

## CFRPの超音波特性と伝達損失に関する研究

勝又 健一\*, 高井 元弘\*, 前田 利雄\*\*

Study on the Characteristics of Ultrasonic  
Wave Propagation and Transfer-loss in CFRP

by

Kenichi KATSUMATA, Motohiro TAKAI, Toshio MAEDA

### Abstract

This report describes ultrasonic testing for CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics). In the wave propagation test with oblique angle, defects were detected by measuring the lapse time of reflection wave. As sample defects, artificial notches were prepared on the surface of CFRP specimen. The sensitivity analysis says that minimum defect size is about 0.2mm in depth and 10mm in length. It was recognized that the wedge angle of 10 ~ 25 degrees is desirable.

Numerical investigation was carried out to evaluate transfer-loss in the case of wave propagation through three layers made up of a transducer of a normal probe, coupling medium - glycerine or water - and CFRP. Calculation shows the fact that coupling medium of water makes transfer-loss much larger compared to glycerine. Moreover, in the case of four layers added by the coordinating medium, the coordinating medium has good effect in decreasing transfer-loss compared to three layers without coordinating medium.

---

\* 材料加工部

\*\* 水海技術部

原稿受付 平成8年11月21日

審査済 平成9年5月7日

## 目 次

1. まえがき	2
2. 斜角深傷における超音波の伝搬	2
2.1 スリットによるエコー高さ	2
2.2 波面及び伝搬方向	3
3. 垂直深傷における伝達損失の定量化	5
3.1 四重媒質のパルス伝搬	5
3.2 直接接触法における接触媒質の影響	6
3.3 水浸法における塗料層の影響	7
4. 考察	8
4.1 斜め入射による深傷	8
4.2 垂直深傷における伝達損失	8
5. まとめ	8
6. 参考文献	9

## 1. まえがき

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics: 炭素繊維強化プラスチック) は船舶及び航空機用などの、構造部材として用いられるようになってきている。繊維破断などの厚さ方向に進展する欠陥を超音波で調べるには、探触子を垂直に置く垂直探傷では測定できず、斜めに入射する斜角探傷が必要と思われるが、実際には未だ行われていない。斜角探傷を適用する場合は、斜め入射による超音波の伝搬方向がまず問題となる。それはCFRPが大きな音響異方性を有するために、伝搬方向による音速が変化するので欠陥の位置推定などが困難であることも要因となっている。

現在、CFRPの非破壊検査は一般に、測定物を水中に置く超音波の水浸探傷が行われている。水浸法では自動走査及び画像化の技術を取り入れており剝離などの欠陥は、結果が像として得られるので視覚的観察が可能となっている。水浸法は水中に没するなど実用的に困難を伴う場合がある。この場合には垂直探傷による直接接触法で対処できる。直接接触法は、探触子と試験材の間に接触媒質が必須であるが、その種類と適用する層の厚さで入射効率が変化する。伝達損失は表面の状態によっても変化する。特に画像化では再現性については重要な因子であり、伝達損失の定量化が必要になってくる。

本報告は斜角探傷における伝搬方向など及び、垂直探傷における伝達損失について調べたものであり、その結果を報告する。

## 2. 斜角探傷における超音波の伝搬

## 2.1. スリットによるエコー高さ

炭素繊維の体積含有率 $V_f$ が60%で板厚20mmのCFRP平板について、直径140mm、厚さ0.3mmの砥石によって開口スリットを加工したものを斜角探傷する。斜角探傷は図1のように、垂直探触子(広帯域型の周波数2MHz: B2C15N)は上面を斜めカットしたアクリル製のくさびに取り付け、CFRPに超音波が斜めに入射させる

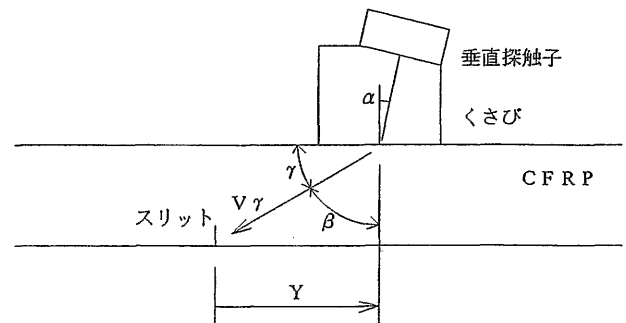


図-1 CFRPの斜角探傷の模式図

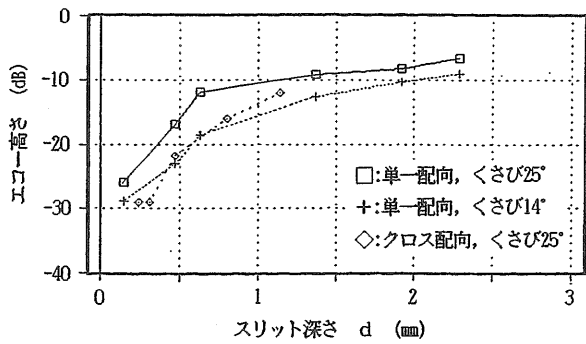


図-2 スリットの深さとエコー高さとの関係

方法である。欠陥を模擬したスリットは深さ0.15~2mmで、単一配向材の繊維を切断する方向である。

測定結果は図2に示す。基準感度は探傷方向に対応した端面からのコーナーエコーを0dBとした。図において、エコー高さと深さとの関係は三者(□, +: 単一配向材と◇: クロス配向材)とも似た傾向を示した。これらから開口長さ10mmの場合もスリットの最小の検出深さdは約0.2mmと判定された。

2.2. 波面及び伝搬方向

スリットの探傷時は図1のような探触子との位置的關係があると、測定した伝搬時間から音速が求められる。同時に欠陥の深さ位置(図1から板厚に等しい)と探触子距離Yから伝搬角が得られる。しかし、実際には欠陥は内部に存在しているので、その位置を求めるには欠陥エコーの時間的な位置と、超音波が斜めに進行する角度及び音速が必要である。これらを各々、T, S, Vとすれば欠陥は音の入射位置から前方にVT・cos(S)/2、表面から深さ方向はVT・sin(S)/2から推定可能となる。ところが音響異方性材料では、進行する角度によって音速が異なるので関数などとして知る必要がある。そのため測定から求めた音速と伝搬角に対して、数値計算したものと比較する。

CFRPの音速は繊維方向では速く、その直角方向では遅い。その比は最大3倍程であり、最初に伝搬角との関係を調べた[1]。得られた関係は図3(図中に測定法を示す)のように、二つの波(到達順に先頭波及び第2波とした)に対して大きな角度依存がある。実線はそれぞれについての実験から得られた近似式であり、先頭波については第1期の研究で得られた楕円関数[1]、第2波では4次式で表した。波の伝搬の様子はホイヘンスの原理を利用して求める。ただし、等方性でないので素波の広がり音速の分布を近似式で持たせている。

これらの関係式を基にCFRPに斜め入射した時の波面を求めた。斜め入射する波面を波面方向に分割して、各要素が表面に入射した際のt秒後の素波を合成

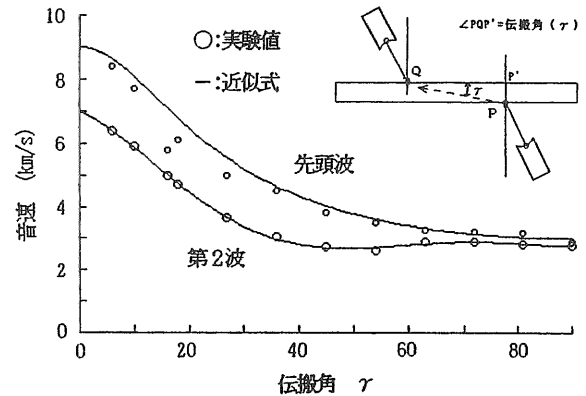


図-3 伝搬角と音速との関係(単一配向材)

した波面H(t)及び強度の強い部分の合成波形P(t)を求めれば次のようになる。

$$H(t) = \sum_{n=1}^m V(\gamma_n) \cdot t \quad (1)$$

$$P(t) = \sum_{n=1}^m V(\gamma_n) \cdot D(\gamma_n) \cdot f(t - t_n) \quad (2)$$

ただし、V(γ)は音速、D(γ)は素波の強度に関する項である。f(t-t<sub>n</sub>)は波面の分割数mにおける各nでの時間的な合成波形の関数となっている。なお、f(t)は次のようなパルス波形とした。

$$f(t) = \sin(2\pi t/T_f) \cdot \sin(\pi t/NT_f) \quad (3)$$

ここで、Nは伝搬するパルスの波数、T<sub>f</sub>はその周期である。

超音波探傷では広帯域の場合、Nは1.5~4程度の値が一般的に使用されている。周波数2MHz(周期T<sub>f</sub>=0.5μs)とし、2波のパルスで素波の強度は、全方向に対して等しいものとした。図4は先頭波の場合で入射角7度である。θは屈折角(波面の法線方向の角度)、β(=90-γ)は伝搬補角を示す。θ及びβは音速の関数として解析的に得ることができる。(1)式の素波及び(2)式の波はCFRPに入射してから一定の経過時間後について表した。なお、くさび内での音速V<sub>w</sub>は2.46km/sとした。図4の(2)式から求めた波の合成では、振幅のしきい値以上を表示したもので進行方向(エネルギー伝播方向)が明らかとなっている。第2波の場合では、波面を描くと図5に示す結果が得られた。図から伝搬が密と判断したエネルギー伝播方向の角度βは数値で表した。図5において、素波の位相の揃った所が見られる方向は2つ現れているよう

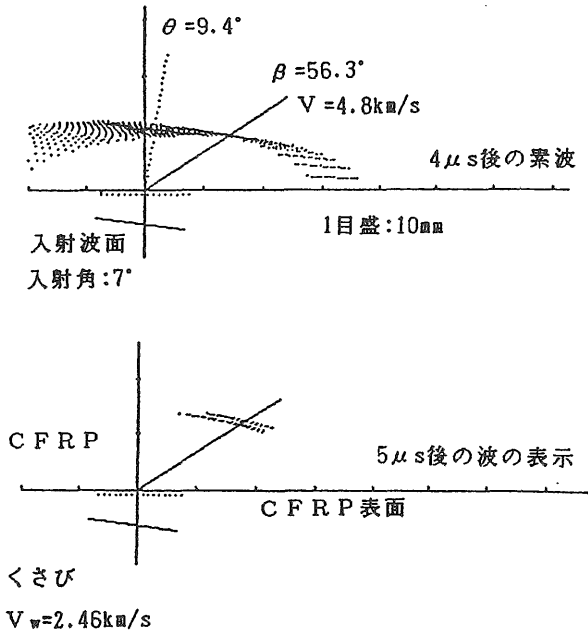


図-4 先頭波の波面(上)と伝搬方向(下)  
(入射角:7度)

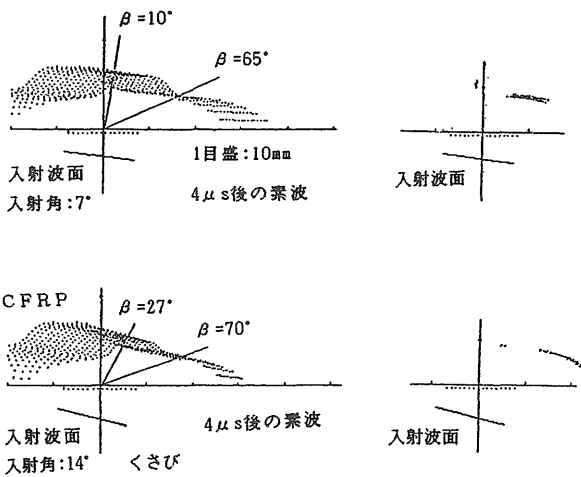


図-5 第2波の波面(左)と伝搬方向(右)  
(上:入射角7度、下:入射角14度)

あり、波の表示においても、 $\beta$ の小さな成分が見られる。図4と5において、素波が揃ってない方向は位相が大きく離れているので振幅は極端に小さく、逆に素波が揃っている方向は振幅が大きいため、波として表示できることになる。このように計算で得られた $\beta$ と音速は実験結果と比較してみる。

図6は入射角 $\alpha$ と伝搬補角 $\beta$  (●マーク)及び音速(○マーク)との関係である。図において、●と○を結ぶ縦の破線は一对であることを示す。図6の入射角

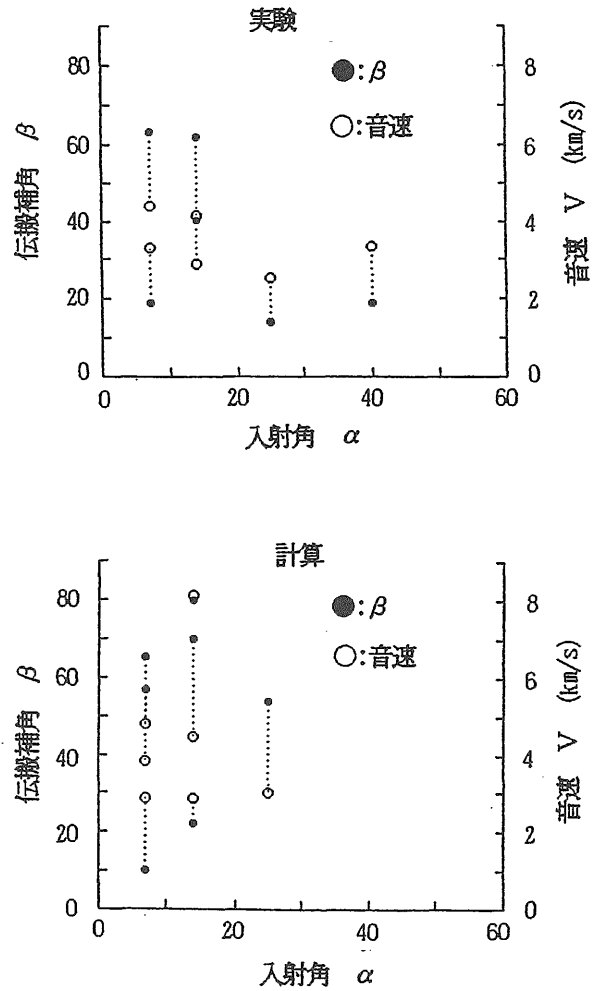


図-6 入射角と伝搬補角及び音速との関係  
(上:実験、下:計算)

7度の実験において、 $\beta$ が65と18度の両角度でスリットが検出されており、Y距離の長い $\beta$ の大きい方が先頭波で小さい方が第2波である。同図の計算では三つの波のうち、音速が最も速いものが先頭波で他は第2波と判断され、二つは実験に近いものと思われる。入射角が14度では、音速が遅い方の $\beta$ が異なったが、選択した角度は図から求めたことが要因と思われる。実験では入射角が25度と40度では検出した波形は一つで、音速と $\beta$ から第2波と判断された。

実験では欠陥と探触子距離Yを0から徐々に遠ざけて探傷するので、伝搬角 $\gamma$ は90度から0度(伝搬補角 $\beta$ では0度から90度の方向)の領域に変化する。したがってCFRPに伝搬する波を第2波及び先頭波の順で得ることになり、欠陥を検出する波が複数得られることになる。入射角が25度以上では、先頭波がCFRPに伝搬することがなくなるので実験で得られた波は第2波のみになったと考えられた。

実験と計算とを比べて、一對の $\beta$ と音速が同様となれば伝搬方向が推測可能となる。入射角7度の場合、実験では異なるY位置でエコーが得られている。実験において、入射角を7,14,25及び40度と変えても、音速は2.7~4.3km/sの範囲での欠陥の検出が多く得られた。計算では入射角が7,14及び25度の場合、音速が3000m/s付近の波が存在している。実験及び計算の両者から音速が3000m/s程度の波が探傷に有効で、欠陥の検出に適するものと思われる。

今回のCFRPの斜角探傷では、欠陥までのY距離が短いところで検出する方がエコー高さ、が大きい結果となった。これらの音速は2.7~3.3km/sと比較的遅い。入射角によって異なるが、より長いY距離でも欠陥は検出できると思われるが、この場合の音速は前者よりも速い。少なくとも、鋼などの一回反射(底面反射)のような経路による検出は得られないようである。欠陥の位置推定はくさびが7度の場合、実験から伝搬角 $\gamma$ が約70度となり、音速が3.2km/sが得られた。よって、両者の値とエコーの受信時間から斜角探傷が可能となり得る。

### 3. 垂直探傷における伝達損失の定量化

超音波が多重媒質層に対して垂直に伝搬する場合の伝達損失について数値計算により求めた。計算はパルスによる多重媒質の伝搬を扱った。中間媒質が一つであれば三重媒質となり、多重反射はこの層のみとなる。中間媒質が二つとなると、四重媒質の伝搬となるのでこれらの多重反射は中間層二つとその層の和の合計三層で行うことになる。パルス伝搬による三重媒質の斜角探傷の場合については報告がある[2]。しかし、垂直探傷については未だ明らかにされてなく報告はない。

#### 3.1. 四重媒質のパルス伝搬

パルスによる四重媒質での伝搬の計算は、図7に示すように伝搬方向から媒質1、2、及び媒質4とし、

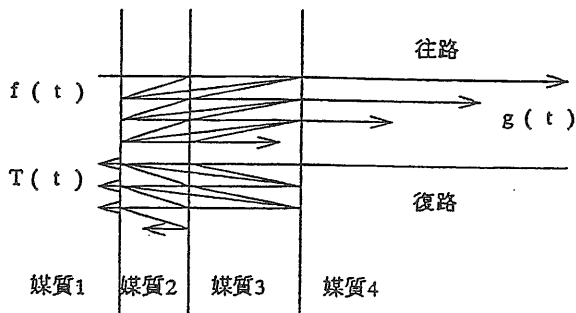


図-7 四重媒質伝搬の経路

往復の通過で行った。超音波は媒質1から2及び媒質3を伝搬して媒質4に入射する。その際、パルスの通過波を $g(t)$ とすると、 $g(t)$ は次の式で求めることができる[3]。

$$g(t) = \sum_{n_1=1}^{m_1} F_1 f(t-t_{n_1}) + \sum_{n_2=1}^{m_2} F_2 f(t-t_{n_2}) + \dots + \sum_{n_k=1}^{m_k} F_k f(t-t_{n_k}) \quad (4)$$

ただし、 $f(t)$ は送信波形(伝搬パルス)である。 $F_1, F_2, \dots, F_n$ は関連する層での反射回数 $m_1, m_2, \dots, m_k$ に対応する通過率あるいは反射率である。 $n_k$ は各層の厚さ、周波数及びパルス幅によって決められる層内のパルス波の反射回数を意味する。ここでは伝搬経路は4種類( $k=4$ )として扱った。また、媒質4から媒質3、媒質2を経て媒質1に到達する受信パルスを $T(t)$ とすれば、 $T(t)$ は(4)式と同様にして次のように計算した。

$$T(t) = \sum_{n_1=1}^{m_1} G_1 g(t-t_{n_1}) + \sum_{n_2=1}^{m_2} G_2 g(t-t_{n_2}) + \dots + \sum_{n_k=1}^{m_k} G_k g(t-t_{n_k}) \quad (5)$$

なお、ここでは層を伝搬する場合の減衰は考慮していない。伝搬するパルスの形状 $f(t)$ は斜め入射の伝搬で用いたものと同じである。基準の振幅は媒質3の厚さが0として次により求めて(媒質3無しの往復通過率を計算)、その波形の最大値を基準 $T_0$ とした。

$$T_0 = T_{12} \cdot T_{24} \sum_{n=1}^m (r_{24}^n)^2 \cdot (r_{21}^n)^2 f(t-t_n) \quad (6)$$

ただし、 $m$ は媒質2での反射回数、 $T$ 及び $r^2$ は2種媒質の往復通過率と反射率、添字は伝搬方向を意味する。四重媒質における伝達損失を $T_b$ とすると、(5)式 $T(t)$ 及び(6)式 $T_0$ の両波形の絶対値の最大値から $T_b$ が求められる。すなわち、四重媒質を往復通過して振動子に受信される波形 $T(t)$ 、媒質3の厚さを限りなく0として振動子で受信される波形 $T_0$ の各々の絶対値の振幅比を求めれば媒質3の厚さによる伝達損失が得られる。

$$T_d = |T(t)|_{\max} / |T_0|_{\max} \quad (7)$$

$$T_d = |T(t)|_{\max} / |T_0|_{\max} \quad (11)=(7)$$

三重媒質の場合

三重媒質では図7において媒質3を取り除き、媒質4を3とすれば中間層が一層となる。パルスによる三重媒質での伝搬の計算は、伝搬方向から媒質1、2及び媒質3とし、往復で行った。超音波は媒質1から層の媒質2を伝搬して媒質3に入射する。その際、パルスの通過波をg(t)とすると、g(t)は次の式で求めることができる[4]。

$$g(t) = t_{12} \cdot t_{23} \sum_{n=1}^m r_{23}^n \cdot r_{21}^n f(t-t_n) \quad (8)$$

ただし、f(t)は送信波形(伝搬パルス)である。tとrは通過率と反射率、添字は媒質番号とその伝搬方向を示すものであり、mは層内でのパルスの反射回数である。また、媒質3から媒質2と媒質1に到達する受信パルスをT(t)とすれば、T(t)は(8)式と同様にして計算できる。

$$T(t) = t_{32} \cdot t_{21} \sum_{n=1}^m r_{21}^n \cdot r_{23}^n g(t-t_n) \quad (9)$$

基準の振幅は媒質2の厚さが0として次により求めて(媒質1と3の往復通過率を計算)、その値T<sub>0</sub>を0dBとした。

$$T_0 = t_{13} \cdot t_{31} \cdot f(t) \quad (10)$$

したがって、伝達損失をT<sub>d</sub>とすると(9)式と(10)式から、四重媒質の場合と同様な方法、式(7)からT<sub>d</sub>が得られる。

四重媒質及び三重媒質の伝搬において、波形の絶対値の振幅を採用した理由は、超音波探傷においては検波波形で表示しており、これは全波整流が主だからである。

3.2. 直接接触法における接触媒質の影響

垂直探傷では振動子、接触媒質、試験体の順にパルスが伝搬し、復路はその逆となる。したがって、三重媒質の計算で伝達損失(T<sub>d</sub>)が求められる。計算するために用いた三つの媒質の密度と音速の値は表1に示した。

図8は周波数2MHzにおける接触媒質の厚さdとエコー高さとの関係である。縦軸のエコー高さは負の値が大きくなれば伝達損失が増大することを意味する。伝達損失は接触媒質の厚さが増加すると大きくなる。その低下量は音響インピーダンスが小さい程顕著である。ただし、損失が回復する厚さがあることが分る。

整合膜のある場合

整合膜は試験体への入射効率を高めるために用いら

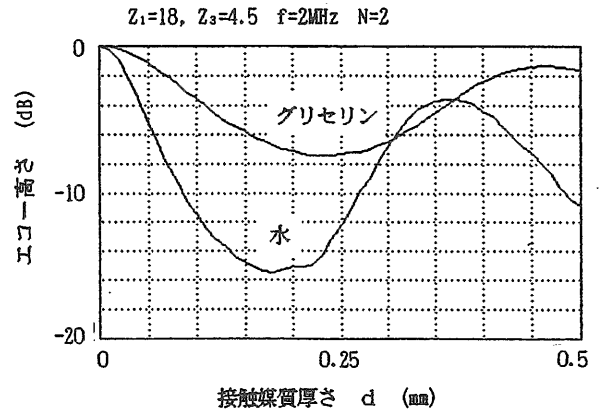


図-8 接触媒質の厚さとエコー高さとの関係

表1 各媒質の密度と音速 (三重媒質)

	媒 質 1		媒 質 2		媒 質 3
	振動子		水	グリセリン	CFRP
密度 (g / cm <sup>3</sup> )	6.0		1.0	1.3	1.5
音速 (km / s)	3.0		1.48	1.9	3.0

音響インピーダンス (Z) = 密度 × 音速

密度: CFRPでは比重

表2 各媒質の密度と音速 (整合膜付)

	媒質 1	媒質 2	媒質 3		媒質 4
	振動子	整合膜	水	グリセリン	CFRP
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	6.0	3.0	1.0	1.3	1.5
音速 (km/s)	3.0	$(Z_1 Z_4)^{1/2} / 3$	1.48	1.9	3.0

媒質2の厚さ:  $\lambda / 4$ ,  $\lambda = 3 / f$

密度: CFRPでは比重

表3 各媒質の密度と音速 (塗料層付)

	媒質 1	媒質 2	媒質 3
	水	塗料	CFRP
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.0	1.4	1.5
音速 (km/s)	1.48	2.1	3.0

密度: CFRPでは比重

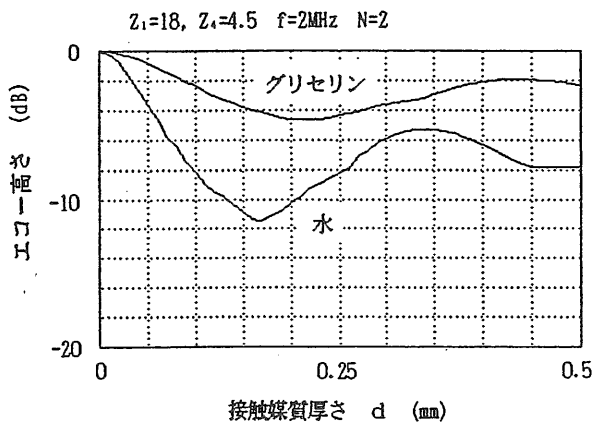


図-9 接触媒質の厚さとエコー高さとの関係 (四重媒質、整合膜を有する場合)

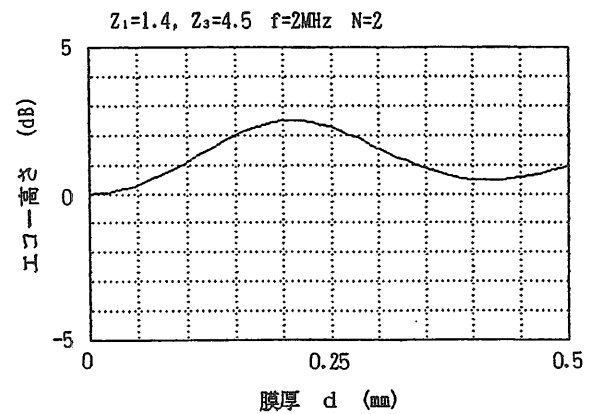


図-10 塗料層の厚さとエコー高さとの関係 (水浸法の場合)

れる。その音響インピーダンスの値は振動子と試験体の音響インピーダンスの積の平方根とするのが一般的であり、厚さは波長/4とする。整合膜は磨耗に耐えるためにも硬い材料、一般にはセラミック系が使用されている。

図9は前項と同条件(表2参照、同表の媒質2は整合膜)で、整合膜を付けた場合(四重媒質の計算)の接触媒質厚dとエコー高さとの関係である。整合膜を付けない場合の計算、図8と比較すると、損失の低下が少ないことが分る。

### 3.3. 水浸法における塗料層の影響

構造部材へ、CFRPを利用する場合、紫外線損傷など環境下の影響を避けるためと、デザインの効果などから表面に塗装する場合がある。塗装面からの超音波探傷では塗料層により、伝達損失が生ずる。水浸法で測定する場合は三重媒質となるので、(8)~(11)式を用いて $T_d$ を計算できる。適用する媒質の密度と音速は表3に示した。

図10は塗料層の厚さとエコー高さとの関係である。d=0の塗料なしに対して塗料層の厚さdが増加するにしたがって、感度が増加(伝達損失は少ない方向)

して0.2mmでピークとなる。以後損失は多くなるが、0.4mm付近で $T_a$ が最小値となり、その後また感度が増加する。これらの結果から、塗料の場合には損失は小さいとみてよい。これは、塗料の音響インピーダンスが水とCFRPの中間に近い値となることによるものである。

#### 4. 考 察

CFRPは一層ごとに樹脂を含んだ繊維で成っており、厚さを増すには層を重ねて作成する。繊維の配向により平面的には強度の異方性が生ずるが、厚さ方向については同じ層が重なり合っていることからマクロ的には均一多層材として扱える。これは音響についても同じで、音響異方性は繊維配向などで決るが、厚さ方向はやはり均一として扱える。すなわち、垂直探傷では厚さ方向に超音波を入射させるので音響異方性はないと言えるが、斜め入射させる斜角探傷ではその入射角と繊維方向から音響異方性が生ずる。

##### 4.1. 斜め入射による探傷

板の垂直方向のき裂は垂直探傷では検出できず、斜角探傷が必要となる。斜角探傷では斜め入射した超音波の伝搬方向と、得られたエコー波形の時間から欠陥の位置が求められる。等方性な材料であれば屈折則を用いて縦波あるいは横波速度から欠陥の位置が得られる。CFRPは伝搬する波面と伝搬方向が対応しないので実際の反射源で調べた。反射源の大きさを変えれば評価法にもつながる。ここでは表面に開口を有するスリットを用いている。

スリットによる検出可能な最小断面積は図2から約1.4mm<sup>2</sup>で、繊維破断の本数に換算すると数百本程である。更に検出度を向上するには、周波数を高くまたは音を絞る必要がある。音響異方性材料の超音波の伝搬は屈折則による伝搬方向と屈折角が一致しない。それ故、数値計算では素波からの音源で波面を作成した。図5の波線は波面と垂直方向（屈折方向）であるが、エネルギー伝搬は波面での位相が密な実線の方向である。図5の第2波の場合は波面が二つ生じ、伝搬方向も2方向の様相を示した。スリットの探傷実験（図6）では伝搬角が大きく音速も遅い、これは図2の結果をみても分る。同図の数値計算では二つの伝搬角が表れたが、実験に対応すると思われる音速は3km/s弱とみられる。

表・底面に開口していない内部欠陥では、くさび角による入射角に対応した実験からの伝搬角及び音速を用いる。そして、くさびの入射点を基準にとりTOF（反射源からエコーを受信する時間：Time Of Flight）から計算して欠陥の位置を求めることになる。欠陥寸法の評価は、音速と実測周波数から算出した波長と伝

搬距離によって、エコー高さを求めることは可能である。大きな欠陥については、探触子走査によるエコーの広がりから求められる。

##### 4.2. 垂直探傷における伝達損失

伝達損失は探傷面における超音波の往復通過率の低下を意味し、探触子、伝搬媒質及び試験体の音響インピーダンスと表面状態で決められる。これを定量的に求めるには各境界面の通過率などを調べる。

音響インピーダンス $Z_a$ 、 $Z_b$ の境界面を媒質aからb方向に伝搬する際の反射率及び通過率は、 $(Z_b - Z_a) / (Z_a + Z_b)$ 、 $2Z_b / (Z_a + Z_b)$ で表される[5]。パルス伝搬の場合には入射波形 $f(t)$ とすると、反射及び通過波形は $f(t)(Z_b - Z_a) / (Z_a + Z_b)$ 及び $f(t) \cdot 2Z_b / (Z_a + Z_b)$ となる。これらは $f(t)$ を細かに時間分割することで、薄い多重媒質においても各々の境界面の反射と通過を加味すれば計算できる。本報告では波形の最大振幅で表したが、パルスと連続波の計算と異なる所はパルスでは受信波形の推定が可能なことである。実験的には鋼の表面に放電加工によって粗く処理した試験片の伝達損失を調べて、計算と比較したものは文献[4]に掲載している。これは最大粗さによるエコー高さの低下を求めたもので計算とは対応した。したがって材料が変わってもCFRPの場合、音響インピーダンスが異なるのみなので適用は可能と思われる。

図9の整合膜の効果は、その外側両媒質の音響インピーダンスの積の平方根に設定するために損失が少なくなる。これは膜のない場合、図8の最大損失値と比べると分る。塗料がCFRPに塗布された場合の想定についても整合膜と同様のことが言える。図10は塗料の音速及び比重を表3の値としたものであるが、これらは水及びCFRPの音響インピーダンスの中間的な値となる。したがって、伝達損失は大きくならない結果を示した。厚さにより損失が+になるのは塗料なしを基準とした相対値のためである。ただし、絶対値としての損失は+になることはない。

#### 5. ま と め

- 1) 音響異方性の大きいCFRPの断面方向のき裂をくさびを用いた斜角探傷により検出可能であることを確かめた。なお、くさびの角度は10~25度の範囲が良いことが分った。ただし、角度が小さいとくさび内反射によるエコーが生ずる。斜角探傷によって、底面開口スリットの位置を実用的な精度で特定できることが分った。したがって、内部欠陥についても位置の推定が可能となる。
- 2) 四重媒質を垂直に伝搬するパルスについて数値計算し、伝達損失を求めた。計算は波形合成で行う単純な方法である。実験との対応は行っていない



いが、パルスを扱う垂直探傷に適用可能と思われる。

## 6. 参考文献

- 1) 勝又健一：CFRP板における繊維方向と音速との関係について、非破壊検査協会第1回超音波による非破壊評価シンポジウム、p.49-55(1994)
- 2) 福原熙明：斜角探傷における表面粗さによる伝達損失の周波数応答解析、非破壊検査協会第1回超音波による非破壊評価シンポジウム、p.136-142(1994)
- 3) 勝又健一：垂直探傷における4重媒質のパルス伝搬の数値実験、非破壊検査協会超音波分科会資料、No.21509(1995)
- 4) 勝又健一：パルスによる薄層媒体での伝達損失の数値実験、非破壊検査協会超音波分科会資料、No.21502(1995)
- 5) 日本学術振興会：超音波探傷法、1977年