

## 研究ノート

## AE法による疲労き裂進展期の評価

富山職業訓練短期大学校 五島 奎一

Evaluation of Fatigue Cracks Propagation by Acoustic Emission Technique

Keiichi Goshima

**要約** Acoustic Emission とは、固体材料の変形や破壊にともなうエネルギーの開放によって発生する弾性波（音波）をさす。非破壊検査法の一つとして AE 波を電気信号に換え各種処理をおこなう計測システムが確立されている。音波を利用した試験法に超音波探傷法がよく知られるが、AE 法はき裂の発生、進展する過程をリアルタイムに計測、記録できる利点がある。

本報告では、疲労き裂進展期（第Ⅱ段階）の挙動が計数モードの一つであるリングダウン計数の挙動とよく対応することを見出した。さらに破壊力学的な視点から、応力拡大係数幅 $\Delta K$ の変化と AE 特性との関連で把握することにより、き裂進展の程度を評価する手段としての可能性を探った。高 $\Delta K$ 域におけるリングダウン係数率にかなりのバラツキをみたものの実用の可能性を示唆する実験結果を得た。

## I はじめに

金属疲労における破壊に至る過程は、まず材料表面におけるすべり線の発生が発端となる。すべり線密度の増加、成長の初期疲れ過程（第Ⅰ段階）からき裂の発生、成長、連結そして進展に至る第Ⅱ段階を経て最終には、急速にき裂が伝播し、不安定破壊に至る第Ⅲ段階で破断する、といった模型が平滑材の典型的な疲労破壊過程として示されている。特に、第Ⅱ段階のき裂進展過程の挙動が工学的な意義を含み、その評価には Paries らの破壊力学的なパラメータがよく適用される。

ところで、アコースティック・エミッション（Acoustic Emission、略して AE）とは、固体材料が変形または破壊するといった過渡現象によるひずみエネルギーの開放によって発生する弾性波（音波）を指す。したがって、AE の発生点には材料内部に何らかの欠陥を含むことが考えられ、き裂の発生、進展にも AE の発生をみることが知られている。つまり、AE の出方（例えばカウント数、周波数、波形等）は過渡現象

の微視的過程によく対応しているといわれ<sup>(1)</sup>、固体表面にセンサーを置き AE 波を電気信号に換え、非破壊検査法の一つとして各種の処理をおこなう計測システムが確立されている。特に AE 法は、き裂の発生、進展する過程をリアルタイムに計測、記録することができる試験法でもある。

本報告は、この AE 法の特質に着目し、AE の発生が疲労き裂進展期（第Ⅱ段階）の評価に適用できる可能性を検討したものである。

## II 供試材および試験方法

使用した材料は市販の SS 材とし化学成分は表 1 に示す。材料を試験片外形形状に機械加工後、900°C、1 hr 焼なましをおこなった。熱処理後の機械的性質およびフェライト結晶粒径は表 2 に示す。

図 1 は試験片を示す。熱処理後、研削加工をおこなった試験片中央に直径 1 mm のドリル孔をあけ、ワイヤーカット放電加工により 0.26×4 mm のスリットを入れた。その後、電解研磨により表面層を 0.02 mm 除去した。

表1 供試材の化学的組成

C	Si	Mn	P	S
0.10	0.03	0.48	0.01	0.01

表2 熱処理後の機械的性質および結晶粒径

引張強さのB (kgf/mm <sup>2</sup> )	降伏点のY (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び $\delta$ (%)	絞り $\phi$ (%)	フェライト結晶粒径d ( $\mu$ m)
35.8	26.4	39	52	18

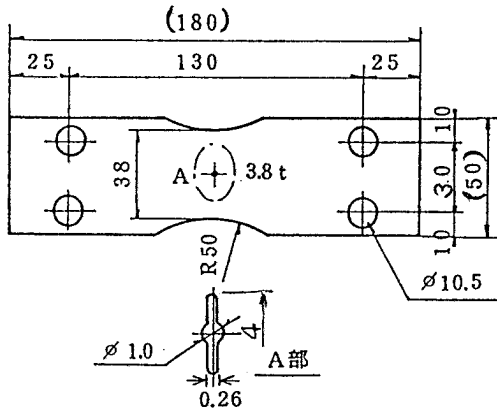


図1 試験片形状

疲れ試験機は島津製10kg f-m 曲げ・ねじり試験機TB-10B (繰返し速度33.3 Hz)を使用した。応比R = -1 (完全両振り)とし、荷重一定試験およびき裂進展期に対しては段階的に荷重を上昇させる応力拡大係数幅 $\Delta K$ 増加試験をおこないAE計数値を測定した。

### III AE計測方式および計測システム

AE発生数を計測する場合、増幅器出力のAE信号波形を一定のしきい値で弁別しデジタル信号に変換される。この場合、振幅により重みをつけ、発生した検出信号の波数をカウンタによって直接計数するリングダウン計数法(図2)と、検出信号をいったん包絡線検波した後にしきい値を越えたものを計数するイベント計数法がある(図3)<sup>(2)</sup>。

図4は本実験で採用したAE計測システムである。試験片に取付けた2個のセンサにほぼ同時に到達した

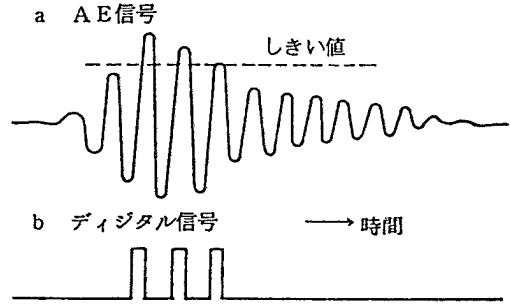


図2 リングダウン計数法

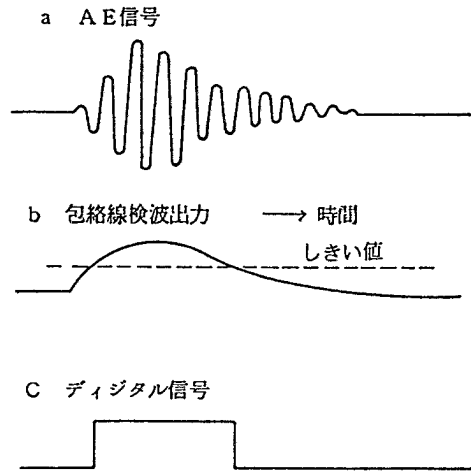


図3 イベント計数法

発生波のみをAE信号として認めるコインシデンス法で、限定された部位のAEのみを計測し不規則なノイズを除去するシステムである。

AE波は試験片に取付けせりたセンサにより電気信号に変換され、プリアンプ(利得46 dB)で増幅された後メインアンプに入力される。メインアンプ(利得50 dB)では周波数選択、増幅(可変設定)、振幅弁別されAE計数パルスが出力される。このパルスが空間フィルターに接続されて位置限定動作をおこない、トータライザーにより計数モードごとに累積計数、計数率が計数され、計数結果はアナログ出力としてペンレコーダで記録される。

本実験では、メインアンプの入力換算スライスレベルを14.3 $\mu$ V、周波数フィルターは500KHz~1 MHzの高域を選定した。またトータライザーによる計数モードは、発生するAEを累積計数としてペンレコーダに出力した。

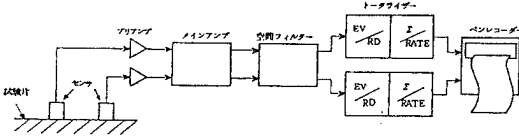


図4 AE計測システムの構成

#### IV 実験結果および考察

##### 1. 荷重一定疲れ試験における AE 発生挙動

まず、イベント計数とリングダウン計数のどちらのモードが疲労き裂進展過程に対応しているかが重要な決定課題となる。図5は、応力拡大係数幅 $\Delta K$ を変化させて両計数法を比較した実験例であるが差異が不

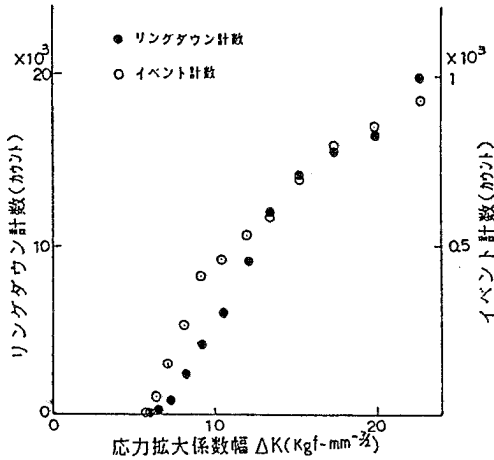


図5  $\Delta K$  に対する計数値実験例

鮮明である。ところで、応力拡大係数幅 $\Delta K$ の計算は面外曲げに対するBowieの式<sup>(3)</sup>

$$\Delta K \cong 1.005 \Delta \sigma \sqrt{a}$$

を使った。ここで $\Delta \sigma$ は応力振幅、 $a$ はスリット全長を含んで測定したき裂半長である。

つぎに、図6は試験片に一定荷重 $\Delta \sigma = 7.5 \text{ kgf/mm}^2$ を負荷し、繰返し数に対しき裂長さおよびイベントおよびリングダウン計数総数（累計数）をプロットしたものである。イベント計数総数は繰返し数に対し比例する傾向を示すが、リングダウン計数総数は定性的であるがき裂長さに対応することが読みとれる。また、き裂進展速度 $da/dN$  ( $N$ は繰返し数) に対する1繰返し数当りのリングダウン計数率 $d(RD)/dN$ を示

すと図7をみるようにほぼ直線の傾向を示す。

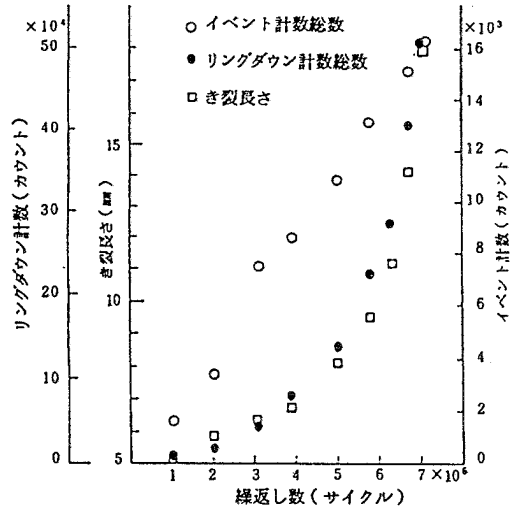


図6 荷重一定試験における繰返し数とき裂長さ、AE計数法の関係

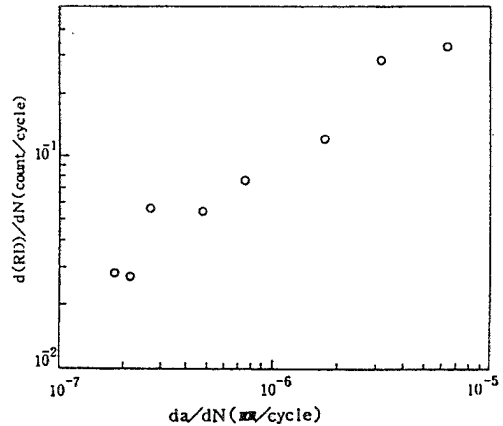


図7 き裂成長率に対する1サイクル当りのリングダウン計数率

疲労き裂進展過程のAE特性として、リングダウン計数法が定性的にき裂長さに対応し、また、き裂進展速度に直線的な相関性をもつことによりき裂進展過程の評価手段として役立つ可能性を示唆する。

##### 2. 段階的 $\Delta K$ 増加試験における AE 発生挙動

つぎに、 $\Delta K$ 増加法によるき裂試験について述べる。まず、き裂進展速度 $da/dN = 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ を得る初荷重を設定し、 $2a = 4 \text{ mm}$ までき裂を進展させる。つぎに、荷重を10%上昇させ、

$$dK_{max}/da = 10 \text{ kgfmm}^{\frac{3}{2}}/\text{mm}^{(4)}$$

の割合で $\Delta K$ を増加させるようパソコン処理し、増加した $\Delta K$ に対応するき裂長さ $a$ を算出させる。このき裂長さに達するまでの繰返し数 $N$ をカウントすることにより増加した $\Delta K$ に対する $da/dN$ が求まる。さらに荷重を段階的に10%ずつ増加させながら上記の手順を不安定破壊付近まで繰返す。 $da/dN$ の決定にはセカント法<sup>(5)</sup>を適用した。き裂長さの測定には、ストロボにてき裂進展面の静止像を得、XYテーブルに100倍の拡大鏡および最小目盛0.01mmのマイクロメータヘッドを取付けた装置を使用した。

図8は $\Delta K$ に対する $da/dN$ 、 $d(RD)/dN$ の試験結果を示す。同図から、き裂進展期の $\Delta K$ に対するき裂進展速度および1サイクル当りのリングダウン計数率は直線性を示し、勾配が近似する。Paries式

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

のべき数 $m$ がこの二者にはほぼ共通因子として考えることができる。

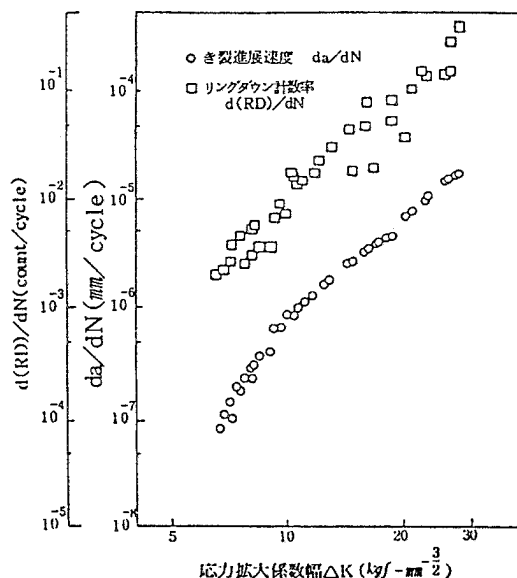


図8  $\Delta K$  に対するき裂進展速度およびリングダウン発生率

ただし、 $da/dN$ に比べ $d(RD)/dN$ の測定値にバラツキがみられる。すなわち AE 計測装置増幅器の感度を一定に設定したとしても検出感度の繰返し精度

が悪い。特に高 $\Delta K$ 域に大きなバラツキを発生させる傾向にある。

リングダウン計数法は、前述のように、振幅による重みづけの計測法であるため、き裂進展過程で発生する大振幅 AE の増加が図7でみるようにその推移を現す利点はあるが再現性に難がある。この因子として、センサーの密着状態や取付位置等による検出感度の変化といった実験方法上の問題点に加え、高 $\Delta K$ 域でき裂先端近傍に多発する微視き裂やすべり線の挙動が AE 発生時のバラツキに相乗効果を与えているものと考えられている。ただ Paries 式の  $m$  が共通因子として存在することは AE 発生時の状態からき裂進展の程度が推定されることを示唆している。ただ定量的に意味のあるデータとして使用したい場合は同一実験条件のもとに統計的な区間推定手法を採用し精度を決定する方法も考えられる。

## V おわりに

平面曲げ疲労試験機を用い、き裂進展過程に AE 法を応用した場合、その評価の妥当性は下記のように要約することができるであろう。

- (1) イベント計数方式は AE 信号の振幅による重みづけが薄いき裂長さの変化に対応しない。
- (2) リングダウン計数方式はき裂長さの変化によく対応し、 $da/dN$  と  $d(RD)/dN$  には高い相関性を示す。これは AE 信号の出方によってき裂進展状態を推定できることを示唆する。
- (3)  $\Delta K$  増加試験においても  $da/dN$  と  $d(RD)/dN$  はよく対応するが高 $\Delta K$ 域のリングダウン計数はかなりのバラツキをみた。
- (4) 前項の欠点を補うために、統計的な区間推定法を採用し精度を確認することが必要であろう。

## 参考文献

- (1)(2) 尾上守夫ほか：アコースティック・エミッションの基礎と応用、コロナ社、1980、P14～32

- (3) R. ROBERTS and T. RICH : Stress-Intensity Factors for Plate Bending, Trans ASME, Vol 34, Series E, 1967, P777~779
- (4) 菊川真・城野政弘・近藤良之 : 疲労き裂進展下限条件試験法に対する検討 (き裂開閉口挙動に及ぼす荷重履歴の影響)、材料、Vol 30、No 330、1981、P 276~282
- (5) 国尾武ほか : 破壊力学実験法、朝倉書店、1984、P 164~165