小特集・新しい工業計測・制御

U.D.C. 539. 42. 082. 4 : 534. 6. 082. 73-8

# アコースティック エミッション計測法とその応用

## **Acoustic Emission Technique and Its Applications**

アコースティック エミッション法とは,材料や構造物が破壊する前に発生する弾 性波(主に超音波)を検出して,構造物の安全性監視手段に役立たせようとする新し い手法である。特に,化学プラント,原子力機器など大形化する構造物の安全性確 保のために,製作時の検査,あるいは稼動中の監視手段として有力視されている。

本稿は、これらの用途に適したアコースティック エミッション計測技術の一般 的手法,新しい提案などについて述べるとともに、これらの計測手法の材料試験な どへの適用例や、アコースティック エミッションの応用に関する方向について述 べる。 佐藤弌也\* Ichiya Satò 佐々木荘二\* Sòji Sasaki

#### 1 緒 言

近年,化学プラント,原子力施設をはじめとする各種プラ ント施設などの規模は大形化の一途をたどり,万一事故を起 こしたときの災害は,はかり知れないものがある。当然,事 故や災害防止に対する社会的要請が強くなり,そのための技 術開発が急務とされている。このような情勢にあって,各種 機器や構造物の安全性の確保のための監視手段として,アコ 例について述べるとともに, AEの応用範囲と実用化に当たっての問題点,将来の方向などについて言及する。

#### A E 信号の性質

AE信号を発生機構別に分けると、(1)塑性変形、(2)き裂の 発生、成長、(3)金属の相変態などによるものがある。また、

ースティック エミッション(以下, AEと略す)計測法が注目 されるようになった。

AEとは、材料が変形、若しくは破壊するときに解放され るエネルギーによって弾性波が発生する現象で、この弾性波 は、材料の表面に装着したAEセンサによって検出される。 このセンサ1個で、広い範囲の材料内の局部破壊を監視する ことができ、複数のセンサを使えばAE信号の到達時間差か ら発生位置を標定できる。AE法は、材料や構造物中での割 れなどの欠陥の発生時期と場所が即座に検出できるという特 長があるので、材料の塑性変形、破壊機構の研究に新しい観 測手段としてだけでなく、非破壊検査手段としても実用化が 進められている。また、特に巨大構造物の安全性監視及び製 品検査や品質管理のための新しい計測手段として、その期待 されるところは大きい。

ここでは、AE信号の性質、計測技術、一、二の適用実験

コロナ放電,流体の漏れや沸騰音,あるいは回転機の異常音 などはAEとは異質であるが,その計測法は共通に考えるこ とができる。

AE信号には大別して図1に示すような連続形と突発形の 二つがある。連続形AE信号は,主として塑性変形によるも ので,固体内での転位の際に生ずる鋭いパルス状の信号が多 数集まったものと考えられる。突発形AE信号は,き裂の発 生,成長に伴って瞬間的に発生し,連続形AE信号に比較し て振幅が大きく,発生源の位置標定などに利用される。

#### 3 A E 計測技術

AE測定システムの一般的な構成は,図2に示すようになっており,種々のパラメータが測定できる機能を備えている。 本章では実用的見地からみて,特に重要なセンサ,AE発生の 動態観測法,多チャネル式AE発生源標定方法,雑音除去の





(a) 連続形(0.2V/div, 100µs/div)

(b) 突発形(1.0V/div, 100µs/div)

33

図 | AE信号の波形 連続形は、軟鋼の塑性変形によるAE波形例、突発形は、非磁性鋼のき裂進展によるAE波形例である。



202 日立評論 VOL. 58 No. 3 (1976-3)



図2 AE測定システムの一般的な構成 これは4 チャネルの例であるが,実際には1~32チャネルの間で使われている。



図3 センサの形式 図中(b), (c)の形式は電気的外来雑音に強いので現場向きである。

方法について述べる。

#### 3.1 センサ

AE信号として取り扱う周波数は,数十キロヘルツー2メ ガヘルツ程度の範囲で,センサの振動子としてはチタン酸ジ ルコン酸鉛(PZT)などの圧電磁器が用いられる。

図3はセンサの代表的形式を示したもので、(a)は一般的な 不平衡形、(b)は平衡形、(c)は両用形である。平衡形センサは、 電気的外来ノイズの影響を軽減するために用いられ、両用形 センサは、平衡形センサとして用いれば空気中から伝搬して くる音響的外来雑音を相殺し、不平衡形センサとして用いる 場合には、上部ケース側振動子をダミー センサとして用い ることによって、外来ノイズの除去が可能となる。

#### 3.2 AE発生の動態観測法

A E 発生状況の時間的経緯を表示する 2 チャネル式A E 測 定装置の構成を図4に示す。これは、時々刻々のA E 発生位 置をCathode Ray Tube(以下、C R T と略す)に表示できる ようになっていて、A E 発生源の位置は各センサへのA E 到 達時間差より求められる。 信号増幅部は、前置増幅器、ろ波器、主増幅器から成って いて、バックグラウンド ノイズや構造物からのA E 信号の周 波数成分があらかじめ確認されているならば、ろ波器の周波

数帯域を適当に選ぶことによって、不要の信号が除去される。 次に、比較回路によって摘出された2個のAEパルス信号の 時間差ΔTに応じて作られる位置信号を、蓄積形CRTのX 軸に与え、Y軸を時間的に掃引して、経過時間に対するAE の発生場所を刻々表示する。また、メモリを利用すれば、X 軸上の各点でのAE発生個数をY軸に表示することにより、 いわゆるヒストグラムが得られる。図5は図4の構成に基づ いて試作された装置の外観を示すもので、本装置では、セン サ間を64アドレスに分け、各アドレスには255個までのAE発 生個数を記憶できるようになっている。

#### 3.3 多チャネル式AE発生源標定方法

パイプ ラインのような長い物,あるいは圧力容器のよう な広い面積をもつ巨大構造物にAE法を適用する場合には, 当然多チャネルシステムの導入が必要となる。そこで,ここ

では一般に用いられている電子計算機を用いた標定方法と、 日立製作所で開発した簡易形ゾーン標定法について述べる。 電子計算機を用いる方法は、碁盤の目のように多数のセン サを配置し、相対向するセンサ間におけるAE信号の到達時 間差を用いて、発生源の位置の演算を行なう。例えば、図6 のように正方形状に2対のセンサが配置されている場合、X 軸上のセンサR1~R2間の信号到達時間差⊿Txと、Y軸上

34

アコースティック エミッション計測法とその応用 203



図4 2チャネル式AE測定装置の構成例 本方式は、AEの動態観測が可能である。



法によって,各センサ間のAE発生状況が監視できることに なる。このような方法によれば,複雑な演算処理が不要とな り,装置を簡略にし,コストを低減する点で有利である。

#### 3.4 **雑音除去の方法**

雑音除去は, AE法を実用化するうえで最も重要な課題の 一つであり, その対策を大別すると次のようになろう。

図5 2チャネル式AE測定装置の外観 図4で示した装置を製品化 したものである。

のセンサR3~R4間の信号到達時間差 $\Delta T_Y$ とから、それぞ れ同図に示すような二つの双曲線軌跡が描かれ、AE発生源 は両者の交点Pを演算することによって求められる。このよ うな演算を、電子計算機を用いて直接行なう方法と、あらか じめ作成された時間差と座標との組合せの表を素引すること によって結果を求める方法などがある。これらの方法は、圧 力容器などの製造時の試験に用いられつつあるとともに、供 用期間中検査や稼動中検査にも今後ますます多用されるもの と思われる。

しかし、AE計測技術の応用の拡大を図るには、できるだ け安価な多チャネルシステムが必要となる。その要求に応ず るための簡易形ゾーン標定法について説明する。図7は、パイ プラインのような長い形状の物の監視に適した一次元ゾーン 標定法の構成を示す。各チャネルのセンサからの出力は、増 幅検波されて比較回路を通り、その出力の立上りによって時 間幅Tという方形波を作る。次に、相隣接するチャネルの方 形波出力をアンド回路に入れて、それぞれ論理積をとる。例 えば、同図に示すようにセンサR3の付近にAE発生源があ ると、隣接チャネルの出力波形は同図に示すようになり、方

- (1) 周波数や振幅によって弁別する方法
- (2) 発生源の位置標定によって除去する方法
- (3) 空間フィルタによって除去する方法

上記中,(1)はAE信号と雑音との間に振幅や周波数特性の差異がある場合,これを利用する方法で特に説明するまでもない。

(2)は前述したようなAE発生源の位置標定,換言すれば 「戸籍調べ」によって弁別する方法であり,極めて有効な手法 の一つである。

(3)の空間フィルタによる方法としては、図8に示すような 方法がある。同図(a)は、マスタ スレイブ法と呼ばれ、マス タ センサの外側にスレイブ センサを設けて、観測範囲の外 側からきた雑音はスレイブ センサにまず受信されることを利 用してゲート回路を閉じ、出力を出さないことによって除去



35

形波の時間幅Tを次式のようにするならば,アンド回路出力 A3にだけ論理積信号が現われることになる。

ここに、L:センサ間距離v:供試材の音速

この論理積信号,あるいはその累積数を記録するなどの方 図6 AE発生源標定の原理 2対のセンサによる方式の場合を示す。

204 日立評論 VOL. 58 No. 3 (1976-3)



簡易形AEゾーン標定法 本方法は,パイプ ラインのような長い形状の物の監視に適している。

する。(b)は、2個のセンサにほぼ同時に到達した信号だけを AE信号として認めるコインシデンス法である。(c)は、前述 のゾーン標定法によって信号を選択し, 位相弁別回路によっ て信号の到達順位を検知して,遅れて到達するほうの信号だ けをゲート回路によって取り出す方法である。

号が記録されている。一方,図10は実験経過時間に対する AEの発生位置をCRTに表示した結果を示したもので、同 図より試料の弾性領域における受信信号は、端部から発生し た雑音であること, 塑性領域におけるAEの発生位置はリュ ーダース帯の進展と対応していることが分かる。このことは、 AE計測が材料試験のための新たな手段をもたらすことを示 唆する一つの例である。

#### 4 適用実験例

材料におけるAE特性を観測しておくことは、構造物から のAE信号を監視するうえで重要である。ここでは、鋼材の 塑性変形やき裂の進展に伴うAEを3.に述べたAE計測法を 用いて観測した一,二の例について述べる。

### 4.1 鋼材の塑性変形によるAE発生過程の観測

鋼材の引張試験における塑性変形の過程が, AE発生の時 間的経過と関連して観測された例を紹介する。供試試料とし てSM41材の6号試験片(全長520mm, 平滑部長さ80mm, 板厚 5mm)を用いた。まず、図9は応力-ひずみ曲線とAE実効値 の経過を示したデータを示すもので、AEは上部降伏点以降 の降伏期間中に多量に発生している。ここで見られるAEは、 塑性変形によるいわゆる連続形AEである。しかし、同図に は試料の取付け部などで発生する雑音を含むすべての受信信

#### 4.2 自然欠陥材の強度試験におけるAE

機器の大容量化に伴い,溶接構造物はますます大形化し, その強度面の評価が複雑,且つ困難になってきている。ここ では、大形の溶接構造物の引張試験にAE法を適用した結果 について述べる。供試試料は、板厚100mm、平行部幅500mmの 溶接用圧延鋼材SM41キルド鋼の溶接部付近に表層はく離欠 陥をもつ大形試験片である。

図11は、4個のセンサを用いてAE発生点を二次元的に位 置標定した結果を試験片上にプロットしたもので、同図に示 されているAEは、欠陥①及び①と印されている付近から、 ほぼ降伏点に近い27kg/mm<sup>2</sup>で発生し始め,引張強さ36.2kg/mm<sup>2</sup> で破断するまで続いていることが観測された。図12は破面の 外観を示し,破壊の起点が①及び⑪にあることが分かる。上



36







注:1. • AE 発生源 × 試験前に行なった超音波探傷による欠陥部 2. R1, R2, R3, R4:AE センサ 3. SM41Cキルド鋼,板厚100mm



図10 軟鋼SM41の塑性変形によるAE発生過程 リューダース帯の 進展に伴って, AEが発生している状況がよく分かる。

述の結果から、荷重が降伏点近傍になると欠陥の拡大が始まり、続いて合体、成長し、その過程でAEが発生したものと 推察できる。

この実験でも4.1の結果と同様に,試験片の取付け部からのAEと欠陥部からのAEとの弁別が,上述のように位置標定によって可能となり,欠陥の成長開始時期を確認できたことは重要な収穫と言える。

図II 大形自然欠陥材の引張試験におけるAE標定結果 破壊の起 点となった欠陥①, ①の近辺に降伏点以降からAEが集中して発生した。



図12 大形引張試験における破断部 欠陥①, ⑪が破壊の起点になっ たことが破面より分かる。

耐圧試験で全体の検査が可能となるため、検査の省力化、簡 易化及び工程短縮ができる。(2)欠陥の有害度、不安定度に対 応した検査情報が得られ、複雑な形状部、積層構造物など従 来の非破壊検査法が使えない個所の検査も可能になる。(3)稼 動中の設備・機器について材料中でのき裂発生を検出し、そ の成長を監視することにより、危険個所を指摘したり破壊を 予知する、いわゆるOn Stream Monitoringが可能となる。 現在、大形構造物の中でAEの適用が検討されているもの は、プラントの高圧容器、原子炉圧力容器、パイプ ライン、 埋設ガス管及び高圧タービンのような回転体、並びに圧延用 ロール、航空機、船舶、橋梁、建築物及び水力発電所のダム など多岐にわたっている。このうち、大形圧力容器の製造時

 $\mathbf{37}$ 

5 AEの応用分野

5.1 大形構造物の診断,監視への応用 大形構造物の診断や監視に対して,AE法を適用する場合の期待される効果として,次の3点が挙げられる。(1)1回の 206 日立評論 VOL. 58 No. 3 (1976-3)

の耐圧試験時に併行して行なうAE試験については,既に実 用の域に達し各方面でその適用が進められている。その中で 注目すべき動きの一つとして,アメリカExxon社において実 施しているAEの社内規定がある。すなわち同社では,ある 化学プラント用圧力容器の製作仕様の一部として,AE試験 必要範囲を破壊力学的な考察に基づいて定めている。

大形構造物のIn Service Inspection(I.S.I, 供用期間中 検査), On Stream Inspection(O.S.I, 稼働中検査)にAE 計測法を適用するに当たっては, 雑音対策, 高温対策など解 決すべき多くの問題がある。しかし, 近年多発しているコン ビナート事故の対策や, 原子力発電における安全性確保の問 題を考えるとき, 材料の破壊をいち早く予知し, 事故防止の対 策を講ずるためにAE法の実用化に寄せられる期待は大きい。

#### 5.2 製品検査及び品質管理への応用

製品の強度試験にAE試験を併用すれば、定格値以上の過 大な強度をかけなくても、その安全性を確保することができ、 且つこの試験は全数に適用することも可能で、製品の品質保 証を行なうことができる。例えば、航空機、船舶、車両、土 木・建設・運搬用機械、発変電・製鉄所用機器などの応力集 中個所に使われる部材などのように、欠陥の存在が特に重大 事故に発展するおそれがあるものに対しては、AE試験を適 用してその有効性が期待されるので、関係分野で研究が進め られている。 A E 試験法を適用して,溶接の良否を判定できる可能性があ ることが報告されている。例えば,核燃料棒のTIG溶接に よる端蓋溶接部の管理に適用し,AEによる結果と金属顕微 鏡による写真とが良く一致し,極めて有効である例,また, スポット溶接の場合には,溶接強度が強いものほどAE量が 多いという関係があり,従来困難とされていた溶接管理への 適用性が期待されている。

このほか,材料の疲労強度,硬度,相変態など,材料特性のAEを適用した新しい実験手法が各方面で試みられており, その成果が発表されつつある。

#### 6 結 言

以上,AE計測技術を中心に,その適用実験例及び応用面 について述べたが,その実用化についてはまだ緒についたば かりである。しかし,種々の材料や構造物について,破壊を 予知するのに役立つようなAE信号の発生が確証されている ので,雑音などに対する対策や有効な検出手法が確立される ならば,これらの問題について社会的要請の強い各種の産業 施設や,機器の安全性確保のための監視手段として活用され る日も間近いものと思われる。

1 2 2 3 0

次に、品質管理へのAE法の応用に関しては、溶接、熱処 理などの工程監視のためのAEの適用実験が各方面で進めら れている。溶接割れに関しては、溶接中に発生する高温割れ、 溶接後の冷却過程で発生する低温割れ、溶接後の熱処理時の SR(Stress Relief)割れなどがあるが、いずれの場合にも

#### 参考文献

- (1) I. Satoh, S. Sasaki, I. Masaoka: Observation of Acoustic Emission in Tensile Test Using Source Location Technique: 第2回AEシンポジウム予稿集 (1974-9)
- (2) 日本高圧力技術協会編:講習会テキスト「アコースティック・ エミッションの基礎と応用」(1974-10)



**30GHz帯GaAsインパット ダイオードを用いた** 「プレート形発振器」 <sup>日立製作所 水石賢-・宮崎 勝・他2名</sup> 電子通信学会誌 58-10, 538 (昭50-10)

GaAsインパット ダイオードはミリ波帯 まで高効率動作する発振,増幅素子として 注目されているが,一般に素子インピーダ ンスが低いので使用回路は限られ,代表的 回路としてキャップ形,半同軸形回路があ る。ミリ波用のケース入りダイオードでは, キャップ形の場合は十分な性能が出ないの で半同軸形が多く用いられる。ここでは, これらの従来回路に比べ構造が簡単で,し かもミリ波帯でインパット ダイオードの性 能を引き出せるプレート形発振回路の構成 法を提案する。

プレート形発振器は,銅製プレートを方 形導波管の電界最大部に設けたスロットか ら導波管内に挿入し,プレート先端と導波 される一方, プレート部分はλg/4(λg: 管内波長)インピーダンス変成器となって いる。更に短絡面側のプレート部分は, プ レート端の電界強度が最大となる発振モー ド以外の不要モードを防止している。

プレート形発振器の特徴の一つに発振周 波数が広帯域にわたって変えられることが 挙げられる。例えば、キャップ形ではダイ オードと短絡面との距離を変えても、発振 周波数の中心値の数パーセントしか変化で きないが、プレート形では10%近く連続可 変できるため、周波数調整が容易となる。 また、キャップ形、半同軸形の場合、発振 帯域が狭いうえ回路調整中に不要モードが 発生しやすいなどの欠点があるが、プレー の関係が成り立つ。Z<sub>p</sub>は,導波管寸法が与 えられたとき,プレートの厚さ及びプレー ト先端部と導波管H面との間隔から計算に より求まる。これらの値を調整することに より,ダイオードと導波管とのインピーダ ンス整合を行なうことができる。

30GHz帯マイクロ ピル形GaAsインパッ ト ダイオードをプレート形発振器に入れて 発振特性を測定した結果, 30GHz帯で平均 出力300mW, 効率7%を得ており半同軸形 発振器に匹敵する性能であった。このとき,  $Z_p$ は20~30Ωとし, ダイオード部のインピ ーダンスが1~3Ωとなるようにプレートを 調整してある。

以上のように,従来回路に比べ構造及び

