

# AE (アコースティックエミッション) による き裂の追跡と検出の展望

Following-up and Detecting of Cracking by Acoustic Emission

北川 英夫\*, 大平 壽 昭\*

Hideo KITAGAWA and Toshiaki OHIRA

## 1. き裂監視技術としてのAE

\*き裂の発生・成長または伝ばによる破壊過程のAE (acoustic emission) による追跡・監視<sup>1)</sup>は、プラント・構造物の安全に関係して、最近急速に関心の高まった技術課題の一つである。

この意味でのAEの適用は、現在次のようなものであるかと思われる。

(a) 破壊の進行の途中過程が主対象である。材料の最終的破断時には一般に可聴音を発するが、この現象の工学的用途はまだ少ない。き裂の発生・成長過程を含む安定進行の破壊過程は、つい近年まで“警告なき突然の破断”とされ、その早期検出に払われた多大の努力の中で音響測定も試みられたが、少なくとも金属では実験室の段階を脱するに至らず、100 KHz ないしMHzオーダでのAE測定の導入により破壊の早期予知が実用面でも実現しつつあるかに見える。

(b) 一つの推定に過ぎないが、通常の上記周波数帯中心でのAE測定の対象は、小領域での高速変形ではないかと思われる。AE測定の対象となるき裂による破壊過程は、その平均進行速度が物体中音速のオーダから長時間の後ようやく測定できるほどの低速のものまで含んでおり、“われ”は複雑な複合現象であるが、そのうち直接の音源は、材料局部での幾何学的・時間的に急勾配の変位、すなわち広義の局所的・不連続の変形または境界条件の急速な変化で、これから発した弾性波の合成・変形されたものが現在測定されているAE信号であろうか。

(c) き裂の監視技術としてのAEでは、き裂のマクロ的挙動とAE信号からの情報とを臨床医学的に関係付け、経験の蓄積を加味して判定する方法がとられているように見える。実際の破壊事故ではもちろん、試験片ですらき裂挙動が不明確な現在、これは一つの有用な方法論であろう。この点では破壊力学との共通性が感じられる。

(d) 急速に発達したAE技術の中で、き裂とAE信号の関係や、AEによるわれの有効な測定方法については、多数の研究にもかかわらず、普遍性ある一般論として言えることは現在まだ多くない。研究テーマの膨大な宝庫

であるとも言えよう。

(e) AEによるき裂の追跡や監視では、原則としてはAE信号よりのすべての情報が用いられるが、き裂挙動の解析にはAE計数総数 (total AE counts) が、次にAE計数率 (AE count rate) が多く採用される。き裂発生の監視には直接の波形記録も使われる。また、AE信号を連続型AEと突発型AEとに分けた時、突発型AEがき裂挙動に関係が深く、各単発のエネルギーレベルは塑性変形による連続型AEより一般に高いと認識されているようである。供試体は、後のき裂挙動側での解析の便を考えてか、破壊力学での汎用試験片、すなわち、第1モードの大きな貫通き裂を入れた板状試験片が多く用いられる。注目される測定周波数帯は、主として0.1~1.0 MHz である。以上は平均的現状だが、き裂問題のAEによる研究では、研究方法はまだ開発の途上にあると考えられる。

## 2. き裂材の延性破壊とぜい性破壊への適用

既にき裂またはき裂状切欠を有する材料に静的に単調増加する荷重がかかって、既存のき裂端またはき裂状切欠端より直接新しいき裂の不安定伝ばが始まる現象がき裂材の典型的ぜい性破壊 (の発生) である。実際には一般に、上記の不安定伝ばの開始に先行して、既存のき裂端の塑性変形による鈍化と安定延性き裂 (さけ) の発生・成長が見られるが、その程度が著しく、時に全断面降伏が先行するなどの場合、ここではき裂材の延性破壊ということにする。一般には“延性破壊”の意味する現象はまだ人によって選択の自由がある。

### 2.1 破壊靱性試験におけるAEの適用

単調増加荷重に対するき裂材の強度は、き裂も切欠きもない平滑材の強度とは質的に異なる点を含んだ材料特性で、これを表現するのに一般に破壊靱性 (fracture toughness) を使う。この値を求めるための材料試験が破壊靱性試験である。破壊靱性値 ( $K_{Ic}$ ,  $K_{IIc}$  など) は当初不安定破壊開始条件として求め、これをもって、ぜい性破壊発生に対する材料固有の抵抗力の基準とする予定であった。しかし実際には既述のごとく不安定破壊開始までの過程は単純でなく、途中で安定き裂の成長過程を含み、かつ、その過程は特に、温度・荷重速度・板厚・形状等の影響を受けるので、破壊力学における標準的破壊

\*東京大学生産技術研究所 第1部

壊靱性試験<sup>1)</sup>では、条件付きの安定き裂成長開始条件(3倍伸長)に相当するK値を基準とし、これを平面ひずみ破壊靱性値、 $K_{IC}$ とした。類似の理由で他の破壊靱性値、すなわち、COD 値、J 値等の基準値の実験的決定に当たっても安定き裂成長開始を基準にしたいというのが現在の趨勢のようである。実際には、既存のき裂底から新しいき裂が安定成長を開始する時期を、工業的に能率よく決定するのは容易でなく、AEの役割が期待されている<sup>2),3)</sup>

平面ひずみ条件が満足されていると、安定き裂成長開始時に(荷重)・(き裂開口変位)曲線に段が現れ、可聴域の音(pop)が聞かれるとの意見<sup>4)</sup>に基づき、このpop-in 荷重をクリスタル・マイクロフォン<sup>5)</sup>や加速度計<sup>6)</sup>で成功裏に決定できたと主張された。

$K_{IC}$ 標準試験法(案)<sup>1)</sup>が正式に諮問されたのが1970年代になってからなので、上記の意味でAE測定が破壊靱性試験で着目され始めたのもごく最近である。得られた数少ないデータから次の経験が指摘されている。

(1) 7075-T6 のように靱性のあまり高くないき裂材に静的漸増荷重をかけ、応力拡大係数、K、の値を増しゆくと、あるK値からAEが発生を始め、その後AE

計数総数、N、がふえる。AE計数時のしきい値など。測定条件または計数処理条件を適当に選べば、KとNの関係は両対数図でジグザグ状ながらある範囲で直線となることが多く<sup>7), 8), 9), 10)</sup>(図1)、<sup>8)</sup> 次の式が提案された。<sup>7)</sup>  $C_1$ とSはとりあえずは定数である。

$$N = C_1 \cdot K^S \quad (1)$$

ちなみにNを荷重Pに対してプロットすると、予き裂の寸法、試験片形状によって異なる曲線となるが(図2(a))、<sup>11)</sup> NをKに対してプロットすると1本の曲線に集まる(図2(b))<sup>11)</sup>のである。これはAEの発生がき裂端周辺だけの応力・ひずみに支配されると考えると肯定できることである。しかし、このN~K関係は単なる関数関係でなく、Kの履歴を含んだものであろうことに注意したい。[ $K = \int dK$ ]。き裂開口変位(COD)

(crack opening displacement),  $\delta$ 、についても上記の(1)式と同形の直線関係が $\log N$ と $\log \delta$ (または $\delta$ )との間で得られている。(たとえば $C_2, T$ を定数として $N = C_2 \cdot \delta^T$ ) (図3)。<sup>12)</sup>

マルエージング鋼のように強い材料では、上記諸直線には、安定き裂発生点と思われる位置に鋭くはないが折点が生じた<sup>9), 13)</sup>(たとえば図4)。<sup>13)</sup> J値と $\log N$ の

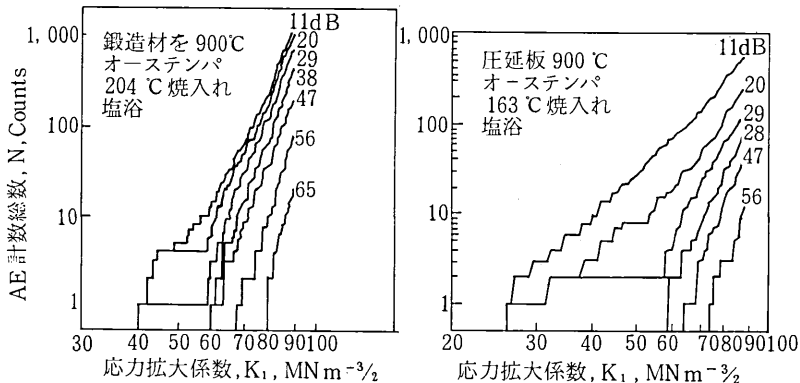


図1 高強度鋼D6aC板厚19.0mmのCT試験片を静的に引張った場合の応力拡大係数、 $K_1$ 、の増加に伴うAE計数の増加。図中に示すdB単位の数字は、しきい値でプリアンプで10MVに対する超過分(Y. Nakamura, C. L. Veach & O. McCauley)

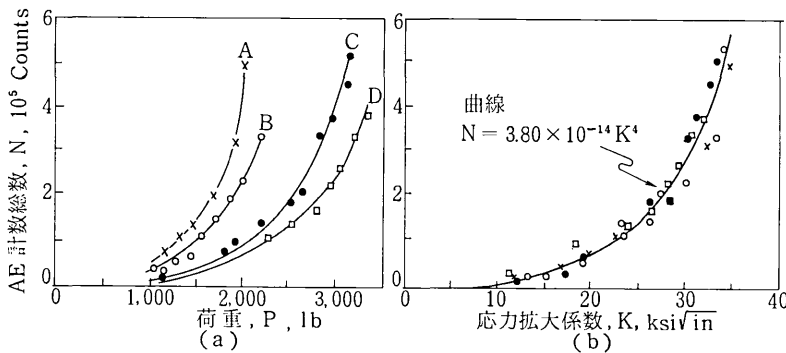


図2 AI合金7075-T6の片側き裂試験片を静的に引張った時のAE計数総数の変化。A, B, C, Dはき裂長が異なる4種の試験片である。(b)にもA, B, C, Dのすべてのデータがプロットしてある。(H. Dunegan & D. Harris)

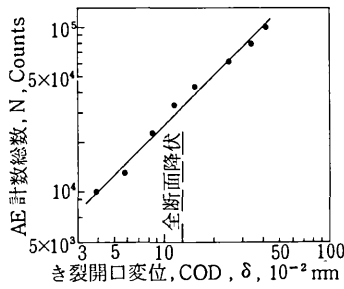


図3 原子力圧力容器から切り出したMn鋼のCT試験片の静荷重時のき裂開口変位とAE計数総数(I.G.Palmerほか2名)

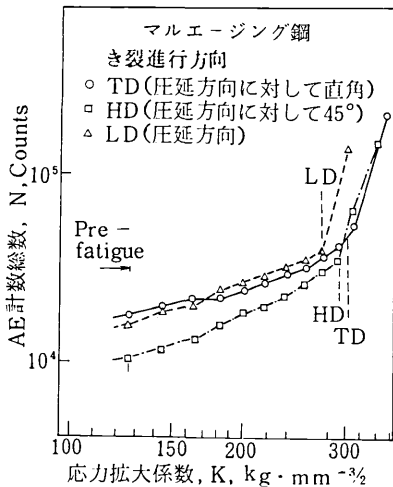


図4 マルエージング鋼CT試験片の静的荷重時の応力拡大係数とAE計数総数(岸、齊藤ほか2名)

曲線にも折点が現れ、この折点でのJの値が、J値とストレッチゾーン幅(SZW)との関係を示す直線の折点のJ値に近い値であったという<sup>9)</sup>(図5).<sup>3)</sup>

これらの折点の出現については、材料や実験条件の差の影響を始め多くの検討を必要としようが、安定延性き裂の成長開始をAEで検出できる見通しも暗くはない。

### 2.2 压力容器等の安全管理・検査へのAEの適用

上記の破壊靱性試験中におけるAEの測定結果を参照すると、压力容器等の供用前検査または定期検査にAEを適用すれば、(1)危険なき裂・欠陥の検出、(2)加圧時の安全管理に役立つ可能性があり、もしAE測定の長期間連続適用が有効に実施できれば、従来と異なる供用中検査により安全性の著しい向上が期待される。しかも、危険な欠陥の位置標定やき裂発生 of 事前検出などAE独特の機能も期待され、多くの研究が行なわれ成果を挙げつつある。<sup>14), 15)</sup>しかし、AE発生に対する履歴の影響、き裂の識別、安定成長のAE発生に対する材料差の影響

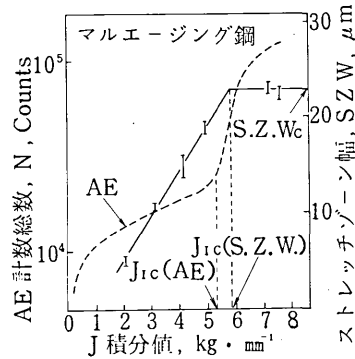


図5 マルエージング鋼の静的荷重時のJ積分値とストレッチゾーン幅とAE計数総数(岸、齊藤ほか2名)

などAE側での検討点のほか、延性破壊に対する破壊力学側の多くの未解決点など今後の研究に期待したい諸点も残されていると考えられる。

### 3. 環境破壊われへの適用

AE技術における最近の重要課題の一つに応力腐食われ(stress corrosion cracking, SCC)の検出・追跡がある。一定の静荷重またはそれに相当する荷重を常温で長時間受けても、顕著なき裂の発生・成長は生じないものと信じられているが、特定の環境下では、一定の静荷重のもとでもき裂の著しい発生・成長とそれに伴う強度や寿命の低下が起きる。これを広義のSCCと呼び、これへの対策にいとまのない今日である。

#### 3.1 高強度鋼などの水素ぜい化われ(遅れ破壊)(Hydrogen Embrittlement Cracking)

水中または大気中等の自然環境中で高強度鋼中のき裂が主として水素の影響で急速な安定成長をすることが問題になってから20年以上になるが、いまだに解決されず、高強度化を目指す材料開発への障壁となっている。機構は異なるが、類似の現象は高強度のAl合金・Ti合金・Mg合金等やガラス・セラミックまで見られる。

この場合のき裂進行は、たとえば、 $10^{-4} \sim 10 \text{ mm/min}$ 程度の安定な成長であるが、これとAEの関係についての組織的研究はHartbowerとGerberich<sup>16)</sup>によるものが最初であるらしく、それによれば、大気中・水中および水素を吸蔵したD6aC鋼のき裂成長速度 $da/dt$ は、それぞれAE計数率 $dN/dt$ と両対数図ではほぼ直線関係を示した<sup>16)</sup>(図6参照)。<sup>16) 19)</sup>

$$\frac{dN}{dt} = C_3 \left( \frac{da}{dt} \right)^\ell \quad (2)$$

SCCにおけるき裂のKと $da/dt$ とは、Kの広い領域を考えると、単純な関係にはないから(図7参照)、<sup>17)</sup>計数率 $dN/dt$ はKの関数でなく成長速度 $da/dt$ の関数と考える方が自然である。少なくとも高強度鋼では、SCC

によるき裂成長は主き裂前方に発生した微小き裂と主き裂との微視的な断続的連結によるとされ、<sup>18)</sup> また微小き裂の発生頻度とAE計数率または各AE波発生に要する潜伏時間の逆数とは等価であると理解されている。<sup>16)</sup> その裏付けとして、主き裂成長速度が異なる水素チャージと水中の両種環境中で、AE計数率  $dN/dt$  と主き裂成長速度  $da/dt$  とが両対数図で同一直線関係を示すこと (図6)<sup>16), 19)</sup> や微小き裂のジャンプ距離 [ $\ell^* \approx K^2 / (2\sigma_y E \pi \epsilon_f)$ ],  $\epsilon_f$ : 破断ひずみ) も与えられている。<sup>19)</sup>

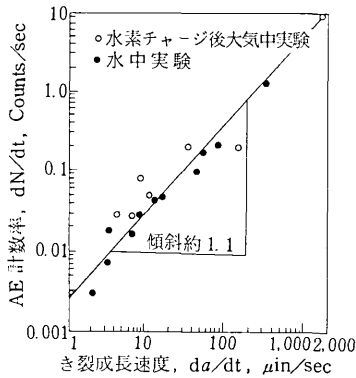


図6 D6 aC鉄のSCCにおけるき裂成長速度とAE計数率 (W.W.Gerberich, C.E. Hartbower)

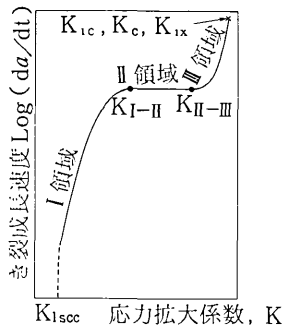


図7 SCCにおけるK~(da/dt) 特性 (応力拡大係数とき裂成長速度関係)

またAE振幅を  $g$  とすると、1回のき裂成長により増加するき裂面積  $\Delta A$  は  $(\Sigma g)^2 E / K^2$  (応力波パラメーター) と対応関係にあり、両者は両対数図で直線となった。<sup>19)</sup> けっきょくこの場合は、き裂の発生速度はき裂端塑性域の寸法には比例せず、微小き裂の発生速度がそのまま主き裂成長速度とAEの発生速度 (すなわちAE計数率) とを支配したことになるかと思われる。また、この種のわれではAE計数総数  $N$  は  $K$  一定のとき、時間に比例して増加するが、この時CODも時間に比例する。<sup>20)</sup> この種のSCCでのAE波形は破壊機構の変遷をよく反映するとのことで、<sup>21)</sup> AEの新しい適用方法を示唆するかもと思われる。

しかし、この高強度鋼の水素ぜい化われも、 $K$ のレベルが変わると、同じ環境でも、粒界われからdimple模様の延性破壊まで機構が変化できる<sup>22)</sup> ことを考慮すると、上記の諸関係がSCCの全破壊過程を通じて成立するかどうかについて検討する必要がある。

### 3.2 ステンレス鋼の応力腐食われ

オーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食われは水素われ機構でなく、アノード溶解による活性経路腐食 (active pass corrosion, APC) であるとの主張が強い。もしもき裂底での局部溶解の継続ならば連続現象でありうる。力学的境界条件の変化が連続かつきわめて遅いならば顕著な弾性波の放出は起こりにくく、明確にAEを測定できる水素ぜい化われとこのAPCとは、AEによる機構判別ができることになる。しかし、トンネル腐食と局部破断による破面形成を考えるとAEが出ても不思議ではない。この意味での研究は、その重要さにもかかわらずまだ少なく、5N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0.5M NaCl溶液中の304オーステナイト系ステンレス鋼ではき裂成長に伴うAE計数総数の増加が見られず、35%NaCl溶液中のマルテンサイト系ステンレス鋼ではそれが見られたとの報告がある。<sup>23)</sup>

一方、オーステナイト系ステンレス鋼では、上記の塩素イオンによるSCCのほか、最近では酸素を含む高温純水中での鋭敏化材の粒界応力腐食われ (IGSCC) が問題となっていて、これのAEによる検出の可能性の有無が注目されている。これについては、304鋼のパイプのSCCによる貫通までの長時間測定により時間とともに増加するAE計数総数を認め、AEによるIGSCCの検出の可能性を主張した報告が出された。<sup>24)</sup> 316鋼のUベンドによる試験の報告も同様な主張をしている。<sup>25)</sup> いずれにしても、オーステナイト系ステンレス鋼のSCCき裂のAEによる研究はまだ始まったばかりであり、論評を避けたい。現在はまだ、AEのみならず、この種の材料のSCCではき裂成長速度  $da/dt$  と  $K$  との関係や  $K_{Isc}$  についてのデータすらようやく取れ始めた段階にあり、<sup>26)</sup> これからの研究に待ちたい。

### 4. 疲れき裂へのAEの適用

き裂の挙動に関する諸データの中では、疲労き裂に関するものがもっとも多い。基本的影響因子だけでも  $\Delta K$  レベル、応力比、繰返し速度、振幅変動、 $\Delta K_{TH}$  値、曲げと引張の配合比、荷重の2軸性など多様であり、それに応じたき裂挙動データがある。それに比して、疲労き裂挙動とAE信号との関係にはデータがまだ少ない。

しかも、疲労き裂から発するAE信号の解析は他のき裂と異なった難しさがある。すなわち、(i) 除荷時の面接触という衝撃によるAE。(ii) タイヤトラック・ラブマークに残る摩擦によるAE。(iii) 逆降伏・パウシンガー効

果によるA E. (iv) 多くの実用材ではストライエーション形成機構からのA Eが低いとの予想. (v) 数回ないし100回を単位とする準ミクロ的破面形成機構から最も有力なA Eが出るらしい. (vi) 疲労破面の成長機構自体未解明ないし複数意見. (vii) 単位時間当たりの放出エネルギーの低さ. (viii) 油圧サーボなど原理的にノイズを除けぬ装置を使つての破壊力学的疲労試験中の(S/N比に悩まされる)A E測定. (ix) 計数処理の多様性・任意性等々である.

疲労過程でのA Eの測定と解析の基礎事項については、仲佐<sup>27)</sup>や小野<sup>10)</sup>のすぐれた解説がある。疲れき裂のA Eの若干の問題点を次に挙げる。

(1) A E計数率  $\frac{dN}{dn}$  とき裂成長速度  $\frac{da}{dn}$  とはよい直線関係をなす (図8)<sup>16)</sup> 疲労の場合  $\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m$  の単純な関係があり、 $\frac{dN}{dn} = D(\Delta K)^k$  (図9)<sup>28)</sup> も成立つ。従つて、 $\frac{dN}{dn}$  が何に依存するか一見不明確。

(2) しかし、図8に見られる  $\frac{dN}{dn} \sim \frac{da}{dn}$  関係の強い材質依存性を考慮すると、A E計数率として表わされる。断続的の局部破壊頻度が直接き裂の成長を支配するのでなく、 $\Delta K$ 相当の変形がき裂の成長を支配するが、そのき裂成長面が金属構造の影響を受け、パッチ間移動頻度やCODの変化を介して材質の差がA E計数率に影響すると考えたい。この推定がもし正しければ、同じKの関数であるSCCの  $\frac{da}{dt}$  の材質依存性と疲労の  $\frac{da}{dn}$  の非依存性も併せて説明できるかとも思われる。そう考えた場合、疲労のA E係数率はSCCのA E係数率と同質には使えないことになるので注意を要しよう。

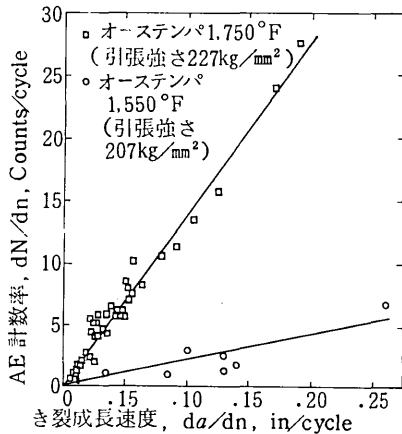


図8 D6aC鉄のCC試験片の疲労試験における疲労き裂成長速度とA E計数率の関係およびそれに与える材質差の影響 (C.E. Hartbower, ほか2名)

(3) 準静的荷重下の平滑材で指摘されたKaiser効果は、繰返し荷重下のき裂端にも適用できるようである。

(4) プラント関係で問題となるような高応力低サイクル疲労、または熱疲労では、平滑材でも従来の通説より著しく早く多数の高密度の微小き裂が発生することが最

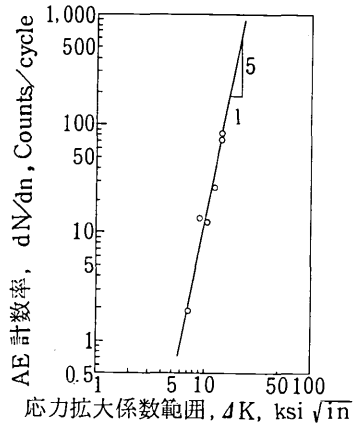


図9 アルミニウム合金2024-T851のCT試験片の疲労き裂成長速度と応力拡大係数範囲の関係 (T. M. Morton ほか2名)

近分つてきた。その発生時期は、繰返し初期の硬化・軟化の飽和期に当たるかと思われる。どの程度のき裂からA Eに影響するかは測定方法によるが、上記の点の認識は疲労のA E信号の解釈には重要な前提であろう。

(5) A E信号が弱いといわれていたオーステナイト系ステンレス鋼でも、疲労のA E測定はき裂の発生の前後を通じ、室温・高温を通じて十分行えることが示された。<sup>29)</sup>

(6) 繰返しに伴うA E振幅分布の変化 (図10)<sup>29)</sup>は、マクロなき裂の発生・成長その他の現象変化を教えられる有益な情報でありうるかと思われる。

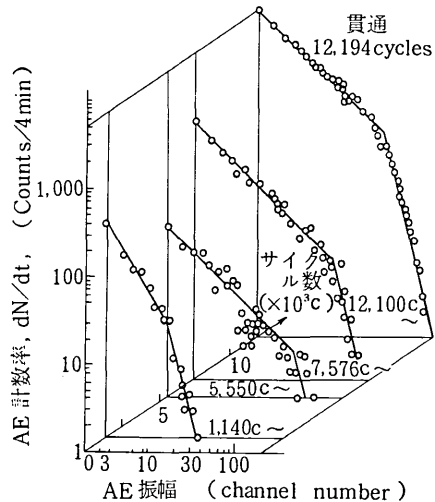


図10 SUS 304ステンレス鋼バンド管の疲労の進行に伴い変化するA E振幅の分布 (±30 mm, 8 cycles/min) (仲佐)

(7) 繰返し荷重を受けて疲労き裂が開閉口する1サイクルの間で、A E発生の時期が荷重最大時と一致しないとの報告<sup>14), 27), 30), 31), 32)</sup>は疲労破壊現象の理解にお

ける最近の重要な情報であろう。

(8) AEによる疲労の監視・検出技術の最近の進歩は目を見張るばかりであるが、き裂の判別、高サイクル疲労への適用、絶対的定量評価など今後の課題も多いかと思われる。

### 5. 反省と今後の課題

AEの専門家だけでなく、AEの御世話になっている、パートナーとしての破壊力学の側から、AEによるき裂の追跡と監視について展望し、われわれの反省として次の課題に到達した。

(1) き裂による破壊過程の現象自体をまず時間的な変化過程として整理して提示すること。(2) 従来のFMの主なる手法であったシミュレーション解析のみではなく、き裂の発生・成長と最終破損についての具体像をミクロ的現象も含めて明確にすること。(3) AEもFMもフラクトも含めた臨床医学的事故診断学の可能性の追求と各分野の専門家の一層の協力。(4) AEによるき裂測定の実データの収集と整理、特に subcritical crack growthに関するデータの蓄積。(5) 音響工学、地震学、システム工学、破壊力学等の諸領域での異なった発想の間の調整と交換。(1977年9月21日受理)

### 参考文献

- 1) Annual Book of ASTM Standards Part 10 E399 (1972)
- 2) Methods for Crack Opening Displacement Testing, DD 19 (1972) Brit. Stand. Inst.
- 3) 岸・斎藤ら; 東大宇航研報告, Vol. 12, No 1 (A) (1976) P. 227, 文献(9), 文献(13), 金沢・飯田ら, Proc. 3rd, AE Symp., Tokyo (1976) P. 513, 矢貫; 機械学会非線形破壊力学研究会資料
- 4) R. W. Boyle, A. M. Sullivan and J. M. Kraft; Weld. J., Vol. 41, No 9, Res. Suppl. (1962) P. 4288
- 5) M. H. Jones and W. F. Brown, Jr.; Mat. Res. Standards., Vol. 4 (1964) P. 120
- 6) C. E. Hartbower, W. W. Gerberich and H. Liebowitz; Engng. Frac. Mech., Vol. 1 (1968) P. 291
- 7) H. L. Dunegan, D. O. Harris and C. A. Tatros; Engng. Frac. Mech., Vol. 8 (1968) P. 105
- 8) Y. Nakamura, C. L. Veach and O. McCauley; ASTM STP 505 (1972) P. 164
- 9) T. Kishi, S. Saito, Y. Mishima and R. Horiuchi; Proc. 3rd AE Symp., Tokyo (1976) P. 455 Paper, 7-1
- 10) 小野; 鉄と鋼, Vol. 59, No 9 (1973) P. 1338
- 11) H. L. Dunegan and D. O. Harris; Ultrasonics, Vol. 7 (1969) P. 160
- 12) I. G. Palmer, B. J. Brindley and R. P. Harrison; Mat. Sci. Engng., Vol. 14 (1974) P. 3
- 13) 斎藤; 金属材料, Vol. 17, No 2 (1977) P. 27
- 14) 尾上・山口・市川・嶋田; 電気学会論文集, Vol. 95, No 6 (1975) P. 139
- 15) 仲佐・渡辺; JSSC., Vol. 11, No 112 (1975) P. 21
- 16) C. E. Hartbower, W. W. Gerberich and P. P. Crimmins; Welding J., Weld. Res. Suppl. (Jan. 1968) P. 1-s
- 17) 北川; 機誌, Vol. 77, No 670 (1974) P. 959
- 18) 青木, 金尾, 荒木; 第18回材料強度と破壊国内総合シンポジウム論文集 (1973) P. 51
- 19) W. W. Gerberich and C. E. Hartbower; Proc. Intern. Conf. Fundamental Aspects of SCC (1969) P. 420 または Intern. J. Frac., Vol. 3 (1967) P. 185
- 20) H. L. Dunegan and A. S. Tetelman; Engng. Frac. Mech., Vol. 2 (1971) P. 387
- 21) 南雲, 門田, 後藤; 鉄鋼協会第88回講演会前刷 (1974) P. 234, No 236
- 22) 北川, 小林; 第6章環境破壊, 北川・小寺沢編フラクトグラフィ(1977) 培風館破壊力学講座
- 23) H. Okada, K. Yukawa and H. Tamura; Proc. 6th Intern. Conf. Mat. Corrosion, Sydney (1975) No 2-22 近日出版
- 24) K. S. Stahlkopf, P. H. Hutton and E. L. Zebroski および P. H. Hutton and J. R. Skorpik; Proc. 3rd Conf. Inspection of Pressurized Components, London (1976) No 2-6
- 25) P. G. Bentley; European Working Group on AE, Roskilde, Denmark (1976) No FAE-49
- 26) 北川, 大平, 結城; 第22回腐食防食討論会講演要旨集 (1975) および, 大平, 小島, 北川; 機械学会講演論文集 No 770-2 (1977) P. 236
- 27) 仲佐; 材料科学, Vol. 13, No 1, 2 (1976) P. 29
- 28) T. M. Morton, R. M. Harrington and J. G. Bjeletich; Engng. Frac. Mech., Vol. 5 (1973) P. 691
- 29) 仲佐・永田; 圧力技術, Vol. 13, No 2 (1975) P. 72
- 30) 岸; 私信 (1977)
- 31) 動燃, 電中研共同研究報告, PNC N941 77-77, CRIEPI 276005 (1977)
- 32) 羽田野; 材料, Vol. 24, No 265 (1977) P. 974