

超音波による FRP 劣化診断技術の開発

勝又 健一^{*}、松岡 一祥^{*}、林 慎也^{*}、田中 義照^{*}
秋山 繁^{**}

Development of Ultrasonic Deterioration

Diagnosis Technology for FRP Plates

by

Kenichi KATSUMATA, Kazuyoshi MATSUOKA, Shinya HAYASHI
Yoshiteru TANAKA and Shigeru AKIYAMA

Abstract

The visual inspection or the hammering test is usually used for the deterioration diagnosis of aged FRP ships. Then, we developed a new FRP deterioration diagnosis device to evaluate the level of damage objectively. This paper outlines the progress to development and the feature of the device.

First, ultrasonic normal beam testing was examined for the test piece in the damaged parts of FRP plates, which had been provided for crush tests. As a result, it turned out that the undamaged part, the exfoliated part and their boundary part could be roughly distinguished by the ratio of the interface echo height and the bottom echo height. Second, ultrasonic attenuation coefficient was introduced from theoretical consideration for the exfoliated size and the reflection of the interface of resin and glass fiber plane. It turned out that the interface echo in an undamaged part became the standard of exfoliation sizing. Next, the relation between the values of undamaged area ratio and echo height ratio was examined through detailed experiments using FRP specimens. The experiment result and the theory showed good correspondence, and the algorithm of the FRP deterioration diagnosis was constructed.

The prototype installed this algorithm was produced, and it was confirmed that the function of exfoliation evaluation operated normally. However, as it had the fault in the portability, a handy and practicable device that improved the prototype was produced. Both devices were provided for the actual proof experiment after completion, and were able to detect and evaluate exfoliation of FRP ships. When damaged by collision etc., it turns out that the circumference has also exfoliated in many cases.

^{*} 環境・エネルギー研究領域、^{**} 輸送高度化研究領域

原稿受付 平成 年 月 日

審査済 平成 年 月 日

目 次

1 . ま え が き	2
2 . 実 損 傷 材 に よ る 調 査	3
2 . 1 FRP 損 傷 材	3
2 . 2 使 用 装 置	3
2 . 3 垂 直 探 傷 の 適 用	3
2 . 4 測 定 し た エ コ ー 高 さ と 健 全 面 積 率	4
2 . 5 2 章 の ま と め	6
3 . 理 論 的 検 討 及 び ア ル ゴ リ ズ ム 構 築	6
3 . 1 減 衰 を 考 慮 し た 剥 離 評 価 の 定 量 化	6
3 . 2 評 価 ア ル ゴ リ ズ ム の 構 築	7
3 . 3 3 章 の ま と め	7
4 . 剥 離 試 験 片 に よ る 調 査	7
4 . 1 人 工 剥 離 試 験 片	7
4 . 2 界 面 反 射 率 の 算 出	8
4 . 3 底 面 / 界 面 エ コ ー と 健 全 面 積 率 と の 関 係	8
4 . 3 . 1 剥 離 の 深 さ に よ る 影 響	8
4 . 3 . 2 実 験 か ら 求 め た 界 面 反 射 率	9
4 . 4 理 論 と の 対 応	9
4 . 5 FRP に お け る 実 験 値 変 動 の 検 討	10
4 . 6 4 章 の ま と め	10
5 . 装 置 の 開 発	10
5 . 1 プ ロ ト タ イ プ の 開 発	10
5 . 2 実 用 機 の 開 発	12
5 . 2 . 1 携 帯 型 FRP 劣 化 診 断 装 置	12
5 . 2 . 2 開 発 装 置 の 機 能 に つ い て	12
5 . 3 5 章 の ま と め	13
6 . 実 証 実 験	13
6 . 1 1 号 プ ロ ト タ イ プ に よ る 場 合	13
6 . 2 2 号 実 用 機 に よ る 場 合	14
6 . 3 6 章 の ま と め	15
7 . ま と め	15
謝 辞	15
参 考 文 献	16

1 . ま え が き

積層構造を有する代表的な材料は複合材料である。複合材料のマトリックスには、プラスチック及びアルミ等の金属が用いられており、強化材は炭素繊維及びガラス繊維がある。最も多量に使用されているガラス繊維強化プラスチック（GFRP あるいは FRP）は、漁船やプレジャーボートの船体材料として使用されている。

建造した構造物は使用中に劣化することが免れない。一般構造物の劣化状態の把握は超音波などの非破壊検査手法により調べられている。しかし、FRP に限って言えば、航空機の一部翼に対して超音波が

適用されている以外は殆ど実用化されていない。ただし、部品検査に渦流探傷が行われる。FRP 検査に関するものでは、水浸探傷による剥離の検出¹⁾、疲労クラック²⁾及びボイド³⁾を調べた報告がある。航空機の場合は CFRP が用いられ、やはり水浸探傷で疲労クラック⁴⁾の検査法、繊維配向の調査報告⁵⁾がなされている。直接接触法では航空宇宙用 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)のボイド及び剥離を周波数変調・周波数分析が述べられた⁶⁾。実用的な検査法では航空機翼ハニカム CFRP に対して直接透過法の報告⁷⁾がある。

船用 FRP は、不飽和ポリエステル樹脂(60 重量%)とガラス繊維(40 重量%)の複合材料であり、鋼のような均一な材料ではない。船用 FRP に通常使われるガラス繊維は、強度保護のためのロービングクロスと接着性向上と厚さを確保するためのストランドマットとが交互に積層されている。ロービングクロスはガラス繊維を織ったものであり、表面に凹凸がある。超音波の場合は、樹脂ベースなので減衰が大きく、高い周波数を適用できない。さらに FRP はガラス繊維を樹脂で接着作製していくことから、その界面からの反射を無視することができない。従って、内部欠陥を正確に把握することは非破壊検査にとって、技術的に難しいのが現状である。

平成 12 年度から始まった運輸省(13 年度：国土交通省)海事局受託研究「FRP 廃船高度リサイクルシステムの構築に関する研究」において、リサイクルシステムの構築及び、リユース技術の構築の研究が始まった。後者には、ブロック接合技術と FRP 劣化診断技術の開発が関連し、ブロック接合船のための FRP 船の損傷を検知する技術開発が始まった。上記研究は省庁の組織改革により、平成 14 年度からは国土交通省海事局船用工業課からの受託研究「FRP 廃船の発生抑制に係わるリサイクル・リユース技術確立のための調査研究」となり、この研究の中で平成 14 年度に開発した FRP 劣化診断装置(プロトタイプ)は、船体 FRP の剥離検出とその評価に対して、実験室的にも実際のドック現場においても十分満足できる機能があることが分かった。ただし、大きさ、重量及び操作性の点では不十分であった。平成 15 年度では装置の小型軽量化を図り、操作性が格段に向上した携帯型 FRP 劣化診断装置(実用機)が開発できた。本報告はその装置の内容及び、実際のドックで行った FRP 船の劣化診断実証実験の結果を述べたものである。

FRP 劣化診断実用装置の開発は次のような経過を辿ってきた。

- 1) 破壊試験等で損傷した FRP 材料を用いた、剥離部等の探傷によるデータ集積
- 2) 超音波伝播と剥離面積に関する理論的検討と、模

擬剥離試験片による詳細な実験

- 3) 剥離診断のアルゴリズム構築に基づく FRP 劣化診断装置プロトタイプの開発
- 4) プロトタイプ 3) による現場での FRP 船の劣化診断実証実験及び、装置の問題点抽出
- 5) 問題点の改善と実用機への開発着手

本報告は上記の流れを順に記述するとともに、開発した装置による実証実験も併せて述べる。

2. 実損傷材による調査

劣化診断技術の開発は、実際に損傷した FRP 材の剥離検出から始まった。超音波を用いて、剥離した箇所及び健全な状態の場所を比較して剥離評価の可能性検討へと進めていった。

2.1 FRP 損傷材

使用した FRP はガラス繊維と熱硬化性樹脂の構成である。図-1 は一般船用 FRP の積層断面の概念図である。直径 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ のガラス繊維はロービングクロスと長さ 50mm で無方向配置のチョップドストランドマットが交互に近い配列で積層されている。接着用の樹脂は不飽和ポリエステル樹脂を使用しており、ガラス含有率は 40% である。

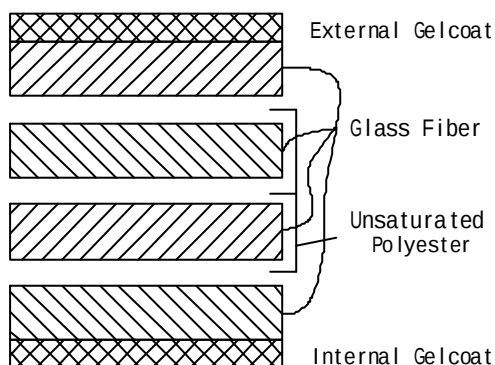


図-1 船用FRPの断面模式図

作製したFRP単板(板厚 $5,10\text{mm}$)はFRP廃船処理の効率を調査⁸⁾するために各方法で切断破壊し、剥離試験片として適用できるものを選んだ。完全に破壊した箇所は繊維が露出するなどしているが、その周辺は剥離で安定している場合が多い。これらの試験片は超音波探傷用に使用可能であり、実損傷材とした。

大きさ 250mm 角のFRP試験片は剥離と健全部の境界をX線フィルム観察器によって調べた。損傷していない健全状態では光の透過が大なので明瞭となっているが、剥離があると光が透過しないために透過光が分からない。この性質を用いて健全部と剥離

部である剥離前線を調べ、ペンで追跡して境界線を描いた。

2.2 使用装置

FRP板を探傷するために用いた装置は、汎用の超音波探傷器である。超音波探傷器の送信波は矩形パルスである。受信周波数帯域は $0.5 \sim 10\text{MHz}$ となっている。なお、ビデオ出力を有しており、波形の画像出力が容易に行える。超音波探触子は公称周波数 2MHz の広帯域型(B2C15N-DL:振動子径 15mm)で、遅延材としてシリコンゴムが付けてある。なお、接触媒質はマシン油及び水に比べて音響インピーダンスが大きいグリセリンペーストを用いた。

2.3 垂直探傷の適用

FRPの剥離を検出・評価するには超音波の伝播方向を剥離面に対して垂直にするのが適切⁹⁾である。したがって、表面から垂直探傷が適用できる。測定箇所は健全部、剥離部及び境界線の所であるが、それらはランダムな位置を選択した。勿論、境界部では健全部と剥離部の面積が1対1になるように注意する。図-2 は実験する場合の模式図である。測定は同一点での反射波形における+側の底面エコー高さ(反射振幅値%)及び、界面(剥離面を含む)エコー高さである。なお、界面エコーについては表面エコーの後及び底面エコー以前の位置で、複数であっても最大のものをデータとして採取した。

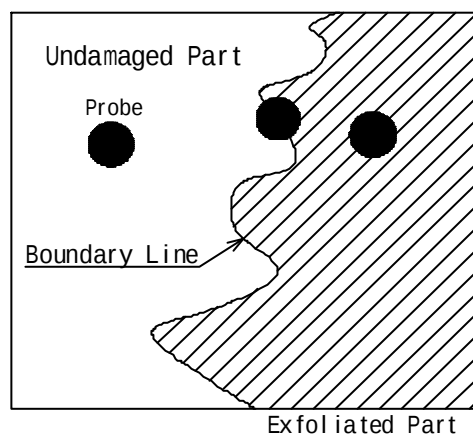


図-2 損傷材測定における探触子位置の例

探傷時に底面及び界面2つのエコーを抽出するために、時間軸の範囲を分割した。振動子から送信された超音波は、遅延材を伝播してFRP表面に到達して内部に伝播するが、一部は反射する。表面エコーは常に生ずるのでこの範囲は監視外とする。FRP底面と内部の界面エコーとの時間軸の境界は底面エコーの立ち上がり点とした。図-3 は探傷器画面上における時間軸分割の設定を説明した図である。

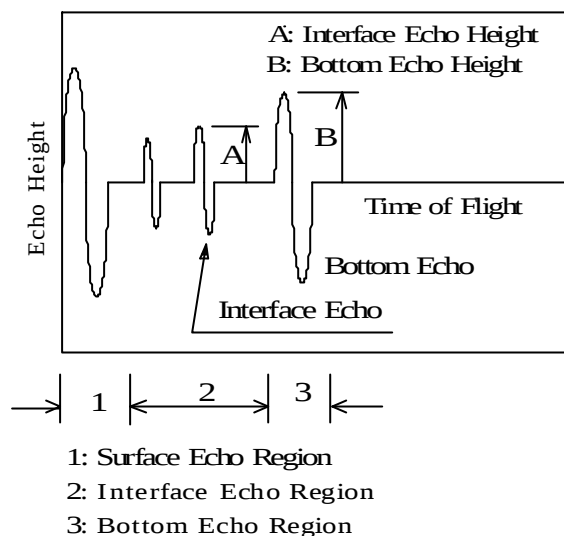
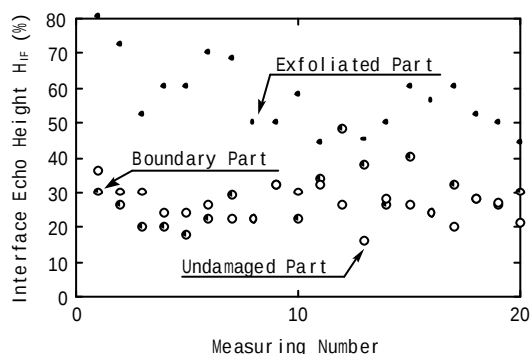
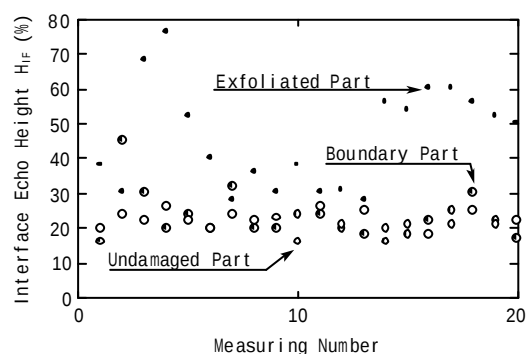


図 - 3 探傷画面における時間領域の分割

すなわち、表面エコー領域、界面エコー領域及び底面エコー領域がある。これら領域の始点及び終点は、実験から最適と判断した位置から決めた。



(a) Thickness of 10mm



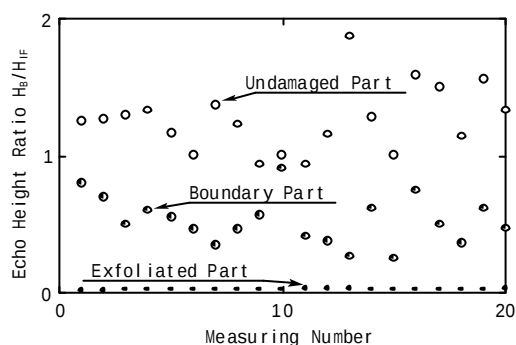
(b) Thickness of 5mm

図 - 4 損傷材の界面エコーの測定
(a:板厚 10mm、b:板厚 5mm)

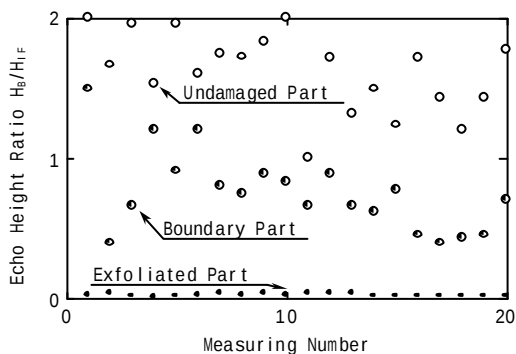
2.4 測定したエコー高さと健全面積率

図 - 4 は任意 20 点における界面エコー高さの測定結果である。図 - 4a の板厚 10mm の場合、健全部のエコー高さは 20% ~ 30% の範囲であるものの、境界部は 20 ~ 45% の範囲と健全部よりも大きい、明瞭に区別はできない。ただし、剥離域では 45 ~ 75% と明らかにエコーが高くなった。図 - 4b の 5mm 厚では健全部のエコーが 15 ~ 25%、境界部では 15 ~ 30% と差は見られず、剥離の箇所は 30 ~ 65% とエコー高さが高い。両板厚の測定結果から言えることは、剥離が混在した界面と健全部との差が明らかでないことである。これは健全部における界面エコーの位置と剥離がある場合の剥離からのエコーの位置が一致するとは限らないことが一要因であろう。

図 - 5 は界面エコー測定時に得られた底面エコー高さとの比で界面エコー高さを表したものである。すなわち、底面エコー高さ H_B 、界面エコー高さ H_{IF} の比、 H_B / H_{IF} が縦軸となる。図 - 5a が厚さ 10mm、図 - 5b が 5mm 厚である。これらの結果では健全部、境界部及び剥離部の順で H_B / H_{IF} が小さくなった。各パートが分類できたことには底面エコーの差が寄与されていることになるが、底面エコーのみで評価することは絶対値の測定となり、今後の FRP 劣化診断装置実用化を目指す上では適切な方法にならない

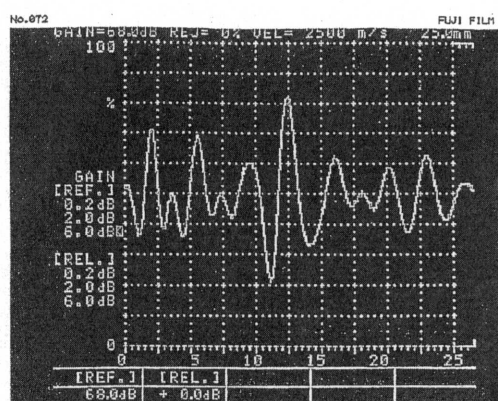


(a) Thickness of 10mm



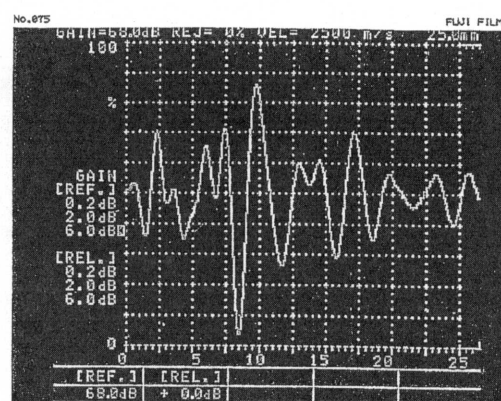
(b) Thickness of 5mm

図 - 5 底面 / 界面エコーによる整理
(a:板厚 10mm、b:板厚 5mm)



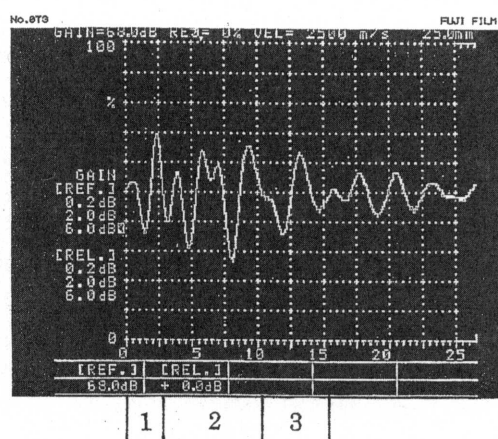
1: Surface Echo Region
2: Interface Echo Region
3: Bottom Echo Region

(a) 10-mm Thickness, Undamaged Part

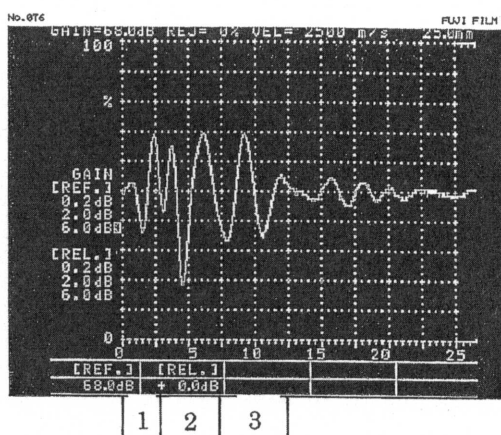


1: Surface Echo Region
2: Interface Echo Region
3: Bottom Echo Region

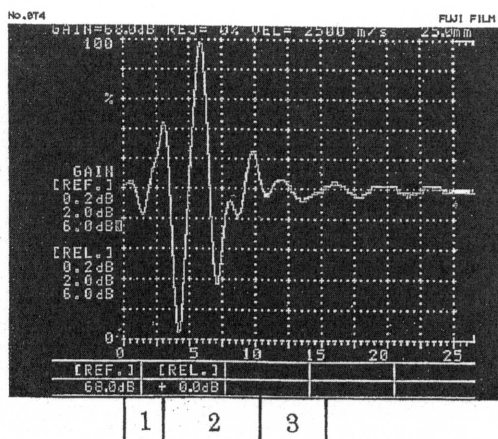
(b) 5-mm Thickness, Undamaged Part



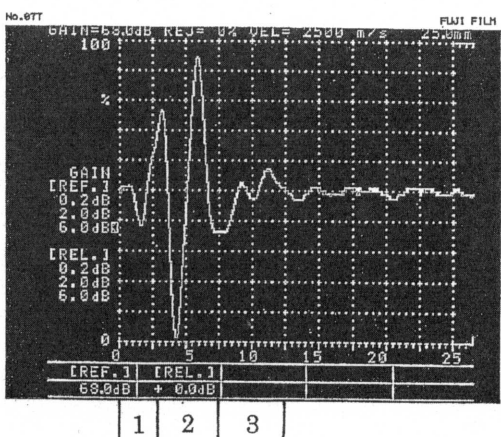
(c) 10-mm Thickness, Boundary Part



(d) 5-mm Thickness, Boundary Part



(e) 10-mm Thickness, Exfoliated Part



(f) 5-mm Thickness, Exfoliated Part

図-6 波形例

(a, c, e: $t=10\text{mm}$, b, d, f: $t=5\text{mm}$, a, b: 健全部, c, d: 境界部, e, f: 剥離部)

いため利用しない。さらに、FRP は不均一な材料であることも理由となる。

図 - 6 は代表的な波形例を示したものである。健全部は底面エコー及び界面エコーとも測定が比較的容易であった。探傷器の画面において時間分割したことにより、界面エコーは機械的に求めることができる。底面エコーは板厚に一致する場合で且つ、位相が変化していないものを選択するので難しい面がある。剥離部では、図のように底面エコーが非常に小さいが、剥離からの界面エコーは明瞭である。なお、剥離部における底面エコー領域にエコーが出現しても、界面エコーとの干渉などで底面エコーの位相が変化している場合は底面エコーとして扱わない。

剥離部では超音波が当たる範囲全て剥離しており、健全部では剥離がないので健全面積率が 100% となる。ここで、図 - 7 に示すごとく健全面積率を定義することにする。超音波の有効面積は拡散がない距離なのでその寸法は振動子面積 S で表すことができる。

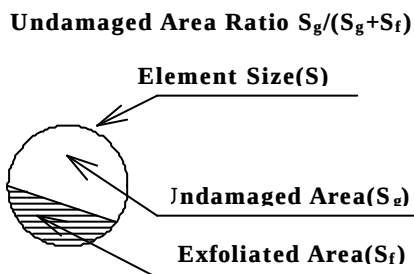


図 - 7 健全面積率の定義

S の中に健全面積 S_g 、剥離面積 S_f とすると健全面積率は $S_g / (S_g + S_f)$ で表すことができる。図 - 8 はエコー高さの比 (H_B / H_{IF}) と健全面積率との関係である。健全面積率 50%(境界部)及び 100%(健全部)における H_B / H_{IF} は、広範になってはいるが、健全面積率に応じて大きくなっている。また、厚さ 10mm (●) と 5mm (○) を比べると、○の方が H_B / H_{IF} が全体的に大きい結果を示している。

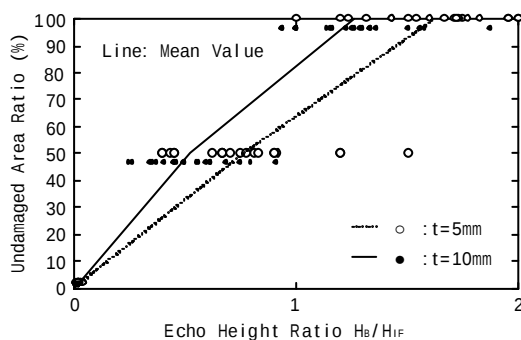


図 - 8 エコー高さの比と健全面積率との関係

以上により、FRP の垂直探傷は底面エコー高さと界面エコー高さの比で評価するのが適当と考えられる¹⁰⁾。実際の損傷材による実験からは、健全部と剥離部との差は明らかになった。ただし、境界部での変化が顕著ではなかった。実際には剥離が混在する場所の評価が問題と思われるため、詳細な実験を行う前に次章において、理論的な検討をすることにする。

2.5 2章のまとめ

損傷した厚さ 5 及び 10mm の船用 FRP 材を用いて、健全部、剥離部及びその境界部の超音波垂直探傷を行った。界面エコーによる場合は、剥離と健全部とでは差があったが、境界部は健全部と顕著ではなかった。底面エコーと界面エコー高さの比による整理法を提唱した。この値からは健全部、境界部及び剥離部の差が明らかとなった。本実験は FRP 劣化診断技術開発の第 1 歩となった。

3. 理論的検討及びアルゴリズム構築

損傷材の探傷結果、健全部及び剥離部とはエコー高さに差は生ずるが、測定値にバラツキがある。したがって、実験値だけでは剥離評価の根拠が弱いので、理論的な検討の必要性が生じた¹¹⁾。

超音波の音場は近距離音場と遠距離音場に大別される。両者の境とする距離 X_0 は $D^2 / 4\lambda$ である。ただし、 D は振動子直径、 λ は波長である。遠距離音場では拡散するので距離に反比例して音圧が低下するが、近距離音場では拡散がないので距離による音圧の低下は考えない。FRP はプラスチックがベースなので拡散による減衰が無視できて FRP 伝播の減衰は考慮しなければならない。

3.1 減衰を考慮した剥離評価の定量化

超音波の拡散がない範囲における厚さ t の平行平面な FRP 板において、底面からのエコー高さ H_B は次式で表される。

$$H_B = K P_0 \exp(-2\alpha t) S \quad (1)$$

ただし、 K は比例定数、 P_0 は振動子における平均送信音圧、 S は振動子面積、 α は伝播周波数での減衰定数である。

振動子面積に等しい反射領域において、剥離面積 S_f と健全面積 S_g が混在する深さ x における境界層からの界面エコー高さ H_{IF} は次式で表すことができる。

$$H_{IF} = KP_0 \exp(-2\alpha x) r_{IF} S_g + KP_0 \exp(-2\alpha x) S_f \quad (2)$$

ただし、 $S_g + S_f = S$ 、 r_{IF} はガラス繊維と樹脂との界面における反射率である。なお、ガラス繊維は平面として扱っている。超音波は剥離の後方には伝播しないので、底面エコーに寄与する面積は健全面積分である。したがって、式(1)の S は S_g となり、式(1)を式(2)で割ると、エコー高さの比 H_B / H_{IF} は式(3)となる。

$$\frac{H_B}{H_{IF}} = \frac{\exp(-2\alpha t) S_g}{\exp(-2\alpha x) r_{IF} S_g + \exp(-2\alpha x) S_f} \quad (3)$$

健全面積率は当然、 $S_g / (S_g + S_f)$ である。

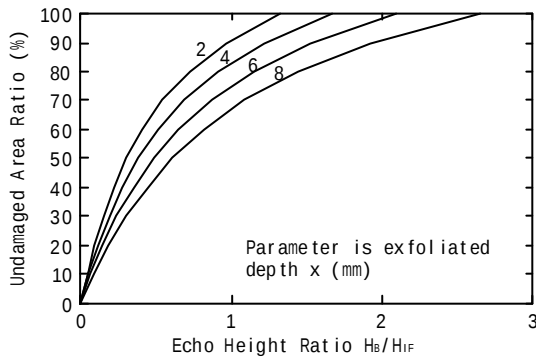


図-9 式(3)の計算結果
($t=10\text{mm}$, $x=2, 4, 6$, and 8mm)

図-9 は式(3)の計算結果である。厚さ $t=10\text{mm}$ 、界面反射率 $r_{IF}=0.3$ 、 α はデシベル表記で 0.5dB/mm の場合である。図-9 において、剥離深さ x が大きいほど、 H_B / H_{IF} が同じ値において健全面積率が小さい。また、健全面積率 100%における H_B / H_{IF} は剥離深さ x で異なる。ここでエコー高さの比を基準化してみる。

健全面積率 100%における H_B / H_{IF} の値を H_1 とする。式(3)の左辺を基準化したエコー高さの比で表すと、次式が得られる。

$$\frac{1}{H_1} \frac{H_B}{H_{IF}} = \frac{r_{IF} S_g}{r_{IF} S_g + S_f} \quad (4)$$

すなわち、健全面積率 100%における $H_B / (H_1 H_{IF})$ は 1 となる。基準化したエコー高さの比は、反射率に依存されたものとなる。

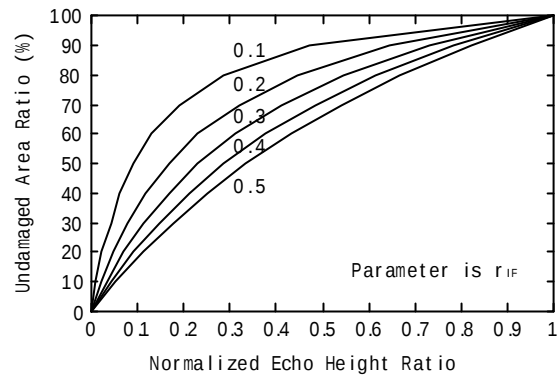


図-10 基準化したエコー高さの比と健全面積率

図-10 は基準化したエコー高さの比と健全面積率の関係である。すなわち、基準化したエコー高さの比から健全面積率を求める場合、界面反射率はパラメータとなる。

3.2 評価アルゴリズムの構築

FRP の剥離評価には式(3)を用いることになるが、減衰定数及び界面反射率は予め調べておいた値を用いる。他は測定時に得られる取得データを入れることで健全面積率が求められる。2つのエコーを監視する範囲(ゲート)は吟味して設定しなければならない。底面を監視するゲートは FRP 板厚の取得が基本であるが、 2MHz の場合では、健全部においては界面エコーよりも底面エコーの方が大きいので、時間的位置は自動的に検出可能となる。したがって、ゲートの始点は底面エコー位置の半波長分前に置き、終点は数波長分後方に決める。界面のゲート終点は、底面ゲートの始点とする。ただし、界面ゲート始点は探触子のパルス波数から決めることができる。底面エコーが不明瞭の場合には、波形から判断した位置あるいは設計板厚を入力する。演算式への導入及びゲートが決まれば測定へと移行する。

3.3 3章のまとめ

健全面積率算出の理論的検討及び FRP 劣化診断装置のための手順アルゴリズムを構築した。理論は拡散減衰のない平面音場における反射体面積とエコー高さとの関係から減衰項を考慮して求めたものである。評価アルゴリズムは理論式が主で、データ収集のためのゲートが副となる。開発する装置の操作性に影響するゲート設定には過去の経験に基づく知恵が多分に入っており、説明可能な部分のみ纏めた。

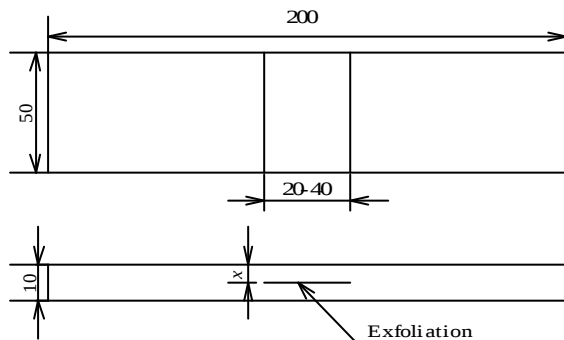
4. 剥離試験片による調査

前章までで実際の損傷材における実験及び理論

的な検討について述べた。ここでは、両者の結びつきを更に調べるために、剥離を人工的に模擬した FRP 試験片を用い、健全面積率を変えて超音波探傷により多数の試験片で調査した結果について述べる。

4.1 人工剥離試験片

試験片の大きさは厚さ 10mm、長さ 200mm、幅 50mm である。試験片の中央部には人工的に、スペーサーを入れて積層させて作製し、後にスペーサーを抜いて、模擬の剥離とした。剥離は試験片の幅方向に貫通しており、試験片の長手方向に 20-40mm の寸法である。表面からの深さは図 - 11 に示すように、1.7mm から 7.1mm となっている。これらの試験片は外装及び内装用のゲルコート処理は行っていない。各試験片の健全部と剥離部の境界線は、試験片の両側面から見て表面に描いた。なお、FRP 試験片は実損傷材と同材料・同様の方法で製作した。



$X=1.7-2.9, 4-4.85, \text{ and } 6.15-7.1\text{mm}$

図 - 11 剥離試験片の形状及び寸法

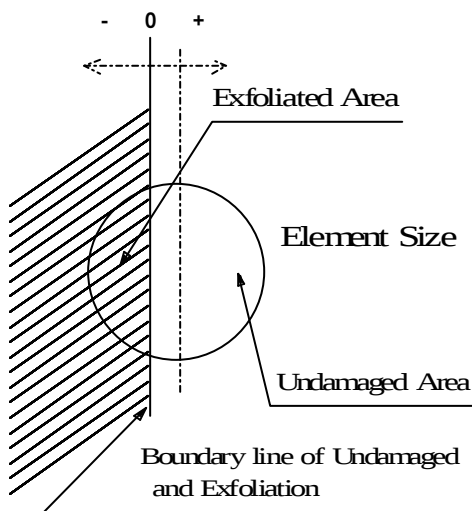


図 - 12 探触子位置による健全面積率

健全面積率は試験片表面に描いた境界線に対して、探触子を直交方向に移動させて変化させた。探触子は境界線を中心に左右方向、各 2mm のステップで 10mm まで移動させた。図 - 12 に示すように、健全面積率は境界線と探触子位置から求める。探触子に使用されている振動子は直径 15mm なので、健全面積率は 0 から 100% までカバーしている。

4.2 界面反射率の算出

界面反射率はガラス繊維と樹脂の音響定数から近似的に求められるが、ここでは、FRP 健全部におけるデータから算出することとした。その手順は以下の通りである。

- (1) 2 章の図 - 3 において、健全部における界面エコー領域でのエコー高さを $A\%$ 、底面領域でのエコー高さを $B\%$ とする。底面エコーの距離 t は板厚、界面エコーの距離は $A\%$ におけるビーム長さである。
- (2) 両エコー高さは減衰が含まれているので、減衰の補正をする。すなわち、減衰補正したエコー高さを各々 $a\%$ 及び $b\%$ とすれば、次の結果を得る。

$$a=A / (e^{-2 \alpha x}) \quad (5)$$

$$b=B / (e^{-2 \alpha t}) \quad (6)$$

- (3) 底面エコーは、底面の反射率が 1 として得られたものとして差し支えなく、界面反射率は反射率 1 との比であるから、式(4)÷式(5)で a/b となる。したがって、 $r_{IF}=a/b$ が求められる。

(1)～(3)の手順を踏む前に、超音波探傷器の表示画面の横軸を決めるために FRP の音速値が必要である。これには、実測の板厚と底面エコーのビーム路程から算出した 2,600m/s を用いた。

4.3 底面 / 界面エコーと健全面積率との関係

4.3.1 剥離の深さによる影響

作製した剥離は深さが異なっている。これらは図 - 11 に示したように、1.7～2.9mm、4～4.85mm 及び、6.15～7.1mm の範囲で、と及びの 3 つのグループに分けた。また、界面反射率 r_{IF} は計算する上で、実験で得られた測定値及び 4.2 項の式(5)と(6)から求め、全体の平均的な値、0.3 を用いた。図 - 13 は剥離の深さが最も浅い、グループにおける H_B / H_{IF} を基準化したエコー高さの比と健全面積率との関係である。図 - 13 において、健全面積率が 50% 以下の測定値の変動は小さい。それ以上、70～100% におけるエコー高さの比の値が広くばらついた。しかしながら、理論による計算結果と実験結果は概ね一致している。図 - 14 は剥離の深さが板厚中央近辺のグループの測定結果である。図 - 14

において、エコー高さの比は、横軸が0.2ないし0.3の幅を有して変化しているようである。計算値は実験値と良い対応が示された。図-15は剥離の深さが最も深い、グループの結果である。図-15では特に健全面積率が30%以下と小さい範囲で大きくばらついた。この原因は底面エコー領域に現れるエコーが原因の一つと考えられる。すなわち、剥離が底面に近いと、剥離エコーの一部が底面領域に侵入してしまうからである。

以上より、剥離が深いほど計算値と実験値が大きくずれる傾向が示された。すなわち、剥離が底面に近く、健全面積率が小さい場合には、剥離を見逃す恐れが生じることになる。

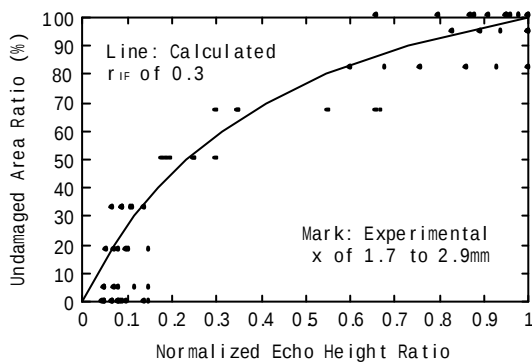


図-13 基準化したエコー高さの比と健全面積率との関係 (x=1.7-2.9mm)

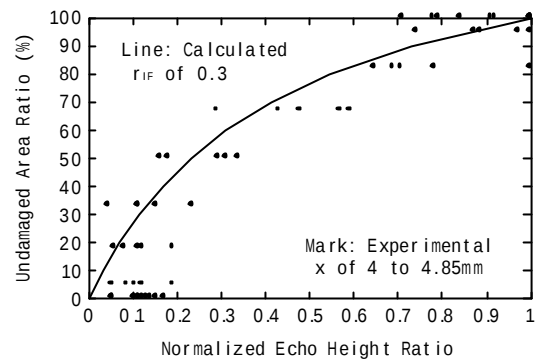


図-14 基準化したエコー高さの比と健全面積率との関係 (x=4-4.9mm)

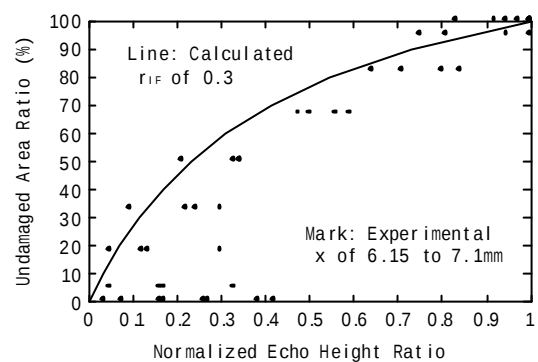


図-15 基準化したエコー高さの比と健全面積率との関係 (x=6.1-7.1mm)

表-1 実験から求めた界面反射率

Specimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
t (mm)	9.85	9.65	9.9	10.2	10.3	10.3	9.9	9.9	10.1	10.7	10.4	9.65	9.9	10.3	10.3	10.2	9.85
x (mm)	1.70	2.30	2.30	2.65	2.85	2.90	4.00	4.15	4.15	4.65	4.85	6.15	6.60	6.85	6.90	7.00	7.10
r_{IF}	0.40	0.27	0.48	0.19	0.32	0.30	0.41	0.10	0.29	0.29	0.45	0.22	0.44	0.33	0.54	0.17	0.33
B/A	1.0	1.5	0.87	1.9	1.4	1.0	1.6	2.3	1.7	1.2	0.8	1.3	0.9	0.9	0.7	3.3	1.2
X_{IF} (mm)	4.0	4.0	4.2	3.6	4.5	3.0	6.5	2.0	5.0	3.5	3.6	2.8	4.0	3.0	3.8	5.5	4.0

4.3.2 実験から求めた界面反射率

界面反射率は異質媒質境界における入射波と反射波の比で、両者の音響インピーダンスからも得られ、一般に周波数の依存性はない。ガラス繊維と樹脂の音響定数が不明確な場合を想定して式(5)及び式(6)から界面反射率を調べた。表-1は各試験片での健全部における探傷データから求めたものである。 t は板厚、 x は剥離深さ、 X_{IF} は測定時の界面エコーの距離である。界面反射率は0.1から最大0.54となった。平均すると0.32~0.33となる。樹脂の音速と密度を2,700m/s、1.4g/cm³とし、ガラス繊維のそれら

を3,000m/s、3g/cm³として求めると反射率は0.41となり、実験値に近い。

4.4 理論との対応

理論における界面反射率は繊維を平面として扱い且つ、層厚の影響は無視した。それでも、実験との対応は良い一致が示された。実際にはサブミリ範囲の現象であるが、これらをマクロ的に扱った結果とは矛盾しないことが分かった。薄層であっても異種媒質界面の反射論が成り立った結果と言える。

4.5 FRP における実験値変動の検討

図 - 13 ~ 図 - 15 において、健全部（健全面積率が 100%）でさえ実験値はバラツキがある。界面及び底面からの反射は積層された境界面を超音波が伝播して再び戻る。境界面では通過すると同時に一部は散乱し、それらが多層に渡って繰り返される。FRP は、作成過程で加圧の差などによりガラス繊維と樹脂との接着が異なると超音波の通過率が変化する。

超音波における異種媒質界面の反射率 r と往復通過率 T との関係は、 $T=1-r^2$ で表される。一方、FRP 層の間隔は約 0.3mm 強であることから、板厚 10mm で約 30 層となる。今、FRP 局部の界面反射率が 0.3 に対して、5% 小さいと仮定する。板厚全体では、 $\Sigma T=(1-r^2)^{30}$ から、0.06 及び 0.078 となる。したがって、界面反射率が 5% 小さい方が往復通過率の総計が 20% 多い。これは底面エコーの変動の一因として考えられる。

図 - 16 及び図 - 17 は、健全部の探傷波図形が最も異なった例である。すなわち、界面エコー高さと底面エコー高さの比が大きく異なっている。減衰補正前の両者の H_B / H_{IF} は各々、図 - 16 では約 2 及び図 - 17 では約 1 となっている。多層による境界面エコーの干渉が含まれていることもあるが、界面エコーの最大値から界面反射率を求める過程でその値が異なる原因となる。

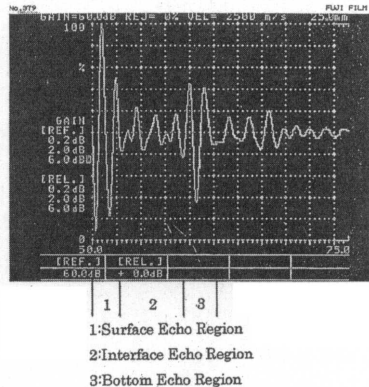


図 - 16 健全部の標準的な波形例

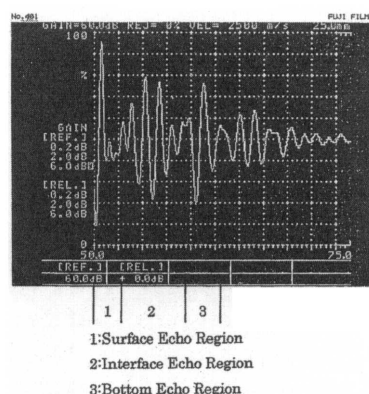


図 - 17 健全部の界面エコーが大きい場合の波形例

剥離が浅い場合には底面エコーは小さく、この場合には H_B / H_{IF} は正しいので正確な健全面積率を評価することが出来る。しかしながら、剥離深さが底面に近い場合の探傷図形は底面エコー領域まで剥離エコーのパルス波が及ぶ。したがって、底面エコー領域に現れたエコーが底面による反射か否かの判断は信号処理をしない限り困難である。しかし、実用的な検査法を考えた場合、ゲート内に出現したエコーを取らざるを得ないので、結果的に健全面積率評価へ影響することになる。

4.6 4 章のまとめ

FRP 船の実用的な劣化診断の裏付けとなるデータを蓄積するために、詳細な実験を行った。実験には剥離を模擬した FRP 試験片を作成して、健全面積率を変えて探傷した。理論との関係を比べて見たが、両者は良い対応であった。健全部における界面エコー及び底面エコーから見かけ上の界面反射率が求められることが分かった。界面エコー領域及び底面エコー領域の各最大エコー高さの比と理論式等から健全面積率を求めた。実験値はバラツキが生じたが、その原因について考察した。

剥離評価のための理論及び裏付けとなるデータが得られ、構築したアルゴリズムにより FRP 劣化診断装置の開発へと進む道ができた。

5. 装置の開発

平成 14 年度にはプロトタイプ FRP 劣化診断装置（1 号機）15 年度に実用機（2 号機）を開発した。プロトタイプでは基本性能の機能の確認ができた。プロトタイプを小型軽量化し、操作性を向上させて 1 人で検査可能とした実用機は実際の現場で使用できる実機仕様である。なお、本章以降の図表中では、装置の画面表示に合わせて、前章までに用いた界面エコー高さ H_{IF} を H_F または H_F と表記する。

5.1 プロトタイプの開発

FRP 劣化診断装置は、剥離評価のための専用機である。図 - 18 は開発した劣化診断装置の構成である。

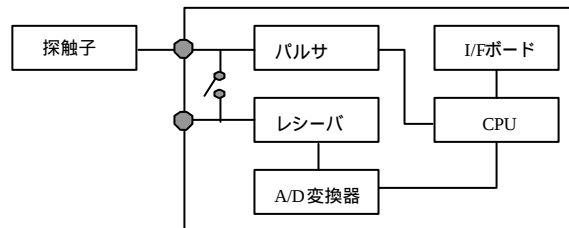


図 - 18 装置のブロックダイアグラム

装置が構成されている機器には超音波パルサー、レーザー、A/D変換器、インターフェースボードおよびCPUがあり、ハード的には汎用のデジタル探傷器に近く、専用のソフトが組み込まれたFRP劣化診断装置となった。

図-19は装置による測定手順剥離を示したものである。大きさは、汎用の超音波探傷器ほどであるが、重量は10kgと重い装置である。

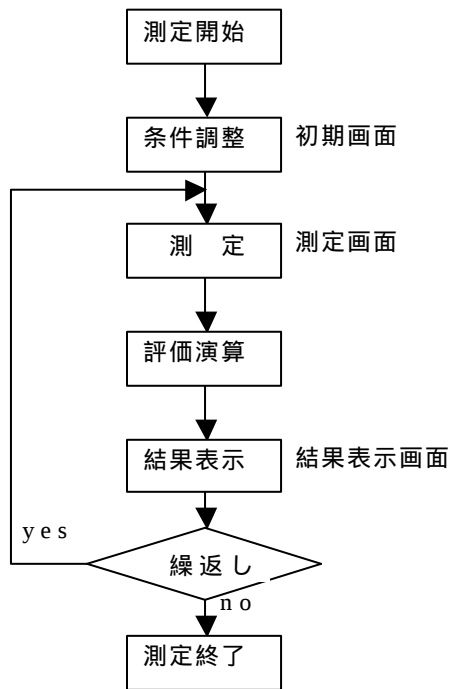
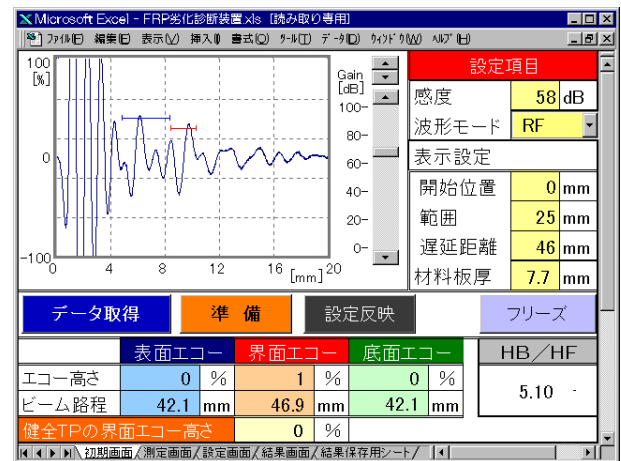


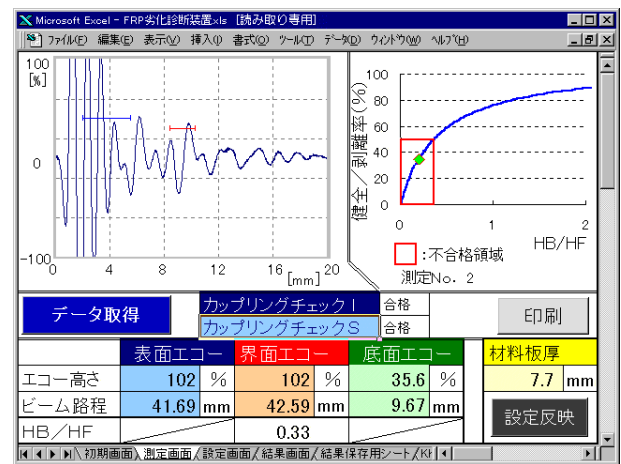
図-19 測定手順のフローチャート

本装置は専用器なので測定範囲、探傷方法及び音速調整などは、操作を容易にするために限定している。FRPの剥離評価に欠かせない減衰定数及び界面反射率などの値は数値入力する方法をとっている。また、通常の探傷器のように表示される波形以外に、評価演算曲線及び不合格率を表示する画面(図-20参照)が採用されている。探傷する際に、FRPの厚さを定めた後には画面上に時間領域を分類する必要がある。このため、これらは表面エコー領域、界面エコー領域及び、底面エコー領域の時間領域の区分けを採用している。界面エコー領域に現れたエコーは最大値1点を取り、底面エコー領域に現れたエコーも最大値を取る。なお、表面エコー領域は探触子の接触状況チェックに機能追加している。

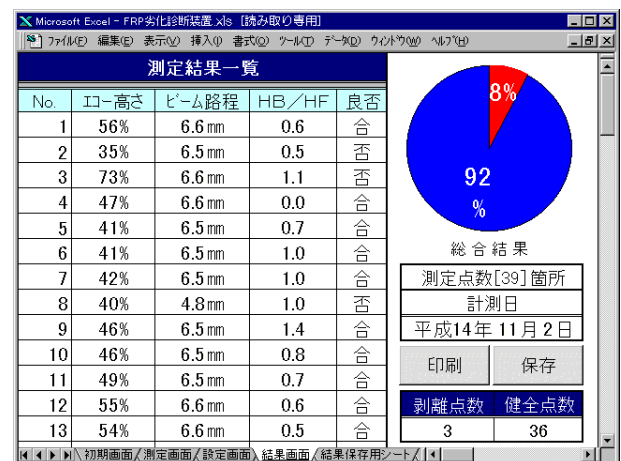
探傷データはメモリに内蔵することができ、必要に応じて外部記憶媒体との入出力が可能である。外部記憶媒体にはフロッピーディスク、MOディスク及びCD-Rがある。なお、各々の画面は印刷することができる。



初期画面



測定画面



結果表示画面

図-20 劣化診断装置の各種画面

5.2 実用機の開発

5.2.1 携帯型 FRP 劣化診断装置

開発の目標とした実用劣化診断装置ではプロトタイプよりも大幅な小型軽量化とともに操作性の向上が図られた。小型軽量化には、電子回路のモジュール化及び評価プログラムの ROM 化を図った。新たに、装置操作用キーを表示画面下に設けた事により、確実な片手操作を可能にして操作性が向上した。図 - 21 は本装置の外観図である。



図 - 21 実用機の外観

装置の大きさと重さ等は次に示す。

- ・寸法：縦×横×奥行、100×200×40mm
- ・重量：560g（内バッテリー85g）
- ・バッテリー動作：16時間、充電：2時間

本装置では、診断する FRP の厚さに応じて用いる超音波探触子を選択できるようにした。例えば、板厚 6mm 以下では周波数 4MHz 探触子、6mm 以上は 2MHz 探触子を用いる。4MHz 探触子を使用すれば、剥離深さ 1.6mm 以上で検出可能となる。剥離評価のアルゴリズムは 14 年度に開発した劣化診断装置と同様であるが、新たに以下に示すルーチンを加えた。

健全部における界面エコーと底面エコーとの比を健全面積率が 100% 近辺にと基準化することである。これは FRP 材による界面反射率等の影響を見かけ上補正することに対応する。すなわち、異なる FRP に対して健全部の超音波特性値（初期値）を持たす

ことによって、FRP 積層による層間（界面）からの反射率が変わっても、見かけ上これを補正することで剥離診断の信頼性を向上させる。測定前には基本として診断対象 FRP の板厚を設定する。板厚の設定にはカーソルによる数値入力为原则である。ただし、自動設定方式が可能な場合がある。自動設定方式はボタンの操作により板厚が自動的に設定される（2MHz 探触子使用時のみ）。

FRP 劣化診断時の測定データから得られる情報は、界面を含む剥離の深さ、底面の距離、界面と底面両者のエコー高さ、および、剥離判定結果（○健全、×剥離）である。これらのデータは、100 点まで本体に記憶され、必要に応じて外部 PC に転送できる。

5.2.2 開発装置の機能について

板厚の自動設定は 2MHz において、健全部の底面エコーが明瞭の場合に適用できる。これは FRP からのエコー群が特徴ある波形パターンであることからアルゴリズムに採用可能となった。ただし、4MHz では超音波の減衰が大きいことから自動設定は出来ず、底面エコーを選択して厚さを設定する。

底面エコーが不明瞭の場合は板厚を入力する。設計図面などを利用して情報を得、厚さをキーで入れる。これは適用周波数に関わりなく、拡張手動の設定方法である。健全部が存在しない、測定箇所が剥離となっているような場合には、FRP の音響定数等により、底面エコー範囲を自動設定する方式は拡張自動の機能として追加した。この設定方式では測定の信頼性は良いとは言えない面はあるが、ロンジ部等への適用が可能である。ちなみに 14 年度に開発した装置では、健全部の底面エコーが明瞭であっても板厚の設定は入力方式のみであった。15 年度に開発した FRP 劣化診断装置のアルゴリズムには、板厚の自動設定及び、拡張自動が加えられている。

携帯型 FRP 劣化診断装置の画面は 3 種類、音速など数値を入力するなどの入力画面、診断測定をするときの測定画面及び、測定したデータを表示するデータ画面がある。電源を入れると測定画面となり、前回の条件などが記憶された状態となっている。入力画面では減衰係数、層間の反射率、音速等の音響定数、測定範囲、初期値の有無及び良否のしきい値等が表示される。測定画面では波形、良否及び測定値などの各種の条件が表示される。データ画面では、測定したデータが測定数とともに表示される。

図 - 22 は測定画面を示す。図 - 22 において、ゲート 1 は界面エコーの監視範囲及び、ゲート 2 が底面エコーの監視範囲であり、設定板厚等を含めて再設定しなければ有効である。底面及び界面エコーの高さ及び距離は測定中、常に表示する。両エコーの

測定は各ゲート内の最大高さがデータとなる。なお、使用周波数、通常及び拡張、バッテリー状態が分かるように表示される。

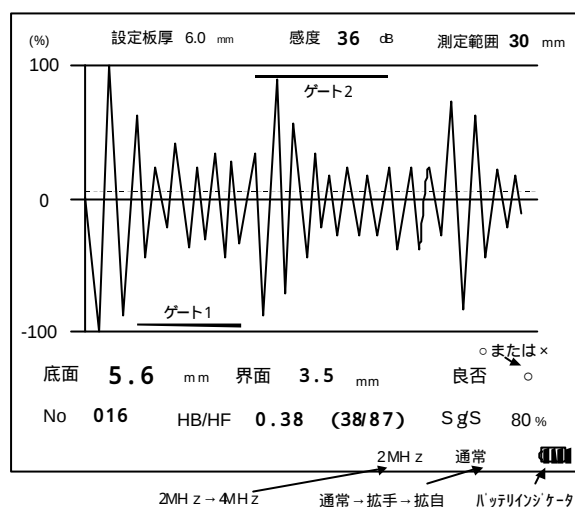


図 - 22 測定画面の内容

5.3 5章のまとめ

FRP の剥離損傷を評価するプロトタイプ及び携帯型 FRP 劣化診断装置を開発した。携帯型の実用機は A5 サイズ弱、500g 強と小型軽量であり、キー操作による方式を採用したことで操作性が良好となった。剥離の評価アルゴリズムは理論的根拠と、実験的な裏付けから構築されている。剥離評価の測定結果は設定した健全面積率のしきい値内が否 (×) と表示される。これは装置が自動で判定する機能のため、結果に客観性がある。

6. 実証実験

海上技術安全研究所が主体的に開発した FRP 劣化診断装置は、超音波による探傷技術が駆使されている。本装置は研究室的にはその機能が確認されたが、現場的な実証実験が必要なため、実際にドック入りした FRP 船(5t 級)に対して現地で FRP 船体の劣化診断が行われた。

6.1 1号プロトタイプによる場合

実証実験は三浦の小型造船所において、平成 15 年 1 月に実施した。FRP 船は 1972 年竣工、1984 年竣工、1994 年竣工、1998 年竣工の 4 隻である。とが遊漁船、とは漁船である。

遊漁船では右舷船首 5m 付近喫水線上の損傷がみられた近辺について測定した。4 箇所のうち 1 箇所、測定部直径 20cm 範囲に対して、11 点中 5 点が剥離として検出された。

漁船の測定は船底等船体中央部に対して行った。

図 - 23 は剥離が検出された船側下部である。その結果は表 2 に示す。

漁船は図 - 24 に示したバルブスバウが衝突して生じた損傷部が測定域である。先端から 15cm(半径)までは損傷が目に見えていた。測定の結果、15cm ~ 20cm まで剥離、25cm 付近は健全、30 ~ 35cm は剥離していることが分かった。



図 - 23 漁船における剥離損傷周辺の測定部

表 - 2 漁船における損傷部の測定結果

測定 No.	エコー高さ	ビーム路程	H_B/H_F	良否
1	11 %	6.0 mm	2.2	合
2	19 %	7.6 mm	0	否
4	29 %	6.1 mm	0.4	否
5	22 %	6.6 mm	2.0	合
6	32 %	7.0 mm	1.2	合
7	24 %	4.0 mm	1.8	合
8	47 %	6.4 mm	0.4	否
9	13 %	5.4 mm	2.8	合
10	34 %	5.8 mm	0.4	否



図 - 24 バルブスバウの損傷部

衝突によって損傷した場合、損傷部周辺が剥離する可能性があり得ることが FRP 劣化診断装置によって初めて分かった。したがって、修理する際には、破壊損傷部の周辺を調べる必要があると思われる。

遊漁船は竣工して間もない FRP 船であり、剥離損傷は考えられなかったが、左舷船首から 3.6m の船側上部において、剥離の可能性が検出された。自然損傷でなく、悪天候時の航行で浮遊物と衝突したとの報告を受けた。他の場所では損傷が確認されなかった。表 - 3 は剥離個所 ($t=8\text{mm}$) のデータである。17 点中 7 割が否となった。図 - 25 は劣化診断の様子を示したものである。表 - 3 において、 H_B/H_{IF} の値が小さいほど、剥離の確率が高い、あるいは剥離面積が大きい。また、エコー高さとビーム路程は

表 - 3 遊漁船における損傷部の測定結果

測定 No.	エコー高さ	ビーム路程	H_B/H_F	良否
1	35 %	8.0 mm	1.5	合
2	74 %	7.2 mm	0.3	合
3	81 %	7.2 mm	0.4	否
4	80 %	7.0 mm	0.5	合
5	34 %	7.1 mm	0.8	合
6	50 %	7.2 mm	0.4	否
7	49 %	7.0 mm	0.4	否
8	43 5	7.3 mm	0.4	否
9	74 %	7.0 mm	0.4	否
10	66 %	7.3 mm	0.4	否
11	35 %	4.5 mm	2.2	合
12	53 %	7.3 mm	0.4	否
13	85 %	7.3 mm	0.4	否
14	46 %	6.9 mm	0.4	否
15	81 %	7.2 mm	0.4	否
16	88 5	7.1 mm	0.5	合
17	67 %	7.3 mm	0.4	否



図 - 25 プロトタイプによる劣化診断の様子

界面からのエコーを示す。界面エコーは大きいほど否となる頻度が大きく、ビーム路程は短いほど表面に近い。

平成 15 年 2 月は北海道苫小牧において劣化診断講習会を行った。FRP 造船所及び関連団体の方々等に、劣化診断の重要性を説明した。当日は低温であるにも係わらず、多くの方が参加された。

プロトタイプの場合には装置の寸法と重量が大、タッチペンの操作性等に難点があり、1 人で操作することが困難であった。

6.2 2号実用機による場合

プロトタイプに改良を加えた 2 号実用機による FRP 船劣化診断の実証実験は 15 年度、寒冷地を含めて数箇所で行った。剥離診断測定は喫水線・船首と言うように予め場所を決めて調べた。特に装置の操作性確認及び 1 人で測定する際、問題があるか等について調べた。

実証実験を行った場所と FRP 船は次に記す。

実習船 4.9t、船齢 10 年（下関、気温 13 ）

底引き網漁船 4.9t、船齢 30 年（新潟、気温 5 ）

実習船の劣化診断実証実験

船首から 2.5m、喫水線上部 30 点、喫水線下部 20 点測定した。これらは格子間隔 25mm のジグ（測定 30 点）を用いて行った。本船の FRP 船体外部には目立ったキズは存在してはいなかった。

測定結果の例は表 - 4、5 に示す。測定部の FRP 外板は 6mm 以上あり、探触子は 2MHz である。測定結果は、喫水線の下部では健全状態で占められているが、上部に剥離の判定がされた場所が存在した。

天候は雨で測定には決して良い状態ではなかったが、FRP 劣化診断装置は濡れながらも正常に動作した。その様子は図 - 26 に示す。図 - 26 で分かるように、本装置は軽量小型、操作性が改良されたことから 1 人で容易に測定することが可能となった。

表 - 4 実習船の測定例（喫水線上）

測定 No.	エコー高さ	ビーム路程	H_B/H_F	良否
1	42 %	3.1 mm	1.21	○
2	19 %	4.0 mm	0.73	○
3	36 %	4.0 mm	0.72	○
4	31 %	4.0 mm	0.32	×
5	48 %	6.0 mm	0.29	×
6	100 %	5.7 mm	0.16	×
7	88 %	5.6 mm	0.15	×
8	38 %	3.3 mm	0.55	○
9	40 %	3.8 mm	0.72	○
10	46 %	3.6 mm	0.78	○

表 - 5 実習船の測定例 (喫水線下)

測定 No.	エコー高さ	ビーム路程	H_B/H_F	良否
1	24 %	2.9 mm	1.20	○
2	22 %	4.6 mm	1.77	○
3	39 %	4.2 mm	0.74	○
4	40 %	4.1 mm	0.72	○
5	40 %	4.1 mm	0.72	○
6	31 %	5.4 mm	0.22	×
7	11 %	3.3 mm	1.45	○
8	9 %	3.3 mm	1.44	○
9	9 %	3.3 mm	1.44	○
10	8 %	3.5 mm	1.62	○



図 - 26 実用機による劣化診断の様子 (実習船)

底引き網漁船の実証実験

底引き網漁船は廃船とするため、1年以上陸上に放置されていた。塗装も見た目も古くキズが多い状態であった。測定は喫水線付近を船首から1~11mまで1m置きに30点ずつ行った。測定に際し、図-27に示すような探触子ジグを用いて測定箇所を明らかにしている。ジグの孔は探触子がちょうど入る大きさである。

図-28は測定位置の概略と診断測定結果を示したものである。各円グラフの反時計回り(黒)は剥離の存在を表しており、50%~75%以上となっている。これら1箇所30点の測定面積は70cm²であり、剥離は喫水線上、船の全長に渡っている。

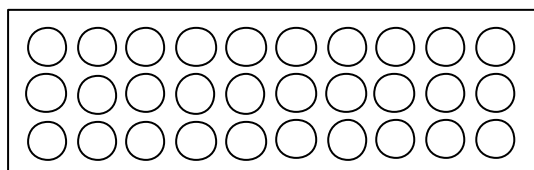


図 - 27 探触子ジグ

(格子間隔25mm、直径19mmの孔30個)

30年経過の廃漁船

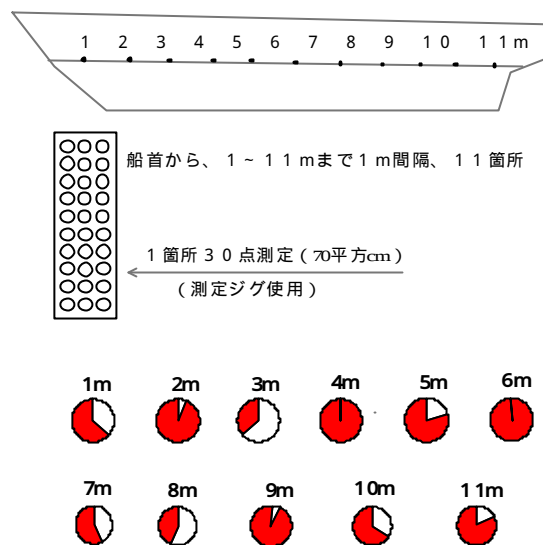


図 - 28 底引き網漁船の測定箇所と結果

6.3 6章のまとめ

本装置によるFRP船での実証実験は、補修のためにドック入りした小型漁船などに対して行った。船体には喫水線付近に剥離と判断できる箇所がいくつかの測定によって得られた。プロトタイプはFRP劣化診断の機能が正常に働くことが確認できた。実用機による劣化診断は1人で容易に行えることが分かった。

7.まとめ

平成12年度から15年度まで4年間の研究期間に、船体FRPの剥離検出・評価を可能としたFRP劣化診断装置が開発できた。開発に至るまでの経過は実損傷FRP材における実験、理論的検討及び詳細な実験を経てきた。14年度はプロトタイプの開発、15年度は実用機が開発できた。各開発年度末までに実際のFRP船ドックにおいて、実証実験を行って装置の機能が正常に働くか等を確認した。

損傷材の探傷から健全部と剥離部では顕著な差があることが認められた。ただ、健全部と剥離部が混在する箇所の評価が問題であり、その可能性のある界面エコー及び底面エコー両者を扱うことが重要であった。理論的検討によって超音波の音場、FRP内の減衰及び剥離による反射の定量的な扱いから健全面積率を導くことができた。同時に劣化診断のためのアルゴリズムを構築して、装置の開発の基礎が可能となった。詳細な実験を行い、理論と実験の良い

対応が示された。

FRP 劣化診断装置 1 号機はプロトタイプとして開発し、その装置を使用した実証実験では FRP 船の劣化診断を行い、装置の問題点を抽出した。次に重量及び操作性の向上を図った実用機の開発を行い、1 人で検査できる携帯型 FRP 劣化診断装置が完成した。本装置による FRP 船での実証実験は、補修のためにドック入りした小型漁船などに対して行った。船体の喫水線付近に剥離と判断できる箇所がいくつかの測定によって得られた。

謝辞

本研究は国土交通省技術研究開発委託費（海事局船用工業課）により実施しました。船用工業課の皆様には研究の遂行に対してのご援助に感謝いたします。

参考文献

- 1) William J. Murri, Kirk W. Bailey, Bradley W. Sermon, Tammy J. Todaro: Ultrasonic Techniques to Produce Damage Profiles Through the Thickness of Sample, QNDE, Vol.6B, (1987), pp.1213-1220
- 2) I. M. Daniel, S. C. Wooh, J. W. Lee: Defect and Damage Characterization in Composite Materials, QNDE, Vol.6B, (1987), pp.1195-1202
- 3) D. K. Hsu, S. M. Nair: Evaluation of Porosity in Graphite-Epoxy Composite by Frequency Dependence of Ultrasonic Attenuation Review of Progress in QNDE, Vol.6B, (1987), pp. 1185-1193
- 4) Raymond J. Nagem, Jocelyn M. Seng, James H. Williams: Residual Life Predictions of Composite Aircraft Structures via Nondestructive Testing, Materials Evaluation, Vol.58, No.9 (2000), pp.1065-1074
- 5) David K. Hsu, Dong Fei, Zhanjie Liu: Ultrasonically Mapping the Ply Lay-up of Composite Laminates, Materials Evaluation, Vol.60, No.9, (2002), pp.1099-1105
- 6) Laura M. Cosgriff, George Y. Baaklini: Ultrasonic Spectroscopy of Composite Rings for Space Station Flywheel Rotors, Materials Evaluation, Vol.61, No.9, (2003), pp.1013-1019
- 7) David Moore, Dennis Roach, Mark Swanson, Phil Walkington: Nondestructive Inspection of Adhesive Bond in Composite and Metallic Materials, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Vol.41, No.1, (1966), pp.583-596
- 8) 林 慎也, 永松徳二: FRP 廃船解体技術に関する研究, 船舶技術研究所報告, 34-3 (1978), pp.367-373
- 9) 勝又健一: FRP の剥離損傷の検出について, 非破壊検査協会第 8 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, (2001), pp.17-22
- 10) 勝又健一, 松岡一祥, 林 慎也, 岩田知明: FRP 船の劣化診断技術の検討, 第 1 回海上技術安全研究所講演集, (2001), pp.363-366
- 11) 勝又健一, 秋山 繁, 林 慎也, 田中義照, 松岡一祥: FRP 船の劣化診断装置の開発, 第 3 回海上技術安全研究所講演集, (2003), pp.13-16
- 12) 国土交通省: プレジャーボートのリサイクルとエコボート・循環型社会に向けて(2003)
- 13) 国土交通省船用工業課: FRP 廃船高度リサイクルシステム構築プロジェクト実施報告書(2003)