

UDC 534.6-8
539.375
620.179.16
621.039.536.2

アコースティック・エミッションの計測技術

Instrumentation for Acoustic Emission Measurement

山口 楠 雄*

Kusuo YAMAGUCHI

アコースティック・エミッション (AE) は、構造物の破壊予知のための有効な手段となりつつある。ここではとくに突発形 AE による構造物の欠陥位置標定のための計測技術について述べ、さらに本所において開発した小形計算機を含む多チャンネル AE 標定システムによる原子炉模形圧力容器の内圧繰返し疲労試験における AE 標定について報告する。

1. ま え が き

AE (アコースティック・エミッション) は、固体が塑性変形もしくは破壊するときに発生する音であって、普通は超音波の領域を取扱っている。AE 計測は、この超音波が固体中を伝播してくる弾性波を対象としているので、技術的には超音波計測の応用の面が多い。しかし AE 計測は材料あるいは構造物にストレスのかかっている状態で行われるので環境雑音が多く、これを除くためのフィルタの使用あるいは論理回路、アルゴリズムなどによる処理が必要となる点、高温等の環境でセンサを長時間使用する場合がある点、多数のデータの記憶および情報処理が必要な点および多次元表示が必要な点などの相異がある。

AE 計測には大きく分けて連続形と突発形の二つの場合がある。塑性変形から出る連続形 AE の場合は、AE 信号の発生率と累積総数をデータとして得ることを目的とすることが多い。突発形 AE は、構造材の微小なわれの進行にともなって発生するもので、発生源の位置を知ることが計測の重要な目的となるので連続形の場合と同様な計測だけでは不十分な場合が多い。突発形 AE の信号レベルは、連続形に比較してはるかに大きい位置標定のためには複数のセンサへの信号到達時間差の正確な測定を行なう必要があるので雑音の除去をより厳重に行なうことと音速の選択が重要となってくる。

大形構造物の安全性確保のための試験あるいは監視に使用する AE 計測では、欠陥位置の標定が不可欠となってくるのでここでは突発形 AE の位置標定を中心とした計測技術について述べたい。

2. AE 信号

突発形 AE の原信号は鋭いインパルス状のものと考えられ、広い範囲の周波数成分を含んでいるものと見られる。しかし、電気的信号として観測される AE 信号は、原信号そのままではなく伝播ならびに変換子の特性を経たものとなる。

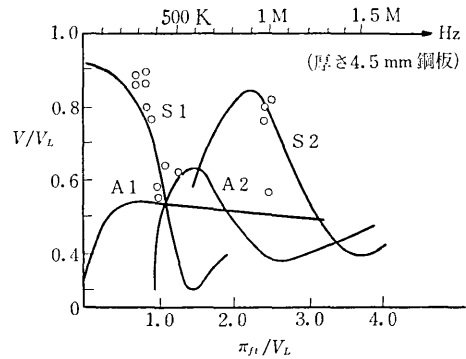

 $V_L = 2.30 \text{ To } 2.36 \times 10^6 \text{ インチ/秒}$
 $V = \text{群速度}$
 $f = \text{周波数}$
 $t = \text{厚さ}$

図 1 鋼板中の板波の群速度

固体中の弾性波には、たて波とよこ波および表面波があるが板によって造られた構造物ではラム波 (板波) が生じるので、受信される AE 信号はこれらの波の組合せとなり複雑な様相を呈する。鋼の中の音速は、たて波が約 5,840 m/s, よこ波が約 3,050 m/s, 表面波は 2,540 m/s であるが、鋼の板波の群速度は図 1 の曲線のようになる。厚さ 4.5 mm の鋼板についてパルス加振の場合の受信信号から速度と周波数を求めた結果を同図にプロットしてある。上側の横軸が板厚 4.5 mm の鋼板の場合の波の周波数である。

AE 源の位置標定を行なう場合、受信波の速度と周波数の選択は大きな問題の一つである。一般的には、板の厚い場合 (鋼で数 cm 以上のとき) はよこ波と表面波の中間の速度 (鋼で約 2,800 m/s) を選び、小さい厚さの場合は板波の速度を選べばよいとされているが、正確な標定のためには実験を含んだ十分な検討を行なうことが望ましい。

3. 変換子

AE 信号として取扱う周波数は普通 100 kHz ~ 2 MHz 程度の範囲なので変換子としては圧電形素子が一般的である。よく用いられるのは、チタン酸ジルコン酸鉛圧電

* 東京大学生産技術研究所 第 3 部

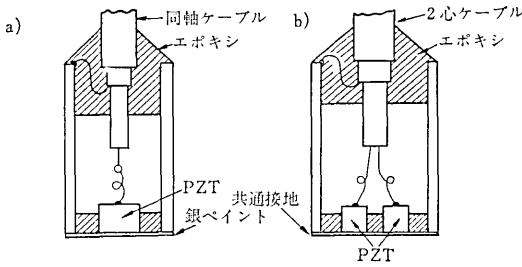


図 2 変換子の構造例

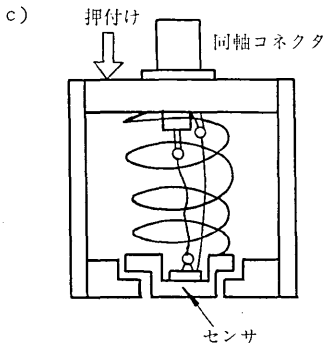
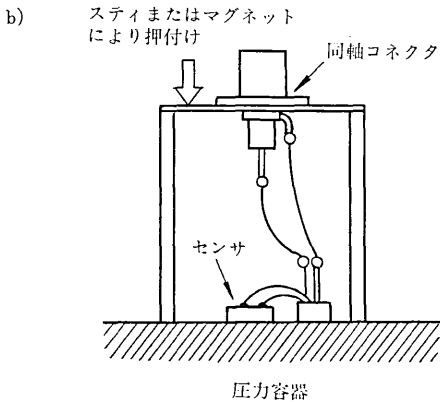
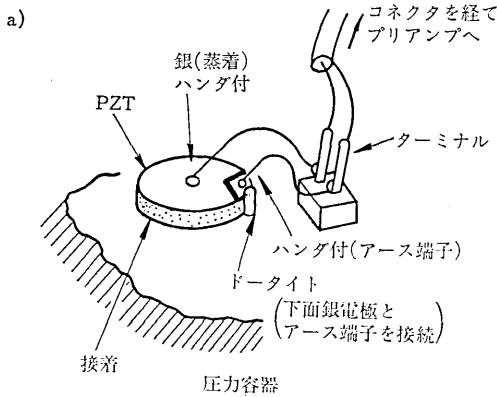


図 3 実験に用いた変換子の構造

セラミック (PZT) であって、厚み方向に分極してあり、両面に銀電極を焼付けてあるものを直径数 mm~十数 mm 程にカットして用いることが多い。

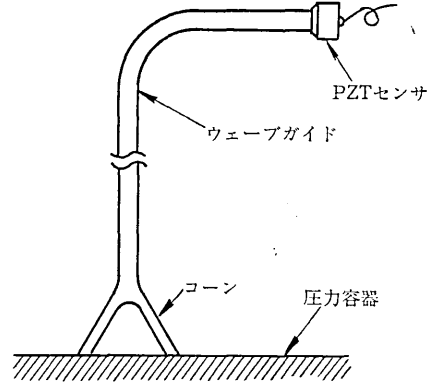


図 4 機械的ウェーブガイド付変換子

変換子 (センサ) の構造物への取付には工夫を要する。変換子の構造例を図 2 に示す。(a) は一般的な変換子で、(b) は雑音軽減のために差動形としたものの例である。変換子は、接着剤で取付ける場合とグリース等を介して押付けて使用する場合がある。押付け形の方が取付け、移動、交換などに便利であるが感度は接着形より低くなる。生研で実験に使用した変換子の実例を図 3 に示す。接着形の場合アース端子の取出し方が難しいが一例として図 3 (a) のような方法を用いた。(b) は接着形であり、(c) は押付け形で移動用のパルス加振器としても使用できる。

普通の PZT は、約 200°C 位までの温度で連続使用でき、さらに高い温度で使用できるもの例も発表されているが、高温物体の AE 計測のためには図 4 のようなウェーブ・ガイド付のものを用いる。この場合当然感度は低下する。

PZT 変換子は、かなり Q の高い共振特性を持っている。普通は、半径方向の共振を使用して特定周波数のみ高感度で受信するようにして雑音の除去と板波のモードの選択などに利用している。半径方向の共振周波数は、カットする直径により容易に変更できる。共振の Q があまり大きいとリングング時間が長くなり、また立上りも悪くなって時間測定の誤差を増すのでエポキシ樹脂などによって変換子を固めてダンピングをかける場合がある。AE 信号の波形を観測するには十分にダンピングをかけたフラットな特性のセンサが必要である。ダンピングをかけると感度は著るしく下るので信号レベルの低い場合には使用できない。

AE 計測を標準化するには AE 源の標準化とともに変換子の交換特性の較正が必要である。これについて研究はなされているが難しい点が多くこれからの課題となっている。変換子の周波数特性を調べるためにはサンドブラストによる白色雑音を使用する例があり、また感度の測定には同一の変換子による出力の反射波の受信出力レベルなどによる例がある。

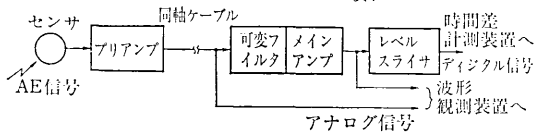


図 5 AE 計測用増幅器の構成例

4. 増幅器・フィルタ

AE 信号の変換子出力としては、普通十数 μV ~数 mV 程度のもを扱うので 50~100 dB 程度の増幅が必要である。また場合によってはさらに低レベルの信号を扱うことが必要となることもある。さらに環境による電氣的雑音あるいは機械的振動雑音などを除くためにハイパス特性のフィルタを用いる。電氣的な外部雑音あるいは増幅器の雑音を低減させるため、さらにローパス特性のフィルタを設けて不必要な帯域をカットする場合もある。板波のモード選択を行うためにバンドパス・フィルタを用いることもあるが、変換子の共振周波数の選択がより重要である。

雑音除去のためには、周波数を高く、バンド幅を狭くする方がよいが、高い周波数の AE 波は伝播中の減衰が大きく、狭いバンド幅は受信信号の立上りを悪くするので場合に応じて適当な周波数の選択が必要である。

構造物に取付けられた AE 信号の変換子と計測装置本体との間はかなり距離があるのが普通なので図 5 に示すような構成の増幅器を用いることが多い。前置増幅器は 40 dB 程度の固定利得の小形のものでセンサのすぐ近くに置かれる。増幅器の飽和を防止するためある程度のバンドパス特性を持たせる。

フィルタは帯域を変えられることが望ましい。主増幅器は可変利得のもので、この出力はそのままアナログ波形として観測されるとともにレベル・スライサを経て 2 値信号となり情報処理装置の入力となる。スライス・レベルを自動的に変えることが必要な場合がある。

5. AE 信号の処理

AE 信号から得られる情報としては次のものがある。

- (1) 発生率
- (2) 累積総数
- (3) 振幅あるいは振幅分布
- (4) 波形あるいは周波数スペクトラム
- (5) 到達時間差

(5) 以外でもっともよく利用されるものは (1) の発生率、あるいは (2) の累積総数である。

発生率は、単位時間の AE 信号発生数をカウントすることによって求まる。発生数をカウントするためには、スライス・レベルの選択が重要である。一つの方法として、図 6 に示すように増幅器出力の振動波形を一定レベ

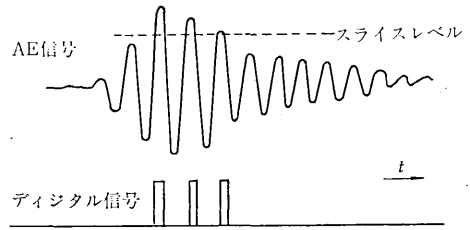
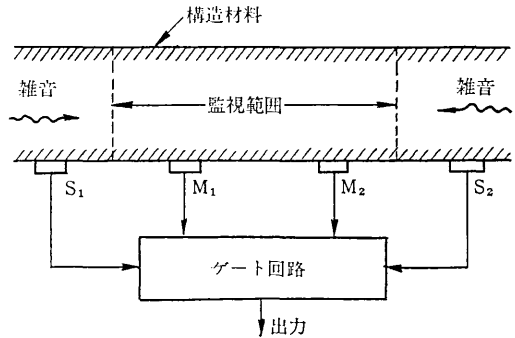


図 6 スライス・レベルによる信号の振幅重みづけカウント



M_1, M_2 : 計測用センサ S_1, S_2 : ゲート用センサ

図 7 ゲートによる外部雑音の除去

ルでスライスしてそのレベルをこえた波のサイクル数を全部数えることが行なわれている。この方法は、振幅による一種の重みづけ計数法である。これと異なり AE 信号の一回入力ごとに一定時間出力をホールドして AE の発生数そのものを計数する方法、あるいは包絡線検波の後に計数する方法などもある。

発生率、すなわち単位時間ごとの発生数がわかれば累積総数はこれを積分することにより容易に求まる。ただし累積総数は一定時間ごとに記録し時間的な変化が識別できるようにする必要がある。

発生率あるいは累積総数を求めるために単一のセンサを使用するとスライス・レベルをこえた信号は全部同様に処理され、雑音も同様にカウントされる。監視範囲を限って、その中の AE 信号を範囲外からの雑音から分離するための一方法として図 7 のゲートによる雑音除去方式がある。AE 信号検出センサの外側にゲート用センサを設けてゲート用センサに信号が先に入った場合には信号用センサの出力を抑止することにより AE 信号検出用センサの内側およびゲート用センサより信号検出用センサに近い範囲から発生した AE 信号のみを検出しようとするものである。この方法は小規模の突発形 AE 計測装置に用いられることが多い。

突発形 AE 計測を本格的に行なうにはどうしても標定が必要になる。標定を含んだ AE 計測システムについて次に述べる。

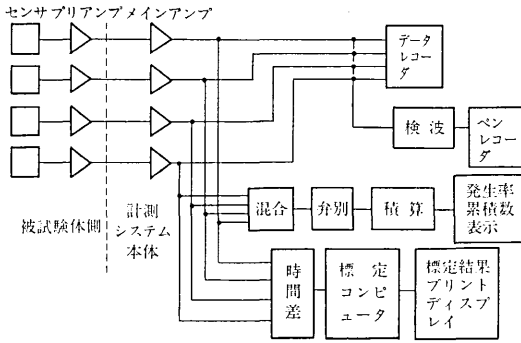


図 8 AE 計測システム構成例

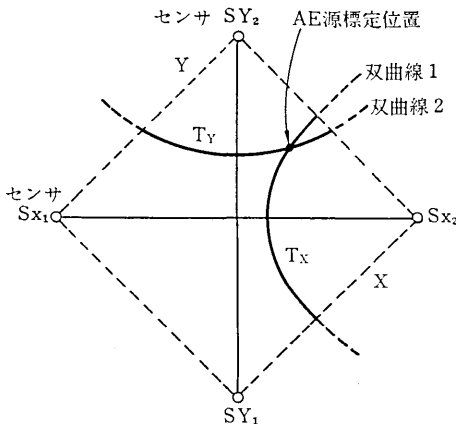


図 9 AE 標定原理 (2 対のセンサの場合)

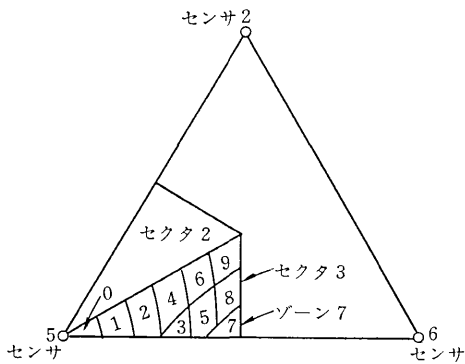


図 10 テーブル・ルックアップ標定方式の例

6. AE 標定

複数の変換子を用いて、それらに到達する AE 信号の時間差を計測し、これから AE 源の位置を標定することができる。たとえば、板による構造体では 3 個以上のセンサがあれば位置を求めることができる。

AE 標定の目的として次のものがある。

- (1) 圧力容器などの構造物において AE が頻繁に発生する欠陥箇所の発見。
- (2) ある場所のわれなどの時間的進行の追跡、推定、あるいは危険度の判定。
- (3) 監視している範囲外からの外部雑音と範囲内

に発生した AE 信号との識別。

などがあり、構造物の安全性確保のための試験のみならず、監視にとって非常に有用な手段を与えらるものと見られている。標定を含んだ種々の AE 計測を行なうシステムの構成例を図 8 に示す。

AE 標定の原理は、地震における震源地の推定と全く同じであるが、多数回の AE について標定を繰返し、統計的処理を行なって確度を上げることが行なわれている。

時間差計測はアナログ的にも行なえるが、アルゴリズムによる処理を前提とするとカウンタによるデジタル計測の方がすぐれている。時間差データをデータ・レコーダに記録し、オフライン的に計算機で処理する方法もあるがオンライン計算機による同時標定の方が便利であり、この方式が一般的になるとと思われる。

標定のためのセンサの配置は、一般的にはランダムでよいが、情報処理の利便さから規則的配置をとる方が多い。たとえば標定対象の構造物を 2 次元とした場合、図 9 のように正方形に配置すると、X 軸上のセンサ Sx_1 , Sx_2 間の信号到達時間差 T_x から双曲線 1 が求まり、Y 軸上のセンサ Sy_1 , Sy_2 間の時間差 T_y から双曲線 2 が求まるので AE 源はこれらの双曲線の交点として求まる。図 9 は、2 対のセンサによる例であるが 3 個のセンサでも同様の標定が行える。

標定のアルゴリズムには数値計算を行う方法のほかに表による方法もある。図 10 は正三角形に配置したセンサの例で、AE 信号が 3 個のセンサに、5, 6, 2 の順に到達すれば AE 源はこの正三角形を 6 等分したセクタのうちのセクタ 3 の中にあると推定し、次にその時間差に対応したゾーン番号を表から見出し、10 個のゾーンのいずれかに決める。この方法は、一つのセクタのゾーンの表さえあれば多数の三角形のネットで構成されるセンサ群によって囲まれる構造物全体の標定を行なうことができ、標定の情報処理速度が大きい点に特徴がある。

双曲線の式を直接解く方法はやや時間を要するが、センサ間隔の変更、ゾーンの大きさの変更、波の速度の異なる場合などにパラメータの変更のみで自由に使用できる点に特徴がある。

いずれにせよ標定のアルゴリズムの中にはセンサ数の冗長等を利用した雑音除去のプログラムが必要であり、ハードウェアにおける雑音除去とともに標定システムの重要点の一つである。

標定結果はプリントあるいは記録の他に、CRT ディスプレイに表示できることが望ましい。できれば標定データは、全部記憶しておき、試験終了後あるいは一定時間ごとに自動的に分類・集計されることが望ましい。

センサ間隔は S/N 比、すなわち雑音の大きさと AE 信号レベルおよび波の減衰からきまり、普通最大間隔

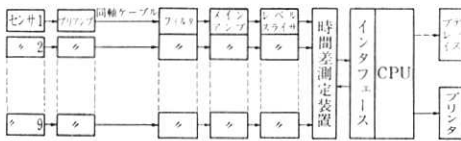


図 11 多チャンネル標定システムの構成

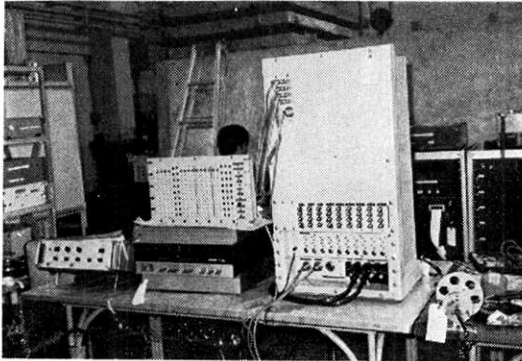


図 12 AE 標定システムの写真

(中央: CPU, 右側: メインアンプ, 時間差計測装置およびインタフェース装置, 中央上: ランプ盤およびマニュアル操作盤, 左側: 加振用パルス発生器, 手前にタイプライタがある。軽水炉模形の試験に使用中の写真, 前方コンクリート壁内に圧力容器がある)

1.5~5 m 程度が限度である。センサ数の減少は, AE 標定システムと標定作業のコストの低下につながるのとくに大形構造物の場合重要な問題となってくる。雑音の多い環境においてセンサ間隔を大きくとるため, デジタル的にハードウェアで相関をとる方式も発表されている。この方式によれば S/N 比が 0.6 位まで標定でき, センサ数を大幅に減少できるとのことであるが, ハードウェアのコストが高くなるのは避けられない。

図 8 に示すような多チャンネルの AE 計測システムをまとめて自動車に搭載した移動計測車もすでに使用されている。

本所で開発した AE 標定システムの構成図を図 11 に, その写真を図 12 に示す。この標定システムの内容についてはすでに発表した, 図 8 に示したシステムとことなり AE 標定を主目的として可搬化を考慮した非常にコ

ンパクトな設計になっており, 小形計算機によりオンラインのデータ処理を行なう点に特徴がある。このシステムのソフトウェアと CPU およびタイプライタを除くハードウェア全部は本所において設計製作したもので現在までにほとんど無故障で動作している。この全システムは小形のライトバンによって運搬できる。

7. AE 標定実験

図 11 および図 12 に示した AE 標定システムを用いて原子炉模形について実験を行ったのでその結果について概要を述べる。この実験は, 日本原子力研究所の行なっている軽水炉モデルの一連の繰返し疲労試験の一環として昭和 48 年 7 月から 9 月にかけて行なわれたもので, 東京大学は電力中央研究所からの委託研究によってこの日本原子力研究所との共同研究に参加し, おもに AE 標定を担当した。

この実験に用いた AE 標定システムは, 図 8 に示したもので, 原子力研究所東海研究所に CRT ディスプレイを除く全システムを搬入して使用した。

実験に使用した軽水炉模形は, 図 13 に示されるように内径 695 mm, 円筒部胴長 2,000 mm, 円筒部厚さ 23 mm, 円筒部外周 2,328 mm のもので, 胴のほぼ中央に同一円周上に 90° 間隔で 4 個の試験用ノズルが設けられている。これらのノズル 1, 2, 3, 4 の内側コーナ

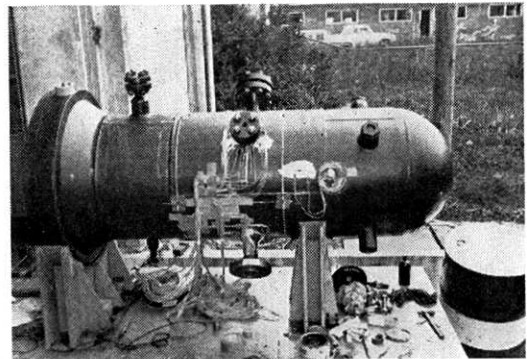


図 14 試験に使用した軽水炉模形圧力容器の写真 (試験準備作業中のところ, センサはまだ取付けられていない)

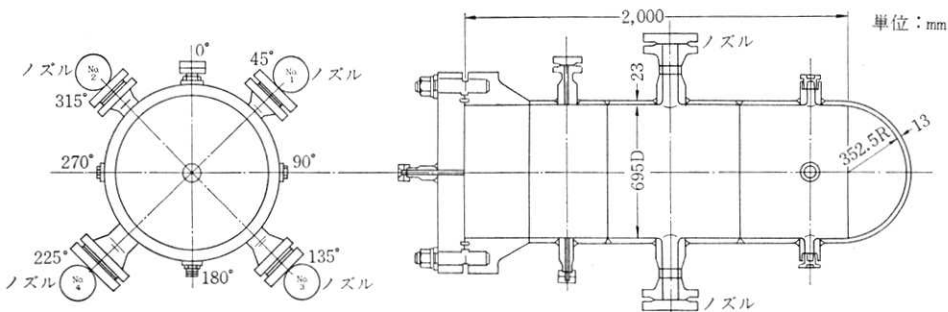


図 13 軽水炉模形圧力容器の構造

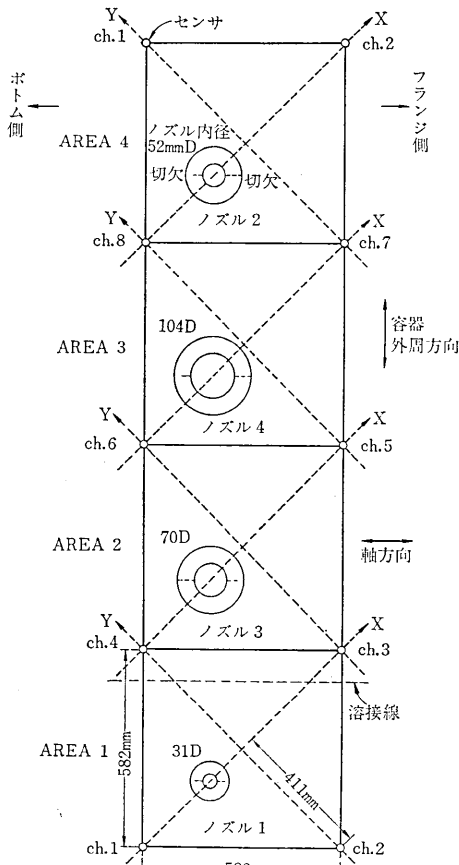


図 15 軽水炉横形圧力容器のノズルの位置およびセンサ配置

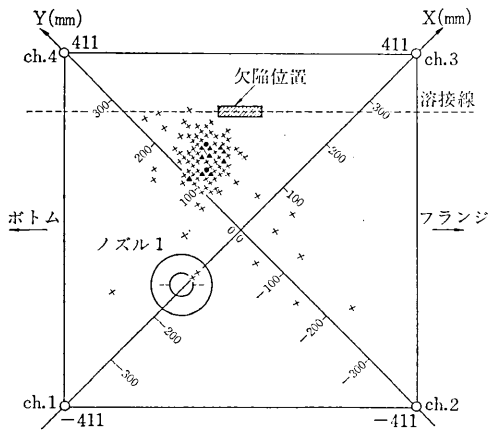


図 16 標定結果 (AREA 1, N=150~580)

に容器の軸方向に対向して人工的疲労われ発生のための切欠が入れている。この模形の写真を図 15 に示す。

センサ配置としては、各 4 個により正方形エリア 1 個を構成させる方法を取り、8 個のセンサで 4 個のノズルすべてを囲む図 15 に示されるような配置を用いた。座標原点付近は雑音による誤標定の可能性が大きいので、

ノズルが原点からずれるようにエリアを構成させた。音速は、はじめ 3,400 m/s を使い、約 12,280 サイクルから 2,800 m/s に変更した。

内圧 0 ~ 120 kg/cm² の繰返しを 5 CPM の速さで加えて試験を行なった。繰返しサイクル数 N = 約 150 ~ 580 の間に図 16 に示すような標定結果が得られた。これは溶接線の欠陥から発生した AE と考えられたが、後に超音波探傷の結果図 16 の斜線部に欠陥のあることが検出された。この溶接線からの AE 信号レベルはかなり大きく、増幅器利得 60 ~ 76 dB で十分標定できた。

疲労われの開始点では AE 信号はきわめて小さく、十分検出できなかったが、増幅器利得 100 dB 程度で、約 11,000 サイクル付近より標定可能となった。標定結果の例として AREA 3 の 19,000 サイクル以後のデータを図 17 から図 20 までに示す。はじめノズル 4 の両側の切欠の疲労われから AE が検出されたが、20,600 サイクル以後はフランジ側の AE が急増していることがわかる。20,933 サイクルでこのフランジ側の疲労われが貫通して試験を終了した。

AREA 3 以外の他の AREA についてもかなり良好

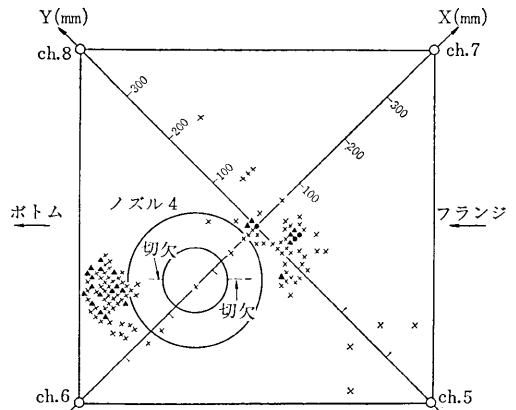


図 17 標定結果 (AREA 3, N=19,000~20,000)

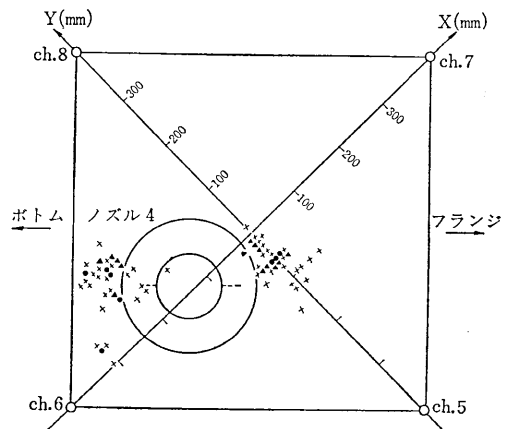


図 18 標定結果 (AREA 3, N=20,000~20,600)

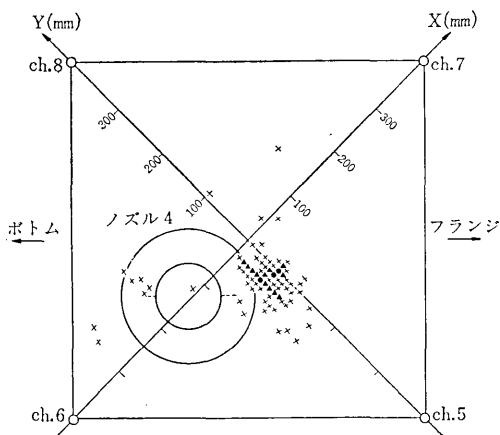


図 19 標定結果 (AREA 3, N=20,600~20,830)

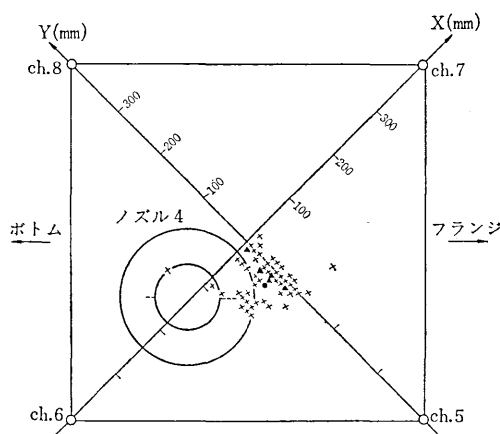


図 20 標定結果 (AREA 3, N=20,830~20,933)

な標定結果が得られ、試験後に調べた疲労われの進行の大きさと AE 標定数の大小とが一致する傾向を示している。

8. あとがき

アコースティック・エミッションの発生源位置標定を中心とした AE の計測技術と、本所において開発した標定システムの概要、ならびにこれを用いて行った軽水路模形の内圧繰返し疲労試験における標定結果の例を述べた。ここに述べられたような比較的低応力の多サイクル繰返し試験における AE 標定の例は今まで少ないのではないと思われる。このような実験ははじめてであったので不十分な点もあるが、AE 標定についてはかなり満足すべき結果が得られ、AE 計測における標定の重要性が確認されたように思われる。また溶接線の欠陥とことなり疲労われからの AE 信号レベルがきわめて小さいこと

などが認められた。

大形構造物の安全性確保のための AE の利用については、試験中の欠陥検出と破壊予知のみでなく、常時監視のできるシステムの開発が望まれている。これらの目的のためには雑音をはじめ解決を要する問題点が多く、今後一層の研究開発が必要である。

なお、軽水路模形についての実験は先に述べたように電力中央研究所、日本原子力研究所との共同研究として行なわれたもので、御援助下さった電力中央研究所原子炉安全管理研究室長大野博教授ならびに仲佐博裕氏などの方々、および日本原子力研究所構造強度研究室長藤村理人氏ならびに宮園昭八郎氏などの方々に深謝の意を表したい。また、AE について本所においてはかねてから尾上教授を中心として共同研究などの形で基礎的研究・調査からシステム開発まで広く研究が行なわれており、ここで述べた AE 標定システムの開発、およびこれを用いた実験も尾上研究室と山口研究室の共同で行なっているものであり、いつも AE について種々御助言をいただいている尾上教授はじめこの AE について研究に協力して下さった同研究室の諸氏および他の方々に感謝の意を表したい。

(1974年2月6日受理)

参 考 文 献

- 1) 尾上, アコースティック・エミッション, 日本音響学会誌, 28-3, 1972.
- 2) 尾上, アコースティックエミッションの計測, 非破壊検査, 21-4, 1972.
- 3) SWRI technical report to steering committee EEI project RP 79, 1972.
- 4) An addendum report to steering committee EEI project RP 79, 1973.
- 5) 尾上, 山口, 市川, 山田, 野口, 多チャンネル AE 標定システム, 非破壊検査協会秋季大会予稿 II-1, 1972.
- 6) 尾上, 山口, 市川, 嶋田, 野口, 多チャンネル・アコースティック・エミッション標定システム, 電気学会全国大会予稿 1381, 1973.
- 7) 尾上, 山口, 市川, 嶋田, 野口, 多チャンネル AE 標定システム, 生産研究, 25-4, 1973.
- 8) 山口, 尾上, 市川, 嶋田, 南崎, アコースティック・エミッション標定システム, 計測自動制御学会学術講演会予稿 1511, 1973.
- 9) 山口, AE の計測技術, 電気四学会連合大会シンポジウム予稿 288, 1973.
- 10) 尾上, 山口, 市川, 嶋田, 下間, 多チャンネル・アコースティック・エミッション標定システム(第2報), 電気学会全国大会予稿 1136, 1974.
- 11) 尾上, 山口, 市川, 嶋田, 下間, 原子炉模形圧力容器の内圧繰返し疲労試験における AE 標定について, 電気学会全国大会予稿 1137, 1974.
- 12) 尾上, 山口, 市川, 嶋田, 下間, 原子炉模形圧力容器の内圧繰返し疲労試験における AE 標定について, 非破壊検査協会春季大会 II-17, 1974.