

解 説

キーワード
アコースティックエミッション
新素材
FRP
セラミックス
材料評価

AEの新素材への適用*

湯山 茂徳** 岸 輝雄***

Usefulness of Acoustic Emission for Evaluation of Advanced Materials

by Shigenori YUYAMA and Teruo KISHI

1. はじめに

固体内で生ずる割れ、変形などの局所的微視変化を探る手段として有力なAE法¹⁾は、工業技術の1つとしてすでに十数年の発展をとげ、さらにその応用範囲が広がろうとしている。適用対象となる材料も、古くから用いられている金属材料や岩石のほかに、最近ではFRPやFRMなどの複合材料、またファインセラミックスなど、新素材の材料評価法として、特に注目を浴びている。

多数の繊維が異方的かつ不連続的に母材中に存在するFRPでは、放射線の透過や超音波の反射を用いる従来の非破壊検査法であるRTやUTは問題を生じやすいが、材料内で生ずる破壊現象そのものをとらえるAE法は、動的破壊過程を検出する優れた非破壊検査法として、大きな威力を発揮するものと考えられる²⁾。実際にAE法をFRPに適用するにあたり、この手法は材料の力学的特性、疲労損傷、層間剝離、接着不良、き裂などを評価するのに優れ³⁾、さらに振幅分布、エネルギー分布などのパラメータを用いることにより、母材の割れ、繊維の母材からの剝離、繊維の破断など異なる破壊機構を識別しうることが報告されている。こうした特長を利用し、米国ではすでに自動車産業、宇宙航空産業、化学産業などで多くの適用が行われ、大きな成果をおさめている。

一方、セラミックス^{4),5)}においては、AE法はその特性により、材料のスクリーニング、部材の寿命、余寿命評価などへの適用が進んでいる。特に近年変位を直接計測しうる圧電型変換子が開発され⁶⁾、また変換子、媒体形状

に依存しない割れの動的素過程を与えるAE原波形解析手法⁷⁾が進展し、新しいAE技術の時代が到来しつつある。現在、セラミックスへのAE法の適用は、引張試験、破壊じん性試験においてAE発生応力 σ_{AE} を求め、それより材料のスクリーニングを行う試み、その延長としてスペースシャトル外面の断熱タイルの欠陥検出へのAE適用の例がある。これらの場合、AE計測により1~5 μm の微視割れが検出されていると考えられる。また原波形解析では、破壊じん性試験におけるき裂先端プロセスゾーンにおいて、15 μm 程度の微小欠陥を定量的に評価しうることが示されている。

これらの事実を踏まえ、本稿ではFRPおよびセラミックスにおけるAE法適用の現状について述べ、その将来を展望する。

2. AE法とは

AEとは、物が応力下で破壊する時発する数10kHz~2MHz程度の周波数を持つ弾性波のことを言う。物が壊れるとき発する可聴域の音を聴いて危険を予知することは、我々が古くから行っている重要な日常動作の一つである。環境雑音および電気雑音の影響を取り除くため、上述の超音波領域に注目し、固体内で生ずる局所的、微視的破壊を検出する実験手法として、また重要な非破壊検査法の一つとして、AE法は60年代の初頭より大きな発展をとげてきた。図1に、AE法と他の代表的な非破壊検査法の一つである超音波探傷法(UT法)との比較⁸⁾を模式的に示してある。AE法が応力下で固体内に生ずる破壊現象そのものをとらえるのに対し、UT法は超音波を入射することにより、破壊源となる欠陥の存在を検出するという違いがある。すなわち、AE法が動的かつ受動的検査法であるのに対し、UT法は静的かつ能動的検査

** 日本フィジカル アコースティクス株式会社(東京都渋谷区神宮前6-19-16, 越一ビル405)

Nippon Physical Acoustics Ltd.

*** 東京大学工学部境界領域研究施設(東京都目黒区駒場4-6-1)
Faculty of Engineering, University of Tokyo

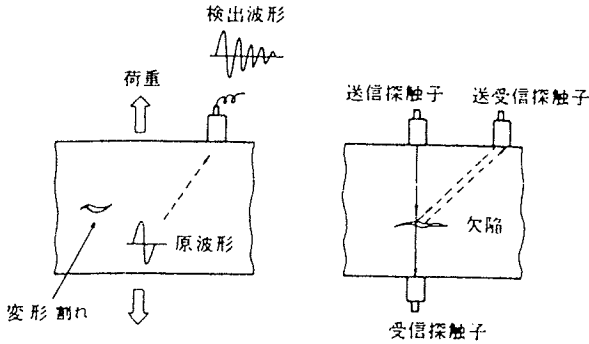


図 1 AE 法と UT 法の比較

法であり、両者は相補的な関係にある。

さて AE を検出し、それを解析するには、AE 変換子と AE 計測システムが必要である。一般的に変換子は、弾性波を電気信号に変換するため圧電素子を用いており、感度を高める目的で適当な周波数域に共振をもたせるのが普通である。被試験体に圧着された変換子により検出された AE 信号は、プリアンプでいったん増幅された後、メインアンプあるいはログアンプを通して、信号処理および解析が行われる。信号処理パラメータとしては、しきい値を超えた振動の回数をすべて数えるリングダウンカウント数 (計数率および累積数)、AE 信号のひとかたまりを一事象と数える事象数 (事象率および累積数)、発生した AE エネルギーの相対的な比較が可能な最大振幅値、最大振幅値に統計的処理を施すことによって得られ AE 発生機構の分類がしばしば可能な振幅分布、包絡線検波波形の時間に関する積分として得られ、発生した AE エネルギーの正確な比較が可能で最近特に注目を浴びているエネルギー、さらに変換子間の信号到着時間差を求めることで可能な AE 源の位置標定などがある。また最近では、AE 発生機構そのものを探る目的で、波形に注目した研究 (原波形解析)⁷⁾が行われ、AE 源の定量的評価に関して大きな成果をあげている。

現在汎用される AE 計測システムは、初期のものから数えて第 3 世代に属するものである。この装置では、以前には各モジュールごと個別に行われた多種の信号処理が、すべて 1 枚のボード上で可能になっている。複数のマイクロプロセッサを用い、AE 信号の取得、信号処理、データ転送、およびデータ表示を統一的に行うため、著しい高速化、安定化が計られている。チャンネル数の増設は、1 チャンネルあるいは 2 チャンネルごと 1 枚のボードを装入するだけ済み、こうした小型化、軽量化により、たとえば実験室における材料評価・開発用として 4~8 チャンネルを実装する卓上型装置が、また実機構造物試験用として最大 128 チャンネルまで実装可能な大型装置が開発されている。データ解析には、装置内に内蔵

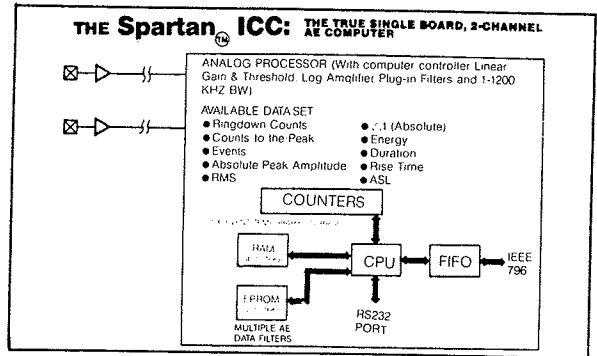
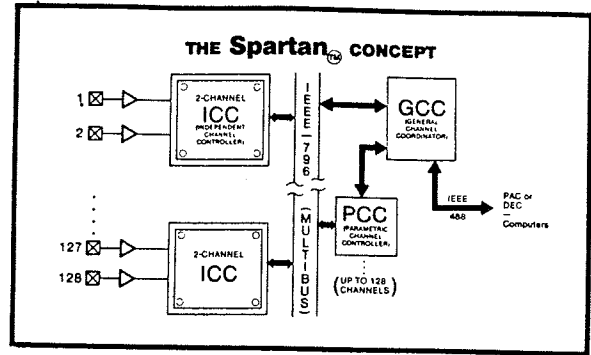


図 2 最新 AE 計測システムのブロック図

される AE 解析用コンピュータが用いられ、付属する基本ソフトウェアにより、有効パラメータのオンライン解析を可能にしている。図 2 に、一例として最新大型 AE 計測システムのブロック図を示す。

3. FRP への適用

3.1 FRP における AE 発生の特徴

FRP で発生する AE は、金属など他の材料のそれに比べ、強度 (エネルギー) の大きいことが知られている⁹⁾。最終破壊に至るまでの発生数が多く、比較的小さな応力から AE 発生が見られる。これは FRP が潜在的に持つ多数の応力集中や欠陥、また残留応力、母材となる樹脂の延性度の問題、さらに母材の強度が繊維に比較して小さいことなどが原因と考えられる。発生する AE 信号は、減衰の小さな低周波成分を多く含むため、他の材料に比べ、AE 信号の検出は容易である。

FRP の破壊過程で生ずる主な AE 発生源としては、繊維材の母材からの剝離、繊維材の破断、母材の破壊などが考えられる。また AE 計測で特徴的な点として、他の材料と異なり、初期破壊部となりやすい、たとえば母相・繊維境界部が材料中に広く分布するため微小破壊が各所で同時に多発し、AE 発生が広範囲にわたり、さらに FRP 内において、音速に異方性がある、減衰が大きい、個々の AE 信号振幅値間のバラツキの幅が大きいなどの理由により、正確な変換子間信号到着時間差を求めるのが困難なため、AE 発生源の位置標定を行うのが難し

い場合が多いことなどがある。しかるに、パラメータとしてエネルギー（包絡検波波の積分）を用いれば危険部の位置標定を容易に行い得ることが最近示され¹⁰⁾、FRP破壊過程の解析手段の一つとして、このパラメータの活用が今後期待される。

図3および図4に、著者らがCFRPの引張試験で計測したAEの発生状況を示す¹¹⁾。図3はAE発生挙動および荷重変化を示したもので、最初のAEは試験開始後60秒（破断荷重の約37%）で発生しており、その後荷重上昇過程で生ずる不連続荷重低下（繊維の破断によると考えられる）に対応し、ステップ状に多くのAEが発生する。図4にこの時得た振幅分布を示す。図から明らかのように、振幅分布上でAEのエネルギーレベルは、30dB以下の最大振幅値をもつAE事象、同30~40dBの事象、それ以上の最大振幅値を持つ事象と三つのグループに分けられる。著者らが行った圧縮試験（繊維材の剥離が破壊の主要部分を占める）、母材のみの引張試験、繊維一本

の引張試験によれば、剥離で生ずるAEの最大振幅は30dB程度、母材の破壊によるAEは最大40dB程度、また繊維材の破断では最大80dB程度のAE発生が観察された。したがって、前述の三つのグループは、三つの異なる破壊機構、すなわち繊維材の母材からの剥離、母材の破壊、繊維材の破断に、それぞれ対応するものと考えられる。

振幅分布は、AEを生じた事象により解放されたエネルギーの大小の違いを相対的に比較できるため、異なるAE発生機構を識別するうえで最も有効なパラメータと考えられている。FRPでは、ここで示されたように、異なる破壊機構が異なる最大振幅レベルに対応するのが一般的であるため、適当な信号計測しきい値を選ぶことにより、それぞれの破壊段階に応じたAE信号の検出を行い、破壊過程を直接評価することが可能と考えられる。

一方、AE波形の周波数特性に注目してAE発生機構の識別を行う試みも行われている。たとえば、一例として200kHz以下の周波数成分を多くもつAEは母材の割れに対応し、それ以上の比較的高周波成分を多く持つAEは繊維材と母材の剥離に対応するなどの報告¹²⁾がある。しかしながら、AE信号の周波数特性はAE波の伝播媒体となる試験片や変換子の周波数特性に強く依存し、検出波のみの解析では正しい情報を得られない場合も多く、AE発生機構と検出波形の周波数特性との対応については、定説が与えられていないというのが現状である。今後は、伝播媒体や変換子の特性を考慮したうえで、こうした解析を行うことが望まれる。

3.2 AE法の実機応用

3.2.1 宇宙航空産業

CFRPが宇宙航空材料として使用される頻度が増し、その重要性が大きくなるにつれ、この材料のAE発生に

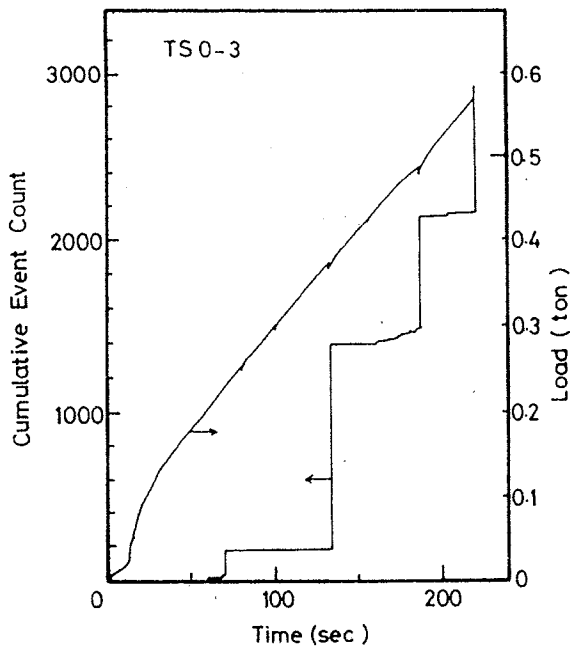


図3 CFRPの引張試験におけるAE発生挙動

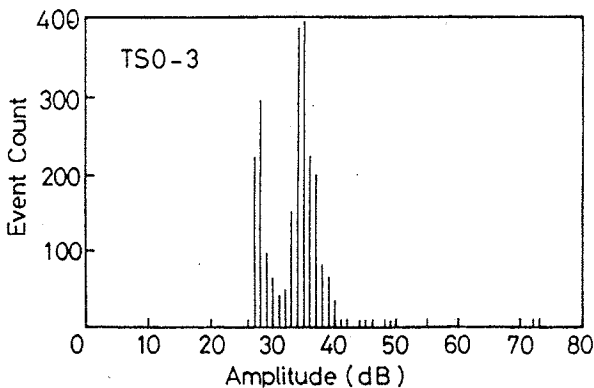


図4 CFRPの引張試験で得たAE振幅分布

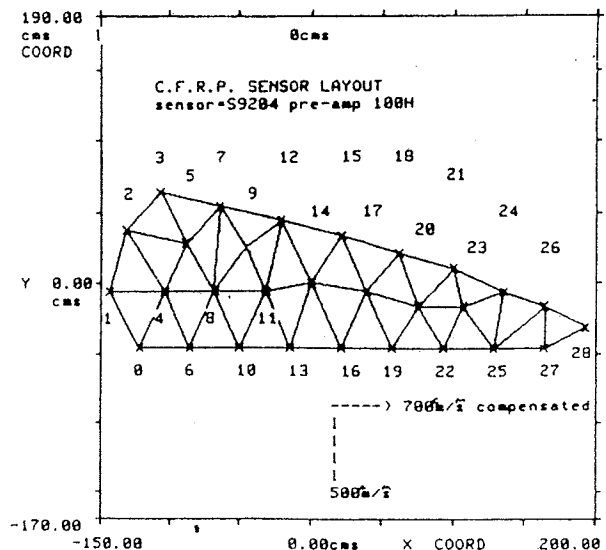


図5 CFRP製主翼のAE試験における変換子配置

関する研究も数を増している。我国でもすでにいくつかの基礎研究^{13),14)}がなされ、多くの成果を上げている。CFRPは、現在通信衛星用構造材、ロケットモータ用構造材、航空機の翼用材料などとして実用化が進み、その健全性評価の重要な手段として、AE法は世界各国で適用されつつある。しかしながら、いずれの場合も最先端技術あるいは軍事技術に関連したものであるため、結果が公表されている例は極めて少ない。図5は、公表された結果の一例である¹⁵⁾。音速および減衰率に異方性のある点を考慮して作成したソフトウェアを用い、図に示された変換子配置をとることにより、全面CFRP製主翼の疲労過程で発生するAEを解析し、その破壊過程を評価しようとしている。

3.2.2 化学産業

SPIがまとめた健全性評価のための推奨法¹⁶⁾のもとに、主として米国においてFRP製タンク、圧力容器、パイプなどのAE試験が多く行われている。これらFRP製構造物に対するAE法適用の有効性を示すものとして、モンサント社の報告¹⁷⁾がある。図6は、同社が1972年から1983年にかけて経験したFRP製タンクの重大な破壊事故件数の推移を示している。これより1970年代には、毎年数件程度の事故が起こっていたことがわかる。一方、図7は同社が行ったAE試験数の推移を示す。1980年を境に、試験数が急速に増えている。それに対応して、図6に見られるごとく、タンクの事故発生数は1980年代に入ると急速に減少している。また図8は、FRPタンクに発見された各種欠陥発生率の推移を示す。やはりAE試験が多く行われるようになって以後、発見

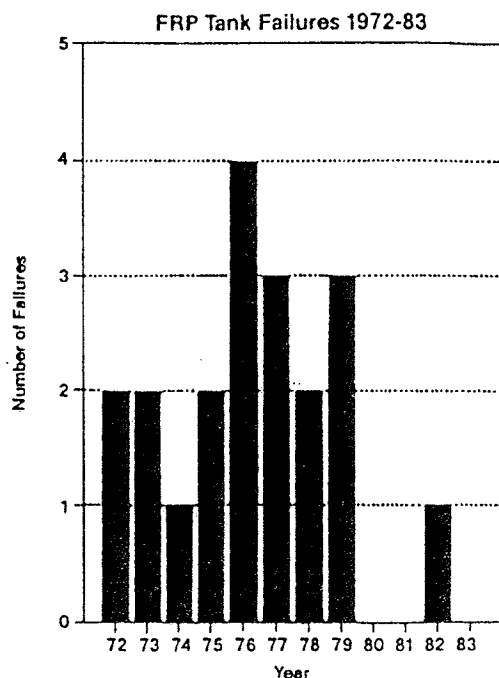


図6 モンサント社におけるFRPタンク破壊数の推移

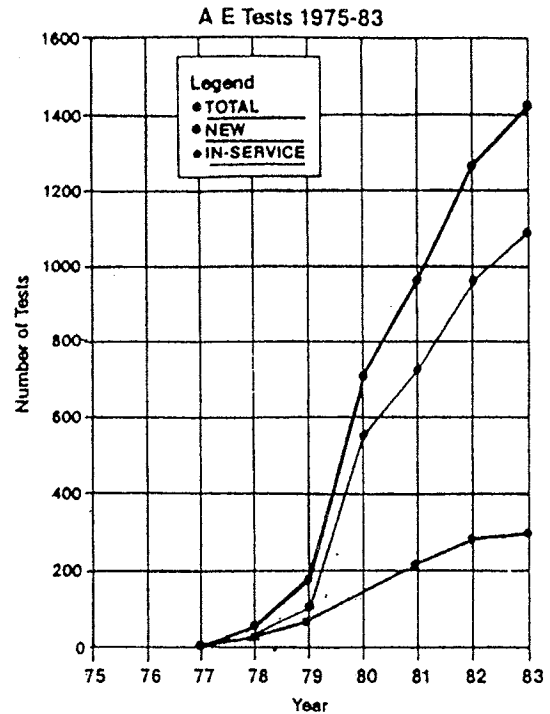


図7 同AE試験数の推移

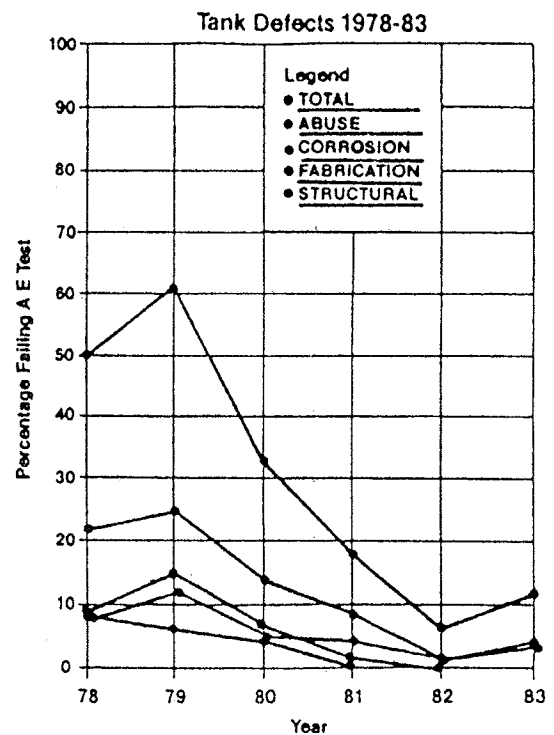


図8 同発見された各種欠陥発生率の推移

される欠陥の数は大きく減少しており、さらにタンクに致命的影響を及ぼす構造的欠陥はほとんど見られなくなった。今日までにモンサント社では、1400を越えるFRP製タンク、圧力容器に対して、また数100を越えるFRP製パイプに対してAE試験を行っており、その健全性評価に大きく貢献している。

SPIの推奨法では、AE変換子の種類と配置法、また負荷形態を指定している。AE計測には、少数個の低周波用変換子（共振周波数25~75kHz）と多数個の高周波用変換子（共振周波数100~200kHz）を使用することが定められている。低周波用変換子は伝播損失の少ないAEの低周波成分を検出し、FRP構造物全体のAE活動度をモニターするのに用い、一方健全性などの定量的評価は、すべて高周波用変換子で得たデータをもとにする。図9は、試験時におけるAE変換子配置を模式的に示したもので、変換子間信号到着時間差による位置標定は用いず、1個の変換子に対して監視領域を定めるという方法（ゾーン標定法）により、AE発生源すなわち破壊の生じつつある部位の標定を行っている。また図10は、FRP製貯蔵タンクや圧力容器の試験時に用いられる応力の負荷形態を示す。このように応力上昇—保持をくり返し、階段状に負荷を変化させた時のAE活動度を調べ、その健全性評価は行われる。

ところで、AEに特有な不可逆現象としてカイザー効果

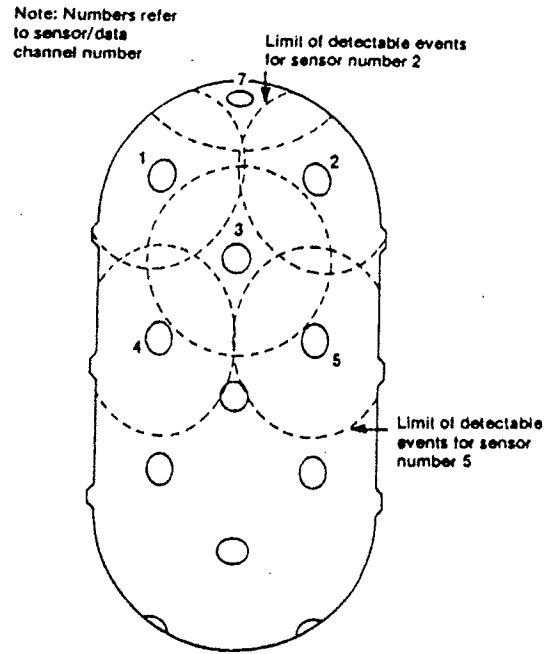


図9 AE変換子の配置

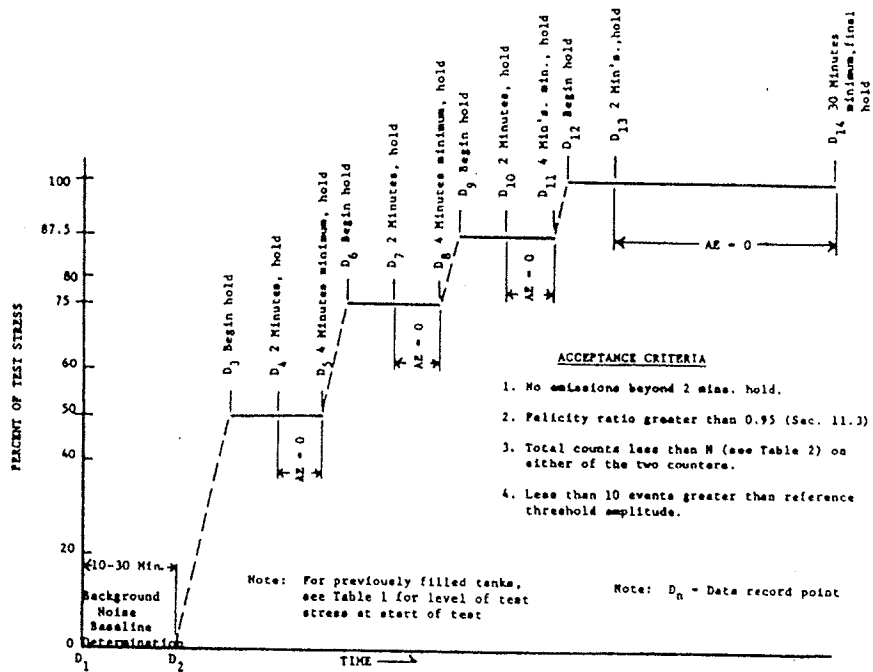


図10 AE試験における応力負荷形態

果がある。これは材料に荷重を加えるとAEが発生するが、一度除荷し再び負荷すると、以前に加えられた最大荷重を越えるまでAEが発生しないという現象である。図11は、一方向強化FRPの3点曲げ試験で記録されたカイザー効果で、CFRPは特に顕著な特性を示している。この効果は、荷重が大きくなるにつれて薄れ、一度除荷して再負荷する過程で、以前に加えられた最大荷重より小さい荷重でAEが発生し始めるようになる。この荷重と以前に加えられた最大荷重の比をフェリシティ比と呼ぶ。その値は破断荷重に近い負荷を受けたFRPで

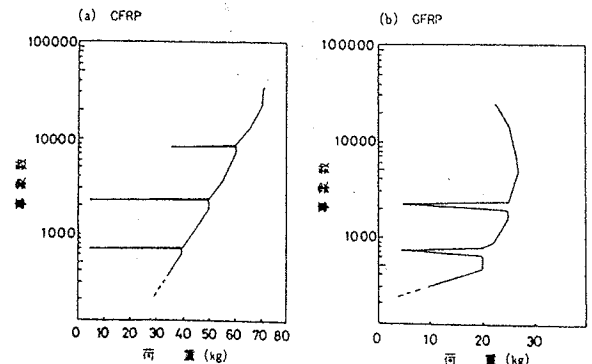


図11 FRPのカイザー効果

は1以下を示し、その材料が被った損傷の程度を表わす指標となる。SPIの推奨法では、フェリシティ比は圧力容器、タンクとも0.95以上の製品を合格とするようにすすめている。

これまでにSPIの推奨法をもとに行われたAE試験は、5000を越えると報告されている。こうした実績をもとに、昨年(1985年)夏、AE法はFRP製構造物の健全性評価法としてASME規格¹⁸⁾に取り入れられ、標準化された。したがって、その適用は今後さらに広範囲に広まり、一般化していくものと考えられる。

4. セラミックスへの適用

4.1 セラミックスにおけるAE発生の特徴

セラミック材料の中でも陶磁器、耐火物に対するAE計測の適用は以前から行われている。陶磁器はシリカガラスマトリクス中にムライトが分散した系と考えられ、耐火物は多数の気孔を有する複合材料とみなされる。この場合、き裂が不均質材料中を進展することになり、その時発生するAE信号の振幅値は大きく、容易に計測可能である。

一方、ファインセラミックスは強度と信頼性の向上を目指し、結晶粒の微細化と均一化の方向に開発が進行している。粒径が微細になると個々の結晶粒の破壊により放出されるエネルギー量は粒径の三乗に比例して減少するため、突発型AEの振幅値は小さくなると考えられる。数十 μm の粒径を持つアルミナ多結晶体と、数 μm あるいはサブミクロンオーダの結晶粒で構成される窒化ケイ素や部分安定化ジルコニアとでは、観測される振幅

値に40dB(100倍)程度の差が生じる。したがって、ファインセラミックスに対してAEによる非破壊検査法を進展させていくには、変換子やアンプ等のハードウェアの性能向上が必要となる。

4.2 材料試験への応用

4.2.1 DT試験

セラミックスは、破壊じん性値以下の応力拡大係数のもとでゆっくりしたき裂成長(slow crack growth)を生ずる。遅れ破壊を予測するためには、slow crack growthにともなうAEが検出可能でなくてはならない。セラミックスのAE特性を把握するために、き裂進展を制御する手段としてDT法がよく利用される。ファインセラミックスのAE特性は岩崎によって詳細に調べられている¹⁹⁾。

ここでAEイベント総数をN、AE事象率を dN/dt とする。き裂進展速度 V_c が一定であれば次式が成立する。

$$dN/dt = (dN/dS)(dS/da) V_c \dots\dots\dots(1)$$

この式でSは破面面積、aはき裂長さであり、 dS/da は試験片とき裂の形状によって決まる。AE特性を表わす材料定数と見なせるのは、 dN/dS であり、破面が単位面積だけ増化する際に発生するAE数である。逆にAEが一つ発生することに対応する破面の増加 ΔS は、

$$\Delta S = dS/dN \dots\dots\dots(2)$$

と表わされる。さらに $\Delta l = (\Delta S)^{1/2}$ は、AE発生源の寸法の日安となる。表1に、各種セラミックス材料のAE特性値および平均粒径を示してある。平均粒径の大きなアルミナではAE発生源寸法と粒径が対応するが、窒化ケ

表1 セラミックスのAE特性

材 質	アルミナ				窒化ケイ素		ジルコニア	炭化ケイ素	
	TPA-10	ADS-10	ADS-35	ADS-80	HP-SN	S-200	TZR-2	Cerasic-100	
密度 (g/cm ³)	3.98	3.80	3.80	3.60	3.27	3.19	6.00	3.10	
β (m ⁻¹)	1.10×10^4	1.41×10^4	1.18×10^6	5.66×10^5	3.41×10^5	3.41×10^5	6.77×10^4	4.63×10^5	6.45×10^5
dN/dS (m ⁻²)	1.10×10^9	1.41×10^9	1.18×10^9	5.66×10^9		6.77×10^7	4.63×10^8	6.45×10^8	
ΔS (m ²)	9.09×10^{-10}	7.09×10^{-10}	8.47×10^{-10}	1.77×10^{-9}	2.93×10^{-9}	1.48×10^{-8}	2.16×10^{-9}	1.55×10^{-9}	
Δl (μm)	30.1	26.6	29.1	42.1	54.1	122	46.5	30.4	
粒径 (μm)	~25	~15	~15	~3	~1	~1	~0.3	~15	

イ素、部分安定化ジルコニアなど微細結晶粒で構成された材料では、粒径よりもはるかに大きな面積の破壊によってAEが発生している。

次に、き裂が一定速度で進展する際に発生するAEの振幅分布は、 $n(V)$ を単位時間当りのAE事象率、VをAE信号振幅、また V_0 を規格化因子とすると、

$$n(V) = a(V/V_0)^{-b} \dots\dots\dots(3)$$

と与えられる。図12は、アルミナのDT試験で得たAE振幅分布を表わしており¹⁹⁾、直線の勾配bはき裂速度と

ともにわずかに変化する。一方、窒化ケイ素のAE振幅は、き裂進展速度により大きく影響される。AE変換子の感度に限界があるために、極めて遅いき裂進展に対しては、AEは検出されなくなる。図13に、常圧焼結窒化ケイ素のAE特性のき裂速度依存性を示す⁵⁾。縦軸は $\Delta S/dn$ に対応する。ただしdnはき裂の幅であり、この場合は500 μm である。このAE計測条件において、窒化ケイ素では 10^{-4}m/s までのき裂進展しか検出されなかったが、部分安定化ジルコニアでは、 10^{-7}m/s 以下まで検出可能

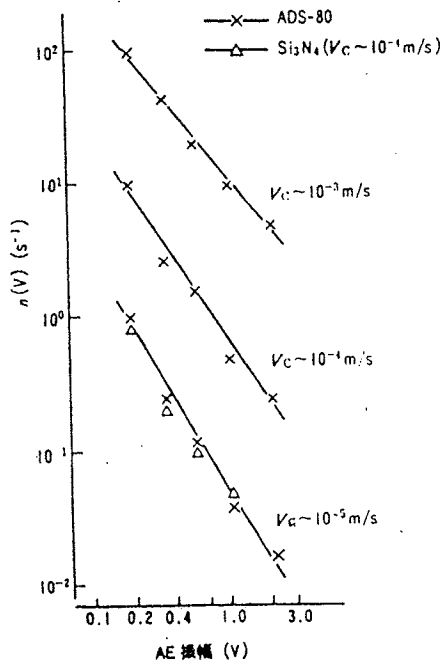


図12 AE振幅分布のき裂速度依存性

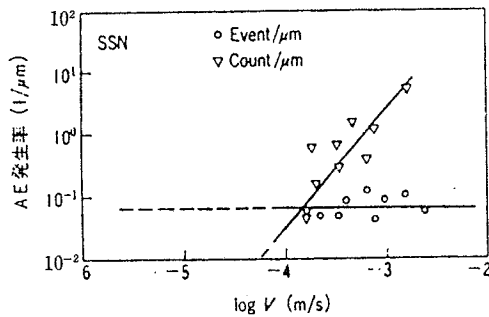


図13 AE特性のき裂速度による変化

であった。AE振幅分布，振幅の速度依存性，材料による特性の差異が，いかなるき裂進展機構に起因しているのかは，今後の興味ある研究課題である。

4.2.2 曲げ試験

セラミックスの曲げ試験において，破断以前にAEが検出できれば，破壊予測や保証試験に直接応用できる。

Gogotsiら²⁰⁾は，反応焼結窒化ケイ素の曲げ試験中にAEが発生を開始する応力 σ_{AE} の分布が，曲げ強度と同じワイブル分布に従うことを見だし，平均強度の60~70%の予負荷により保証試験が可能なることを示した(図14)。

常圧焼結窒化ケイ素に対しては，強度の低い試験片では破断直前でしかAEが検出されず，強度の高い試験片ほど破断強度と σ_{AE} との差が広がることが報告されている。

4.2.3 熱衝撃試験

ファインセラミックスに対しては熱衝撃破壊抵抗が，また耐火物に対しては熱衝撃損傷抵抗が耐熱衝撃性の評

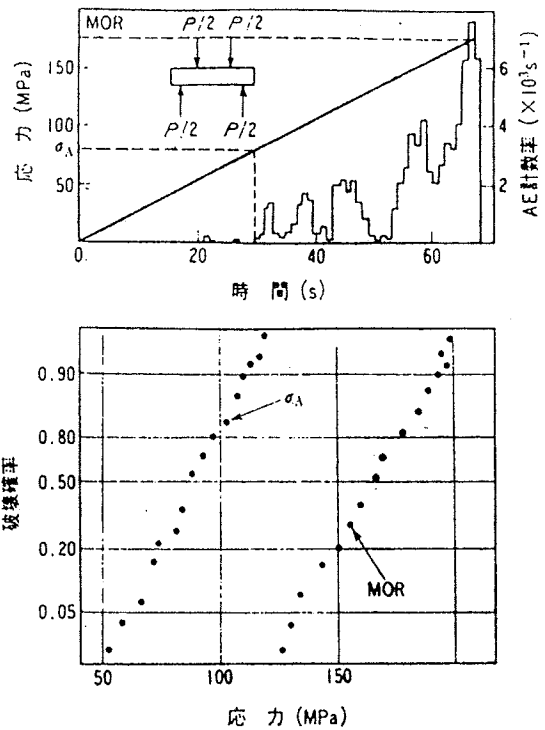


図14 曲げ試験時のAE発生

価パラメータとして利用される。材料特性としての熱衝撃破壊抵抗は，熱膨張係数やヤング率などの熱的・弾性的定数から計算されるが，これとは別に急冷後の試験片の強度を測定し，著しい強度劣化を生ずる急冷温度差で熱衝撃特性を評価することが行われている。強度の低下は熱衝撃による表面クラックの生成によるものであるから，AE計測によりき裂発生が検出できれば強度試験を行うことなく熱衝撃特性が把握できる。Ouanezarら²¹⁾は，加熱した円板状試験片に空気を吹き付けて急冷し，導波棒を用いてAE発生を測定した。アルミナおよびマグネシア部分安定化ジルコニアのAEは，急冷温度差が約500℃を越えた付近から急増した。またAE発生に対する熱サイクルの履歴の効果も観察された。

なお，耐火物の耐スポーリング性試験に対するAEの適用については，極めて多くの研究²²⁾がなされ，実用化も進んでいる。

4.2.4 圧子圧入試験

圧子圧入法は，ピッカース硬さ試験による圧痕にともなうクラック長さの測定より破壊じん性値Kcを求める方法であり，その簡便さからKcの相対評価に広く使われている。圧子圧入時には，クラックの発生，成長，停止が続いて起こるため，この方法はぜい性材料の微小破壊に対する格好のモデルを提供する。Lawn, Evansらの単純モデルに対する弾塑性解析によれば，圧子圧入過程において，まず円形クラックが圧子直下の塑性域と弾性域の境界に発生する⁵⁾。負荷過程において，メディアーク

ラックは弾性応力場と残留応力場により安定成長を行う。除荷時には残留応力により表面方向に成長し、半円形の最終形状となる。この際、表面に平行なラテラルクラックが発生することも多い。

円形クラックの発生する臨界荷重 P^* と Kc との間には、次式が成立する。

$$P^* = \lambda \cdot Kc (Kc/H)^3 \dots\dots\dots(4)$$

木村²³⁾ら、Lankford ら²⁴⁾は、AE 発生開始点から P^* を決定することにより、 Kc を推定している。また松尾 ら²⁵⁾は、圧子圧入試験において AE 信号を計測し、全エネルギーが急増する点の荷重 P_{th} のワイブルプロットを行い、ピッカーズ圧子圧入において、ほぼ2パラメータワイブル分布に従うことを見いだしている。

荷重保持時間中および除荷過程においても、AE は観察される。AE 事象総数 N ととき裂進展で形成される自由表面 S との間に、よい対応の見られることが本間らにより報告されている²⁶⁾。

一方、球型の圧子をぜい性材料に押しつける際には、Hertzian クラックが発生する。Swindlehurst ら²⁷⁾は、ガラスの Hertzian クラックの発生を AE より検出し、解放されるエネルギーと AE との定量的な比較を試みている。井川ら²⁸⁾は、ダイヤモンドの微小破壊強度を知る方法として AE を利用した Hertz 強度試験を考案し、その適用範囲を検討している。

4.3 原波形解析

検出される AE 波形は、試験片の応答関数および変換子の応答特性に強く影響されているため、その振幅、立上り時間、周波数成分など観測量の物理的意味は不明確である。しかしながら、試験片の応答関数を計算あるいは実験的に求め、また応答特性が既知である変換子を用いることにより、検出波形から逆変換の手法で試験片、変換子いずれにも影響を受けない原波形を得ることができる⁷⁾。原波形は、微小破壊のエネルギー解放量、割れ速度、割れ面積など破壊力学的に重要な特性量に関する情報を含んでおり、破壊素過程の定量的評価を可能にする。

図15に、セラミックス製 CT 試験片において、原波形解析を行う時の変換子配置を示してある。6個の変換子を図の如く配置することにより、AE 発生源の三次元位置標定を正確に行うことができる。各変換子で観察される検出波形を、変換子、計測系および試験片の応答関数で逆たみ込み積分してセラミックス中に生ずる微視割れのモーメントテンソルを求め、さらに破壊力学的解析との対応により、割れの発生時刻、位置、傾き、モード、大きさなどを定量的に評価する。

図16は、一例として原波形解析で得たアルミナの破壊じん性試験中にき裂先端のプロセスゾーン内に形成される微小クラックの寸法分布を、細粒試験片（上図：粒径

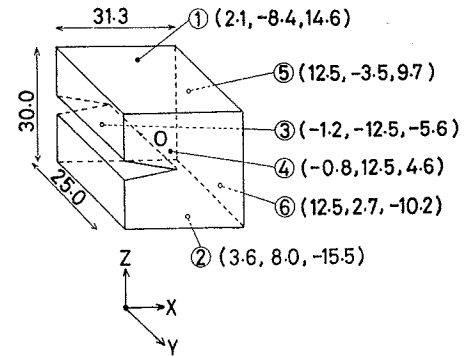


図15 セラミックス製 CT 試験片の原波形解析における変換子配置

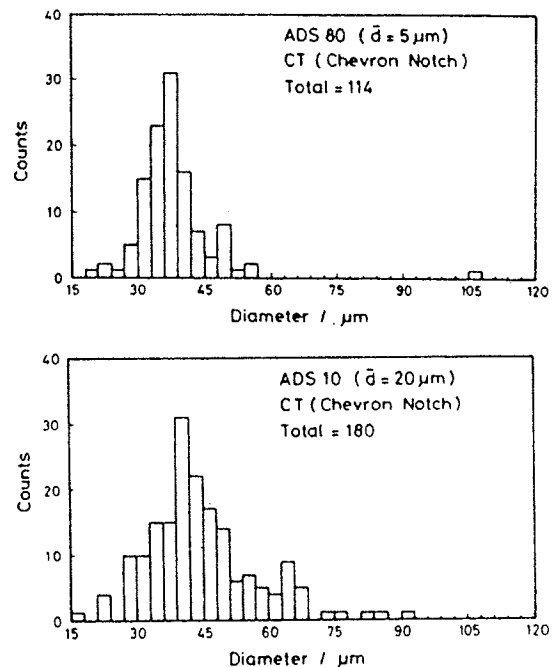


図16 プロセスゾーン内に生じた微小クラックの寸法分布

5 μ m) および粗粒試験片（下図：粒径20 μ m) について示したものである⁴⁾。細粒試験片では直径40 μ m 程度のき裂発生が主であるのに対し、粗粒試験片ではこのほかに直径60 μ m を越えるき裂が多数発生している。破面の SEM 観察等により、割れ経路は細粒試験片では40 μ m 程度のステップを基本としたジグザグ状であるのに対し、粗粒試験片ではより大きなステップを含み、比較的平坦であることがわかった。ところで、割れ進展抵抗は細粒試験片の方が粗粒試験片に比べはるかに大きかった。その原因は、前述した割れ素過程（経路）の相違、すなわち細粒試験片ではプロセスゾーン内で直径40 μ m 程度の微小クラックが多数ジグザグ状に発生するのでエネルギーを吸収しやすいのに対し、粗粒試験片ではより大きなクラックを含むので割れ進展が容易に起こりうるためであることが、原波形解析により定量的に評価可能で

あった。

4.4 非破壊評価法としての応用

よく知られている評価法に、スペースシャトルの外壁の熱絶縁材として用いられるセラミック・タイルに対するAE法の適用がある⁵⁾。この場合、通常のUTが使えないため、適当な応力を負荷して内在き裂から発生するAEを検出する検査が実施されている。

また、保証試験時のAE計測により有害欠陥を判定し、部品のスクリーニングを行うには、複雑形状部品に対し所定の応力を負荷する技術が必要とされる。たとえば、高温に保持した部品に冷却ジェットを吹きつけることで任意の部分に熱応力を与えることができ、セラミック部品の熱衝撃抵抗性の保証が可能となる。

一方、生産現場における非破壊評価法としてAEは、最終製品の試験評価だけにとどまらず、製造工程における欠陥の発生を検出することによってプロセスの改善を図ることに適用できる。たとえば、ピエゾセラミックの焼結過程において、加熱・冷却プロセスで割れが発生したという実例があるが、焼結後の冷却時にAE発生が認められたことにより、冷却曲線に問題のあることが判明した。この場合、製品開発の段階でAE計測からの知見をもとにプロセスを改善し、製品の信頼性を高めることに成功している。

5. まとめ

AE法の新素材、特にFRPとファインセラミックスへの適用の現状について、まとめてみた。

AE法は、材料の破壊現象そのものをとらえ、とりわけ異なる破壊機構を識別できるという特長により、FRPの材料特性を評価する優れた評価法として、さらに進んで材料開発を進めるうえでなくてはならない手法の一つとして、実験室で広く用いられている。また実機FRP構造物では、劣化損傷過程をモニターする非常に有力な手段として汎用され、特に化学産業の分野において、耐食FRP製タンク、圧力容器、パイプの健全性評価試験として、AE法のコード化がSPIの手で進められ、ASME規格にも1985年夏取り入れられた。今後その特性を生かし、FRPの材料試験法の一つとして、また実機FRP構造物の健全性評価法として、さらに適用が広まるものと考えられる。

一方、セラミックスへの適用に関して、この手法はクラックなど微小欠陥の検出に敏感であり、かつ複雑形状大型部品の応力負荷条件下で適用しうる唯一の手段であるため、非破壊評価法の一つとして構造部品の使用中に

おけるクラック進展の監視と寿命予測、保証試験時の微小破壊の検出などに応用が期待される。現状では実験室レベルの技術であるが、セラミックスのAE研究は近年急激に増加しており、計測系の高度化および原波形解析など新しい試験法の登場により、実用レベルの技術へと着実に成長していくものと考えられる。

おわりに本稿を書くにあたり、貴重な資料を提供するとともに、有益な討論をいただいた、名古屋工業技術試験所の若井氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 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(1976年)
- 2) 湯山茂徳；強化プラスチック，31，No. 9.433(1985)
- 3) 金原 勲；日本複合材料学会誌，10，97(1984)
- 4) 岸 輝雄；セラミックス，20，No. 10，870(1985)
- 5) 若井，松野；セラミックス，20，No. 10，879(1985)
- 6) 湯山，今中；第4回AE総合コンファレンス論文集，p. 13(1983)
- 7) 大平，岸；鉄と鋼，70，2188(1984)
- 8) 岸 輝雄；軽金属，31，266(1981)
- 9) 大塚裕光；日本複合材料学会誌，10，102(1984)
- 10) 志波，岸，榎；第5回AE総合コンファレンス論文集，p. 58(1985)
- 11) 湯山，長谷川，川上；第4回AE総合コンファレンス論文集，p. 114(1983)
- 12) H. Kishimoto and M. Suzuki；Proc. 1st Intern. AE Symp. on FRP, Session 3, San Francisco(1983)
- 13) 林，角田，中井；航空宇宙研究所報告，TR707，1982年4月
- 14) 金原，大沢；AE委員会資料No. 69，日本非破壊検査協会(1983)
- 15) G. S. Whally and P. T. Cole；Proc. 1st Intern. AE Symp. on FRP, Session 4, San Francisco(1983)
- 16) SPI；Recommended Practice for AE Testing of FRP Tanks/Vessels
- 17) T. J. Fowler；Chemical Processing, March, 24(1984)
- 18) ASME, Section V-N. D. E., Article 11, "AE Examination of FRP Vessels"
- 19) 岩崎秀夫；材料科学，19，273(1983)
- 20) Gogotsi et al；Proc. Ultrason. Int., 83，69(1983)
- 21) N. Ouanezar et al；Rev. Int. Hautes Temper. Refract., 19，239(1982)
- 22) 熊谷，内村；窯業協会誌，89，500(1981)
- 23) S. Kimura et al；Rep. Res. Lab. Eng. Mater. Tokyo Inst. Technol., 1，105(1982)
- 24) J. Lankford and D. Davidson；J. Mater. Sci., 14，1662(1979)
- 25) 松尾，野末；日本機械学会論文集(A編)，50，495(1984)
- 26) 本間，鳥越；日本機械学会論文集(A編)，第462号，499(1985)
- 27) W. E. Swindlehurst and T. R. Wilshaw；J. Mater. Sci., 11，1653(1976)
- 28) 井川，島田；精密機械，48，177(1982)