu\text{m}$ ). The arrow indicates the direction of sliding. The values indicate the height of the element or particle.

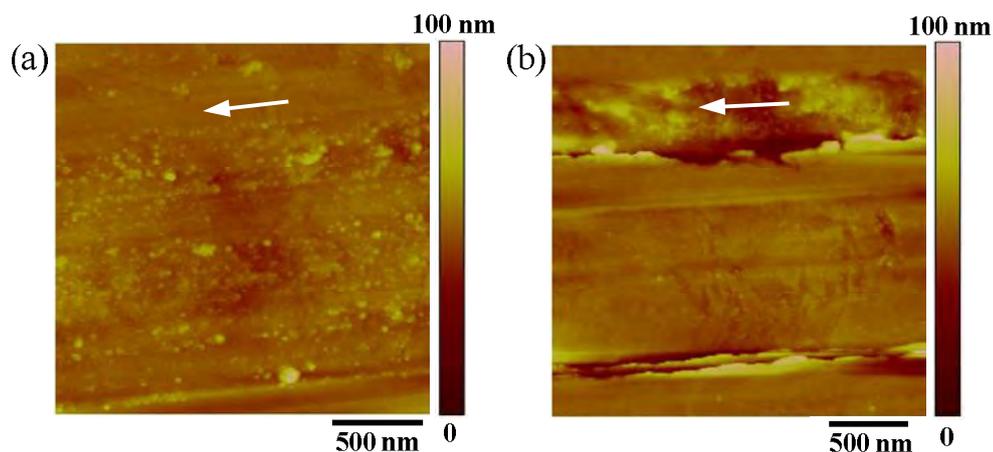


Fig. 7.6 AFM images of the friction surfaces of iron block for various lubrication conditions ( $W = 1.0$  N,  $v = 120$   $\mu\text{m/s}$ ,  $L = 120$   $\mu\text{m}$ ): (a) dry; and (b) lubricated.

ある。摩擦方向は、研磨方向に対して垂直の方向である（矢印方向）。なお、AFM の測定箇所は摩耗痕の中央部とした [Fig. 7.4 (A) 部]。ここで、摩擦前の表面は、研磨痕のみが観察されており、その他の汚れ等のいかなる微粒子も観察されていないことがわかる。それに対し、摩擦後の表面は、摩擦により生成した摩耗素子（ $\boxtimes$ 印）を確認することができる。また、その集合体である移着粒子（ $\blacktriangleright$ 印）も観察される。Fig. 7.6 は、Fe/Fe の垂直荷重 1.0 N における潤滑の有無に関して、摩擦面 AFM 像をそれぞれ示している。これより、潤滑の存在によって摩耗素子の生成量が激減することが明らかである。また、Fig. 7.6 (b) の潤滑下では移着粒子の成長がほとんど確認できない。Fig. 7.5 と Fig. 7.6 を比較すると、荷重の大きな Fig. 7.6 (a) でより多くの摩耗素子および移着粒子の生成が認められることがわかる。

以上の結果を定量的に評価するため、各実験で得られた AFM データ ( $2.5 \times 2.5$   $\mu\text{m}$  の領域) から、摩擦面上に生成した摩耗素子および移着粒子の存在数、摩耗素子の粒径分布を評価する。Fig. 7.7 は、Fe/Fe の潤滑の有無に関して、摩耗素子および移着粒子の存在数を垂直荷重に対してプロットした結果である。ここで、潤滑の有無に関係なく垂直荷重の増加に伴い、摩耗素子および移着粒子の存在数が増加する傾向にあることがわかる。これは、垂直荷重の増加により真実接触点数が増加し、摩耗素子の生成と移着粒子の形成が促進

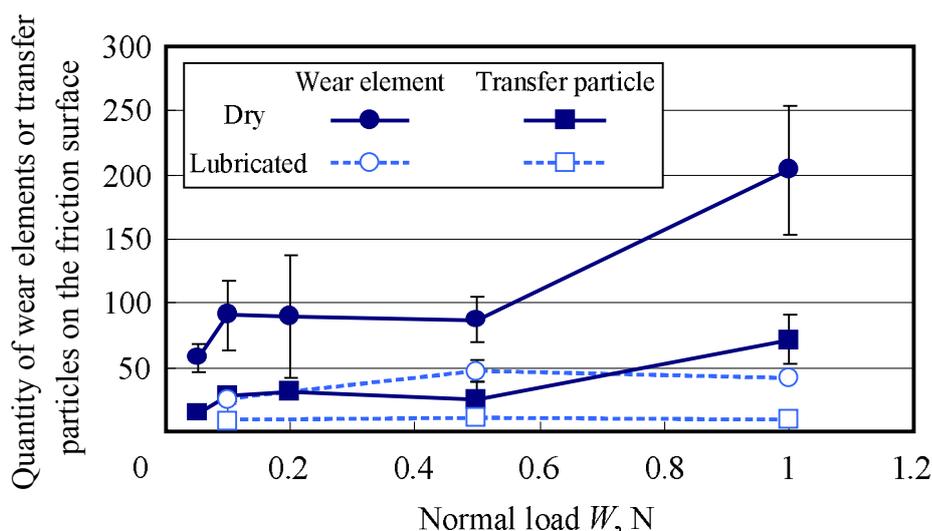


Fig. 7.7 Relationship between the normal load and the quantity of wear elements and transfer particles on the friction surface in an area of  $2.5 \times 2.5 \mu\text{m}$  (Fe/Fe,  $v = 120 \mu\text{m/s}$ ,  $L = 120 \mu\text{m}$ ). The error bars correspond to the scatter in measured value of two experiments.

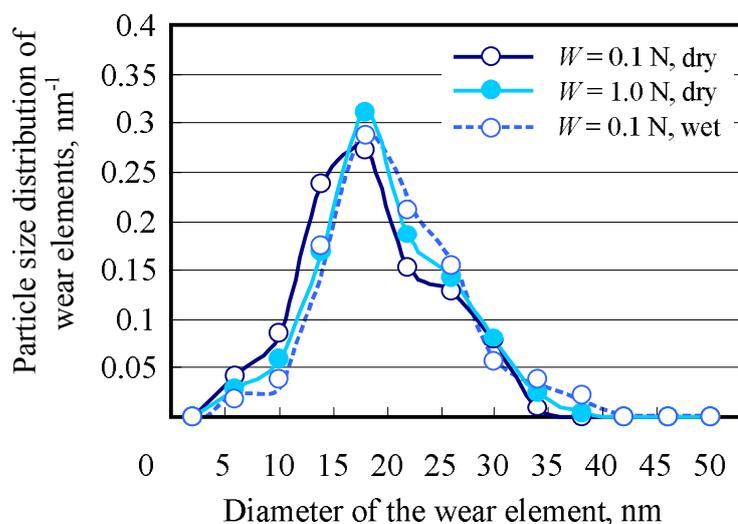


Fig. 7.8 Particle-size distribution curves of the wear elements for various normal loads and lubrication conditions (Fe/Fe,  $v = 120 \mu\text{m/s}$ ,  $L = 120 \mu\text{m}$ ).

されるためと考える。また、潤滑によって摩耗素子および移着粒子の量が減ることが確認できる。Fig. 7.8 は、Fe/Fe の垂直荷重の違いと潤滑の有無に関して、摩擦面上に生成した摩耗素子（集合体でない粒子）の粒径分布を調べた結果である。このとき、粒径分布のピークは、垂直荷重の違いや潤滑の有無によらず、ほぼ同じ（18 nm 付近）であることがわかる。

以上の結果から、垂直荷重の違いや潤滑の有無の影響は、生成する摩擦素子の大きさよりも、その生成量に現れるといえる。このことは、後で示す材料固有の摩擦素子径が存在することを示唆している。

次に、垂直荷重 0.1 N, 無潤滑下で異なるピン材料を用いて摩擦実験を行い、材料の組み合わせの影響を調べた。Fig. 7.9 は、ピン材料の違いによる AFM 形状像の違いを示している。また、その各ピン材料に関する摩擦素子の粒径分布曲線を Fig. 7.10 に示す。この結果から、分布に多少ばらつきはあるが、材料の違いによって摩擦素子の粒径分布のピークが存在している。摩擦素子径を決定する因子に関する議論は現時点で困難であるが、安定して存在でき

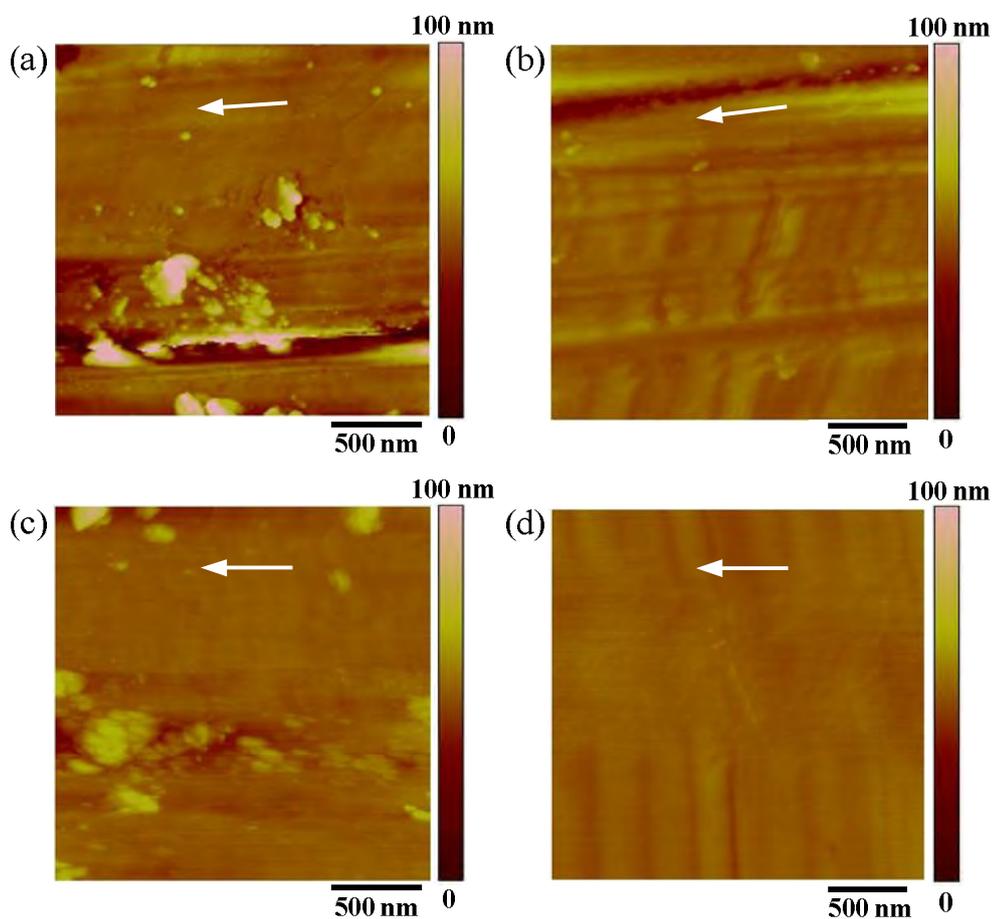


Fig. 7.9 AFM images of the friction surfaces of iron block for various pin materials (dry,  $W = 0.1$  N,  $v = 120$   $\mu\text{m/s}$ ,  $L = 120$   $\mu\text{m}$ ): (a) aluminum on iron; (b) lead on iron; (c) copper on iron; and (d) silver on iron. The arrow indicates the direction of sliding.

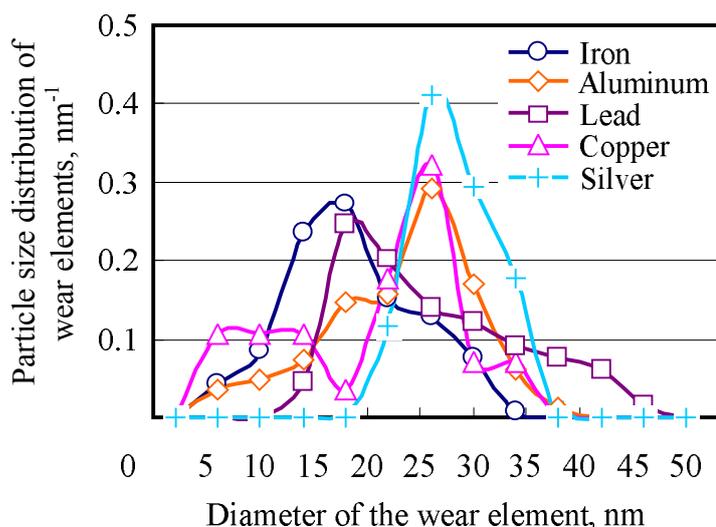


Fig. 7.10 Particle-size distribution curves of the wear elements for various pin materials (dry,  $W = 0.1 \text{ N}$ ,  $v = 120 \mu\text{m/s}$ ,  $L = 120 \mu\text{m}$ ).

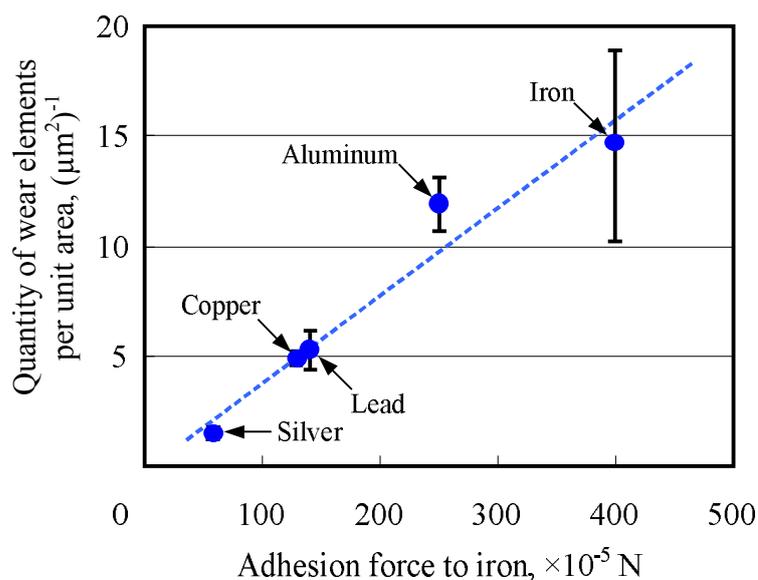


Fig. 7.11 Quantity of wear elements per unit area, generated by rubbing five metals on iron, plotted against the adhesion force to iron (dry,  $W = 0.1 \text{ N}$ ,  $v = 120 \mu\text{m/s}$ ,  $L = 120 \mu\text{m}$ ). The error bars correspond to the scatter in measured value from two experiments.

る材料固有の摩耗素子径がそれぞれ 10~30 nm に存在するといえよう。

Fig. 7.11 は、摩耗素子の（単位面積あたりの）生成量を凝着力に対してプロットしたものである。この凝着力の値は、Buckley による実験値である<sup>1)</sup>。これより、摩耗素子の生成量が組み合わせた材料間の凝着力と比例関係を示

すことがわかる。これは、凝着力が直接接触部において摩擦素子を持ち去る力として働くためと考える。

### 7.3.2 摩擦素子生成時の AE 信号

前節において摩擦素子が摩擦条件に関わらず生成することが確認できた。ここでは、これらの摩擦素子や移着粒子の生成時に検出される AE 信号に関する結果を述べる。

微小すべり摩擦実験における 1 回の摩擦中で、AE 信号が連続的に検出される場合と AE 信号の検出が断続的になる場合とがみられた。Fig. 7.12 は、AE 信号が連続的に発生する場合の摩擦面 (Fe/Fe) の AFM 形状像である。これより、摩擦素子 (図中▷印) や移着粒子 (▶印) を確認することができる。この AFM 観察位置で検出された AE 信号波形およびその周波数分布を Fig. 7.13 に示す。Fig. 7.13 (a) にみられるように、振幅が大きく立ち上がり明確な突発型 AE 信号が検出されることがわかる。これは、Fig. 7.12 の摩擦素子や移着粒子の生成により発生したと考えられる。また Fig. 7.13 より、この AE 信号の周波数分布のピークが 1.1 MHz 付近に存在することがわかる。対

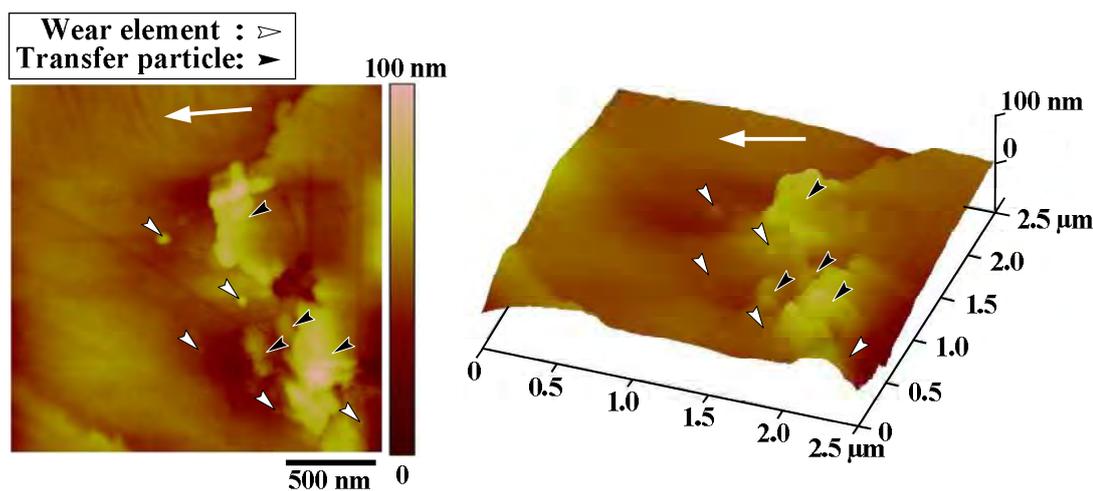


Fig. 7.12 AFM images of the friction surface of the iron block after rubbing (Fe/Fe, dry,  $v = 100 \mu\text{m/s}$ ,  $W = 0.49 \text{ N}$ ). The arrow indicates the direction of sliding.

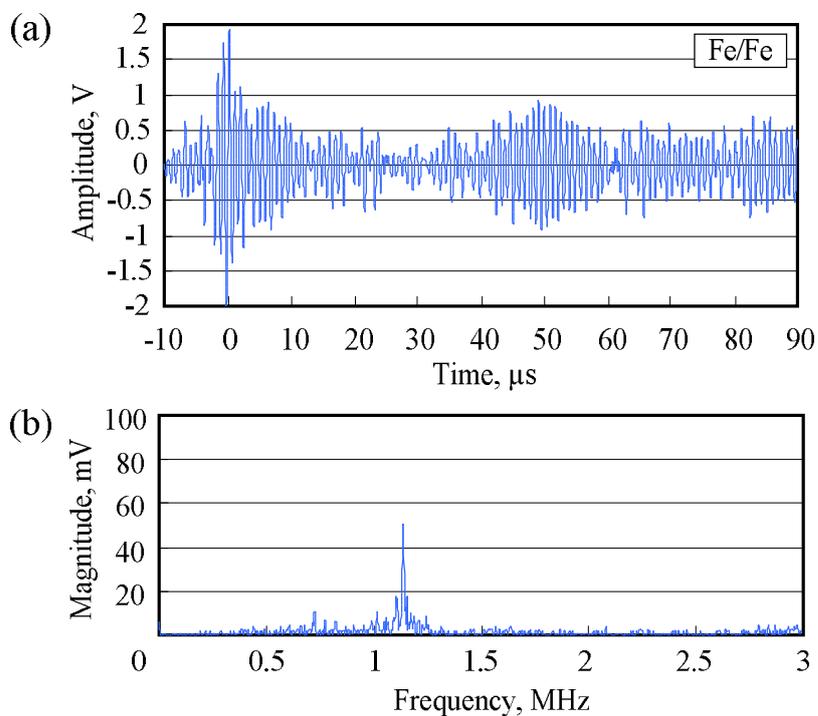


Fig. 7.13 Typical AE signal detected at the transfer of wear elements and transfer particles for the rubbing of iron on iron: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

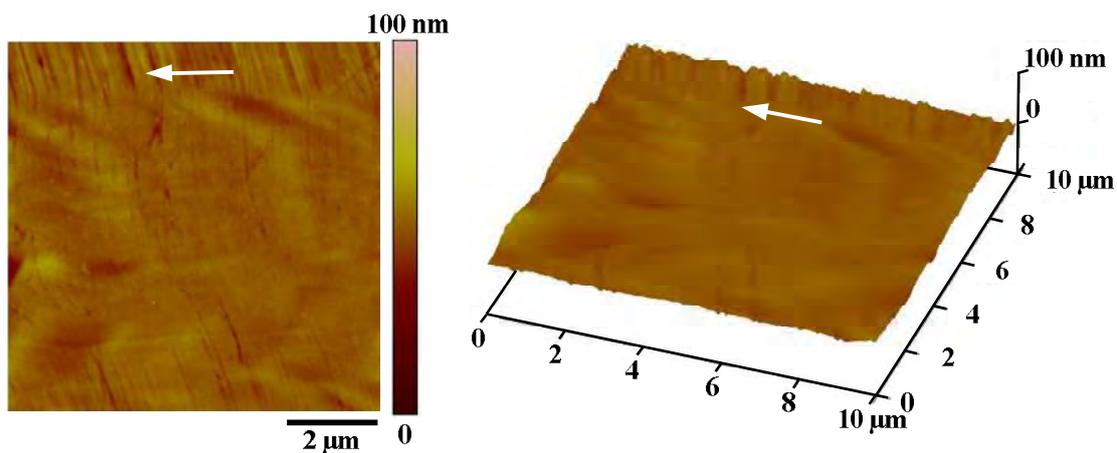


Fig. 7.14 AFM images of the friction surface of the iron block after rubbing when AE signals were not detected (Fe/Fe, dry,  $v = 100 \mu\text{m/s}$ ,  $W = 0.49 \text{ N}$ ).

して、AE 信号の検出が断続的になる場合に、AE 信号が検出されなかった摩擦箇所の AFM 観察結果を Fig. 7.15 に示す。これより、摩擦面上に Fig. 7.13 にみられるような移着粒子は存在せず、摩耗素子もほとんど観察されないことがわかる。この場合、AE 信号レベルは非常に小さく、その AE 信号の周波数分布にも特徴は現れない。よって、以上のことから Fig. 7.13 で計測された AE 信号は、摩耗素子や移着粒子の生成に起因したものといえる。

Fig. 7.15~7.17 は、それぞれ Al/Fe, Cu/Fe, Ag/Fe (pin/block) の摩擦で計測された AE 信号波形およびその周波数分布を示している。これらの AE 信号は、Fe/Fe の摩擦時と同様、Fig. 7.9 に示したような摩耗素子や移着粒子の生成時に検出されたものである。ここで特筆すべきは、Fig. 7.13 および Fig. 7.15~7.17 の周波数分布に関して、1.1 MHz 付近に周波数ピークをもつことである。これは、材料に関係しないことから、凝着摩耗現象に関係した周波数ピークと考える。

Fig. 7.18 は、本摩擦系の共振周波数の影響を AE 標準音源（シャープペン

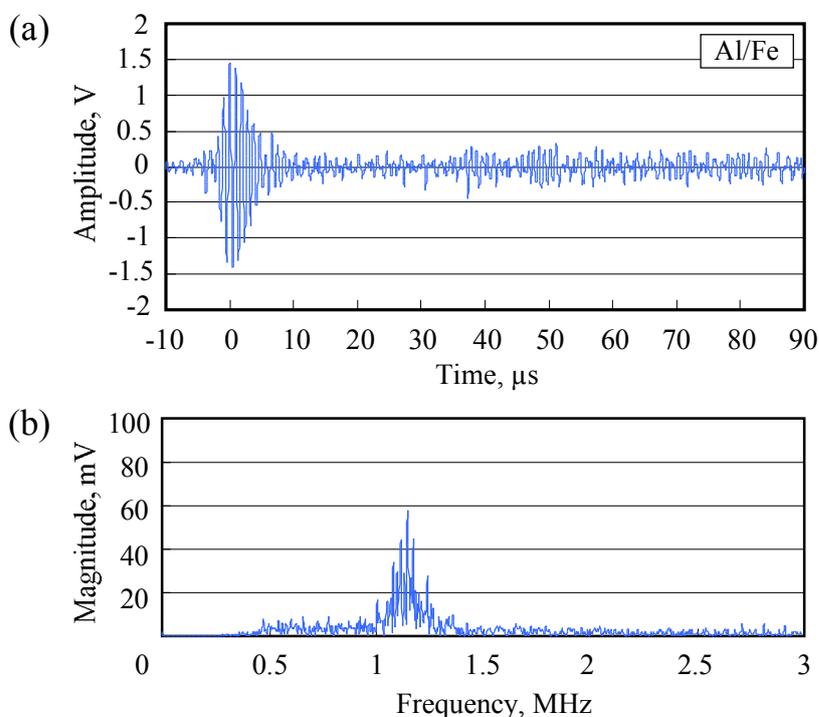


Fig. 7.15 Typical AE signal detected at the rubbing of aluminum on iron: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

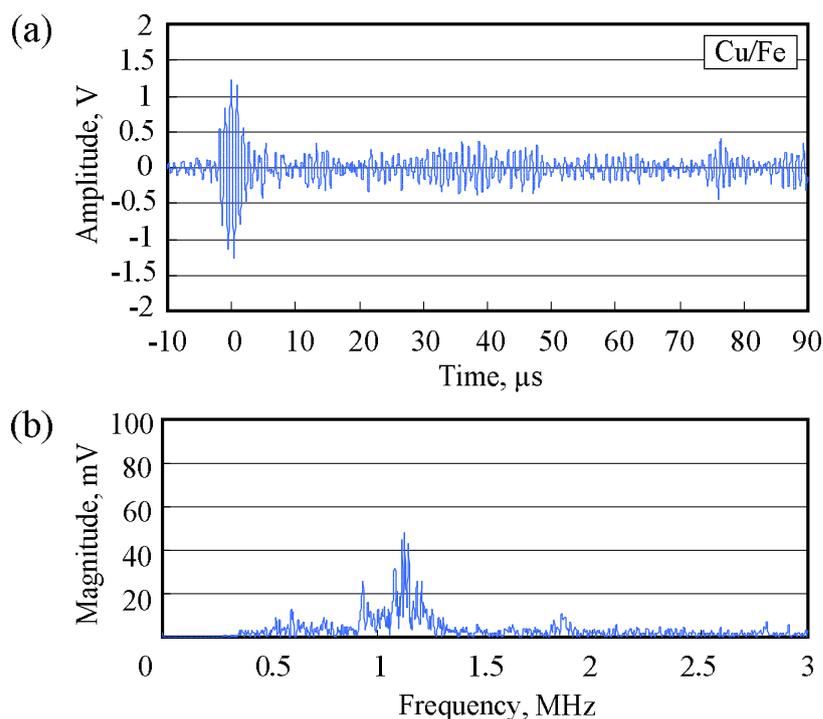


Fig. 7.16 Typical AE signal detected for the rubbing of copper on iron: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

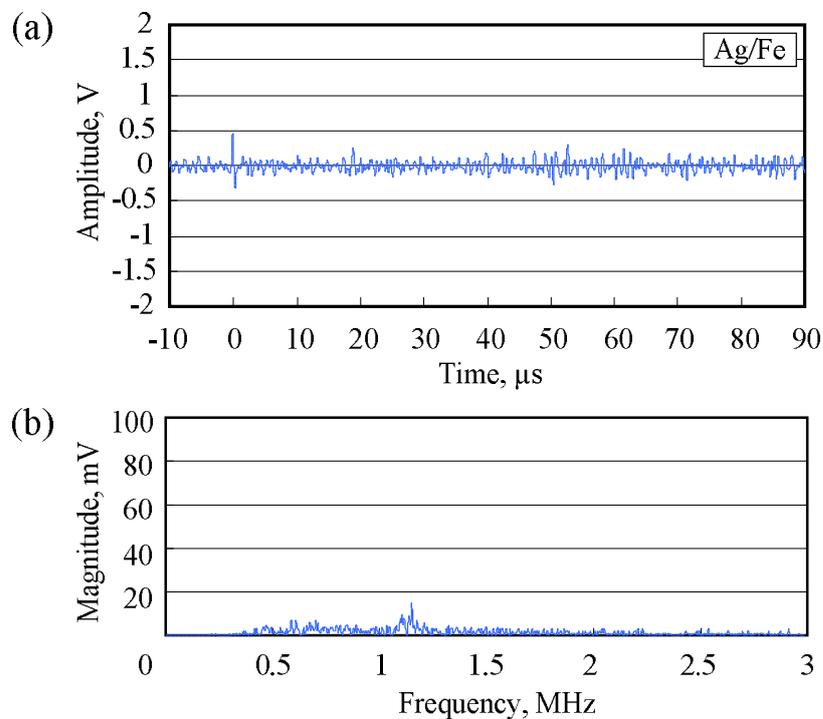


Fig. 7.17 Typical AE signal detected at the rubbing of silver on iron: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

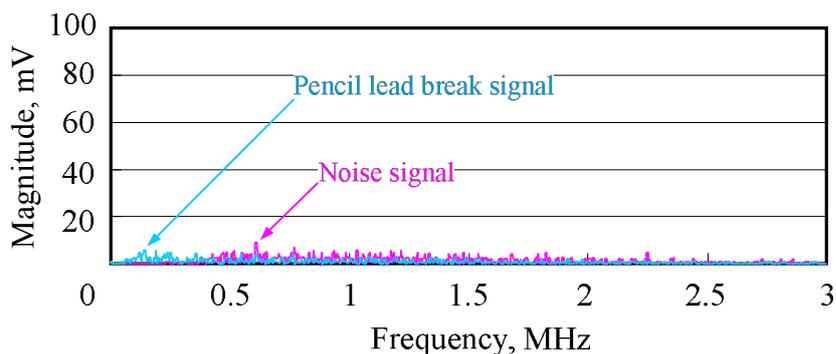


Fig. 7.18 AE frequency spectrum for noise and pencil lead break.

シル用芯の圧折によって発生する AE 波)を用いて調べた結果である。また、本実験環境下のノイズ信号に関する周波数分布も示している。これより、実験系の共振周波数やノイズの影響は全くないといえる。

ここで、Fig. 7.11 において摩耗素子の生成量の評価に用いた単位面積あたりの摩耗素子生成量と AE 信号の最大振幅値および継続時間との関係を Fig. 7.19 に示す。これらは、10 個の AE 波形から得られた平均値とそのばらつきを示している。これより、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、摩耗素子の生成量の増加に伴い大きくなることがわかる。

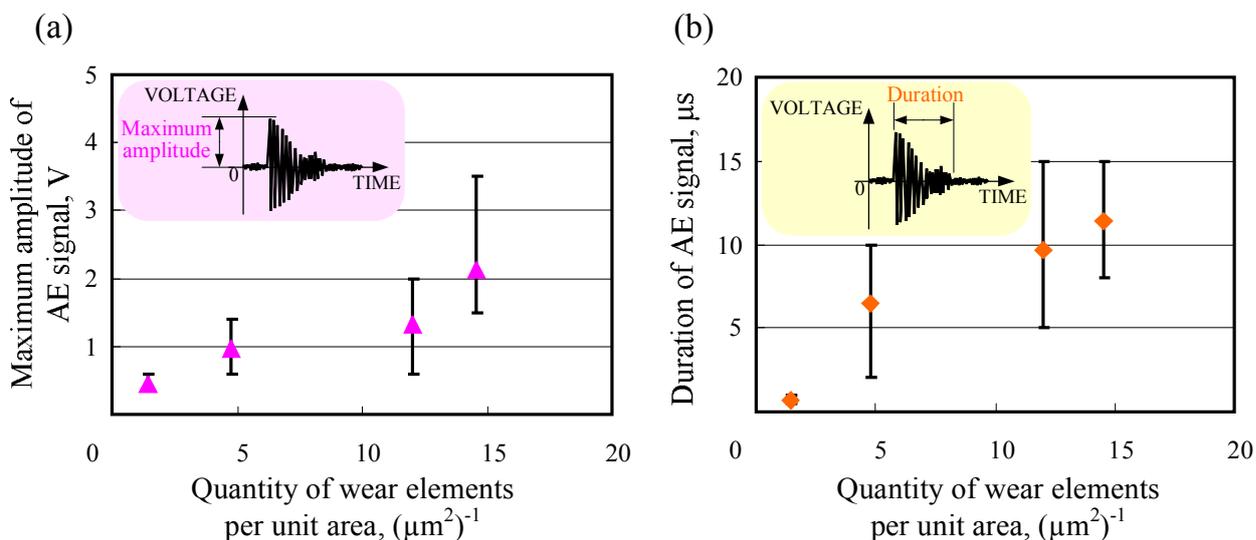


Fig. 7.19 Relationship between the quantity of wear elements and the AE signal: (a) for maximum amplitude; and (b) for duration.

## 7.3.3 アブレシブ摩耗粒子生成時の AE 信号

次に、微小すべり摩擦におけるアブレシブ摩耗粒子生成時の AE 信号に関する結果を示す。Fig. 7.20 は、アブレシブ摩耗を再現させるためにブロック上に貼り付けた研磨紙（#400, #800）の観察結果である。砥粒は炭化ケイ素（SiC）であり、その平均粒径は#400 で約  $35\ \mu\text{m}$ , #800 で約  $22\ \mu\text{m}$  である<sup>2)</sup>。また、凝着摩耗时（Fig. 7.12）とアブレシブ摩耗时（#400）の Fe ピン摩耗面の光学顕微鏡による比較を Fig. 7.21 に示す。この比較より、Fig. 7.21 に示すピン摩耗面がアブレシブ摩耗を呈していることが明らかである。このように、微小すべり摩擦下においてアブレシブ摩耗を再現することができる。なお、本実験は潤滑下かつ低荷重の微小すべり摩擦のため、無潤滑繰返し摩擦で懸念される砥粒の破壊は起こらず、純粋なアブレシブ摩耗による AE 信号が検

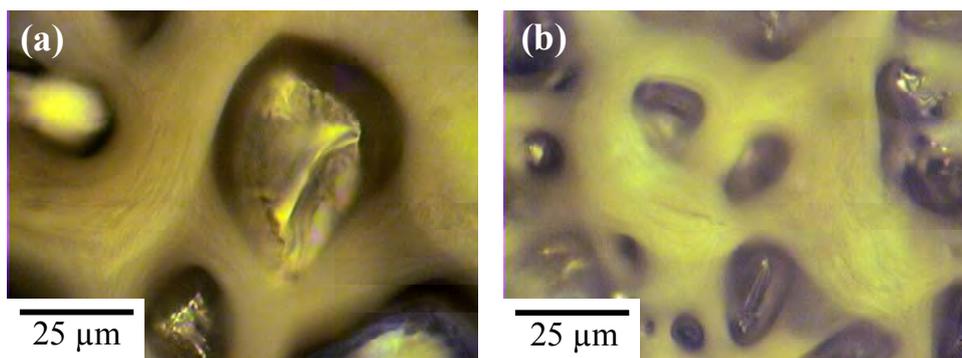


Fig. 7.20 Micrographs of the abrasive grains (SiC) on the abrasive paper: (a) 400-grade; and (b) 800-grade.

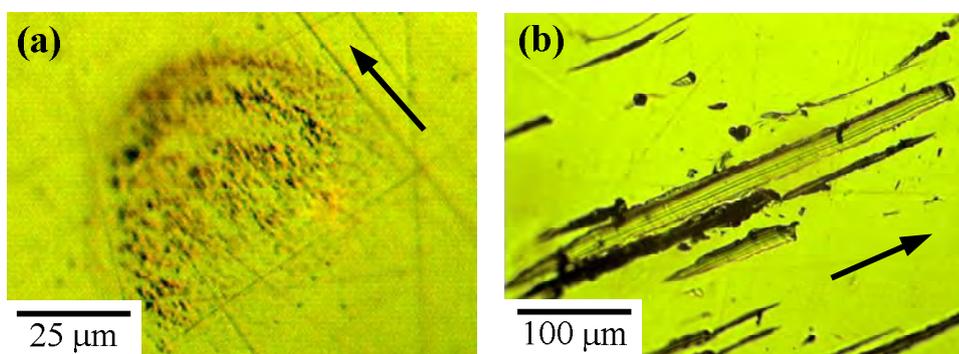


Fig. 7.21 Micrographs of the wear track for the pin specimen ( $W = 0.49\ \text{N}$ ,  $v = 100\ \mu\text{m/s}$ ): (a) adhesive wear (Fe/Fe, dry); and (b) abrasive wear (Fe/#400, lubricated). The arrow indicates the direction of sliding.

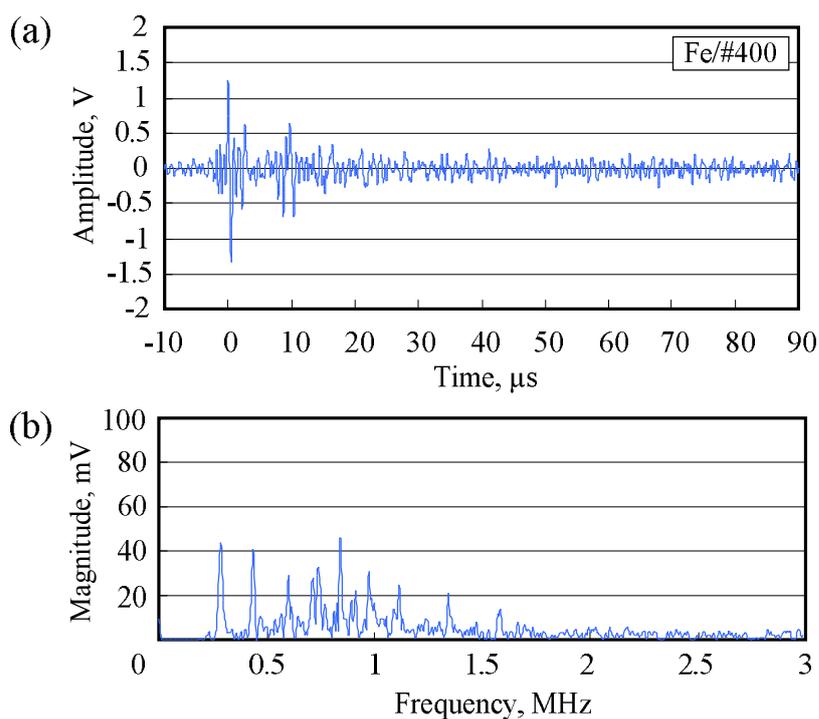


Fig. 7.22 Typical AE signal detected at abrasive wear for the rubbing of iron on the 400-grade abrasive paper: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

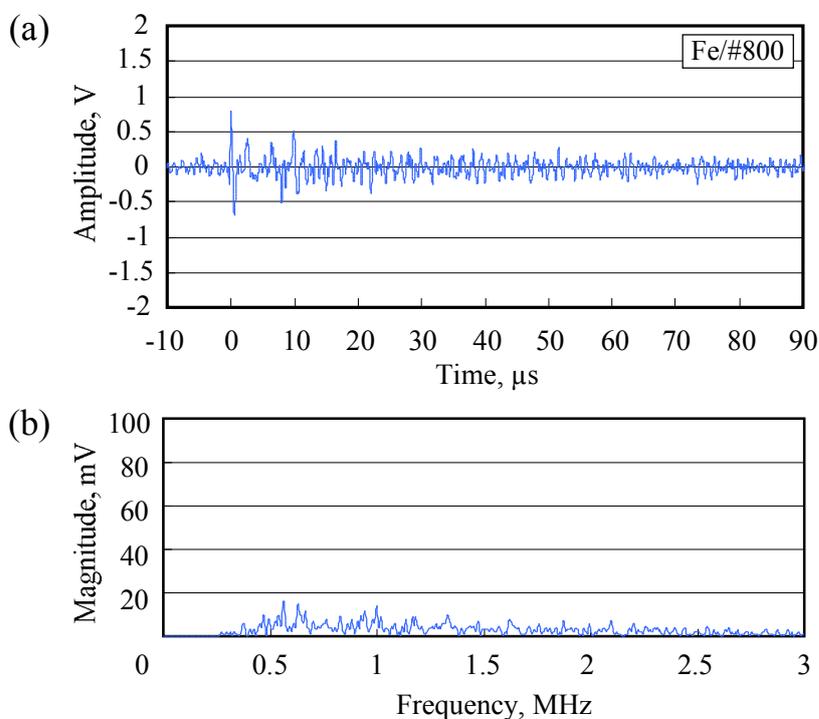


Fig. 7.23 Typical AE signal detected at abrasive wear for the rubbing of iron on the 800-grade abrasive paper: (a) AE signal wave form; and (b) the AE frequency spectrum.

出されると考える。

Fig. 7.22 および Fig. 7.23 は、それぞれ研磨紙#400 および#800 による Fe のアブレシブ摩擦時に検出された AE 信号波形およびその周波数分布である。これらは、凝着摩擦時 (Fig. 7.13) よりも AE 信号の振幅値は小さいことがわかる。また、砥粒平均粒径が大きな Fig. 7.22 の AE 信号の最大振幅値は、Fig. 7.23 に比べ大きいことがわかる。周波数分布に関しては、0.25~1 MHz の間に同程度の大きさの分布が存在している。この周波数は、き裂の進展や破断時などに検出される AE 周波数<sup>3,4)</sup>に関係していると思われる。これとは別に Fig. 7.22 (b) において、1.1 MHz 付近に凝着摩擦時の特徴である周波数ピークが小さいながら見られる。これは、潤滑下においても摩擦素子が生成するため (Fig. 7.7)、砥粒すくい面との接触域で移着が生じたものと考えられる。

以上のように、摩擦形態や摩擦の状況によって検出される AE 信号の振幅値や周波数分布に特徴を示すことが確認された。これは、その変形・破壊現象特有の AE 周波数をもつ AE 信号を計測することにより、複雑な摩擦・摩擦現象で生じる AE 信号の必要な信号成分のみを評価できることを意味する。

## 7.4 論 議

微細な摩擦・摩擦現象およびそこで発生する AE 信号を調べるために、微小すべり摩擦で発生する AE 信号の計測を凝着摩擦とアブレシブ摩擦の二つの摩擦形態に関して行った。ここでは、微小すべり摩擦下で検出された AE 信号やその周波数分布と摩擦形態の関係について議論する。

最初に、得られている実験事実に基づいて、摩擦素子の生成機構について検討してみる。第6章の摩擦面直下で生じる摩擦面の変形過程の in-situ 観察から、以下の塑性変形の過程が観察された。まず、垂直応力の作用によってすべり線 (帯) が接触域の結晶粒界に沿って生じる。そして、接線応力の作用によって異なるすべり系のすべり線が生成し、先のすべり線と交錯する。この過程は巨視的に観察されるが、真実接触部においても微視的に同様の現象が生じていると考えられる。Wilsdorf と Kuhlmann-Wilsdorf は、エレメンタ

リスリップ (elementary slip) として知られる極めて小さなすべりが変形の初期段階で生じることを発見している<sup>5,6)</sup>。それによると、約 50 nm の間隔で約 10 nm のすべりが面心立方格子の純金属で観察される。表面突起の接触・変形過程に関しても、このようなナノスケールのすべりがマクロスケールで観察されたように表面突起の接触点で生じると考えることができる。

次に、表面突起の塑性変形が進行し、すべり線は交錯すると同時に固体同士の直接接触部 (junction) を形成する。これは、真実接触部に酸化膜のような境界層が存在していても、その境界層はすべり摩擦によって破断し、バルク結晶同士が凝着することナノスケールで確認されている<sup>7)</sup>。これは、気体吸着膜や潤滑膜に関しても同様と考えられる。このとき、すべり線が交錯して囲まれた微小領域が、もう片方の表面突起に凝着する。このすべり線で囲まれた微小領域の境界強度は、急激な塑性変形による転移が集積しているため、バルク結晶内部の強度に比べ弱いと思われる。

最終的に、その境界部分で破断が生じて摩耗素子が生成する。これは、粒内破壊が原子レベルで生じたと考える。木塚は、原子スケール凝着過程の観察から、原子の流動や拡散が接触点において生じることを報告している<sup>8)</sup>。このように、このすべり線で囲まれた極めて微細な組織 (原子の集団) が、摩擦させた相手材料との凝着力によって持ち去られるものと考えられる。したがって、組み合わせた材料間の凝着力と摩耗素子の生成量に Fig. 7.11 で示した比例関係があるのであろう。

以上の議論に基づき、Fig. 7.24 に示す摩耗素子の生成・移着モデルを提案する。このモデルは、摩耗素子の生成・移着過程を次の四つの段階で示している：(i) 表面突起が互いに接触する、(ii) その接触点で圧縮応力によってすべり線が生じる、(iii) 直接接触部が形成され、摩擦せん断応力によって異なるすべり系のすべり線が生じ、それらが交錯していく、(iv) 新たな表面突起の接触が生じるとともに接触部が引き離され、すべり線で囲まれた微小領域が移着することで摩耗素子が生成する。この過程の後には、移着成長過程に従って移着粒子 (摩耗粒子) が形成されることになる。

ここで、摩耗素子の大きさについても触れておく。摩耗素子は Fig. 7.24 に

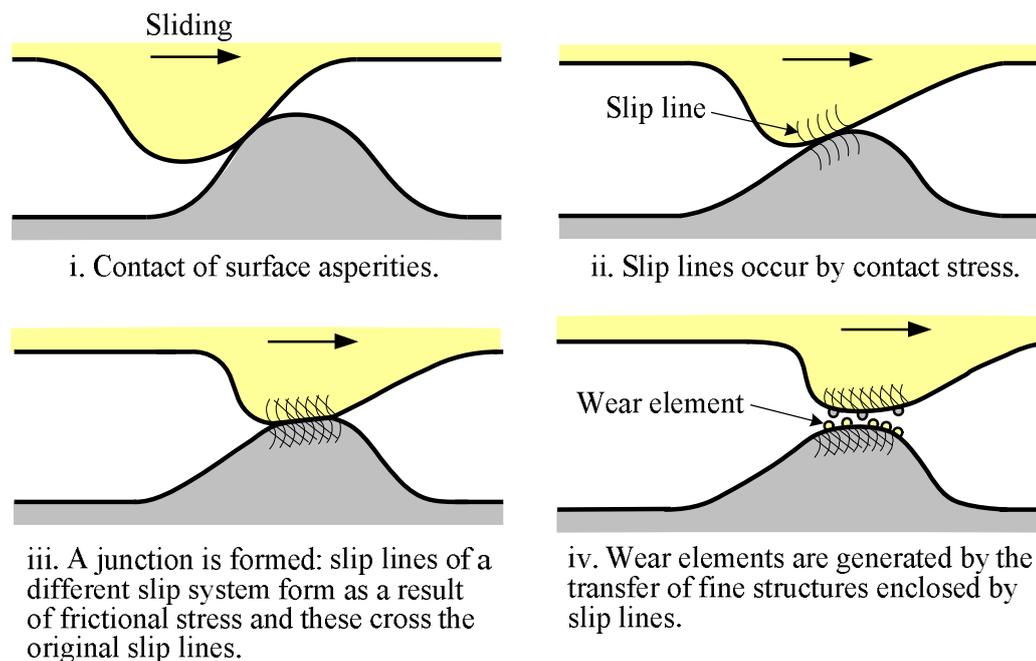


Fig. 7.24 Model for the generation and transfer of wear elements.

示すように半球状（厳密には，摩擦方向に長い半楕円球状）で摩擦面に凝着している．本実験で観察された摩耗素子が主にピンからブロックに移着したものと考えると，摩耗素子の大きさは Fe と Pb では直径約 18 nm であり，Al, Cu, Ag では約 27 nm であることがわかる (Fig. 7.10)．これらは，粉碎法のような機械的製法では生成することのできない超微粒子サイズの大きさである．先に述べたように，エレメンタリスリップは 50 nm 間隔で生成するすべり量 10 nm の極めて小さなすべりである．さらに，すべり線の厚さは一般的に 20 nm 以下といわれている<sup>9)</sup>．よって，これらのすべりが交錯した領域が Fig. 7.24 に移着すると考えるのが妥当と思われる．また，摩耗素子が移着する際に，原子スケールで流動や拡散が生じることによって安定した半球状の粒子となると考える．摩耗素子の大きさが単磁区粒子の大きさと近い値を示すのは，その結果なのかもしれない<sup>10)</sup>．摩耗素子の大きさを決定する因子はまだ明言できないが，材料固有の摩耗素子の大きさが存在するということがいえる．

以上を踏まえて，摩耗素子の生成・移着時に検出される AE 信号に関して論議を進める．Fig. 7.24 の生成機構は，4.4 節におけるの移着モデル (Fig. 4.13)

と同様に考えることができ、Fig. 7.19 で得られた結果は Fig. 4.14 の移着による AE 発生の仮定が正しいことを裏づけている。つまり、AE パルス（突発型 AE 信号）が摩擦素子の集団移着によって生じるという考えが Fig. 7.19 から説明できる。Fig. 7.19 では、凝着力の違いにより摩擦素子の生成量が増減し、それに伴い AE 信号波形の最大振幅値（AE パルスの大きさ）が変化している。よって、4.4 節で導入した AE パルスエネルギー  $e_p$  は、摩擦させた材料同士の凝着力が関係することが示される。また、一つの摩擦素子の移着では AE 信号は検出されておらず、摩擦素子の集団移着によって突発型 AE 信号が発生することが Fig. 7.13 および Fig. 7.15～Fig. 7.17 より示された。さらに、摩擦素子は Fig. 7.24 (d) に示すように一度に数個～数十個（単位  $\mu\text{m}^2$  あたり）移着する。そのため、突発型 AE 信号波形は信号密度が高く、継続時間も長くなり、高周波領域（1.1 MHz）にピークをもつ信号成分となると考えられる。

アブレシブ摩擦における AE 源は、せん断変形に伴う弾性ひずみエネルギーの解放であり、その大きさはせん断領域の面積に比例する（Fig. 5.19）。これより、微小すべり摩擦においても同様に、砥粒の大きい場合はせん断領域面積が大きくなるため、AE 信号の振幅値が大きくなることが説明できる（Fig. 7.22）。また、アブレシブ摩擦時の AE 信号波形は凝着摩擦時の波形とは異なり、AE 信号波形の信号密度が低く、低周波領域（0.25～1 MHz）にピークをもつ信号成分が存在する。この AE 周波数のピークは、き裂の生成・進展や破断、塑性変形時に検出される AE 信号の特徴である<sup>3,4,11)</sup>。したがって、切れ刃によるアブレシブ摩擦時は、これらの現象に起因した AE 信号が発生しているということがいえる。塑性変形に起因した低周波領域の周波数ピークは、凝着摩擦時においても見られる。ただし、移着による信号レベルに比べその振幅は非常に小さい。

摩擦形態の違いにより、その変形・破壊現象に起因した AE 周波数ピークが現れることがわかった。本実験で得られる微視的な摩擦・摩擦現象における AE 周波数の特徴は、和田らによる巨視的な摩擦・摩擦現象での AE 周波数の特徴<sup>11)</sup>と類似している。よって、広範囲の摩擦・摩擦現象に関して、摩擦形態に対応した AE 信号を周波数から弁別可能であることを示している。

## 7.5 結 言

本章では微視的な摩耗現象と AE 信号の関係を調べるため、凝着摩耗およびアブレシブ摩耗のそれぞれの摩耗形態を微小すべり摩擦試験で再現させた。そして、微視的な摩耗で生じる AE 信号波形と周波数分布に関して論議を行った。また凝着摩耗の実験では、摩擦表面に生成した摩耗素子を AFM により観察・評価し、摩耗素子の大きさ・量や影響因子について得られた知見をまとめた。本章で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) 摩耗素子の大きさは材料に関して固有であり、本実験では直径 10~30 nm の範囲にある。この摩耗素子の大きさ(粒径分布曲線のピーク)は、荷重の違いや潤滑の有無によってほとんど変化しなかった。
- (2) 生成する摩耗素子の数は、摩擦させた材料間の凝着力に比例する。これは、摩擦で生成したすべり線で囲まれた極めて微細な組織が、凝着力によって持ち去られるためと考える。
- (3) 凝着摩耗では、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。その AE 信号の周波数分布は、材料に関係なく 1.1 MHz 付近に周波数ピークが存在する。
- (4) 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。
- (5) 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、0.25~1 MHz に周波数ピークをもつ信号成分が存在する。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。

## &lt; 文 献 &gt;

- 1) D.H. Buckley: “Adhesion of Single Crystal Metals to Clean Iron (011) Surface Studied by Emission Spectroscopy”, NASA Technical Note, D-7018 (1971) pp. 1–22.
- 2) 日本工業規格 (JIS) : 「研磨布紙用研磨材の粒度」, JIS R 6010 (2000).
- 3) S. Ramadan, L. Gaillet, C. Tessier, H. Idrissi: “Detection of Stress Corrosion Cracking of High-Strength Steel Used in Prestressed Concrete Structures by Acoustic Emission Technique”, Appl. Surface Science, 254 (2008) pp. 2255–2261.
- 4) 尾上守夫・山口楠雄・仲佐博裕・佐野謙一・磯野英二・渡辺哲夫 : 「アコースティック・エミッションの基礎と応用」, コロナ社 (1985) pp. 50–53.
- 5) D. Kuhlmann-Wilsdorf, H. Wilsdorf: “The Surface Structures of Deformed Aluminum, Copper, Silver, and Alpha-Brass, and Their Theoretical Interpretation”, Acta Metallurgica, 1, 4 (1953) pp. 394–413.
- 6) H. Wilsdorf, J.H. Van der Merwe, D. Kuhlmann-Wilsdorf: “Elementary Structure and Slip-Band Formation in Aluminum”, Phil. Mag., 43, 341 (1952) pp. 632–643.
- 7) T. Kizuka, K. Hosoki: “In-Situ High-Resolution Transmission Electron Microscopy of Direct Bonding Processes between Silicon Tips with Oxide Surfaces at Room Temperature”, Appl. Phys. Lett., 75 (1999) pp. 2743–2745.
- 8) T. Kizuka: “Atomic Process of Point Contact in Gold Studied by High-Resolution Transmission Electron Microscopy”, Phys. Rev. Lett., 81 (1998) pp. 4448–4451.
- 9) J.D. Verhoeven: “Fundamentals of Physical Metallurgy”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.
- 10) 第6章の8)と同じ.
- 11) 和田正毅・水野萬亀雄・笹田 直 : 「AEによる摩擦・摩耗の研究—銅の摩耗形態と AE 周波数—」, 精密工学会誌, 56, 8 (1990) pp. 1474–1479.

## 第8章 AE法による摩擦・摩耗現象の 認識および評価の総括

### 8.1 緒言

ここまで、主たる二つの摩耗形態である凝着摩耗とアブレシブ摩耗について、巨視的および微視的観点から摩擦・摩耗現象と AE 信号の相関を論議してきた。一般的に摩擦・摩耗現象の評価には、様々なトライボロジー特性が利用されている。また最近の研究によって、摩擦・摩耗現象の把握に有効な摩耗形態図がいくつか報告されている<sup>1-4)</sup>。得られた相関関係から実際に摩擦・摩耗現象を評価するためには、これらの評価の目安となるトライボロジー特性を AE 信号の評価パラメータで表す必要がある。そこで本章では、これまでの結果および論議を踏まえ、摩擦・摩耗現象の認識・評価に AE 法を適用するための総括を行う。さらに、AE 法を用いたトライボロジー特性の評価方法の指針について述べている。

### 8.2 AE 信号によるトライボロジー特性の評価

本研究によって導出された、AE 総エネルギー $E_{AE}$ と摩耗量 $V$ の関係を以下に再掲する。

凝着摩耗（移着現象）：

$$E_{AE} = \frac{3ne_p}{2r\tau} \cdot \frac{p_m}{W} V + E_f \quad (4.7)$$

アブレシブ摩耗（切削現象）：

$$E_{AE} = \frac{4e_s cl}{\sin \theta} \cdot \frac{p_m}{W} V + E_f \quad (5.5)$$

以上の2式は、その摩擦・摩耗現象によって AE 波の発生機構が異なるが、摩耗量と AE 総エネルギーとの関係は類似した形で得られる。そこで、これら2式は、

$$E_{AE} = e_{AE} \cdot \frac{p_m}{W} V + E_f \quad (8.1)$$

と書き換えることができる。ここで、 $e_{AE}$ は単位摩擦距離あたりのAEエネルギーと定義する。これは、接触状態および材料のAE特性を含む材料定数であり、摩耗現象によって異なる。また、摩擦に起因するAE信号成分の大半は、500 kHzのハイパスフィルタにより除去できると考える。したがって、式(8.1)より、AE総エネルギーの計測から今まで困難とされてきた摩耗量のインプロセス計測の可能性を示唆できる。

また、AE平均値は表面の損傷状況と相関関係にあることが本実験結果より得られている。よって、AE平均値は時々刻々と変化する摩擦界面の現象の把握に有効であると考えられる。そこで、AE平均値の具体的な意味について論議を行う。AE平均値は、AE総エネルギーの微分の関係にあることから、式(8.1)を用いて、

$$V_{AE} = \frac{E_{AE}}{t} = e_{AE} \cdot \frac{p_m}{Wt} V + \frac{E_f}{t} \quad (8.2)$$

が成り立つ。また、摩擦時間  $T$  には、 $T = L/v$  の関係があるので、

$$V_{AE} = e_{AE} \cdot v \cdot \frac{p_m}{WL} V + E_f' \quad (8.3)$$

とできる。さらに、比摩耗量は  $w_s = V/WL$  で定義されることから、

$$V_{AE} = e_{AE} \cdot v \cdot p_m \cdot w_s + E_f' \quad (8.4)$$

とあらわせる。これより、AE平均値と比摩耗量の関係式が導出できたこととなる。摩耗現象の変化が比摩耗量に及ぼす影響は大きいと、係数部分  $e_{AE} \cdot v \cdot p_m$  をその摩耗現象による定数と考え、AE平均値と比摩耗量が比例関係にあるとみなせる。そこで、得られた実験結果より、AE平均値と比摩耗量の関係を Fig. 8.1 と Fig. 8.2 に示す。Fig. 8.1 は無潤滑下および潤滑下における移着現象について、Fig. 8.2 は切削現象について示している。Fig. 8.2 に示すアブレイブ摩耗では、5章で述べたように材料のAE特性の影響が大きいと、材料により傾きが異なってくる。また、Fig. 8.1 に示す凝着摩耗で

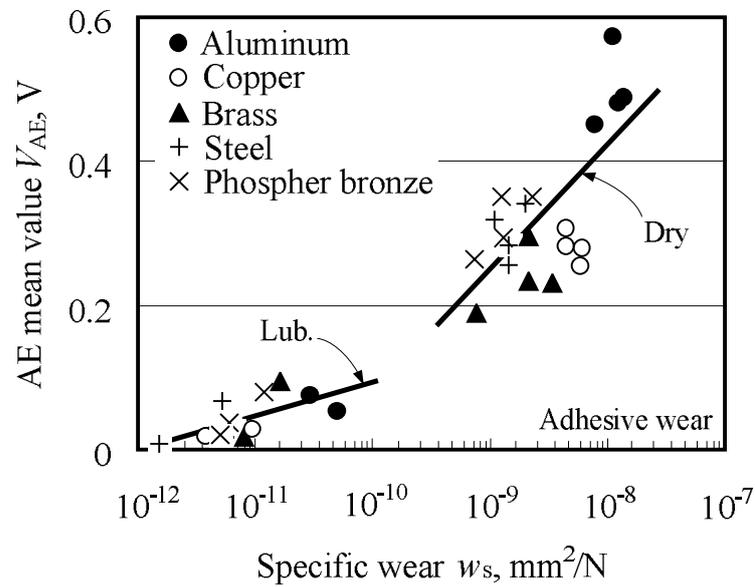


Fig. 8.1 Relationship between the AE mean value and the specific wear rate on adhesive wear.

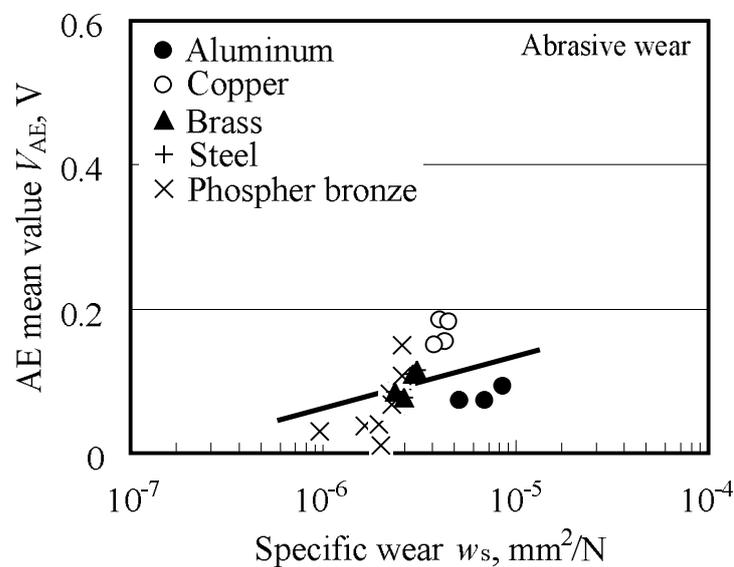


Fig. 8.2 Relation between the AE mean value and the specific wear rate on abrasive wear.

は材料の AE 特性の影響と思われるばらつきはあるが、ほぼ比例関係が認められる。もちろん、摩耗現象自体が摩擦条件などの影響により大きく変化するため、比摩耗量のばらつきの影響も含まれる。以上のことから、式 (8.4) にも示されるように AE 平均値と比摩耗量との間に相関関係が認められた。比摩耗量は非常に重要なトライボロジー特性評価項目の一つであり、それから摩耗の過酷さを評価することができる。したがって、AE 平均値の計測から、比摩耗量すなわち摩耗の過酷さの評価が可能であるといえる。このことから摩擦表面の損傷状況と AE 平均値が相関関係にあったことも説明できる。さらに、式 (8.4) を時間で微分することにより以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}\frac{dV_{AE}}{dt} &= e_{AE} \cdot v \cdot p_m \cdot \frac{dw_s}{dt} + E_f'' \\ &= e_{AE} \cdot v \cdot p_m \cdot w_{sr} + E_f''\end{aligned}\quad (8.5)$$

ここで、 $dV_{AE}/dt$  は AE 平均値電圧の瞬時値であり、 $dw_s/dt$  ( $= (1/W)dV/dL$ ) は微分比摩耗量である。微分比摩耗量  $w_{sr}$  は、物理的に比摩耗量より優れた評価パラメータ<sup>5)</sup>とされ、逐次変化する摩擦・摩耗現象の認識・評価に有用と考えられる。一般的に、実機の摩耗量はその逐次経過を追うことが困難なことが多く、摩耗がある程度進行した段階で求められる。したがって、例えば比摩耗量の大きい初期摩耗状態から比摩耗量の小さい定常摩耗状態に移行していたなら、この比摩耗量は両方の状態を緩和した値となってしまい信頼性に欠けてしまう。しかし、微分比摩耗量を監視できれば常に摩耗量の変化を追うことができるため、その問題を解決できる。この微分比摩耗量を求めることは容易ではないが、式 (8.5) で示したように AE 平均値の計測によって、微分比摩耗量すなわち摩耗量の逐次経過の監視が可能になるといえる。

### 8.3 摩耗-AE 相関図の作成・検討

摩耗形態図は、摩擦条件等の影響因子を無次元化して縦軸および横軸にとり、その実際の摩擦条件から摩耗形態が推定できるというものである。AE

信号の計測において、このような摩耗形態図を表現するには、膨大な数の実験データが必要となる。ここでは、摩耗形態図とは呼べないが AE 評価パラメータとトライボロジー特性の関係から、摩耗-AE 相関図の作成とその検討を行う。

流体潤滑下では摩擦物体間の接触がないため、ほとんど AE 波は発生しない。ただし、キャビテーションなどの流体の雑音がともなうような特殊な環境下では、相応の雑音対策が必要である。それに対して、第3章で挙げたような無潤滑下の繰返し摩擦では、マクロ的かつ加速的な焼付き現象に近い現象であり、AE 信号レベルは非常に大きい。一般の実機では、第4章で挙げた移着による凝着摩耗や5章で挙げたアブレイブ摩耗が主として生じる。これらの様々な現象を含めた総合的な摩擦・摩耗現象を認識・評価するため、摩耗-AE 相関図は有効なものとなる。

8.2節において AE 平均値が比摩耗量とよい相関が得られることが示された。比摩耗量は、摩耗の過酷さおよび大よその摩耗形態を知るためのパラメータの一つである。したがって、AE 平均値より摩耗の過酷さや摩耗形態が把握できるといえる。そこで、Fig. 8.3 は実験結果から移着現象と切削現象について AE 平均値と比摩耗量の関係を示した相関図である。これより、材料の AE 特性の影響によるばらつきはあるが、現象によって AE 平均値が斜線部の領域に分布することがわかる。この相関図を利用すれば、AE 平均値の監視から逐次進行していく摩耗量をモニタリングできると考えられる。しかし、計測系の違いによる問題点が残っており、この点については 8.5 節で詳しく述べる。また、第7章で示した AE 信号の周波数分布の特徴を利用することにより、摩耗形態を正確に判別できると考える。この AE 周波数に関しては、8.4 節で詳細をまとめる。

Fig. 8.4 は、無潤滑繰返し摩擦における凝着摩耗の結果（第2章における実験結果、第3章における実験4回の平均値）を Fig. 8.3 に加えた相関図である。ただし、これらの実験は現象が過酷であることから AE 増幅率を 60 dB と抑えている。よって、Fig. 8.3 と比較するために 70 dB に換算（約 3.16 倍）した AE 平均値で示している。しかしながら、60 dB と増幅率を小さくするこ

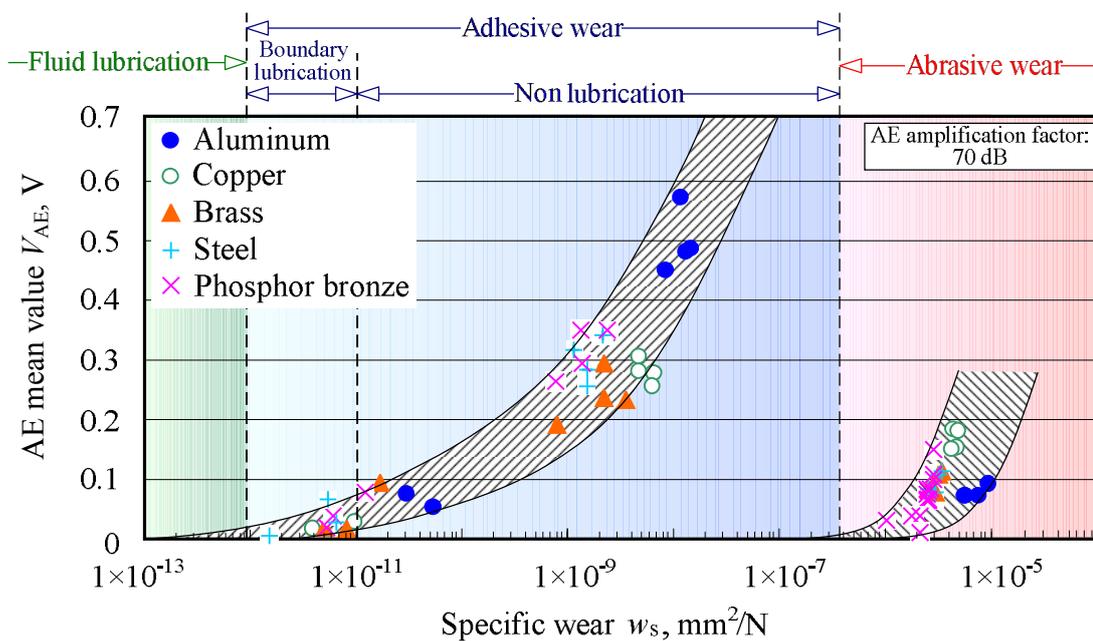


Fig. 8.3 Correlation diagram between the AE mean value and the specific wear rate on the transfer phenomenon and the cutting phenomenon.

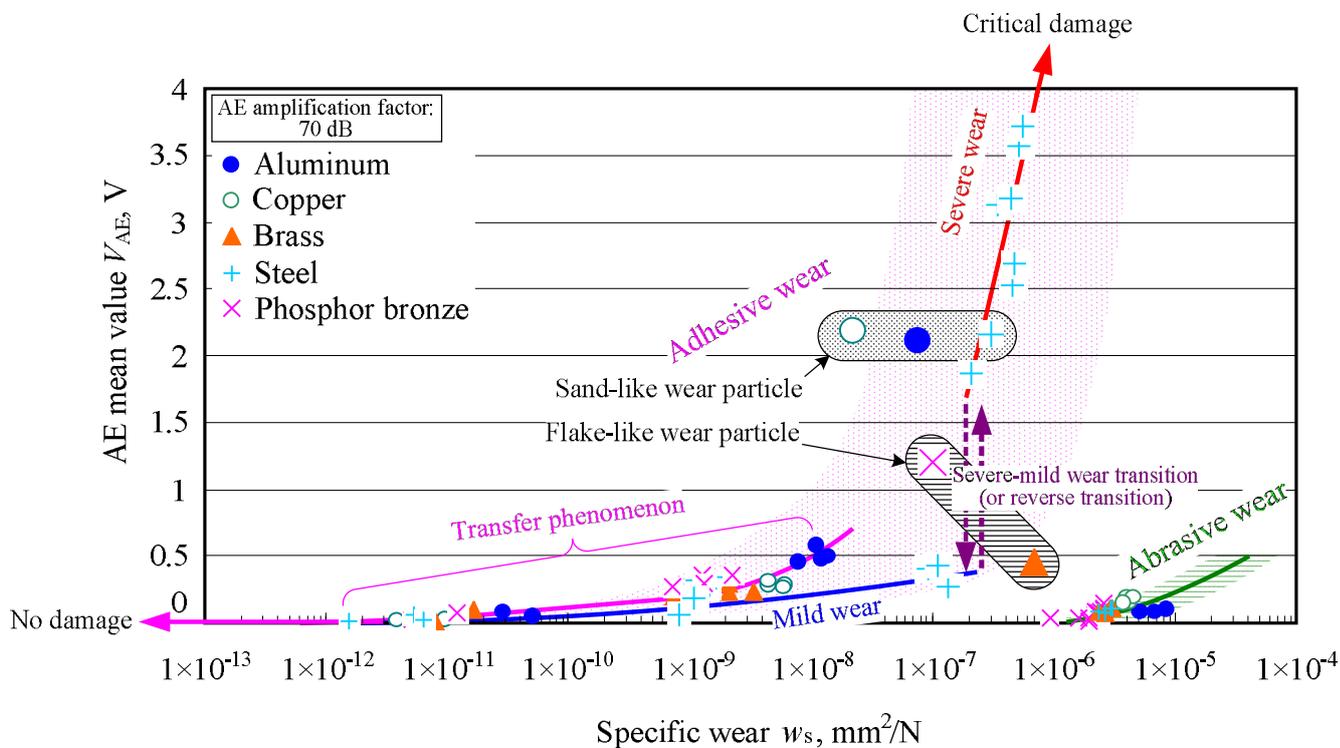


Fig. 8.4 Correlation diagram between the AE mean value and the specific wear rate on all the wear phenomena in this experiment.

とで、移着現象などの信号レベルの小さな現象を検出できない。また、無潤滑繰返し摩擦は移着現象の延長上にあり、摩耗粒子の脱落形態によってその信号レベルが異なった。特に、黒色砂状摩耗粒子が排出される場合、その酸化されて硬化した粒子の摩擦界面での衝突・破壊の影響が大きいと考える。粉粒体の挙動は非常に難解であり<sup>6,7)</sup>、そこで発生するAE信号を考えることは困難と思われる。また、円筒側の損傷が完全に無視できず、その影響も含まれていることも考慮しなければならない。これらの問題があるため、無潤滑繰返し摩擦における凝着摩耗を相関図に加えるには厳密な検討が必要と考える。なお、Fig. 8.4に示した領域は、実験結果を踏まえた予想で示している。

つぎに、式(8.4)から展開してもう一つの相関図の論議を進める。式(8.4)は、

$$V_{AE} = e_{AE} \cdot v \cdot K + E_f' \quad (8.6)$$

と書き換えることができる。ここで、 $K$ は比摩耗量と材料硬さの積で定義される摩耗係数である<sup>8)</sup>。摩耗係数は主として以下の二つの物理的意味をもつ。凝着摩耗では真実接触点での凝着摩耗粒子の発生確率（破壊確率）であり、アブレイブ摩耗では摩耗を引き起こす物体の幾何学的特徴をあらわしている。摩耗現象で得られるAE信号は、摩耗量と同様、この摩耗係数と密接な関係がある。したがって式(8.6)のように、AE平均値と摩耗係数の比例関係が示される。そこで、実験結果からAE平均値と摩耗係数との関係を示したのがFig. 8.5である。摩耗係数で整理すると比摩耗量のときに比べ、横軸における材料のばらつきが小さくなることがわかる。凝着摩耗においては摩擦環境の著しい影響を受け、湿度や潤滑状況の変化で摩耗係数が100倍以上変化する。凝着摩耗では、このような変化にもAE平均値は追従していることがFig. 8.5より確認できる。アブレイブ摩耗の場合、本実験では切削する物体は同一形状となるため摩耗係数は定数となる。よって、AEの材料特性の大きさがAE平均値レベルの違いとなってあらわれる。しかし、切削する物体の形状が異なり摩耗係数が大きくなれば、Fig. 5.18の場合と同じようにAE平均値は大きくなるだろう。したがって、アブレイブ摩耗においても材料のAE

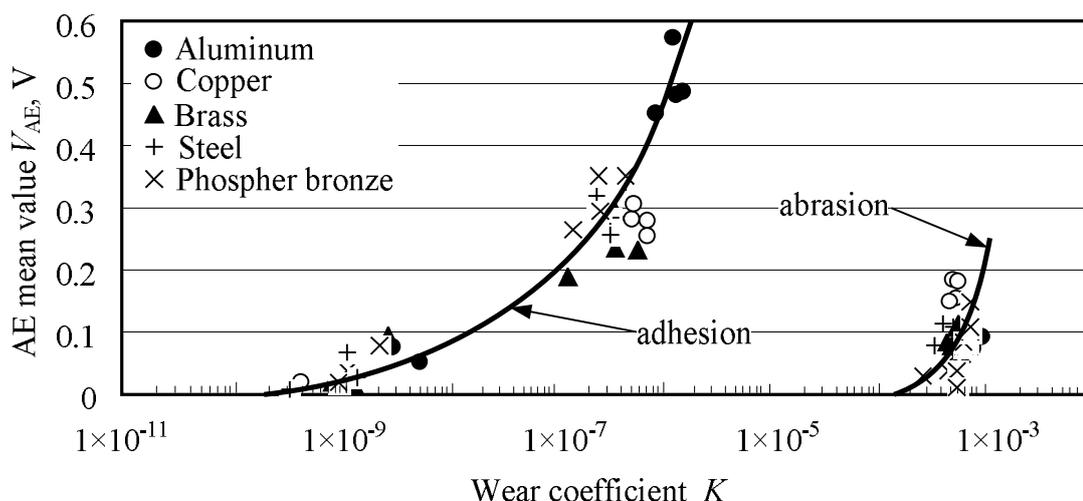


Fig. 8.5 Correlation diagram between the AE mean value and the wear coefficient on the adhesion and the abrasion.

特性の影響はあるが、個々の材料をみれば摩耗係数に比例して AE 平均値が変化すると考えられる。このように、摩耗係数は定数と想定されているが、実際は摩擦条件（荷重、摩擦距離、環境など）によって変化する。ところが、AE 平均値はその変化に敏感であり摩耗係数の評価に有用といえる。

以上より、摩耗-AE 相関図として AE 平均値と比摩耗量または摩耗係数との相関図を提示し、摩擦・摩耗現象の認識・評価に有効であることを示した。

#### 8.4 AE 周波数による摩耗形態判別

第7章で示したように摩耗形態によって AE 信号の周波数分布に特徴が現れる。これは、摩耗形態を正確に判断するためにも重要な知見であると考えられる。本研究で得られた AE 周波数の特徴に加え、いくつかの研究より得られている AE 周波数の特徴を Fig. 8.6 にまとめた。Fig. 8.6 の縦軸である AE 信号レベルの大きさに関しては、AE センサや実験系、実験条件に依存するため概略で示している。ただし、Fig. 4.11 と Fig. 5.11 の比較より、凝着摩耗とアブレイブ摩耗では単位摩耗量あたりの AE エネルギーで3桁 (AE 信号レベルで1桁) もの大きな違いがある。ここでは、摩擦・摩耗現象以外の変形・

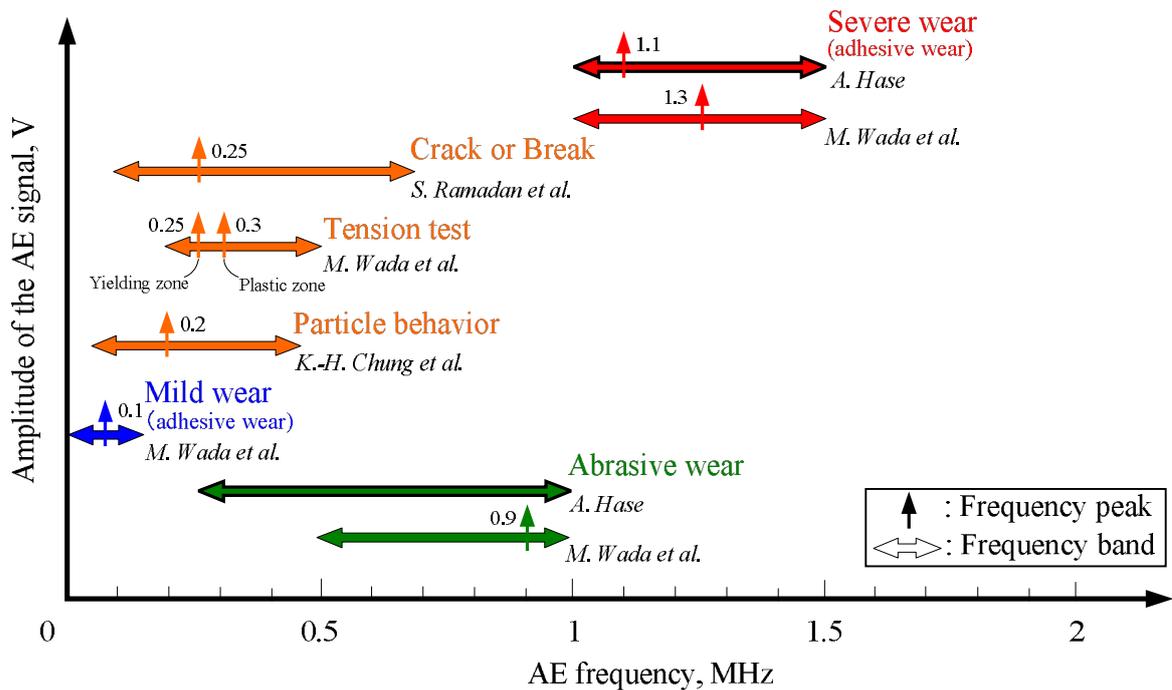


Fig. 8.6 AE frequency bands for each wear phenomenon and deformation and fracture phenomenon.

破壊現象（き裂の進展・破断<sup>9)</sup>，引張試験による塑性変形時<sup>10)</sup>，介在粒子の挙動<sup>12)</sup>）で得られる AE 周波数の特徴も示している．また，和田らによる往復すべり摩擦より得られた巨視的な摩耗現象（凝着摩耗，マイルド摩耗，アブレイブ摩耗）に関する AE 周波数の特徴を示した<sup>11)</sup>．本研究における微小すべり摩擦による微視的摩耗現象から得られた結果は，この周波数領域と類似していることがわかる．本実験では材料の違いに関わらず，凝着摩耗時に同様の AE 周波数分布を示した．また，Fig. 8.6 からわかるように異なる実験系や材料においても，同じ摩耗現象（摩耗形態）で AE 周波数の特徴が類似している．これらのことから，摩擦・摩耗過程においては主に現象に起因する AE 信号を検出しているといえる．特に，凝着摩耗とアブレイブ摩耗の周波数領域が明確に分かれていることから，AE 周波数によって摩耗形態の判別が可能といえる．ただし，AE センサや実験系における共振周波数，材料の AE 特性を把握したうえで，AE 周波数解析を行うことが重要である．また逆に，各摩耗形態に対応した AE 信号を周波数により弁別することができる

ことを示している。

## 8.5 摩擦・摩耗現象に対する AE 計測の指針

最後に、AE を用いたトライボロジー特性の評価方法の指針について述べる。AE 計測の利点は、AE 計数により突発型 AE の事象を数えることで、現象に対する感度を上げることができることである。それには、増幅率としきい値の設定が重要となる。この設定は、対象とする現象に合わせて設定する必要がある。例えば、移着現象を対象とする場合、摩耗素子は非常に微細であり、その移着を検出するためにはできる限り増幅した方がよい。そして、しきい値はできる限り背景雑音レベルに近い方が好ましい。一方、本研究のような無潤滑繰返し摩擦では、非常に現象が激しいため増幅率が大きいと逆に複雑になってしまう。したがって、第3章で適用したように増幅率を少し下げ、移着現象による AE を無視し、摩耗粒子の脱落のような大きな現象を対象とした方がよい場合もある。これは、しきい値の設定によっても可能である。これらに、フィルタ処理を組み合わせることで、現象を絞った計測が可能になると考えられる。特に定量的な評価をする場合は、AE センサ特性、計測系の AE 伝播特性、材料の AE 特性をも考慮に入れなければならない。

以下に、これらの検討項目について著者の知見を述べる。まず AE センサの選択に関して述べる。AE 計測は共振点を有効に利用する計測方法であるため、凝着摩耗形態の AE 信号は 1~1.5 MHz、アブレイブ摩耗形態の AE 信号は 500 kHz~1.5 MHz に特徴を示す<sup>11)</sup>ことから、1 MHz 付近に共振点をもつものがよいと考えられる。ただし、周波数特性はできる限り平坦なものを選択するのが好ましい (Fig. 2.6 参照)。

AE 伝播特性は計測系および材料に左右され、AE 源から離れると AE 信号は小さくなり接合面を通過すると減衰する。また、AE センサ取り付け時のその接触面積の影響があり、押付け力が小さいと信号が正確に検出されない<sup>13)</sup>。さらには、AE センサの特性、AE 信号の増幅およびフィルタ処理などにより、AE 源の信号量が計測系によって異なる。よって、一般的な AE 信号量

として統一して論議することが困難となってしまう。そこで、シャープペンシル用芯の圧折による AE センサの感度劣化測定方法がある<sup>14)</sup>。このシャープペンシル用芯の圧折によって発生する AE 波は、AE 標準音源として多用されている。この測定方法を利用して、

$$\Delta V_{AE} = \frac{V_{out}}{V_{pencil}} \quad (8.7)$$

を考える。ここで、 $\Delta V_{AE}$  は AE 信号校正值、 $V_{out}$  は計測される AE 信号電圧値、 $V_{pencil}$  はシャープペンシル用芯の圧折時に計測された電圧値と定義する。これは芯破壊による AE 信号を 1 とする考えである。式 (8.7) を利用すれば、芯の破壊による入力は同一であるから、校正後の値を計測系に関わらず統一できると考える。実機によっては、この測定方法を用いることが困難な場合があると考えられるが、AE 源から計測点までの距離となる材料厚さに関するその AE 信号の減衰特性を調べておくことで解決できよう。しかし、AE センサの周波数特性そのものが統一できないため、類似した周波数特性をもつ AE センサを使用することが求められる。

材料の AE 特性は、材料試験によって AE 信号を計測し、その破壊機構と発生した AE 信号の関連性から求められるべきであろう。AE と材料特性の関係の研究はいくつかなされている<sup>14,15)</sup>が、材料の結晶状態や初期欠陥など数多くの因子が影響し一概ではないと考えられる。したがって、実際に用いる材料を材料試験にかけ AE 信号を計測することによる方法が有効と考える。

AE によって摩擦・摩耗現象の激しさなどの状態を知ること、いわゆる定性的評価は十分可能である。しかし、トライボロジー特性の評価（例えば、摩耗量の推定や摩耗形態図の作成など）を行うためには、さらなる摩擦・摩耗現象と AE 信号の対応関係の解明、評価方法の考案など、多くの課題が残されている。

## 8.6 結 言

本章では、AE法を摩擦・摩耗現象の認識・評価に応用するため、本実験で得られた結果からAE評価パラメータとトライボロジー特性との相関関係を統括した。また、総合的な摩擦・摩耗現象の認識・評価のために、摩耗-AE相関図の作成および検討を行った。さらに、AE法を用いたトライボロジー特性の評価方法の指針について述べた。本章で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) AE平均値は比摩耗量と比例関係にあり、またAE平均値電圧自体は微分比摩耗量と比例関係があることを示した。これは、AE平均値電圧の積分値であるAE総エネルギーと摩耗量が相関関係にあり、比摩耗量が摩耗量の微分的意味を含むことから説明できる。
- (2) 摩耗-AE相関図を作成し、この相関図を用いてAE平均値から比摩耗量や摩耗係数の推測ができることを示した。比摩耗量や摩耗係数は逐次変化する摩耗現象の程度を意味しており、摩擦・摩耗現象の認識・評価に有効なパラメータであることから、作成した摩耗-AE相関図は有意であるといえる。
- (3) 摩耗形態によってAE周波数に特徴が現れる。このことから、AE周波数によって摩耗形態（凝着摩耗、マイルド摩耗、アブレシブ摩耗）の判別が可能である。逆に、各摩耗形態に対応したAE信号を周波数により弁別することも可能である。
- (4) AE法を用いたトライボロジー特性の評価方法の指針についてまとめた。ここで、計測に関わる様々な問題点に対する解決方法や解決案など、筆者の知見を統括することができた。

< 文 献 >

- 1) I.A. Inman, P.S. Datta: “Development of a Simple ‘Temperature Versus Sliding Speed’ Wear Map for the Sliding Wear Behaviour of Dissimilar Metallic Interfaces II”, *Wear*, 265 (2008) pp. 1592–1605.
- 2) M.M. Stack, H. Jawan, M.T. Mathew: “Development of a Simple ‘On the Construction of Micro-Abrasion Maps for a Steel/Polymer Couple in Corrosive Environments’”, *Tribology International*, 38 (2005) pp. 848–856.
- 3) A. R. Riahi, A. T. Alpas: “Wear Map for Grey Cast Iron”, *Wear*, 255 (2003) pp. 401–409.
- 4) 堀切川一男: 「摩耗形態図に関する最近の研究」, *トライボロジスト*, 37, 10 (1992) pp. 799–805.
- 5) 第2章15)と同じ.
- 6) 那須野悟: 「粉粒体の運動と摩擦」, *トライボロジスト*, 44, 10 (1999) pp. 778–784.
- 7) 早川尚男・西森 拓・佐々真一・田口善弘: 「粉体の物理とパターン形成」, *日本物理学会誌*, 49, 1 (1994) pp. 18–25.
- 8) E. Rabinowicz: “New Coefficients Predict Wear of Metal Parts”, *Prod. Eng.*, 29, 25 (1958) pp. 71–73.
- 9) S. Ramadan, L. Gaillet, C. Tessier, H. Idrissi: “Detection of Stress Corrosion Cracking of High-Strength Steel Used in Prestressed Concrete Structures by Acoustic Emission Technique”, *Appl. Surface Science*, 254 (2008) pp. 2255–2261.
- 10) 第7章の11)と同じ.
- 11) 第2章の8)と同じ.
- 12) K.-H. Chung, J.-K. Oh, J.-T. Moon, D.-E. Kim: “Particle Monitoring Method Using Acoustic Emission Signal for Analysis of Slider/Disk/Particle Interaction”, *Tribology International*, 37 (2004) pp. 849–857.
- 13) 稲崎一郎: 「加工プロセス監視におけるアコースティックエミッションの

利用」, 機械技術, 32, 5 (1984) pp. 36–40.

- 14) 日本非破壊検査協会規格 (NDIS) : 「アコースティックエミッション変換子の感度劣化測定方法」, NDIS 2110 (1997) .
- 15) 羽田野甫 : 「アコースティックエミッション (AE) とその応用 材料の AE 特性」, 電気学会雑誌, 96, 4 (1976) pp. 273–276.
- 16) 栗林一彦・岸 輝雄 : 「塑性変形に伴う AE とその解釈 (2)」, 金属, 47, 8 (1977) pp. 64–67.

## 第9章 結 論

本論文では、すべり摩擦下の凝着摩耗（シビア摩耗およびマイルド摩耗）とアブレイブ摩耗に関して、巨視的現象から微視的現象までの摩擦・摩耗現象と AE 信号との相関関係について定量的評価を意識した検討を行った。そして、得られた相関関係から摩擦・摩耗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った。

具体的な結果に関しては各章の結言に記してあるが、本章ではそれらを統括し、今後の課題と展望を論じている。

### 9.1 本研究の成果

本研究では、摩擦条件や摩擦方式を工夫することによって様々な摩耗形態を再現し、そこでの摩擦・摩耗現象と AE 信号との相関関係について論議してきた。また、数種類のピン試験片材料を供試することで、材料特性との関係を調べた。第1章では、メンテナンストライボロジーの重要性と AE 法の有用性および本研究分野の現状を述べ、特性要因図を作成して相互の影響因子を明らかにした。第2章～第8章において得られた結果を要約すると以下のようなになる。

第2章においては、摩擦速度および相対湿度の異なる条件により、シビア摩耗およびマイルド摩耗現象を再現させた。そして、それぞれの摩耗現象と AE 信号の対応について論議した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) AE 平均値の変化は、摩擦係数の変化に比べ、シビア摩耗およびマイルド摩耗現象の相違をよく認識できる。
- (2) シビア摩耗時は AE 信号レベルおよび AE 信号の変動幅が大きく、マイルド摩耗時はその逆の傾向を示す。
- (3) AE 平均値の振幅変動幅（標準偏差）は、摩擦界面の損傷（両摩擦面の

算術平均粗さ  $Ra$  の和) に比例関係する。よって、AE 平均値の振幅変動幅から摩擦界面の損傷状態を監視できる。

- (4) シビア摩耗およびマイルド摩耗に関して、微分比摩耗量と AE 平均値の間に線形関係が認められる。そのため、AE 平均値より微分比摩耗量すなわち摩耗量の逐次経過を監視できる。
- (5) 摩擦速度によって摩耗形態や摩耗粒子形態などの摩耗現象が変化する場合、その摩耗現象の変化が AE 信号に大きな影響を与える。

第3章においては、無潤滑の繰返し摩擦で巨視的かつ加速的な凝着摩耗を再現し、摩耗粒子形態の違いによる AE 信号の特徴と AE 信号の根源について検討を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) AE 計数率 (または AE 平均値) の振幅値および AE 計数率の振幅変動幅の特徴から、摩耗粒子形態の判別が可能である。
- (2) AE 計数率の振幅変動幅 (標準偏差) は、摩擦界面の損傷 (両摩擦面の算術平均粗さ  $Ra$  の和) に比例する。よって、AE 計数率の振幅変動幅から摩擦界面の損傷状態を監視できる。
- (3) AE 法は、摩耗粒子の生成過程のような摩擦係数の変化にはほとんど現れない現象を検出できる。
- (4) AE 計数総数と生成した総摩耗粒子数の間により相関関係がある。
- (5) 摩耗粒子の生成により生じる弾性ひずみエネルギーと AE 平均値の間に負の相関関係が認められた。この関係から、AE 平均値の計測から摩擦界面の状況を評価できる。

第4章においては、無潤滑下および潤滑下の片処女面摩擦で移着成長初期過程の移着現象を再現し、そこで得られる AE 信号と摩擦・摩耗現象との関係を検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) AE 平均値は、表面粗さ  $Ra$ ,  $Rz$  と非常により相関関係にあり、摩擦界面の表面損傷状態の評価に有効である。

- (2) 摩耗（移着）にともなって発生する AE は、摩擦速度の影響を受ける。
- (3) 移着現象における単位摩耗量あたりの AE エネルギーは、材料硬さに比例する材料固有の値となり、これを用いて摩耗量の推定が可能といえる。
- (4) 移着現象における AE 総エネルギーと摩耗量との関係式を導出できた。

第5章においては、潤滑下の片処女面摩擦で純粋な切削現象（アブレシブ摩耗）を再現し、そこで得られる AE 信号と摩擦・摩耗現象との関係を検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 切削現象で得られる AE 信号レベルは、移着現象と比較して AE 平均値で約 1/10, 単位摩耗量あたりの AE エネルギーで約 1/1000 と小さい。
- (2) アブレシブ摩耗における単位摩耗量あたりの AE エネルギーは、材料の縦弾性係数と相関が得られる。
- (3) アブレシブ摩耗で得られる AE 信号は、形成される溝傾斜部長さの総和およびせん断領域総面積と相関がある。
- (4) アブレシブ摩耗における AE 総エネルギーと摩耗量との関係式を導出できた。

第6章においては、摩擦・摩耗素過程における AE 源を明らかにするため、摩擦現象、摩耗現象、切削現象にそれぞれ焦点を当てた in-situ 観察実験を行った。そこで、摩擦界面で起こる表面の変形や破壊と AE 信号の対応関係を調査した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 摩擦過程では、摩擦に伴う表面結晶粒内のすべり系の進展に起因する小振幅の連続型 AE 信号が生じる。
- (2) すべり線（帯）の生成に起因する AE 信号以外に、摩擦面の急激な塑性変形や摩耗に起因した大きな突発型 AE 信号が生じる。
- (3) 凝着摩耗過程では、主として摩耗素子の生成・移着に起因する小振幅の連続型 AE 信号が検出される。

- (4) 摩擦界面において集合・合体して移着粒子が形成される際に、大きな突発型 AE 信号が発生する。そして、移着粒子が再度移着・排出される際に、移着粒子形成時より小さな突発型 AE 信号が発生する。
- (5) アブレイブ摩耗過程では、摩擦に伴うすべり線の生成に加え、摩耗粒子生成時のせん断すべり変形に起因した小振幅の連続型 AE 信号が発生する。また、摩耗粒子の生成開始時および脱落時に大振幅の突発型 AE 信号が検出される。

第7章においては、凝着摩耗およびアブレイブ摩耗のそれぞれの摩耗形態を微小すべり摩擦試験で再現させ、微視的な摩耗現象と AE 信号の関係を調べた。そして、微視的な摩耗で生じる AE 信号波形と周波数分布に関して論議を行った。また、摩耗素子の大きさ・量や影響因子について得られた知見をまとめた。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 摩耗素子の大きさは材料固有であり、直径 10~30 nm の範囲にある。
- (2) 生成する摩耗素子数は、摩擦させた材料間の凝着力に比例する。
- (3) 凝着摩耗では、1.1 MHz 付近に周波数ピークをもつ信号密度の高い高周波の突発型 AE 信号が検出される。
- (4) AE パルスは摩耗素子の集団移着によって生じ、この AE パルスエネルギーの大きさは、摩耗素子の生成量と比例関係にある。
- (5) アブレイブ摩耗では、0.25~1 MHz に周波数ピークをもつ信号密度の低い低周波の突発型 AE 信号が検出される。

第8章においては、AE 法を摩擦・摩耗現象の認識・評価に応用するため、本実験で得られた結果から AE 評価パラメータとトライボロジー特性との相関関係を統括した。また、摩耗-AE 相関図の作成および検討を行い、AE 法を用いたトライボロジー特性の評価方法の指針について述べた。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) AE 平均値は比摩耗量と比例関係にあり、また AE 平均値電圧自体は微

- 分比摩耗量と比例関係がある.
- (2) 摩耗-AE 特性相関図を作成し, この相関図を用いて AE 平均値から比摩耗量や摩耗係数の推測ができる.
  - (3) 摩耗形態により AE 周波数の特徴が異なるため, AE 周波数から摩耗形態の判別や各摩耗形態に対応する AE 信号の弁別が可能である.
  - (4) AE を用いたトライボロジー特性の評価方法の指針について筆者の知見をまとめた.

以上, 本研究で得られたトライボロジー特性と AE 評価パラメータの対応関係および摩擦・摩耗過程における AE 源に関する知見を Fig. 9.1 と Fig. 9.2 にそれぞれまとめる.

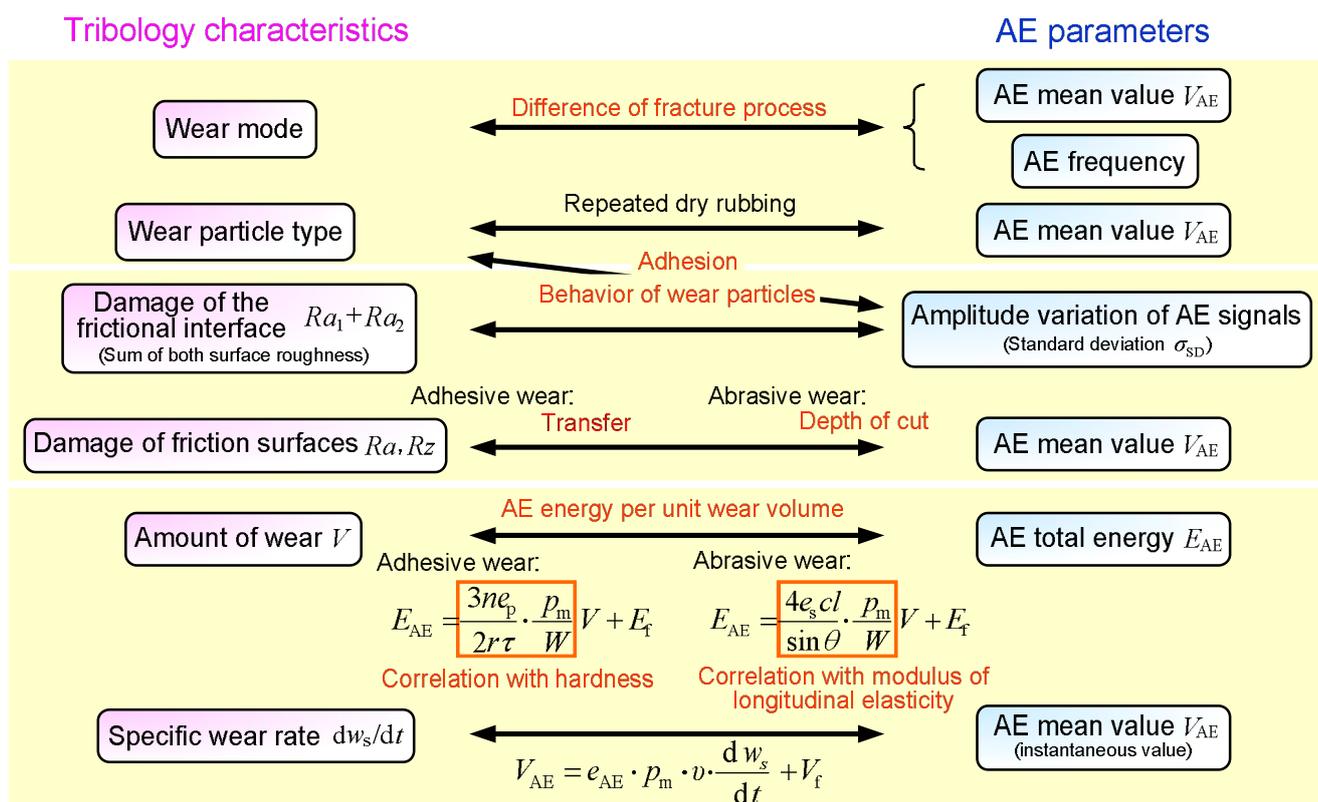


Fig. 9.1 Relationship between tribology characteristics and AE parameters.

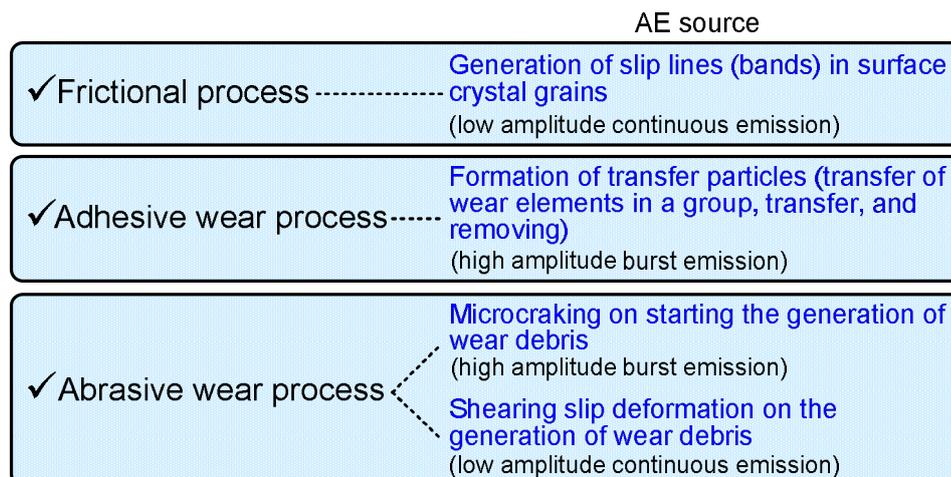


Fig. 9.2 AE sources under friction and wear processes.

## 9.2 今後の課題および展望

本研究では，AE 法を摩擦・摩耗現象の認識・評価に適用するため，それぞれの相関関係をできる限り定量的に検討してきた．そして，今まで困難とされてきた摩耗量のインプロセス計測が，AE 計測によって可能であることを示すことができた．また，微視的な現象から巨視的な現象まで幅広い摩擦・摩耗現象の認識・評価が可能であることを示した．工業的に摩擦・摩耗現象の認識・評価はとても重要であるが，現象が難解であるためか対策がなされにくいのが現状であると思われる．その点，この AE 法による摩擦・摩耗現象の認識・評価は大変有望であると考えられる．

AE 自体を一般化して論議する場合，AE センサの周波数特性などの AE 計測系に依存してしまい，全く同様のケースとして扱えないことが考えられる．したがって，このような問題が生じないよう AE 計測の一般化（規格化）が必要であろう．現在，国際標準化機構（ISO）や非破壊検査協会（NDIS）において，一部の規格化はなされているが十分ではないと考える．また，様々な材料特性と AE 信号との関係，いわゆる材料の AE 特性のデータベース化が必要不可欠である．AE 法が確立されれば，逆に摩擦・摩耗現象の解明にも応用することも期待できよう．

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々にお世話になりました。ここに深甚な万謝をささげる次第であります。

研究活動全般にわたり、格別なるご指導とご高配を賜った千葉大学大学院工学研究科准教授 三科博司 博士に甚大なる感謝の意を表し上げます。先生には研究のやり甲斐と面白さを常に私に示してくださり、それが私の研究者としての人格形成に大いにプラスになりました。そして、この3年間で幅広く様々な研究課題を遂行することのできる問題解決能力を身に付けることができました。誠にありがとうございました。今後も先生の意思を継ぎ、様々なトライボロジー現象の解明に取り組み、一人の研究者として社会に貢献していく所存です。

そして、職業能力開発総合大学校 精密機械システム工学科准教授 和田正毅 博士には研究のきっかけを与えていただき、深甚な感謝の意を表し上げます。博士課程における研究力の基礎を築くことができたのは、学部および修士課程において、先生の熱心なご指導があったからに他なりません。博士課程進学後もご助言や激励の言葉をいただき、本研究を遂行する原動力となりました。本当にありがとうございました。

また、研究に際して有益なご助言とご教示をいただきました千葉大学大学院 工学研究科教授 中本 剛 博士、助教 大森達夫 博士に厚く謝意を申し述べます。合同研究発表会等での先生方との質疑応答や意見交換を通じて、マイクロ工学に関して幅広い視野や知識を得ることができました。大変感謝しております。

なお、本研究の実験装置の製作にあたり、ご指導ご協力をいただきました職業能力開発総合大学校 精密機械システム工学科 米山 實 元准教授に心よりお礼申し上げます。また、実験試料の熱処理のために真空炉の使用に際してご便宜を図っていただきました東京理科大学 機械工学科教授 佐々木信也 博士、産業技術総合研究所 トライボロジー研究グループ 村上 敬 博士、

間野大樹 博士に心よりお礼申し上げます。さらに、原子間力顕微鏡の使用に際してご便宜を図っていただきました理化学研究所 ビームアプリケーションチーム 渡辺 剛 博士に厚くお礼申し上げます。

本実験を進めるにあたり、協力をいただいた当時職業能力開発総合大学校の学生であった渡邊達也 学士，当時千葉大学大学院 自然科学研究科の学生であった土肥雅人 修士，千葉大学大学院工学研究科 佐藤悠樹 学士，岩瀬勇人 学士に深く感謝致します。また，ゼミの輪講や研究中間発表会等を通じて様々な意見等をいただいた千葉大学 マイクロ工学研究室ならびに職業能力開発総合大学校 和田研究室の関係各位に謝意を表します。

研究活動費においては，日本学術振興会 平成 19～20 年度科学研究費補助金〔基盤研究 (C)，課題番号：19560134〕，日本学術振興会 平成 20 年度科学研究費補助金 (特別研究員奨励費)，倉田記念日立科学技術財団 平成 19 年度第 40 回倉田奨励金，千葉大学 平成 19 年度研究支援プログラム (若手助成 A)，千葉大学 平成 20 年度大学院学生の国際研究集会等派遣支援プログラム，千葉大学 平成 20 年度 AGSST 博士後期課程学生の研究集会参加・発表支援プログラムからご支援をいただきました。記してここに感謝の意を表します。

さらに，“摩耗”の世界に興味を持つきっかけを与えていただいた東京工業大学名誉教授 笹田 直 博士に低頭して感謝申し上げます。先生の学術論文および学会講演等にいつも感銘を受け，研究を進める動機の一つとなっていたことは間違いありません。今後さらに，科学としての摩耗の究明に邁進していきたい所存です。

最後に，これまでの長い学生生活を温かく見守り続け，陰ながら励まし支えてくれた家族に深く感謝致します。

平成 21 年 1 月

長谷 亜蘭



## 論文目録

## 既公表論文(著者名:論文名, 発表誌, 巻, 号, 頁, 発表年月)

1. 長谷亜蘭・和田正毅・広田平一:「凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関」, トライボロジスト, 第 50 巻, 第 11 号, pp. 808–815, 2005 年 11 月
2. 長谷亜蘭・和田正毅・三科博司:「アブレシブ摩耗現象と AE 信号の相関」, トライボロジスト, 第 51 巻, 第 10 号, pp. 752–759, 2006 年 10 月
3. A. Hase, M. Wada, H. Mishina: “The Relationship between Acoustic Emissions and Wear Particles for Repeated Dry Rubbing”, Wear, Vol. 265, No. 5-6, pp. 831–839, Aug. 2008
4. A. Hase, M. Wada, H. Mishina: “Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition”, Tribology Online, Vol. 3, No. 5, pp. 298–303, Oct. 2008
5. 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, pp. 3042–3049, 2008 年 12 月

## 解説記事

1. 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, pp. 20–23, 2008 年 8 月

## 紀要論文

1. 長谷亜蘭・和田正毅・広田平一:「無潤滑繰返し摩擦におけるトライボロジー現象と AE 信号の相関」, 職業能力開発総合大学校紀要 A 理工学・技能編, 第 35 号, pp. 19–27, 2006 年 3 月

2. 長谷亜蘭・三科博司・和田正毅：「旋削加工で生じるアコースティックエミッション」, 職業能力開発総合大学校紀要 A 理工学・技能編, 第 37 号, pp. 51–57, 2008 年 3 月

#### 国際会議講演論文

1. A. Hase, M. Wada, H. Mishina: “Correlation of Acoustic Emission Signals and Tribological Characteristics”, Proc. of the 3<sup>rd</sup> Asia Int. Conf. on Tribology, Kanazawa, pp. 123–124, Oct. 2006
2. A. Hase, H. Mishina: “Wear Elements Generated in the Elementary Process of Wear”, Proc. of the 35<sup>th</sup> Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, Paper XXVIII (iii), Sep. 2008
3. A. Hase, H. Mishina: “Magnetization of Friction Surfaces and Wear Particles under Tribological Processes”, Proc. of the 5<sup>th</sup> CIST2008 & 1<sup>st</sup> ITS-IFTtoMM2008, Beijing, CD-ROM Sub2-256, Sep. 2008
4. A. Hase, Y. Sato, H. Mishina, M. Wada: “Acoustic Emission Generated in the Elementary Process of Wear”, Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Advanced Tribology, Singapore, pp. 203–205, Dec. 2008

#### 講演論文

1. 長谷亜蘭・和田正毅・広田平一：「アコースティックエミッションを用いた旋削加工状態の認識に関する研究—切りくず形態と AE 信号との相関—」, 第 13 回職業能力開発研究発表講演会予稿集, 第 13 巻, pp.45-46, 2005 年 11 月
2. 長谷亜蘭・和田正毅・広田平一・三科博司：「移着現象における AE を用いたトライボロジー特性の評価」, トライボロジー会議予稿集 東京 2005-11, pp. 155–156, 2005 年 11 月
3. 長谷亜蘭・和田正毅：「アコースティックエミッション法の旋削加工状態認識への適用」, 2006 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp. 377–378, 2006 年 3 月

4. 長谷亜蘭・和田正毅・三科博司：「アブレイブ摩耗における AE を用いたトライボロジー特性の評価」, トライボロジー会議予稿集 東京 2006-5, pp. 109–110, 2006 年 5 月
5. 松田三央子・長谷亜蘭・和田正毅：「アコースティックエミッションを用いた旋削加工状態監視に関する研究」, 2007 年度精密工学会春季大会第 14 回学生会員卒業研究発表会講演会, N-01, 2007 年 3 月
6. 土肥雅人・長谷亜蘭・三科博司：「強磁性体表面における摩擦磁化」, トライボロジー会議予稿集 東京 2007-5, pp. 103–104, 2007 年 5 月
7. 長谷亜蘭・和田正毅・三科博司：「無潤滑繰返し摩擦で生じるアコースティックエミッションの一考察」, トライボロジー会議予稿集 東京 2007-5, pp. 101–102, 2007 年 5 月
8. 長谷亜蘭・和田正毅・三科博司：「アコースティックエミッション法による旋削加工状態の認識に関する研究—切りくず生成過程と工具摩耗の評価—」, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol.4, pp. 233–234, 2007 年 9 月
9. 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 (第 1 報) —摩擦に伴う表面の変形と AE 信号—」, トライボロジー会議予稿集 佐賀 2007-9, pp. 231–232, 2007 年 9 月
10. 長谷亜蘭・土肥雅人・三科博司：「摩擦磁化機構の解明に関する研究—摩擦表面および摩耗粒子の磁化—」, 日本機械学会関東支部第 14 期総会講演会講演論文集, No.080-1, pp. 39–40, 2008 年 3 月
11. 長谷亜蘭・土肥雅人・三科博司・渡辺 剛：「強磁性体摩耗粒子および摩擦面の磁気力顕微鏡観察」, 春季第 55 回応用物理学関係連合講演会講演論文集, No. 1, p. 475, 2008 年 3 月
12. 長谷亜蘭・三科博司：「微小すべり摩擦試験による摩耗素子の評価」, 日本機械学会第 8 回機素潤滑部門講演会講演論文集, No. 08-12, pp. 39–40, 2008 年 4 月

13. 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」, トライボロジー会議予稿集 東京 2008-5, pp.13-14, 2008 年 5 月
14. 岩瀬勇人・長谷亜蘭・三科博司：「磁鉄鉱表面における摩擦磁化—純鉄表面の摩擦磁化との比較—」, トライボロジー会議予稿集 東京 2008-5, pp. 67–68, 2008 年 5 月
15. 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」, トライボロジー会議予稿集 東京 2008-5, pp. 69–70, 2008 年 5 月
16. 長谷亜蘭・三科博司：「摩耗素子の生成に及ぼす影響因子」, トライボロジー会議予稿集 名古屋 2008-9, pp. 109–110, 2008 年 9 月
17. 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—」, トライボロジー会議予稿集 名古屋 2008-9, pp. 111–112, 2008 年 9 月