

# AE 解析による摺動特性の評価法

Estimation of a Friction Property by Analysis of Acoustic Emission Signals

## キーワード

アコースティックエミッション, トライボロジー, 摩耗試験, 波形, 解析, FFT, ウェーブレット, セラミック, 鉄, サーマット

東富山製鋼所技術部  
原 恭

## 1. はじめに

耐摩耗材料を, 各種機械部品に応用しようとする場合, その信頼性を評価するには実機で使用条件を網羅した性能試験をするのが最も好ましいが, 材料の善し悪しを摩耗試験等の代用試験で判断をせまられる事も多い。そのような場合, 単に摩耗量の比較だけでなく, 代用試験における摩耗機構が何であり, 実用条件に展開した場合にそれがどう変わり得るのか, そして寿命予測としてどうなるのかという考察が欲しい。

しかし, 摩耗機構の解析は古くから多くのトライボロジー研究者にとっての永遠のテーマであり, 現在でも不明点の多い分野である。従って古くから使われている材料であれ新材料であれ, 工業的に実用化しているからといって必ずしも摩耗機構が十分に解明されているとは限らない。

摩耗機構については, 例えば表 1 に示す分類が受け入れられている。

しかし, 摩耗機構そのものは直接観察できないので, 摩耗痕や摩耗粉の観察のほか, 摩擦力, 振動, AE 信号などの各種監視データを基に推定することになる。しかし, 例えばサーメットのようなセラミックスと金属からなる複合材料と鉄系材料を摺動させる場合, 摩耗機構として金属どうしによる凝着摩耗のほか, サーマットの硬質相成分によるアプレシブ摩耗の可能性も考えられ, 金属どうしの場合よりも複雑であるようだ。セラミックスの摩耗機構については多くのメカニズムが研究報告されているが, 例えば Braza は摩耗形態としてチップング, スポーリング, 粒子の脱落, 摩耗痕跡, ポリシングについて説明し, 複雑な摩耗機構を提起している。

こういった摩耗メカニズムとの関連性が期待される監視データには, 摩擦力, 温度, 振動, AE, 電気

表 1 摩耗形態の分類

摩耗機構	内 容
凝着摩耗	摩擦面の微小突起の凝着が主原因で起こるもので, 摩耗機構上最も基本的なものである。この摩耗はさらに次のように分けられる。 ① 正常摩耗: 内容的に量的変化に応じて正常におこる凝着摩耗。 ② 融着摩耗: 荷重, 速度, 温度などの諸条件が苛酷になり, 凝着部が巨視的な大きさに発達して起こる凝着摩耗。
アプレシブ摩耗	接触面上の凹凸や, 摩擦面間に介在する硬粒子の切削効果が大きく現れる摩耗
腐食摩耗	雰囲気, 潤滑剤などによる腐食が大きく影響して起こる摩耗
疲労摩耗	主として, 転り接触下における摩耗で, 軸受や歯車などで大きな問題になっている。

抵抗等がある。それぞれに一長一短があるが, 摩耗現象に対する感性があり周辺の機械振動と区別しやすい AE 信号は, 本質的には優れた特性であると考えられる。また, 材料の非破壊検査法として一般に定着しており, 摩耗診断への応用としては 1983 年にすべり軸受の診断に用いられたのに始まり, その後今日に至るまで摩擦摩耗現象における AE 信号特性が多くの研究者らによって発表されてきた。しかし, 解析装置が比較的高価なものと, 信号処理がやや面倒なので摩擦摩耗現象の診断応用事例は少ない。

## 2. サーマットの摺動部材への応用

TiCN 系サーメット合金は現在切削工具用スローアウェイチップ等に多く用いられており, その特長は高速切削における耐摩耗性および耐熱衝撃性にある。それを可能にしているのは, 微細な高窒素 TiCN 硬質相粒子が均一に分散することにより耐熱亀裂性, 耐塑性変形性等の熱的靱性を高める一方で, 他の構

成相である中間相，結合相，および中間相／結合相界面での機械的強度を確保する成分バランスがなされることによる。

このようなサーメット合金を摺動部品に使用する場合，相手材との親和性が影響するとされる凝着摩耗に関しては高窒素であることが有効と思われるが，ミクロ的に脱落した粒子，結合金属などの影響を考えると，成分の効果は複雑であると思われる。しかしながら切削工具材料としての諸特性の改善の最大のポイントは高窒素化であったことを振り返るならば，摩擦摩耗特性の研究においても窒素の効果調べる価値は大きいであろう。

スローアウェイチップ用サーメットは，その用途分類別には，耐摩耗性重視の仕上げ切削用から強靱タイプと言われる断続重切削用までであるが，前者には TiCN（以下コアと呼ぶ）中窒素量が 30% 以下と比較的少ないものが，また，後者の靱性重視のものにはコア中窒素量が約 50% 近い材種が用いられることが多い。

今回はこれらを踏まえ，コア中窒素量の多いものと少ないもので比較試験を行ったので報告する。

## 3. 試験装置

### 3.1 摩擦摩耗試験機本体

摩擦摩耗試験機の概要を図 1 に示す。

基本構造は回転する円筒リングの外周面に対して線接触する直方体の試料を所定の荷重で押さえつけるローラーチップ式である。回転数は 20~2000rpm まで設定でき，ローラー外径寸法が 30mm の場合，周速で最大約 3m/s が可能である。試料の押しつけ

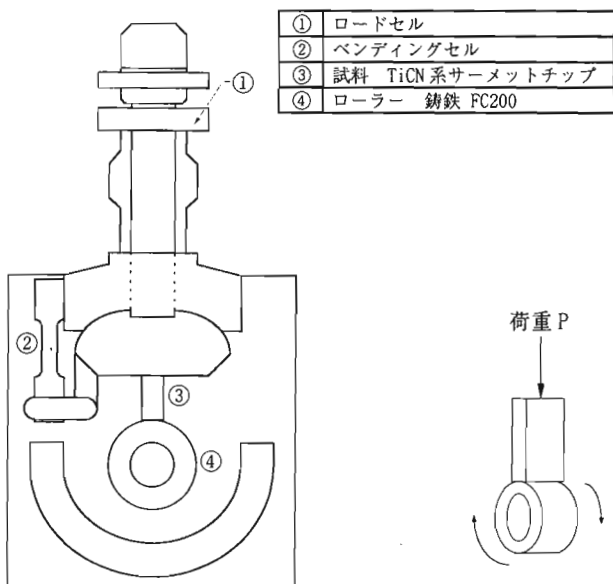


図 1 摩擦摩耗試験機

荷重は，約 10N~1000N の範囲で調整できる。

摩擦力の測定は試料ホルダーを支えているベンディングセルを介して行われ，最大 500N まで測定可能である。

### 3.2 AE 信号測定部概要

摺動部で発生した AE 信号は，試料側面にワックスを介して接着された AE センサーによって電気信号に変換された後，解析される。AE 信号の解析装置の概要を図 2 に示す。

AE センサーで補足された信号は，まず直流増幅器で 40db 増幅後，ハイパスフィルターにて 100KHz 以下の低周波数成分を除去し，再度 30db 増幅して，解析の為の原波形を得る。従って，全体としては約 70db の増幅率である。原波形は，イベント解析装置にかけられるが，そこでは AE のカウント数が予め設定した条件に従って自動的に記録される。また別に，原波形の周波数解析も行うが，これは既に採取してある波形信号を後からオフラインで処理するという方式である。

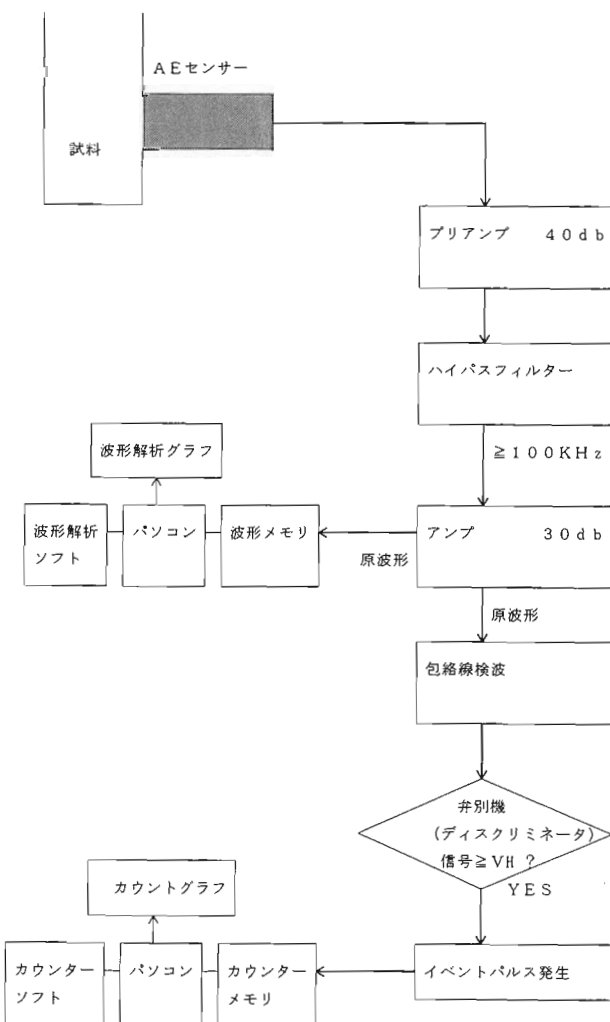


図 2 AE 信号解析装置

表2 AE信号の解析方法

名称	内容	
イベント解析	原波形 → 包絡線検波	弁別 → カウント
ウェーブレット	原波形 → 周波数分布×経時変化	
波形解析	FFT → 周波数分布	

イベントの計数手順は表2に示す様に、原波形の細かい振幅をなだらかな線で結んだ包絡線検波波形が、予め設定してある基準レベルを越えてから元のレベルまで戻るまでを1イベントとカウントすることによって行う。

原波形の周波数解析方法は、ウェーブレット解析による。すなわち時間とともに周波数分布が変化する様子を波形1つ1つの精度で観察可能である。従来からAEの波形解析に使われるFFTによる周波数解析よりも周波数の精度は落ちるが、瞬間的な変化を捕らえるので、摩耗機構におけるミクロ的な違いも反映したデータが期待できる。

#### 4. 試験条件および試験結果

TiCN系サーメットの代表として、コア中空素量の少ない30%程度のサーメットAおよび同50%のサーメットBを用いて2種類のチップを作製した。相手材としてはいずれも铸铁FC200製リングを使用し、表3に示す試験条件にて摩擦摩耗試験を行った。

表3 試験条件

項目	内容
荷重	40 N
摩擦速度	0.1 m/sec
雰囲気	大気中
潤滑条件	無潤滑
試料接触長	10 mm
摩擦距離	1000 m

サーメットAおよびBの摩擦力特性をそれぞれ図3、図4に示す。摩擦開始と同時に約4Nまで急速に上昇した後、漸増傾向の期間を経てからは、高摩擦力と低摩擦力の間を往復する異常変動状態に至る。

摩耗減量を表4に示す。サーメット自体の摩耗量に差は見られないが、相手材である铸铁において、サーメットAの場合はBの場合に比べて10倍近く摩耗している。

サーメットAおよびBのイベント計数率をそれぞれ図5、図8に示す。摩擦開始後から1500sec(摩擦距離で約150m, 以下同様)摩擦力の異常変動状態に対応する後半部分でカウント数が特に大きい。但し、

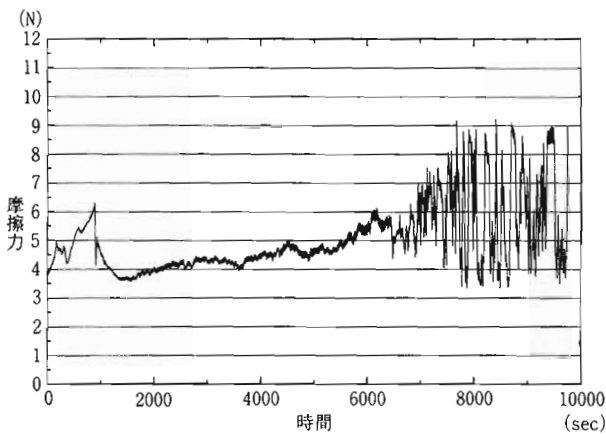


図3 サーメット A の摩擦力特性

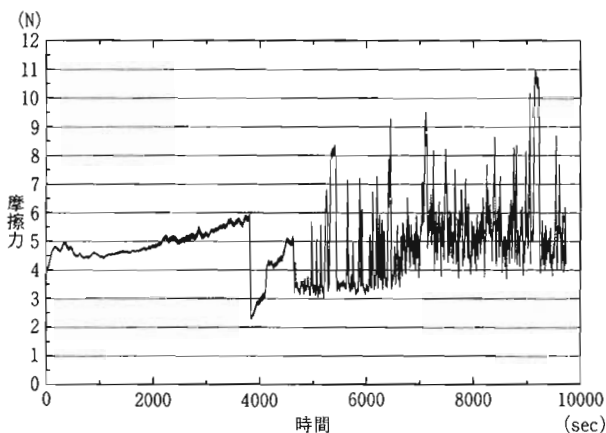


図4 サーメット B の摩擦力特性

表4 摩耗減量

チップ	ローラー	合計
サーメット A 0.7 mg	FC 200 4.5 mg	5.2 mg
サーメット B 0.7 mg	FC 200 0.4 mg	1.1 mg

異常変動状態の部分では波形振幅が振り切れたので、電氣的にベースラインがシフトした関係で実際よりもイベントのカウン数が小さく表示されていると思われる。

サーメット A のイベント計数率の多い代表部分として、(イ部) および (ロ部) の AE 波形解析例を図 6 および図 7 に示す。

図 6 の上段には、イ部、すなはち摩擦開始後 180sec (18m) における AE 信号の増幅波形を示す。図中の左端から約 5.3msec 後に瞬間的なピークが見られ、これが突発的 AE と見なされる。このようなピークと同様な波形はいくつか見られるが、これらのピークのうち、所定の電圧をこえるものをイベントとし

てカウントし、1sec 毎に集計したのが、図 5 である。

さて、図 6 の上段の波形において 2 本の赤線で区切られた部分をウェーブレット解析したものを下段に示す。下段グラフの横軸は上段グラフの横軸上 5.22~5.42msec の赤線範囲を拡大したものであり、縦軸は周波数である。色別は強度を示しており、大きくなるに従って青から赤に変わる。従って、赤い孤立領域はその瞬間および、その周波数がピークであることを示す。

同じくサーメット A の摩擦力異常変動部分における AE 信号として、ロ部すなはち摩擦開始後 6460sec 後 (646m) の増幅波形を図 7 上段に示し、更に同図中赤線で区切られた部分のウェーブレット解析グラフを下段に示す。

同様に、サーメット B のイベント計数率の多いハ部すなはち摩擦開始後 336sec (34m)、およびニ部すなはち同 4649sec (465m)、の AE 波形解析例をそれぞれ図 9、図 10 に示す。

図 6、図 7、図 9 および図 10 の各増幅波形の強度はそれぞれ異なるが、波形の輪郭はいずれも約 0.1msec で減衰するカーブである。図 10 の波形は一見ゆるやかな減衰曲線に見えるが、いくつかの細かい減衰カーブの集まったものであり、基本的には他の波形輪郭と変わらない。

図 6、図 7、図 9 および図 10 のウェーブレット波形解析グラフはそれぞれ強度が異なるのでフルスケール調整してあるが、サーメット A (イおよびロ) に見られる分布パターンと類似形状のものがサーメット B においては、やや高周波数側にシフトしている傾向が見られる。

## 5. 考察

図 3 および図 4 に共通した摩擦力の異常変動は基本的には凝着状態の変動によるものと考えられるが、成分的にはコア中の窒素含有量がより多いサーメット B の方が凝着しにくいと思われるのに、摩擦力の異常変動状態への移行のタイミングは逆にサーメット A の方が遅い。

今回の試験では、A の相手材の摩耗量は B の相手材に比べ、格段に多い事が影響していると推察するが、今後更に詳細な調査が必要である。

図 5 および図 8 のイベント信号カウン数が最初の 150sec で一旦カウン数が落ち込んでいるが、初期摩耗による AE 信号の発生が収まったと考えられる。また、A、B ともに摩擦係数の異常変動状態開始時点からイベント信号が再開しているがこの少し手前部分である摩擦距離 300 sec 時点で微小なカウン数が検出されており、摩擦面の何らかの状態変化が発生したと思われる。

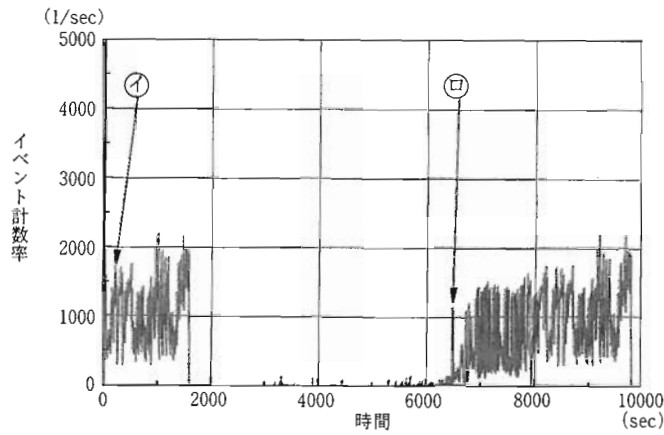


図5 サーマット A の AE イベント計数率

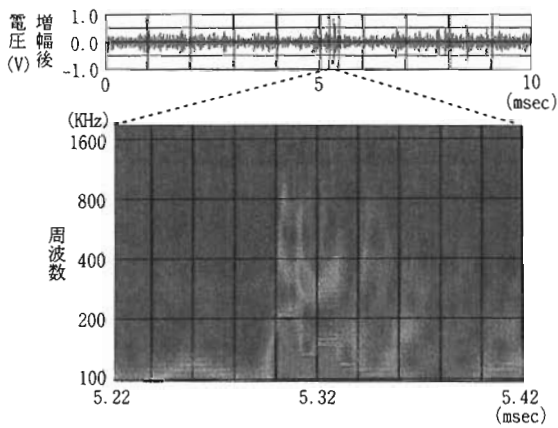


図6 サーマット A の①の時点における AE 信号波形 (上段) およびウェーブレット解析結果 (下段)

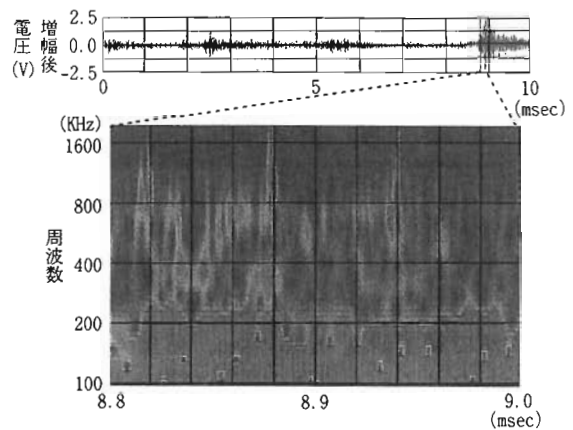


図7 サーマット A の②の時点における AE 信号波形 (上段) およびウェーブレット解析結果 (下段)

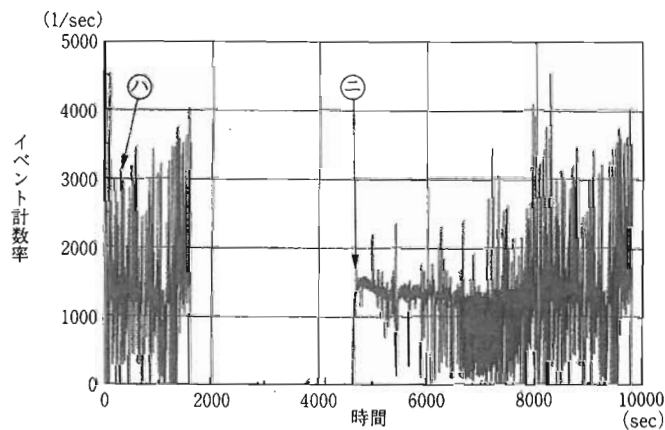


図8 サーマット B の AE イベント計数率

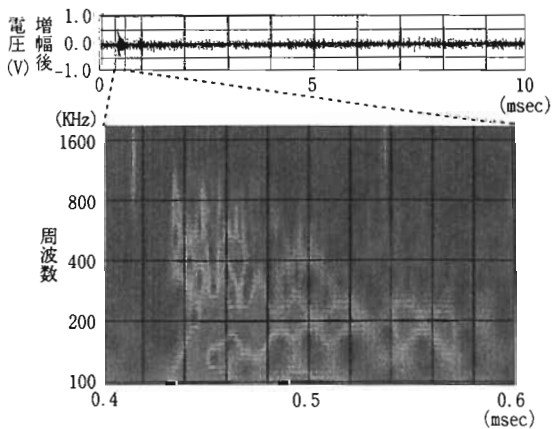


図9 サーマット B の①の時点における AE 信号波形 (上段) およびウェーブレット解析結果 (下段)

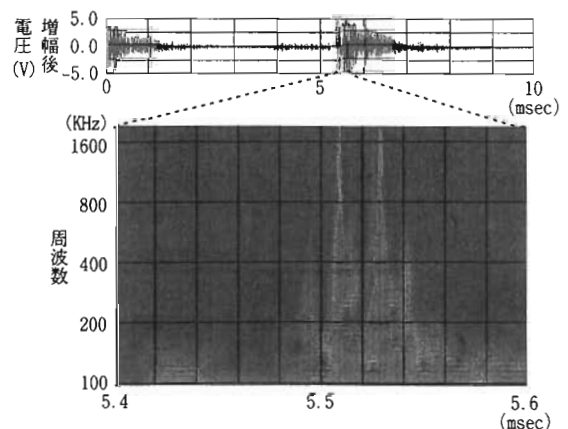


図10 サーマット B の②の時点における AE 信号波形 (上段) およびウェーブレット解析結果 (下段)

ウェーブレット波形解析結果は、AE 信号の反射等の影響を考慮すると、各イベントの先頭ピークに注目すべきと考えるが、それぞれの先頭ピーク付近に着目すると以下の特徴がある。いずれも 200KHz 以下は低周波数になるほど大きい、100KHz 以下は機械的振動の影響が大きいことと関係がある。従って 200KHz 以上の範囲でピーク位置の分布パターンを比較すると、サーメット A (図 6 および図 7) とサーメット B (図 9 および図 10) の間に違いが見いだせる。また、摩擦開始直後と摩擦力の異常変動域でも異なる。

この相違点については、今後更に定量的な解析が必要である。

## 6. まとめ

ローラーチップ式摩擦摩耗試験機を用いて、コア中の窒素含有量の異なるサーメット A (コア中窒素量 30%) およびサーメット B (同 50%) のチップと、それぞれ同じ鋳鉄 (FC200) 製リングの組合せについて無潤滑で摩擦速度 0.1m/sec, 荷重 40N の条件で試験をしたところ、以下の結果が得られた。

- (1) 摩擦力特性および AE のイベントカウント数においては、サーメット A, B 間で大きな差異は見られないが、摩擦力の異常変動に至る

時間はサーメット A の方が長い。

- (2) サーメットの摩耗量は A, B ともに差異は無かったものの、相手材の鋳鉄は A と組み合わせたほうがはるかに摩耗量が多い。
- (3) AE 信号のウェーブレット解析によると、サーメット A と B のパターンに違いがありそうである。

## 7. 終わりに

摩擦摩耗試験装置にウェーブレット解析による AE 波形解析装置をとりつけ、サーメットのコア中窒素量による差異を観測する事ができた。今後は更にデータを蓄積し、材料開発に役立てて行きたい。

AE 計測装置の導入にあたって貴重な情報を提供して頂いた群馬大学の久門輝正教授には、この場をかりて感謝申し上げます。

## 文献

- (1) 金属便覧
- (2) J.F. Braza, H.S. Cheng, M.E. Fine A.K. Gangopadhy, L.M. Keer and R.E. Worden; STLE Tribology Trans., 32 (1) (1989)
- (3) 加藤康司; トライボロジスト, 34 (2), p.88 (1988)
- (4) 佐藤式也, 米山隆雄, 井上知昭; 潤滑, 28 (12), p.872 (1983)



原 恭

1982 年 4 月入社、東富山製鋼所 PM 開発室 (現、焼結課)  
1994 年 9 月同上技術部