

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：54502  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010 ～ 2012  
 課題番号：22560095  
 研究課題名（和文） 表面波から板波への遷移波を利用した GFRP 貯槽の長期耐久性評価  
 研究課題名（英文） Evaluation of Long-Term Durability of GFRP Vessels Using Transition Waves between Surface and Lamb Waves  
 研究代表者  
 和田 明浩（WADA AKIHIRO）  
 神戸市立工業高等専門学校 機械工学科 准教授  
 研究者番号：60321460

## 研究成果の概要（和文）：

老朽化した GFRP 貯槽の健全性を保証する取り組みとして、GFRP 貯槽の外壁から超音波を入射し、その伝播特性を分析して劣化状態を非破壊評価する手法について研究した。内面劣化が少ない初期段階では板面内伝播波による検査は困難であるが、板厚方向に入射した超音波の反射係数分布を算出する手法、および内面反射波の周波数分析から AU パラメータを算出する手法により、安定した劣化検出が可能であることを見出した。

## 研究成果の概要（英文）：

In order to ensure the integrity of GFRP vessels, ultrasonic testing method which is based on the evaluation of transmitted waves from the outside of the vessel is applied. It is found that in the early stage of degradation, inspection with through-thickness wave propagation is more reliable than that with in-plane wave propagation. It is also found that application of Acousto-Ultrasonic parameters improves inspection accuracy.

## 交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 2,000,000 | 600,000 | 2,600,000 |
| 2011 年度 | 500,000   | 150,000 | 650,000   |
| 2012 年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：構造力学，超音波検査

## 1. 研究開始当初の背景

GFRP 貯槽の劣化形態には、薬品による樹脂の加水分解反応，酸化剤による酸化，ガラス繊維／樹脂界面のはく離などがあり，その検査は主に目視検査によって行われてきた。しかし，内表面が付着物で覆われている場合もあり，目視検査だけで貯槽の健全性を保証するには限界がある。そこで近年，超音波を

用いた非破壊検査により貯槽の健全性を保証しようとする取り組みが行われている。

GFRP 貯槽の劣化は貯蔵液体に接する内表面から進行し，板厚方向に進行することが予想される。しかし，従来の超音波検査手法では，板厚方向に伝播する超音波を用いた板厚平均特性の評価となっていたため，上記のような板厚方向の劣化進行を評価できな

った。そこで本研究では、貯槽側壁面内を伝播する超音波を用いた劣化評価手法について研究した。

## 2. 研究の目的

本研究では GFRP 貯槽側壁を面内方向に伝播する「表面波」および「板波（ラム波）」を用いて、貯槽側壁の板厚方向の劣化進行状態を把握し、健全性評価に役立てることを目的とした。弾性体内部を伝播する超音波には縦波、横波成分が存在することが知られているが、超音波の波長に比べて板厚が十分に大きい場合には、自由境界面（板表面）近傍にエネルギーが局在化した「表面波」が存在することが知られている。一方、超音波の波長が板厚に比べて大きい場合、板の表面・裏面に拘束されながら板全体を振動させる「板波」が形成されることも知られている。「表面波」は表面近傍に局在化した波であり、その浸透深さは波長と同程度といわれている。したがって、「表面波」は板表面近傍の材料特性を反映して伝播するといえる。これに対して、波長が板厚より大きい「板波」の場合、板厚平均特性を反映して伝播すると考えられる。超音波の波長は周波数を選択することで容易に変更可能であるため、GFRP 貯槽の板厚を基準として周波数を適切に選択すれば、「表面波」から「板波」に至る遷移過程の波を利用できる。

本研究では、「表面波」から「板波」に至る遷移過程の波を利用して超音波の浸透深さを変化させ、GFRP 貯槽の板厚方向の劣化進行を非破壊評価することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 平成 22 年度

本年度は超音波測定の基礎となる超音波の送受信方法を検討するとともに、周波数による波の浸透深さ変化の実測を行った。超音波の送受信には斜角入射法を採用した。斜角入射法では、固体ウェッジ（アクリルなど）を介して超音波を材料中に入射するのが一般的であるが、GFRP 貯槽の側壁表面はフラットではなくある程度の凹凸があるため、固体ウェッジと側壁の接触状態を安定に保つことは困難である。そこで、固体ウェッジの代わりに水袋（water bag）を介して、超音波トランスデューサと材料表面を接触させる局所水深法について検討した。

検討に先立ち、局所水深法による斜角入射装置を設計製作した。理論的な最適入射角度は屈折の法則（Snell の法則）により算出できるが、本研究では「表面波」から「板波」に至る遷移過程の複雑な波を利用するため、製作した斜角入射装置を用いて、実測により最適な入射角度を決定した。また、新たに購入したペンシル型トランスデューサを用い

た超音波浸透深さ計測装置を設計製作し、試料表面から入射された波が板厚方向にどの程度浸透しているかを計測できるシステムを構築した。さらに、構築したシステムと周波数帯域の異なる複数の超音波トランスデューサを用いて、周波数の変化による超音波の浸透深さ変化を実測した。送信波には既存のファンクションジェネレータからの出力を利用したが、GFRP 内部での超音波減衰が激しいため、新たに購入したパワーアンプを用いて入力信号の増幅を行った。

### (2) 平成 23 年度

本年度は前年度に検討した超音波入射法ならびに、超音波浸透深さのコントロール手法に基づき、内面劣化層を有する GFRP 貯槽の超音波検査を試みた。当初は劣化状態の異なる複数のサンプルを入手する予定であったが、これが困難となったため 13 年間と 19 年間実用された GFRP 貯槽から採取したサンプルを対象に評価を行った。

超音波測定法としては面内伝播を原則としたが、板厚方向に入射し内面劣化層で反射した波の分析も加味することで検査精度の向上を試みた。前年度の研究成果から、超音波伝播方向は貯槽周方向よりも軸方向の方が波の浸透深さのコントロールが容易であることが分かっていたため、今年度は軸方向伝播を標準として超音波測定した。

### (3) 平成 24 年度

昨年度までの研究成果で内面劣化の初期段階では面内伝播波による評価精度が低いことがわかったため、今年度は板厚方向の反射係数分布の評価を中心とし、比較的軽微な内面劣化の検査を試みた。評価対象は温水により人工的に片面劣化させた GFRP サンプルとした。

従来の板厚方向検査では板厚方向の平均特性を評価していたが、昨年度の研究結果より内面反射波から反射係数分布を評価することで内面状態を局所的に評価可能であることを見出した。そこで、各劣化サンプルに対して反射係数分布を算出し、劣化状態と反射係数分布の相関を調べた。さらに、受信波の周波数領域での変化を定量評価するのに適した Acousto-Ultrasonic パラメータを導入し、検査精度の向上を試みた。

最後に、超音波測定結果の妥当性を検証する目的で、劣化サンプルの曲げ試験を行い、残存強度を評価して超音波計測結果との相関を調べた。また、実機の GFRP 貯槽に適用することを想定し、貯蔵液体が超音波検査に与える影響について評価するため、内面を液体に浸した状態で検査が可能か調査した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 平成 22 年度

図 1 に製作した斜角入射装置および超音波浸透深さ計測システムの概略図を示す。材料表面から局所水深法により超音波を入射し、試料端面においてペンシル型トランスデューサで受信するシステムである。超音波の入射角は事前検討の結果、周方向伝播で  $16^\circ$ 、軸方向伝播で  $28^\circ$  を採用した。同システムにより GFRP 貯槽側壁サンプルを計測したところ、貯槽周方向と軸方向で図 2, 3 のような相違がみられた。周方向伝播では外面から入射された超音波が、強化層である FW 層を主に伝播しており、内面劣化層である Mat

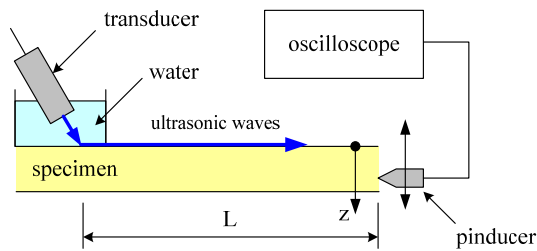


図 1 超音波計測システム

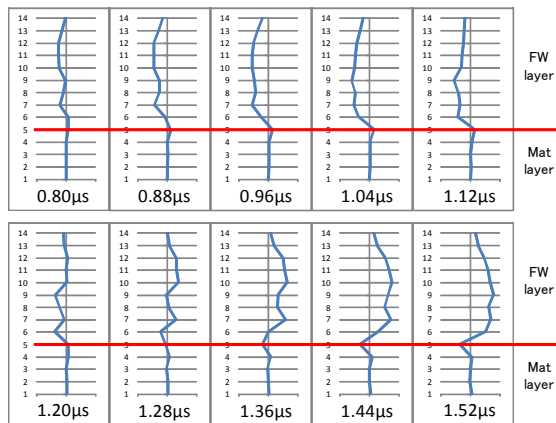


図 2 貯槽周方向に伝播させた場合 (1MHz)

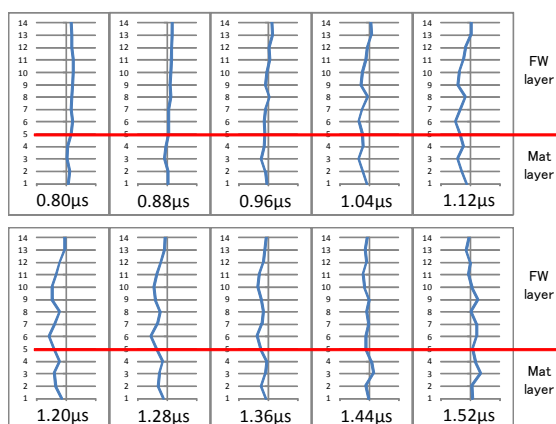


図 3 貯槽軸方向に伝播させた場合 (1MHz)

層まで浸透していない。一方、軸方向伝播では板厚全体に超音波が伝播している傾向がみられた。以上の傾向は入力周波数によらず観察され、伝播方向による波の伝播様式の変化を確認した。このことより、面内伝播波を利用する場合には軸方向伝播が望ましいことがわかった。

##### (2) 平成 23 年度

実用された GFRP 貯槽から採取したサンプルを対象に、周波数の異なる複数の面内伝播波の評価を行ったところ、周波数による超音波伝播速度の変化は少なく内面劣化層の状態を評価できなかった。この原因は、サンプルを採取した貯槽の劣化が内面付近の局所領域に限定されているため、超音波浸透深さの相違による伝播速度の変化が検出レベルに達していなかったと考えられる。

上記のような比較的軽度な内面劣化状態を判定する手法として、板厚方向に伝播させた超音波の内面劣化層からの反射波を分析し、板厚方向の反射係数分布の評価を試みた。図 4 に実用された GFRP 貯槽から採取したサンプルに対する測定結果を示す。縦軸は板厚方向の反射係数の積算値に相当するが、内面劣化の進行に伴い反射係数の低下率が緩やかになることが観察され、貯槽内面の局所的な評価が可能であることがわかった。従来も板厚方向の超音波測定の検討は行われているが、内面劣化がある程度進行すると受信波形が乱れ内面反射波の特定が困難となる。しかし、本研究で提案した反射係数分布の変化を用いることで、内面反射の時間領域の特定が容易となり、劣化した GFRP 貯槽の板厚も測定可能であることがわかった。

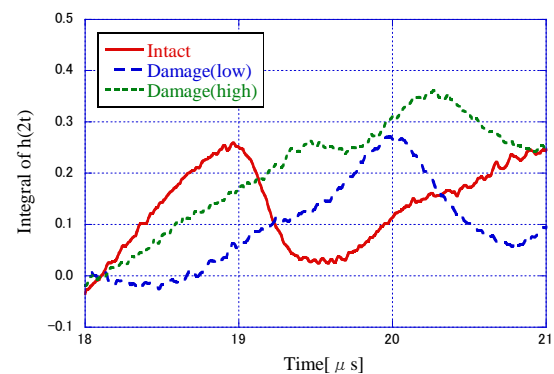


図 4 板厚方向の反射係数分布 (5MHz)

##### (3) 平成 24 年度

研究期間の最終年度にあたる本年度は、昨年度までに提案した内面劣化評価指標の有効性を検証するため、劣化状態が異なる複数の GFRP サンプルを人工的に作成し、これらに対して板厚方向の反射波計測を行い、劣化進行と超音波測定結果の相関を調査した。こ

ここでは昨年度提案した板厚方向の反射係数分布の評価に加えて、内面劣化層からの反射波を周波数解析し、その特徴を抽出する手法についても検討した。本研究では、特徴抽出のためのパラメータとして、広帯域信号の分析に用いられる Acousto-Ultrasonic パラメータ (AU パラメータ) を導入した。

測定試料は片面のみを約 90℃の温水に長期間浸すことで作成し、浸漬時間の増加に伴う超音波計測結果の変化を評価した。図 5 は受信波のスペクトル線図の面積に相当する A1 パラメータの変化を示しているが、探触子と試料の接触状態の影響を受けてデータが安定せず、劣化進行を捉えることが困難である。一方、図 6 はスペクトル線図の図心に相当する A2 パラメータであり、浸漬時間の増加に伴って単調に低下する傾向が見られ、測定誤差の少ない評価指標であることがわかった。また、同パラメータと材料の残存強度には良い相関があることを確認した。最後に、GFRP 貯槽実機での検査を想定して、内面のみを水に接触させた状態で超音波測定を試みたが、劣化検出精度の低下が生じ現実的ではないことがわかった。

以上の研究成果より、GFRP 貯槽の検査では内部溶液の抜き取り後の検査が推奨され、内面劣化の初期段階においては板厚方向の反射波分析が有効であること、および Acousto-Ultrasonic パラメータを導入することで検査精度の向上が期待できることがわかった。

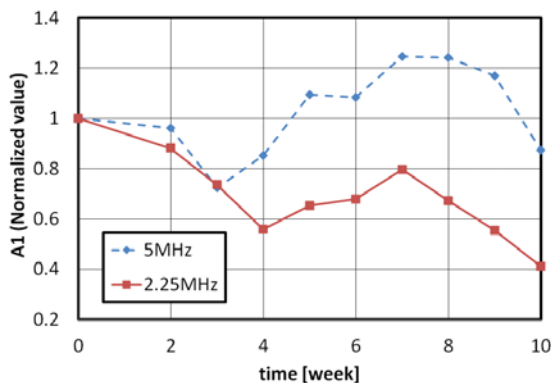


図 5 A1 パラメータ (スペクトル線図の面積)

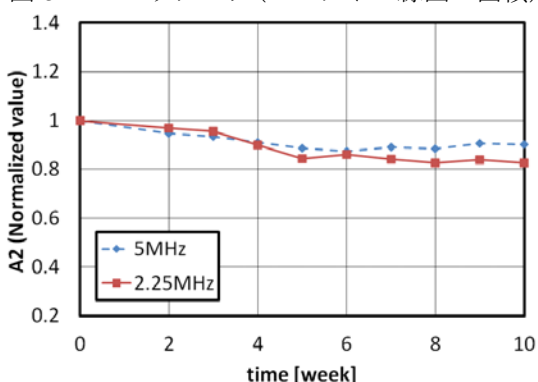


図 6 A2 パラメータ (スペクトル線図の図心)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 和田明浩, 「ラム波スペクトラム解析による複合材料の非破壊検査」, 超音波テクノ, vol. 25, No. 2(2013), pp. 79-83.
- ② 和田明浩, 元木信弥, 山崎友裕, 「ラム波スペクトラム解析による FRP 積層板の衝撃損傷検出」, 日本機械学会論文集 A, Vol. 78, No. 790 (2012), pp. 879-889.
- ③ 和田明浩, 藤井善通, 「超音波による GFRP 貯槽の長期耐久性評価」, 超音波テクノ, vol. 24, No. 2(2012), pp. 77-81.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 和田明浩, 大久保政欣, 武知佑輔, 北川英二, 佐々木勇希, 「積層複合材料の硬化不良部検出に対する AU パラメータの適用」, 第 4 回日本複合材料合同会議講演論文集(2013.3), USB.
- ② 大久保政欣, 武知佑輔, 和田明浩, 北川英二, 佐々木勇希, 「超音波を用いた FRP 成形板の硬化不良検出」, 日本機械学会関西学生会 学生員卒業研究発表講演会講演前刷集(2013.3), p.14-1.
- ③ 武知佑輔, 大久保政欣, 和田明浩, 藤井善通, 「片面温水劣化した GFRP 積層板の超音波検査」, 日本機械学会関西学生会 学生員卒業研究発表講演会講演前刷集(2013.3), p.14-2.
- ④ 大久保政欣, 武知佑輔, 和田明浩, 北川英二, 佐々木勇希, 「積層複合材料における硬化不良部の超音波検出」, 日本機械学会 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集(2012.12), CD-ROM.
- ⑤ 武知佑輔, 大久保政欣, 和田明浩, 藤井善通, 「板厚方向に傾斜劣化した GFRP 積層板の超音波検査」, 日本機械学会 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集(2012.12), CD-ROM.
- ⑥ Akihiro WADA, Yoshimichi FUJII, Shun SATOH, "Evaluation of Gradient Degradation of GFRP Laminates with Distribution of Ultrasonic Reflection Coefficient", Proc. of the 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials, November (2012), CD-ROM.
- ⑦ Masayoshi OKUBO, Yusuke TAKECHI, Akihiro WADA, Eiji KITAGAWA, Yuki SASAKI, "Nondestructive Evaluation of Laminated Composite Plates with Acousto-Ultrasonic Parameters", Proc. of the 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials, November (2012), CD-ROM.

- ⑧ 武知佑輔, 大久保政欣, 和田明浩, 北川英二, 佐々木勇希, 「タイヤ探触子を用いた超音波検査装置の開発」, 日本高専学会第 18 回年会講演会講演論文集(2012.8), pp.257-258.
- ⑨ 和田明浩, 「超音波反射係数分布に基づく GFRP 貯槽の内面劣化評価」, 第 3 回日本複合材料合同会議講演論文集(2012.3), pp.179-182.
- ⑩ 和田明浩, 「超音波反射率測定に基づく GFRP 貯槽の内面劣化評価」, 日本複合材料学会主催 第 36 回複合材料シンポジウム講演要旨集 (2011.10), pp.173-174.
- ⑪ 和田明浩, 「GFRP 貯槽の超音波検査における超音波浸透深さの影響」, 京都工芸繊維大学 長もちの科学研究センター 第 5 回長もちの研究会(2011.7).
- ⑫ 和田明浩, 「GFRP 貯槽の超音波検査における超音波浸透深さの影響」, 第 2 回日本複合材料合同会議講演論文集(2011.3), USB. (学会中止につき論文集のみ発行)
- ⑬ Akihiro WADA, Shinya MOTOGI, "Ultrasonic Testing of FRP Laminates Using Lamb Wave Cross-Scanning", Program Abstracts of The 4th Japan-US Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, June (2010), USB.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

和田 明浩 (WADA AKIHIRO)

神戸市立工業高等専門学校 機械工学科  
准教授

研究者番号 : 60321460