

構造物破壊挙動等の計測のためのAE利用

Applications of Acoustic Emission for Measurement of Fracture-Behavior of Structures

山口 楠 雄*
Kusuo YAMAGUCHI

構造物を省資源化された設計で実現させることは今後の重要課題であるが、この実現に当たって十分な安全性あるいは防災性がなければならない。アコースティック・エミッションを構造物の破壊挙動などの観測に利用し、破壊予測と安全性の確保に役立てることは、この点から一層重要性を持つてくる。本文はこの面でのAE利用の現状を述べ、さらにAE法利用の有効性を高めるため、当所で行われている波形情報利用のシステムおよびAE計測システムの客観的評価方法の研究の概要を紹介する。

1. はじめに

大型構造物のみならず構造物全般について、省資源化された設計で実現せしめることは、これからの工学上きわめて重要な課題である。このことは使用資源の転換を含む資源の直接的節約および加工の省エネルギーおよび省コストを含んでいるばかりでなく、維持のための省資源からさらに移動物の質量低下による移動エネルギーの節減など広範囲の目的を包含している。この課題に対して、構造設計の進展と同時に、各種の新材料の適材適所への採用が重要であると考えられるが、さらに十分な安全性および防災の配慮が加わってはいじめて目的を達成することができる。本所では従来からAE法の研究を行って来たが^{1),3),6),7)}、この一つとして材料および構造物の試験および監視を有効に行うことを目的とした省資源化最適設計のための構造物の内部挙動および破壊予測情報収集の研究をアコースティック・エミッション(AE)利用の面から行っている。

複合材料あるいは他の高強度材など既存の材料に代わる新材料等を含んだ構造物の最適設計のためには、材料もしくはこれを用いた構造物の内部挙動および破壊予測のための情報が大きな助けになる。これは材料および構造物の試験時にもきわめて有用であるだけでなく、使用時の監視にも大きな効果を期待されるものである。

AEを利用して構造物あるいは材料の変形、応力下の欠陥あるいは破壊の挙動を観測する技術は、材料研究および防災工学上の重要な手段となりつつある^{2),3),4)}。破壊力学などへの利用については本所を含めて多くの例があるがここでは特に述べない⁵⁾。構造物についての試験あるいは監視についても多くの例があり^{6),7)}、本文でもとくに省資源に関係する例について後に述べるように実用上かなり有効に用いられつつある。

以上述べた様に、AE法は万能ではないがすでにかな

りの有用性を示している。しかし、AE法にももちろん多くの問題点がある。すなわち、その一つはAE源、伝播および変換子等の特性の定量化および標準化の問題で、これはさらに破壊との定量的対応および計測・標定システムの定量的評価あるいは計測結果の信頼度の予測もしくは推定の問題へとつながっている。環境および内部の雑音も大きな問題であるが、受信AE波の波形情報の高度利用も重要な問題の一つである。

従来のAE法では受信AE波の振幅分布・頻度等のマクロ情報および到達時間差など波形の持つ情報のごく一部を利用するにすぎない方式が多く、多発AE・高雑音環境あるいは異なった発生機構によるAEなどの場合には著しく計測効率を低め、計測結果の信頼度を下げていると考えられる⁸⁾。この欠点に対して、事象ごとのエネルギーあるいは振幅などを計測するシステムも用いられつつあるが計測速度が低く、またデータの利用方法も不十分である。

以上の問題点に対し、計測・標定システムとして本所では同定・標定・判別などに役立つパラメータを系統的に検討した方式を開発中であり⁹⁾、また計測・標定システムの評価のために準定量的なAEシミュレータの開発を行ってきた¹⁰⁾。これらのシステム開発の進展により一般の構造物・材料の計測・標定のパフォーマンスの向上はもとより、複合材料のように内部挙動の一様でないものに対しても有効性の向上が期待される。

2. 省資源のためのAEの利用

AE法の利用は現在広い範囲に広がりつつあるが、破壊力学・材料物性の研究および非破壊検査の一環としての構造物試験あるいは構造物の破壊予知・安全性確保のための監視に至る種々の用途は、広い視野から見ればすべて省資源を目的とした工学的な利用と見られなくもない。

しかし、ここでは直接的に省資源に寄与していると見

* 東京大学生産技術研究所 第3部

られるA Eの利用,特に構造物の監視あるいは試験に対する適用の例について現在までに報告されているものの中から数例を挙げて説明する。

原子炉中に運転中に生じる応力腐食割れなどによる故障を未然に防ぐ必要性は省資源はもちろんであるが,安全性確保の点から強く認識されている。このためA E法を含めた有効な監視方法の研究が各方面で取り上げられてきている。この中で初期の段階で行われた大規模な研究は米国のEdison Electric InstituteとTennessee Valley Authorityがスポンサーとなって,1973年までSouthwest Research Instituteのプログラム管理下にIdaho Fallsの廃却されたEBOR炉の容器を用いて行った実験である¹¹⁾。A E関係の実験はBattelle Northwest Laboratoryの技術的管理下に多数の協力者を集めて行われ,A E関係の計測技術に大きな進歩をもたらすとともに,環境雑音,変換子校正,多チャネル標定などにおける問題点の提示にも役立ったことはよく知られている。

その後,米国のみならず我国でも各種の研究が行われ,最近では原子力工学試験センタ磯子工学試験所における304スレンレス鋼管の曲げ試験等について電力中央研究所を主体とした大規模なA E法による実験が行われている。

実機についての運転中の監視の実験研究としては,米国Philadelphia Electric CompanyのPeach Bottom原子力発電所のUnit 3,電気出力1,100MW,の炉等について行っているものがある。A E法の適用対象は炉全体でなく,き裂の発生しやすいと見られる給水ノズル2箇所,炉心スプレーライン2箇所,再循環バイパスライン1箇所および11個の主蒸気安全リリーフ弁である。

センサ間隔は数十cm以下で,かなり狭い範囲に対象を限定して実験を行っているが,1979年3月までの実験では多くのA Eが運転中の監視により観測されているものの燃料補給のための炉休止期間における他の非破壊検査結果との明確な対応は得られず今後の課題となっている。しかし,停止時の炉心の急激な冷却が構成材に悪影響を与えることがA E活動から分かったことなどのほかに,純粋なA Eではないが主蒸気安全リリーフ弁が弁座の腐食によるリークから誤動作することを完全に防止できたなどの効果も挙がっている。

原子炉関係の常時監視には環境雑音,苛酷な環境における検出端などの長期間の信頼性など難しい点が多いが,放射能被爆のため検査員が自由に近づくことのできない炉および付属設備の安全性確保のためのA E利用の必要度は,ますます大きくなると思われる。

次に述べるのは航空機に対する利用例である。米空軍などで多数使用されているジェット空中給油機C/KC-135の翼下側中央表皮板に起こる不安定き裂成長を検

出するためにA Eシステムが開発され使用されている¹²⁾。C/KC-135機に用いられている翼表皮材料は7178-T6アルミニウムで強度は大であるが脆い材料なので,数年以内には2024-T6アルミニウムに張り換えられる予定とのことである。しかし,この張り換えまでの安全性を保証するためにこのA Eシステムが使用されており,まさに省資源のためのA E利用と言えよう。

このシステムは,表皮上の桁間の長さ約7インチに達する不安定き裂の成長時にそのき裂の発生を検出して警告灯を点灯させ,板の点検と取り換えのための情報とするものである。センサ特性およびデジタルフィルタにより200~250kHzの帯域特性を持たせ,比較的長時間のきれつ成長(約800 μ s)によるA E波を検出することにより雑音を除去している。使用センサ数は明示されていないが1機当たり数十~百数十個程度ではないかと思われ,低コスト(4,300ドル/システム)で実現されている。

このシステムは超大型輸送機のC-5Aにも適用されて成功を収め,その後Dunegan/Endevco社は約1万5千個のセンサを米空軍に納入したことからみて大規模に実用されているのではないかと思われる。

航空機に対する利用としては,ほかにBattelle Pacific Northwest Laboratoriesの行っている練習戦闘機の重要強度材に対する機載のオンライン・モニタリングシステムの研究があり,これも安全性と材料の耐久限度までの有効利用の両立を目的としたものとみられる¹⁴⁾。

複合材料に対する例としては,金属性の容器の使用できない化学工場に使用されるFRP製の容器・管などの試験に用いられている。FRP製品の使用前の強度試験において内部の破壊が起こったかどうかは外部からは判別できないことが多いので,試験中にA E法により内部破壊の有無を保証する必要がある¹⁵⁾。

同様の例としてFRP製の架線工事用の人間リフトあるいは起重機部品の荷重試験時のモニタリングにA E法が開発されており,これらは本所における省資源の研究にも通じるところがあると思われる¹⁶⁾。

以上のほかに,長寿命の耐火煉瓦の開発の評価試験にA E法を用いる方法¹⁷⁾など省資源に関連するA E法の利用の範囲はきわめて広い。もちろん初めに触れたように金属材料に関するA E法の利用の研究はきわめて多数行われており,その成果も大きい。

3. A E計測の問題点

A E法は応力の加わった時に,材料の変形もしくは欠陥あるいはき裂の進展にともない発生する弾性波を利用しているので,変形もしくは破壊の進行が本質的に必要であることは避けられない点である。この本質にともなう短所ももちろんあるが,少数の観測点で大きな構造物

中の欠陥あるいは破壊を探知しようということと破壊活動に対応性のある信号が得られるという他の非破壊検査法にない特長を持っている。

このA E法の特長から、A E法に要求される特性は次の2点につ着る。すなわち、できるだけ少数の観測点すなわちセンサによりできるだけ正確に構造物あるいは材料中の破壊挙動を知りうるということが要求される。このことは少数のセンサでA E波をなるべくもれなく検出することと、検出されたA E波からA E源の位置と破壊挙動を正確に推定することであり、できればこの破壊挙動の観測結果から危険度あるいは破壊部分の形状と大きさを知りたい。

以上の要求を完全に満足させることは現在困難であるが、この要求される特性を眺めると具体的な研究すべき問題点が浮んでくる。すなわち、その一つは与えられたセンサによりA E波の持つ情報をできるだけ多く集めることであり、これには環境および計測系内部の雑音対策、A E波の有用な情報を効率よく示す特徴パラメータの選択と情報処理方法などがある。もちろんこのほかに、与えられた環境下でのセンサ等の計測系の信頼度、センサ特性および費用などがある。

他の一つとしては、破壊挙動と発生するA Eとの対応を明確にするという課題がある。この課題の追及からはA Eの発生機構と破壊力学との対応の定量化の研究にはじまり、伝播を含めたセンサ出力の定量化など多くの研究が必要となってくる。

これらの両者を結ぶものとしてA E源およびA E計測系の較正と標準化の問題があり、計測システムの絶対的な評価と計測結果の信頼度の推定もしくは予測が実用化されることが望まれる。

以上の問題点のうち、我々はA E波の特徴パラメータの選択とその情報処理の面からの研究によりA E計測・標準系の高性能化をはかること、およびA Eシミュレータによる計測・標準系の相対的定量評価の研究の二つの方向からのアプローチを行っている。破壊力学とA E発生機構の定量的解明は所内外の他の多くの研究者が行っているが、この結果は我々の評価の研究に取り入れることができ、絶対的評価の方向への発展に大きく役立つものと期待している。

4. 波形情報の利用によるA E計測・標定^{8), 9), 10)}

A E発生源の標定を有効に行い、同時にA E活動の情報も多く得るために受信A E波の波形情報を能率よく利用する研究を行っている。

現在までの多くのA E標定システムは、おもに複数センサへの信号到達時間差の単純計測のみによるものが多い^{11), 2)}。すなわち、その時間差計測方法は標定エリアを構成する各センサからのA E信号が域値をこえた点で最

初の信号を基準に早いものから順に時間差を計測するものである。このため多発A E時に、近接して短時間内に2個以上のA Eが発生した場合あるいは高雑音環境では誤った時間差が計測される確率が高くなる。ある実験例では、有効標定数は入感総数に対し2%以下であるのに対し、誤った組み合わせは約30%に達した⁹⁾。

この誤った組み合わせの中に含まれているはずの、標定に役立つA Eデータを分離して取り出すことができれば、有効標定率の大幅な向上が見込める。このための一つの方法として、A E波形からA E波の同定に適した特徴パラメータをリアルタイム抽出し、これを用いて同定・組み合わせを行う方式を開発している。この方法によれば、入力の高速読み込みと標定率の向上のみならず、増大した有用な入力情報による破壊挙動推定能力の向上、たとえば異種材料の複合による構造物材の中での破壊挙動の推測、危険度の判別などの能力向上が期待できる。

A E原波形はインパルス状の幅の狭い同一波形で振幅のみ異なるものと仮定すれば、A E波形の同定に用いるパラメータとしてはA E源と受信点間の距離を良く示す特性のものを選べばよいことになる。また、増幅度、雑音、伝播路の状態のわずかな変化に対し、なるべく影響を受けにくいパラメータであることが望ましい。

以上のことと、リアルタイム抽出が比較的容易に行いうる条件の妥協として次の二つの量を同定等のパラメータとして選択した。ただし、 a は包絡線検波後のA E波の振幅である。

1) 信号総エネルギー

$$E_t = \int_{t_s}^{t_e} a^2 \cdot dt \quad (1)$$

2) エネルギー・モーメント

$$T_{em} = \int_{t_s}^{t_e} a^2 \cdot t \cdot dt / E_t \quad (2)$$

実験等の結果から、エネルギー・モーメント T_{em} はほとんど距離のみの関数であり、総エネルギーはA E源のエネルギー・パラメータ兼補助的距離パラメータとなることが分かった。

以上述べたパラメータ抽出と、その前段としての信号分離をリアルタイムで行う試作ハードウェアの1チャンネル分の構成および外形を図1および写真1に示す。

連続したセンサ出力中から、個々のA E信号を分離するために、ここでは短時間振幅積分値 A_s による判別法を用いている。すなわち、

$$A_s = \int_{t_0}^{t_1} a \cdot dt \quad (3)$$

に示される A_s について、 $A_s < C_0$ であれば $t_s = t_0$ から信号が到達開始したものとし、その後 $A_s > C_s$ 、ただし

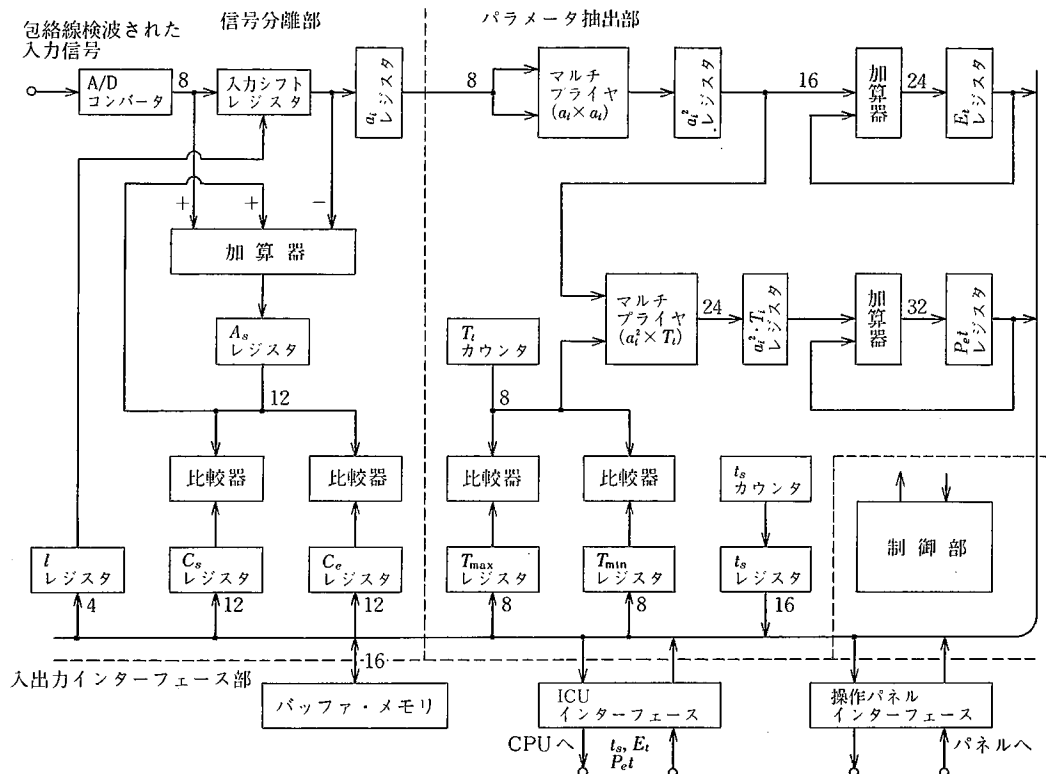


図1 AE波形パラメータ・リアルタイム抽出装置構成図
(1チャンネル分、図中数字はデータ・ビット数)

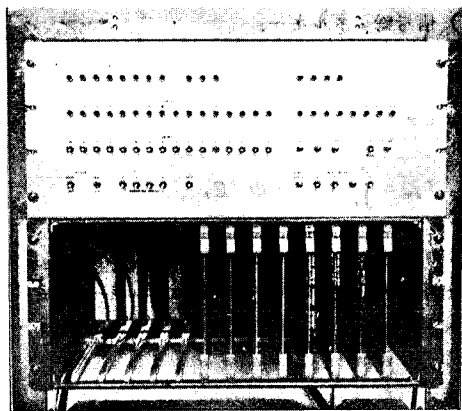


写真1 試作AE波形パラメータ抽出装置の外形
(1チャンネル用)

$C_e < C_s$ 、となれば信号終了と見なす。これにより、平滑化の特性を持ったよい分離が得られる。

CPUへは、総エネルギー E_t およびエネルギー・時間積積分 $P_{e,t}$ 、到着開始時刻 t_s がバッファを介して送られる。エネルギー・モーメント T_{em} は、 $T_{em} = P_{e,t} / E_t$ として CPU において計算される。

同定は異なったセンサからの入力パラメータ・データ

について次の原理によって行う。

- 1) 到達時間差からの計算距離差と T_{em} からの推定距離の差との一致
- 2) 到達時間差からの計算距離差と総エネルギーの差との一致

以上の同定により、3以上のセンサによる受信AE波の組み合わせができれば、これらの各組み合わせにつき時間差あるいは距離パラメータによる標定が行える。さらにこの方法のパラメータを用いれば、2センサによる標定もある程度行うことができるだけでなく、各種の判別処理機能をソフトウェアにより実現させることが期待できる。

5. AE計測・標定システムの評価^{10),19)}

従来の多くのAE計測装置の性能には意外にあまりな点が多く、センサ等の較正が行われたとしても異なった機種、条件での実験結果の量的な比較を困難にしている。AE計測装置で測定された振幅分布、頻度、総数などは原AEのそれとどの程度一致するのか、伝播媒体およびセンサ特性によりどれほど変わるものなのか、あるいはリングダウン・カウントはAEの事象数と振幅にどのように対応するのかなどの計測の基礎になる事項が必

ずしも明確でないままに多くの計測が行われている。また、その性能は入感A E信号の頻度、振幅などの、どの様な範囲で成立するのか等の問題もあり、さらに誤計測防止のためのマスク時間とか包絡線検波の時定数などの影響も無視できないはずであるが明示されているものはほとんどない。

標定システムにとっても同様で、最大処理頻度、呼損率に相当するマスク率、イメージあるいはゴーストのような実体に対応しない誤処理の有無、標定精度などの性能が問題となる。

以上の問題についてのあいまいさは測定結果の相互比較を困難にするだけでなく、計測・標定装置の性能の限界に近い環境あるいは実験対象の測定の結果の信頼度に大きく影響する。

A E源から伝播および変換子を経て計測装置に至る計測系全体の絶対的較正法の確立は現在早急には困難なので、我々は相対的な定量比較を当初の目的とした突発型A Eのシミュレータを開発し、これによるA E計測・標定装置の評価法の検討を進めている。

A E計測・標定システムの性能の中で測定結果あるいは結果の信頼度に影響するおもな機能は次のものである。

- 1) 最大計測率
- 2) 計測対応度
- 3) 誤処理率
- 4) 標定精度

上の各機能に対する評価を行うために使用されるA Eシミュレータの機能的な仕様として、次の項目を挙げる事ができる。

- 1) 最大加振頻度
- 2) 加振振幅分布

- 3) 加振間隔分布
- 4) 加振点数

これらの仕様は、評価される計測システムの性能に対し、十分なものでなければならない。我々の開発したA Eシミュレータは、図2に示す構成のもので、次のような性能を持っている。

- 1) 擬似A E発生率：最大平均値 1,200個/秒
- 2) 加振パルス発生最小時間間隔：20 μ s
- 3) 加振パルス電圧：最大 50 V, 255ステップ可変
- 4) 加振パルス幅：約 1 μ s
- 5) 出力チャンネル数：3チャンネル(増設可)
- 6) 加振振幅分布：一定、一様、対数直線分布その他
- 7) 加振間隔分布：一定、一様、指数分布その他

A EシミュレータによるA E計測・標定装置の基本性能の評価は次のように行う。まず理想状態に近い近似的な無限平板上加振器とセンサー群を取り付け、最大計測率など先に述べた3または4項目の測定を行う。

次に逐次、振幅および発生間隔に分布を与え同様の計測を行い、結果を比較し、さらに複数加振等の計測を行う。以上の諸量の比較から、システムの基本的パフォーマンスを知ることができる。

図3に、本所で数年前に開発された現用の標定システム⁹⁾の最大計測率の測定結果例を示す。この結果から、この標定システムは加振周期30msまではほぼ全入力処理し、その最大計測率は、36イベント/秒であることが分かる。

A E標定システムでは、対象材料あるいは構造物の形あるいは伝播路の状態などにより動作がかなり変わるので、以上と同様の計測を実験する際の構造物について行い、基礎データと比較することにより、実使用時のパー

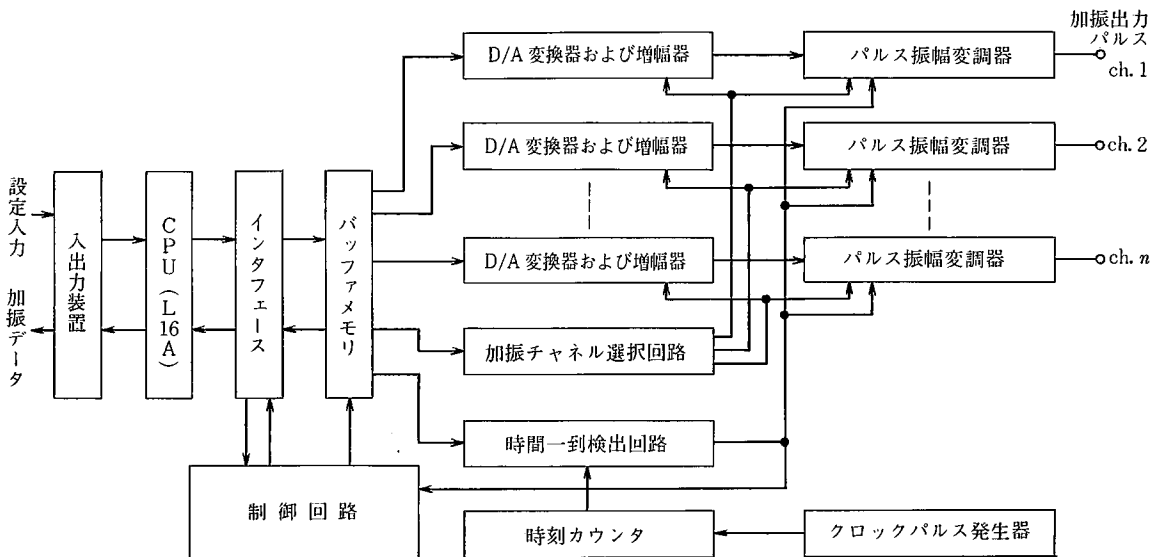


図2 A Eシミュレータ構成図

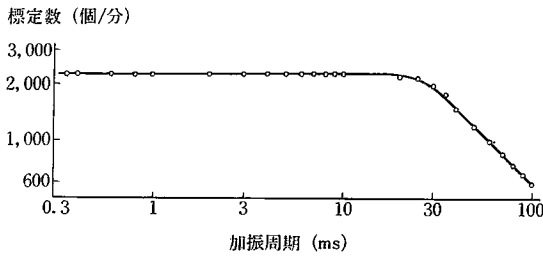


図3 AEシミュレータによるAE標準システムの最大計測率測定の結果例

パフォーマンスをより正確に予測することができる。

6. おわりに

省資源のためのAE利用の実例の説明、AE法の問題点、本所で開発中の波形情報利用のAE計測・標準システムおよびAE計測・標準システムの評価方法ならびにAEシミュレータの概要について述べた。

この中で新標準システムは、一般のAE法による破壊挙動観測と破壊予知に大きな効果をもたらすものと期待されるだけでなく、複合材等の新材料へのAE法の適用にも高いパフォーマンスを発揮するものと考えられる。

AEシミュレータとこれによる評価方法の研究は現在各所で行われているAE法による材料・構造物等の研究に量的な基準を与え、また本所で開発中のものを含めて各種の計測・標準システムの量的評価と比較に進展をもたらすものと思われる。またこの評価法は、AE源、センサ等の定量化の研究の進展を取り入れてより厳密なものに発展させようと考えている。

以上、おもに計測系の観点から述べたが、これらの計測・標準システムの開発と評価法の研究によって、一般的なAE法の利用に対してと同じく省資源のための研究にも今後大いに役立つものと考え、所内外の研究者の協力を得て研究を進めている。

(1980年1月19日受理)

参考文献

- 尾上, 山口, 市川, 嶋田, 野口 "多チャンネルAE標準システム" 生産研究, 25-4 (1973. 4)
- 尾上, 山口, 仲佐, 佐野, 磯野, 渡辺, "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. 12)
- 山口, 尾上, 市川, 嶋田 "多チャンネルAE標準システムとその原子炉模型型圧力容器の疲労試験への適用" 電気学会論文誌C, 95-6 (1975. 6)
- J. C. Spanner "Acoustic Emission: Who Needs It, and Why" Int. Conf. on AE, Anaheim (1979. 9)
- 鳥飼, 北川, 尾上, 李, 大平, 山田, "材料の有効利用を目的とした疲労破壊のAE測定の基礎的研究" 生産研究, 31-3 (1979. 3)
- 山口, 市川, 阿藤, 山上, 中井, "ユニット化時間差計測装置を有するAE標準システムを用いた圧力容器静圧破壊試験における標準実験" 第1回アコースティック・エミッション総合コンファレンス (1977. 12)
- 渡辺, 走崎, 有田 "AE法による構造物欠陥の有害度評価法とその適用例" 同上
- K. Yamaguchi, "T. Hamada, Y. Nakai" AE Source Location by Identification and Combination of Signals" The 4th AE Symp., Tokyo (1978. 9)
- 山口, 山上, 小柳津, 浜田 "AE波特徴パラメータ抽出装置" 第2回アコースティック・エミッション総合コンファレンス (1979. 10)
- K. Yamaguchi, T. Hamada, N. Yamagami "A Simulator for Multichannel AE Generations with Random Intervals and Amplitude" The 4th AE Symp., Tokyo (1978. 9)
- "In-Service Inspection Program For Nuclear Reactor Vessels" SwRI Project 17-2440, Reports 1-8.
- W. F. Hartman, J. W. McElroy "Acoustic Emission Surveillance of Boiling-Water-Reactor Piping; Nozzles and Valves" ASTM Special Technical publication (1979)
- M. E. Mizell, W. T. Lundy "In-Flight Crack Detection System for The C-135 Lower Center Wing Skin" The 22nd International Instrumentation Symposium, San Diego (1976. 5)
- P. H. Hutton, J. R. Skorpiak "Application of a Digital Memory Acoustic Emission System to Aircraft Flaw Monitoring" Int. Conf. on AE, Anaheim (1979. 9)
- T. J. Fowler "Acoustic Emission Testing of Fiber-Reinforced Plastics" ibid
- W. E. Swain "Nondestructive Testing of Aerial Man-Lift and Derrick Equipment Using Acoustic Emission Instrumentation" ibid
- 熊谷, 内村, 川上 "熱衝撃条件下の耐火物に発生するき裂の Acoustic Emission 法による検出" 窯業協会誌, 87-5 (1979. 5)
- K. Yamaguchi "Acoustic Emission Source Location by Identification and Combination of Signals" Int. Conf. on AE, Anaheim (1979. 9)
- 山口, 浜田, 山上, 浜田 "擬似AE発生装置によるAE計測標準システムの評価" 第2回アコースティック・エミッション総合コンファレンス (1979. 10)