

# FRPにおけるAE源の位置標定

日本フィジカルアコースティクス㈱ 志波 光春, 湯山 茂徳

## 概 要

FRP構造物の非破壊検査法の中で、AE法は米国を中心に最も実用化が進んだ分野と言える。FRP構造物のAE検査法で、従来の金属材料と大きく異なるのが位置標定の方法である。金属材料で一般的に用いられてきた到達時間差法は、弾性波の減衰が大きく異方性を持つFRPではそのままでは使うことが困難である。さらに金属材料と異なった破壊機構が、到達時間差法による位置標定精度を下げる。そこで用いられるのが地域標定法である。これは、AE変換子が独立して有効検出地域ごとに検査を行なうものである。この検査方法は、ASTM規格、ASME規格、SPI-CARP推奨法になっている。宇宙航空用FRPでは、弾性波の伝播特性のキャリブレーションを行なった到達時間差法が開発されている。さらに両者の利点を取った到達順位法も検討されはじめている。本稿ではこれらを総合的に評価し、その特徴をまとめてみる。

### 1. はじめに

FRPのAE検査法は、米国を中心に構造物の健全性評価手法として定着してきた。電話線工事作業車のFRPブームの検査法はASTM規格になっており、FRPタンク・容器類はASME規格に、また強化熱硬化性樹脂パイプ(RTRP)はSPIのCARP推奨検査規格になっている。その中で、非破壊検査の最大の目的である欠陥位置の検出、すなわち位置標定の方法は、従来の金属材料の構造物と大きく異なっている。従来の均一正方弾性体での弾性波の伝播を想定した到達時間差法( $\Delta T$ 法)では、次の2点から欠陥位置の検出精度が問題になる。まず第一は、FRPの伝播特性の問題である。具体的には、FRPは金属材料に比べて弾性波の減衰が大きいことと、繊維方向によって音速が異なる点である。第2は、欠陥の発生及び進展機構である。これはFRPが不均一材料であるがゆえに、欠陥の発生や進展が同時期に異なる場所で起こるため、各AE変換子に到達した弾性波を、同じイベントとして取りまとめるデータ処理を複雑にし、その結果として、あやまった位置標定や情報の欠落を生じさせることになる。

このようなFRP特有の問題の解決法として用いられたのが地域標定法である。この方法は、あらかじめ欠陥が発生しやすい場所にAE変換子を配置し、その地域と計測チャンネルを一对一で対応させ、評価する手法である。これは、従来の到達時間差法と視点が異なり、静的な意味での検出位置の精度は落ちる。しかし、化学プラントなど実際の構造物の現場でのAE検査を行なう場合、金属材料でも、地域標定法の発展形である到達順位法が、到達時間差法よりさらに有効であることが、Monsant社のFowlerの10年に渡るフィールド検査結果として報告されている。<sup>(1)</sup>

以下、各種位置標定法を紹介し、FRPにおける位置標定の有効性と問題点を明らかにするとともに、古くて新しい位置標定法である地域標定法を検討する。また、FRP構造物の各規格で用いられている位置標定法を示し、特殊な到達時間差法を

用いた、航空機のFRP主翼の検査例を紹介する。

## 2. 位置標定の種類

### (1) 到達時間差法〔DT法〕(Δt Source Location)

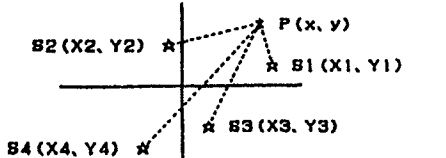
到達時間差法(DT法)は、AE位置標定法として最も古くから用いられている手法である。原理は、金属などの均一方弾性体においては、弾性波の音速はどの方向に対しても一定である、したがって、複数に配置したAE変換子で検出される弾性波の到達時間差を求めることで、AE発生点を標定する方法である。各AE変換子の位置(距離)と、音速または到達時間差の組み合わせは、あらかじめ設定しておき、その条件下で較正を行わなければならない。直線上の位置標定には最低2チャンネルのAE変換子を用い、平面上では3チャンネルまたは4チャンネルのAE変換子を一般に用いる。平面上の位置標定演算を表1に示す。<sup>(2)</sup> また、立体(3次元)の位置標定も近年行なわれている。

弾性波のどの部分をもって波の到達点と見るかは、次の2つがある。第1は、エンベロープ波形を用いる場合で、その際到達点は、しきい値レベルを越えた時点(イベントスタート点)とする方法と、イベントの最大振幅の時点とする2方式がある。構造物の位置評定では、イベントスタート点が一般に用いられている。次に第2は、縦波の検出点をもって到達点とする方法で、CT試験片などを用いた原波形解析に用いられている。<sup>(3)</sup>

実構造物のAE位置標定結果は、構造物を展開図にした形で示されることが多い。展開図の各頂点がAE変換子の配置点である。原理的な位置標定精度は、AE計測装置内の到達時間差計の時間分解能によって決まるが、実際はAE変換子の配置法、弾性波の伝播特性の不均一により、誤差は大きくなる。また、最大の問題は、必ず3チャンネル以上

のAE変換子に、同じ発生源の弾性波が検出されなければ、まったく位置標定はできないことである。実際のフィールドでのAE検査の結果、上記の問題が決定的な因子になることが、報告されている。モンサント社の金属製タンクの

表1. 到達時間差法による平面の位置標定<sup>(2)</sup>

【4センサ標定法】	【3センサ標定法】
<p><b>AE信号伝播の基本方程式:</b>            第一到達センサ: <math>V^2 t^2 = (x-X1)^2 + (y-Y1)^2</math> (1)            第二到達センサ: <math>V^2 (t+T1)^2 = (x-X2)^2 + (y-Y2)^2</math> (2)            第三到達センサ: <math>V^2 (t+T2)^2 = (x-X3)^2 + (y-Y3)^2</math> (3)            第四到達センサ: <math>V^2 (t+T3)^2 = (x-X4)^2 + (y-Y4)^2</math> (4)</p> <p>.....            t: AE源(x, y)から第一到達センサ(X1, Y1)までの伝播時間、            (XN, YN): 第N到達センサの座標、 V: 音速、            T1, T2, T3: 信号到達時間差; <math>0 \leq T1 \leq T2 \leq T3 \leq \dots</math></p> <p><b>独立2次方程式の線形化:</b>            (2) - (1): <math>A1 \cdot x + B1 \cdot y + C1 \cdot t = D1</math>            (3) - (1): <math>A2 \cdot x + B2 \cdot y + C2 \cdot t = D2</math>            (4) - (1): <math>A3 \cdot x + B3 \cdot y + C3 \cdot t = D3</math></p> <p>したがって、  <math display="block">x = \frac{\begin{vmatrix} D1 &amp; B1 &amp; C1 \\ D2 &amp; B2 &amp; C2 \\ D3 &amp; B3 &amp; C3 \end{vmatrix} / D}{\begin{vmatrix} A1 &amp; D1 &amp; C1 \\ A2 &amp; D2 &amp; C2 \\ A3 &amp; D3 &amp; C3 \end{vmatrix} / D}</math>  <math display="block">y = \frac{\begin{vmatrix} A1 &amp; D1 &amp; C1 \\ A2 &amp; D2 &amp; C2 \\ A3 &amp; D3 &amp; C3 \end{vmatrix} / D}{\begin{vmatrix} D1 &amp; B1 &amp; C1 \\ D2 &amp; B2 &amp; C2 \\ D3 &amp; B3 &amp; C3 \end{vmatrix} / D}</math>            ここで、  <math display="block">D = \begin{vmatrix} A1 &amp; B1 &amp; C1 \\ A2 &amp; B2 &amp; C2 \\ A3 &amp; B3 &amp; C3 \end{vmatrix} = A1 \cdot B2 \cdot C3 + A2 \cdot B3 \cdot C1 + A3 \cdot B1 \cdot C2 - A1 \cdot B3 \cdot C2 - A2 \cdot B1 \cdot C3 - A3 \cdot B2 \cdot C1 \neq 0</math></p>	<p><b>AE信号伝播の基本方程式:</b>            第一到達センサ: <math>V^2 t^2 = (x-X1)^2 + (y-Y1)^2</math> (1)            第二到達センサ: <math>V^2 (t+T1)^2 = (x-X2)^2 + (y-Y2)^2</math> (2)            第三到達センサ: <math>V^2 (t+T2)^2 = (x-X3)^2 + (y-Y3)^2</math> (3)</p> <p><b>独立2次方程式の線形化:</b>            (2) - (1): <math>A1 \cdot x + B1 \cdot y + C1 \cdot t = D1</math>            (3) - (1): <math>A2 \cdot x + B2 \cdot y + C2 \cdot t = D2</math></p> <p>したがって、  <math display="block">x = \frac{\begin{vmatrix} D1 - C1 \cdot t &amp; B1 \\ D2 - C2 \cdot t &amp; B2 \end{vmatrix} / D}{\begin{vmatrix} A1 &amp; D1 - C1 \cdot t \\ A2 &amp; D2 - C2 \cdot t \end{vmatrix} / D}</math>  <math display="block">y = \frac{\begin{vmatrix} A1 &amp; B1 \\ A2 &amp; B2 \end{vmatrix} / D}{\begin{vmatrix} D1 - C1 \cdot t &amp; B1 \\ D2 - C2 \cdot t &amp; B2 \end{vmatrix} / D} = \frac{M1 \cdot t + N1}{M2 \cdot t + N2}</math>            ここで、  <math display="block">D = \begin{vmatrix} A1 &amp; B1 \\ A2 &amp; B2 \end{vmatrix} = A1 \cdot B2 - A2 \cdot B1 \neq 0</math>            x, yを(1)式に代入すると、  <math display="block">V^2 t^2 = (M1 \cdot t + N1 - X1)^2 + (M2 \cdot t + N2 - Y1)^2</math>  <math display="block">\rightarrow P \cdot t^2 + 2Q \cdot t + R = 0</math>  <math display="block">\therefore t1 = \frac{-Q - \sqrt{Q^2 - PR}}{P}, t2 = \frac{-Q + \sqrt{Q^2 - PR}}{P}</math>  <math display="block">\rightarrow Z1(x1, y1), Z2(x2, y2)</math></p>
	<p><b>【固定センサ標定法】</b>  <b>x-y軸上センサ間距離測定用の基本方程式:</b>            [x軸] <math>\sqrt{(x+A)^2 + y^2} - \sqrt{(x-A)^2 + y^2} = \pm V \cdot TX</math>            [y軸] <math>\sqrt{x^2 + (y+B)^2} - \sqrt{x^2 + (y-B)^2} = \pm V \cdot TY</math>            ここで、            (x, y): AE源座標、 V: 音速、            (A, 0), (-A, 0): x軸上センサ座標、            (0, B), (0, -B): y軸上センサ座標、            TX, TY: x軸、y軸上センサ間距離、  <math display="block">\therefore x^2 = \frac{LX^2 (B^2 - LY^2) (A^2 - LX^2 + LY^2)}{(A^2 - LX^2) (B^2 - LY^2) - LX^2 LY^2}</math>  <math display="block">y^2 = \frac{LY^2 (A^2 - LX^2) (B^2 + LX^2 - LY^2)}{(A^2 - LX^2) (B^2 - LY^2) - LX^2 LY^2}</math>            ただし、 <math>LX = V \cdot TX / 2</math>; <math>LY = V \cdot TY / 2</math>  <math>TX &lt; 0</math>では、<math>x \rightarrow -x</math>、 <math>TY &lt; 0</math>では、<math>y \rightarrow -y</math>。</p>

AE検査実績によれば、到達時間差法で位置標定可能だったイベントは、全イベントの20%以下であった。ここで、振幅値が大きなイベントであるにもかかわらず、1つのAE変換子でしか検出していない場合や、振幅値が小さなイベントであっても、複数のAE変換子で検出している場合のあることが報告されている。その理由として次の5点があげられている。第1は、弾性波の伝播中の減衰、第2は、溶接や他の不連続面による弾性波の伝播のゆがみ、第3は、ノズルやマンウェイなどの突起物による弾性波の伝播の遮蔽、第4に、容器の形状因子、第5に、弾性波のモード変換である。

以上見てきたように、構造物の非破壊検査としての到達時間差による欠陥の位置標定は、金属材料であっても均一等方弾性体による近似には問題のあることが指摘されている。

### (2) 地域標定法 (Zone Location)

FRP構造物に一般的に用いられているのが地域標定法 (Zone Location) である。図1に地域標定法のAE変換子取付け例を示す。Fowlerは、FRP構造物において到達時間差法による位置標定の問題を、弾性波の伝播特性の問題と破壊機構の問題の2面から、次の3点にまとめている。まず第1に、FRPは金属材料に比べて弾性波の伝播特性における減衰の項が大きいいため、平面上で位置標定を行なうためには、AE変換子間の距離を60センチメートル以下にしなければならない。このことは、大型タンク類のAE検査には、膨大な数のAE変換子と計測チャンネルが必要となり、コスト面から現実性を欠く。第2は、異方性の問題であり、弾性波の音速は一般に繊維方向に速く減衰が少ない。したがって弾性波の伝播は指向性を持つ。理論的には、伝播特性の地図を作ればよいが、現実のFRP材料は異なった繊維方向を持った積層板が多いため、複雑な伝播特性を示す。第3は、FRPの破壊機構の特徴であり、各所でほぼ同時多発にAEが発生するので、イベントの適正な組合せが困難であることである。

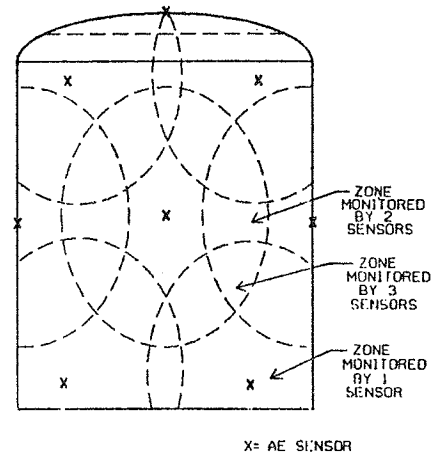


図1. 地域標定法

そこで、到達時間差法によるピンポイントの位置標定の考え方をやめ、あらかじめ各々のAE変換子の有効検出範囲を決めておき、その地域ごとにAEの発生状況を監視するのが地域標定法である。この方法の特徴は、構造物に一樣にAE変換子を配置するのではなく、あらかじめ欠陥が発生しやすい場所にAE変換子を集中して配置することである。

### (3) 到達順位法 (Hit Sequence Source Location, Stuart's Method)

到達順位法 (Hit Sequence Source Location) は、Stuart's 法とも呼ばれる手法で、地域標定法に到達時間差法の要素を取り入れ、地域標定法の精度を向上させたものである。図2に到達順位法の概念図を示す。この方法は、最初に弾性波が到達したAE変換子の有効検出範囲と、2番目に弾性波が到達した有効検出範囲との重ね合

わせた部分をAEの発生位置とするもので、3番目、4番目と複数個のAE変換子に弾性波が到達すればする程、位置標定精度は向上する。この方法の特徴として、Fowlerは金属製タンクにおいてAE変換子の取付け位置や弾性波の伝播特性に左右されにくいと報告している。金属材料のタンク用に開発された手法であるが、今後FRPにも応用されてゆくと考えられる。

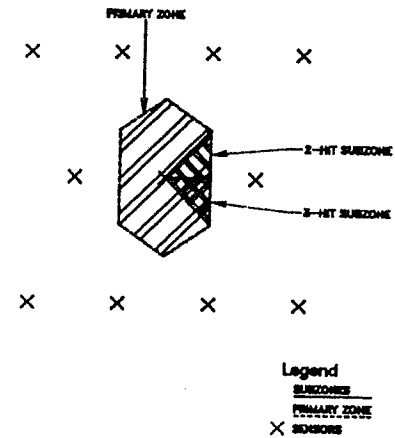


図2 到達順位法の概念図

### 3. 位置標定の事例

#### (1) 試験片

Drexel大学のJ. Awerbuchらは、フィラメントワインドのGFRP積層板試験片(330×25mm)を用いて、引張り試験及び疲労試験で、到達時間差法による位置標定を行なった。その結果、破壊の発生点及び破壊進行状況とAEイベントの発生位置標定がよい対応を示していることを報告している。(4)(5) 図3に、ノッチ付試験片の疲労試験における位置標定結果を示す。

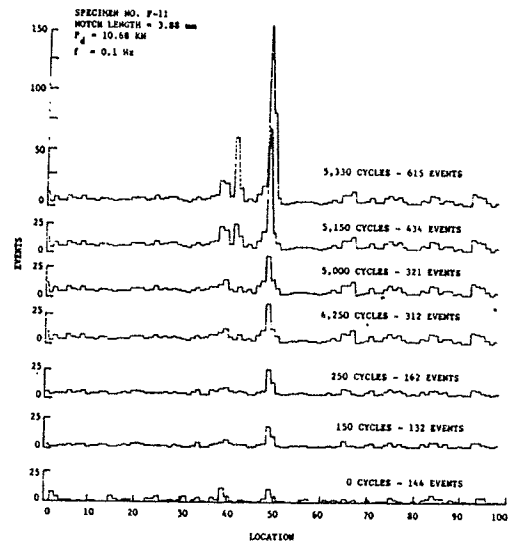


図3 GFRP、ノッチ付試験片の疲労試験における位置標定結果

また、著者らの実験でも、GFRP朱子織り積層板試験片(200×20mm)において、到達時間差法の位置標定を用いて同様の結果が得られている。(6) さらに、時間積分法によるAEエネルギーのパラメータと到達時間差法による位置標定の組合せでは、ノッチがない試験片(R付)でも位置標定の成果が得られている。図4に、GFRP、R付試験片の単軸引張り試験におけるイベントとエネルギーの位置標定結果を示す。

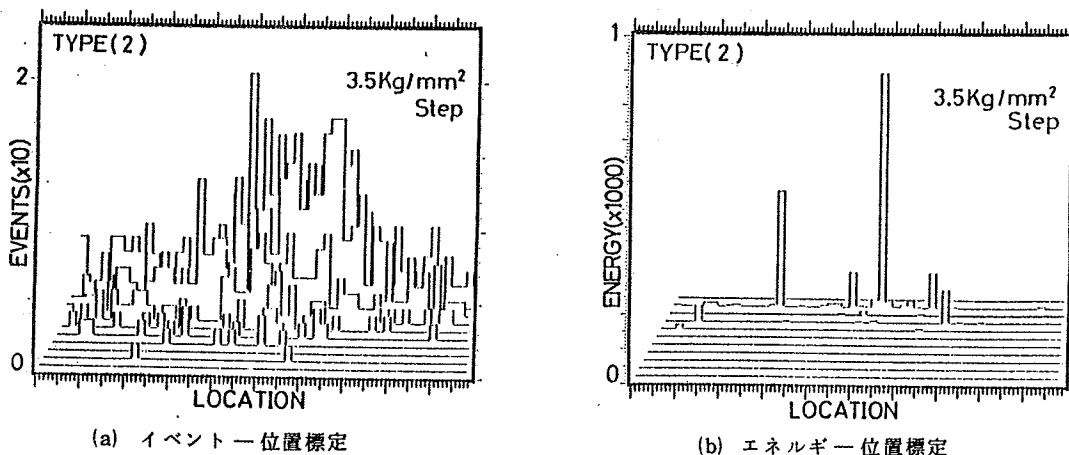


図4 GFRP、R付試験片の単軸引張り試験における位置標定結果

(2) 構造物

FRP 構造物の AE 検査規格は、現在以下の 3 種類があり、いずれも米国の規格である。位置標定には、いずれも地域標定法が用いられている。

- a) Acoustic Emission Examination of Fiber Reinforced Plastic Vessels.  
(ASME, SECTION V, 1985)
- b) Acoustic Emission Test Method for Insulated Aerial Personnel Devices.  
(ASTM, S 914, 1985)
- c) Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Reinforced Thermosetting Resin Pipe (CARP, SPI, 1983)

その他に、規格化までは進んでいないが、現在各航空機メーカーが取り組んでいるのが、マップ式の到達時間差法である(d)。以下、この 4 つの例の位置標定法を紹介している。

a) タンク・容器類の AE 検査 (ASME)

この規格は、CARP の推奨検査法が原案となって、その発表の 3 年後に ASME になったものである。(7) (8) (9) この地域位置標定の特徴としては、2 種類の異なる共振帯域を持つ AE 変換子を用いることである。各地域を独立して監視するのが 100 ~ 200 KHz の共振型変換子で、複数個用いられ、このデータによって合否判定が行なわれる。その他に、データの取りこぼしが発生しないように 25 ~ 75 KHz の共振型変換子を数個用い、タンク・容器類全体のモニターを行なう。AE 変換子の設置場所、すなわち監視地域は、以下の場所を中心として行なわれる。①高応力箇所、②幾何学的不連続点、③ノズル部、④マンウェイ部、⑤樹脂補修箇所、⑥サポートリング、⑦目視検査で発見された傷、等である。検出欠陥対象は、樹脂割れ、繊維と樹脂の剥離、繊維の引きぬけ、繊維破断、層間剥離、接続部の接着不良である。図 5 に圧力容器の AE 変換子の配置例を、図 6 にタンクの AE 変換子の配置例を示す。

キャリブレーションはシャープペンシル芯 (0.3 mm, 2H) の圧折によって放出

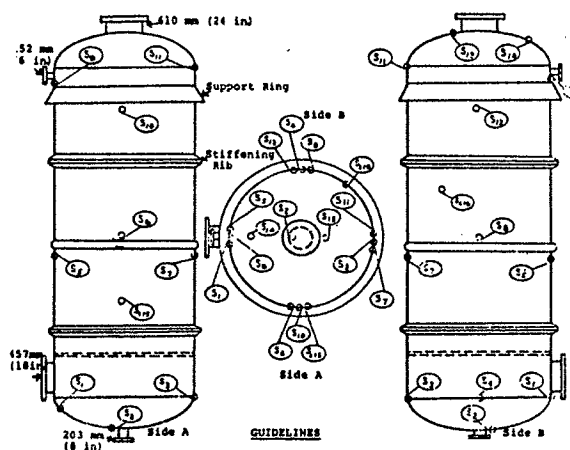


図 5 圧力容器の AE 変換子配置例

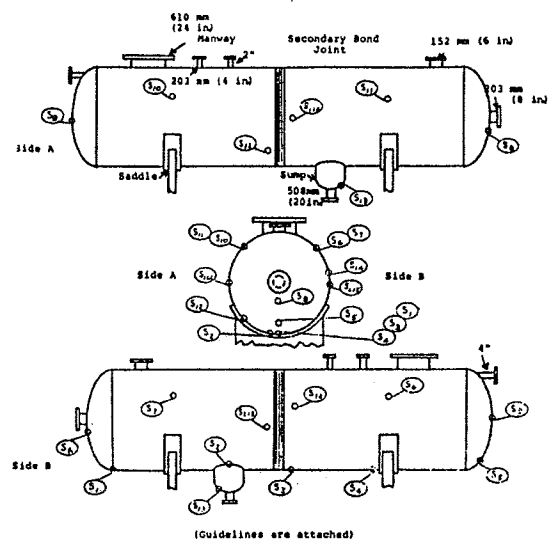


図 6 タンクの AE 変換子配置例

される弾性波（高速ピンポイントフォース解放現象）を用いて行なう。リングダウンカウント及びイベントのしきい値設定は、電気信号レベルで行なうのではなく、ペンシル芯の信号レベルを基準に行なう。また、AE変換子を被試験体に取り付けた段階においても、ペンシル芯を用いて各AE変換子の検出地域の弾性波の伝播特性を記録しておく。これは、AE信号の振幅値がFRPの表面の硬さ、樹脂の状態、繊維方向や補修履歴などによって変化するからである。

AE変換子によって検出される電気信号は、発生源の信号（原波形）、弾性波の伝播状態（伝達関数）およびAE変換子の特性（応答関数）がすべて合成（たたみ込み積分）された形で解析される。したがって、あらかじめAE変換子の特性（感度）をそろえ、各計測チャンネルの物理的検出条件を同じにする必要がある。次に各AE変換子の検出地域における弾性波の伝播特性をあらかじめつかんだうえで、収録されたデータの補正を行なう。この一連のキャリブレーション作業があって、AE検査の信頼性が保障されているのである。

#### b) 有人高所作業車のAE検査 (ASTM)

これは、電話線工事などに用いられる有人作業車のブーム部などのAE検査規格である。図7に、検査対象部を示した有人高所作業車のブーム部の図を示す。このブーム部本体がFRP製である。検出欠陥として、①金属部品のクラック生成、②FRP部の樹脂割れ、層間剥離、繊維破断がある。検査方法は、高周波用AE変換子（100～400KHz共振型）を用いて地域標定を行ない、一方低周波AE変換子（20～75KHz）を用いて全体のモニターを実施している。プラットフォーム部にワイヤーを取りつけ、ブームを上を動かすことで負荷をかけている。負荷サイクルは2サイクルの負荷－保持－除荷で行なう。この検査法の特徴は、FRPや金属部品を含む機械部品全体の非破壊検査法として、一回の試験で構造物全体を評価できることである。今後、ロボットのアーム部、航空機の機体及び主翼部などFRPを用いた複合部品全体の検査に広く応用できるものと期待される。

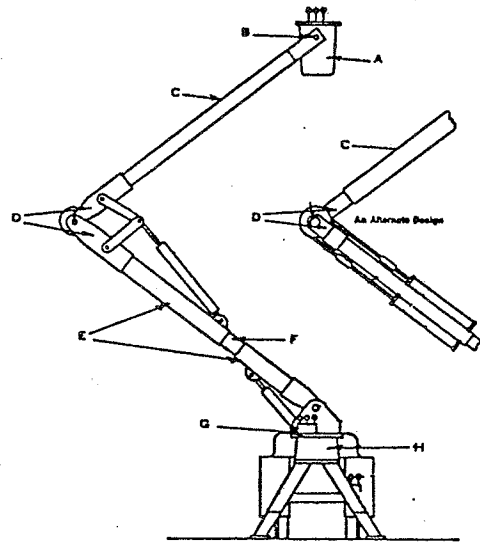


図7. 有人高所作業車のブーム部

#### c) FRPパイプのAE検査 (CARP)

検査対象のRTRPは、FRP容器類やタンクよりも小さな構造物である。ここでは、高周波用AE変換子（100～200KHz共振型のみを用いて地域標定を行なう。AE変換子の取付け位置は、ジョイント部、応力集中部、幾何学的不連続点、補修部、目視検査で発見された傷、

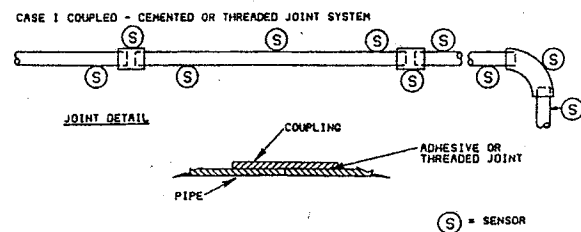


図8. RTRPのAE変換子の設置例

などであり，他は3メートルごとに配管部に配置する。RTRPのAE変換子の配置例を図8に示す。検出欠陥は，樹脂割れ，繊維剥離，繊維の引きぬけ，繊維破断層間剥離，接続部の接着不良である。合否判定は，負荷保持時のイベント数，PBC値，トータルカウント，フェリシティ比，大振幅のイベント数によって行なう。<sup>(11)</sup>

#### d) 航空機主翼のAE検査

CFRPを用いた航空機材料の非破壊検査では，欠陥の位置検出に高い精度が要求される場合がある。そのような場合，たとえば弾性波の伝播特性についてあらかじめ地図を作っておき，異方性による音速の違いや減衰の違いについてキャリブレーションを行なうことで，到達時間差法による位置標定を可能にした例が報告されている<sup>(12)</sup>。キャリブレーションにはペンシル芯(0.5mm, 2H)の圧折信号を用いており，その時得られた減衰特性を示したのが図9である。

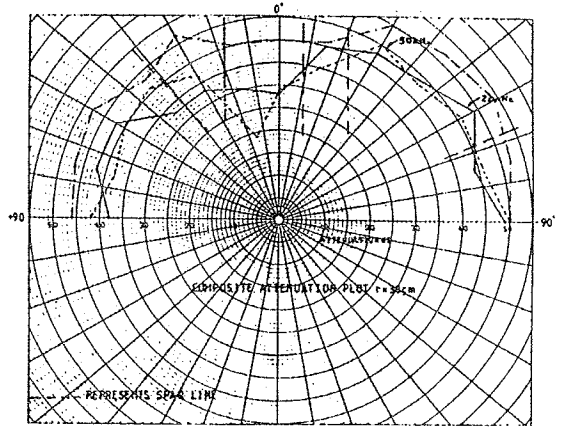


図9. CFRPの減衰特性

また，AE変換子の配置例を図10に示す。その結果として，到達時間差法による平面上の位置標定可能な距離は，1辺が65センチメートル以下であった。また，標定精度は5センチメートル以内であった。

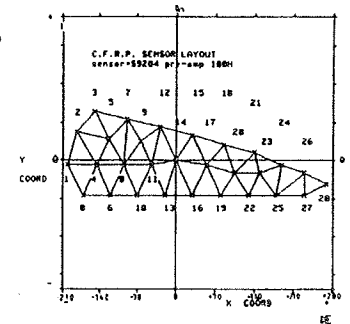


図10. 航空機主翼部AE変換子配置例

#### 4. まとめ

FRPの位置標定に関して，現在到達時間差法，地域標定法，到達順位法の3種類がある。試験片レベルでは，到達時間差法を用いて十分な精度を得ることができる。特にエネルギーを用いれば，欠陥の大きさとの対応も可能である。

また，宇宙航空などの高信頼性が要求される構造物では，音速や減衰などの伝播特性についてキャリブレーションを行なった到達時間差法が有効であることが示されている。一方，産業用構造物では，検査コストを考慮すると地域標定法が適当であろう。さらに精度が必要な場合，伝達特性のキャリブレーションを有効に行いうるならば，到達順位法を用いることが推奨される。

#### 参考文献

- (1) T. J. FOWLER: 7th Intn. AE Symp., p421-449
- (2) 仲佐 博裕: 5th AE Confe., p115-120
- (3) 岸, 金, 大山: " p19-23
- (4) J. AWEBUCH, M.R. GORMAN, M.MADHUKAR: 1st Intn. Symp. CARP Session 3
- (5) " " " " Session 2
- (6) 志波, 榎, 岸: 5th AE Corfe., p59-63

- (7) CARP : Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fiberglass Tanks /  
Vessels (1982)
- (8) C. HOWARD ADAMS : Journ. of AE Vol.1., No 3, p165-172
- (9) 中村, 志波, 諸橋 : 強化プラスチック, Vol.31., No 9, p423-432
- (10) 湯山 茂徳 : " p433-438
- (11) STEWART.J. SLYKHOUS : 1st Intn. Symp., CARP Session 1
- (12) G.S. WHALLET, P.T. COLE : 1st Intn. Symp., CARP Session 4