

主電動機軸継手用CFRP製たわみ板への 非破壊検査法の適用

牧野 一成* 坂本 博* 養祖 次郎**
伊藤 幹彌*** 坂本 達朗*** 鈴木 実***
矢口 直幸***

Application of Non-destructive Inspection Methods to CFRP Flexible Plate for Traction Motor Shaft Coupling

Kazunari MAKINO Hiroshi SAKAMOTO Jiro YOHSO
Mikiya ITO Tatsuro SAKAMOTO Minoru SUZUKI
Naoyuki YAGUCHI

On the traction motor shaft coupling which is used for the cardan-type electric railcar, the use of CFRP flexible plate is becoming popular in recent years for the purpose of weight reduction. However, as the inspection method of delamination which occurs inside CFRP laminates is not established, it is common that all flexible plates are replaced with new ones in the dismantle of a coupling. Thus, the needs to select and reuse fine flexible plates are increasing for the purpose of cost cut. In this paper, we focused on three kinds of non-destructive inspection methods such as soft X-ray radiography, X-ray CT and ultrasonic immersion testing, and flexible plate test pieces with artificial flaws were inspected by these methods. It has been found out that the delamination can be clearly detected with the application of ultrasonic immersion testing method and internal flaw extraction process.

キーワード：非破壊検査法，CFRP，たわみ板，層間はく離，軟X線撮影法，水浸超音波探傷法

1. はじめに

カルダン方式の電車では、走行中の主電動機と歯車箱小歯車間に生じる相対変位を吸収する目的で、図1に示すようなたわみ板を用いた主電動機軸継手(たわみ板継手)が使用される。たわみ板には従来、特殊鋼(SCM430等)が使用されていたが、軽量化等を目的として、炭素繊維強化プラスチック(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)製たわみ板が開発され、近年、普及が進んでいる。

たわみ板の保守は、表1および図2に示すような外観および寸法測定による保守基準などに基づいて行われる。しかし、一般にCFRP積層板の損傷はき裂や層間はく離のように板の内部で発生する 경우가多く、これらの検査方法が確立していないため、主電動機の検修等で継手を分解する際に全てのたわみ板を新品と交換することが多い。そのため、たわみ板のコストを削減する目的で、たわみ板を選別して再利用するニーズが高まっている。

本報告では、軟X線撮影法、X線断層撮影(CT: Computed Tomography)法、水浸超音波探傷法の3種類

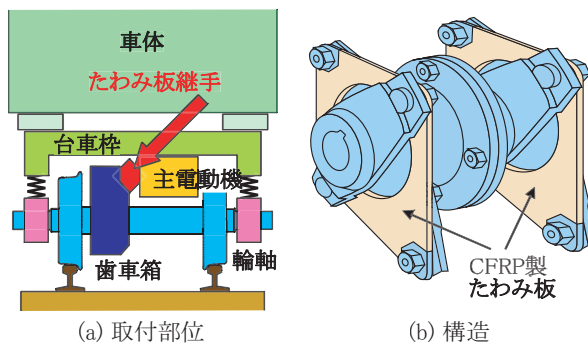


図1 たわみ板継手の取付部位および構造

表1 たわみ板の保守基準の例

項目	継続使用不可項目
表面状況	内外周部に長さ10mm以上で深さ3mm以上の欠損 表面の深さ0.5mm以上のきず
フレッシング 摩耗の状況	最深部の幅が3mm以上で深さが0.5mmを超える 摩耗
形状(反り)の 状況	たわみ板を定盤などの上に乗せた時に、隙間が 2mm以上あるもの
ボルト孔の 寸法・形状	ボルト孔の直径が20.15mmを超えたもの ボルト孔周囲の欠損

の非破壊検査法に注目して、たわみ板に人工欠陥を加工した試験片を探傷し、それらの有効性および検修作業への適用性について検討した結果を示す。

* 車両構造技術研究部(車両強度)
** 総務部
*** 材料技術研究部(防振材料)

特集：車両技術

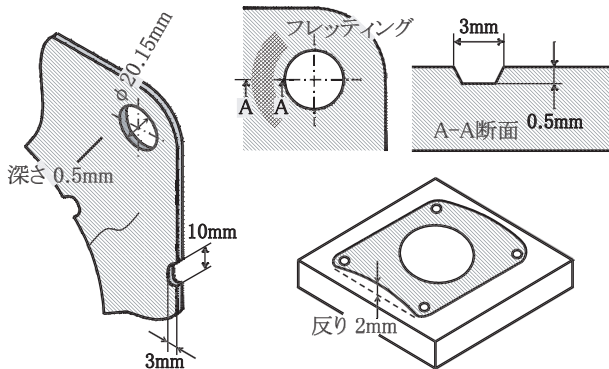


図2 たわみ板の保守基準の例

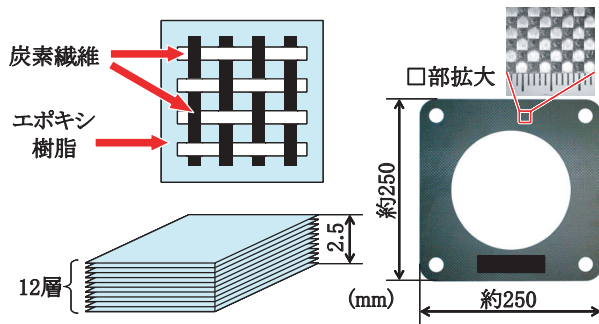


図3 CFRP製たわみ板の構造

2. CFRP製たわみ板の概要

CFRP製たわみ板は耐腐食性に優れるほか、鋼と比較して低弾性率であるため十分なたわみ量が確保される。また、比強度が鋼の約5倍であることから軽量化ができ、回転による慣性力を軽減する効果がある。本研究で対象としたたわみ板は図3¹⁾に示すように、厚さ0.2mmの平織プリプレグ（繊維1層に硬化前のエポキシ樹脂を含浸させたもの）を12層重ねて成形したもので、全体の厚さは2.5mm、大きさは約250mm四方である。

3. 非破壊検査法の選択

材料の代表的な非破壊検査法として、(1)超音波探傷法、(2)磁粉探傷法、(3)浸透探傷法、(4)X線透過法、(5)渦流探傷法が挙げられる。CFRPは導電率が小さく、透磁率がほぼゼロであるため、電磁気的な方法である(2)および(5)は一般的に適用が難しい。ただし、(5)の渦流探傷法を適用して、深さ1mmの位置に存在する5mm角の模擬はく離が検出できたという報告²⁾がある。一方、(3)の浸透探傷法は、表面に開口した欠陥しか検出できないため、本研究で対象とする層間はく離等の内部損傷の検出には適用できない。

以上のことから、(1)超音波探傷法の一つである水浸超音波探傷法、および(4)X線透過法の一つである軟X線撮影法およびX線CT法を、CFRP製たわみ板の非破壊検査法として選択した。これらの検査法は、CFRPを

含む各種複合材料の非破壊検査法として一般的に適用されている方法³⁾である。

4. 軟X線撮影法による試験

4.1 概要

軟X線とは、波長が0.1～10nmで、エネルギーが低く透過性の低いX線をいう。CFRPを含むプラスチック、あるいは、ゴム、木材のような低密度の材料に通常のX線を照射すると完全に透過してしまうが、軟X線を照射すれば材料内部を可視化することができる。

軟X線撮影法の模式図を図4に示す。X線は、試験体を通過する際に吸収が起こるが、吸収の割合は試験体内部の密度と厚さに依存する。たわみ板のように厚さが一律な試験体に軟X線を照射した場合、欠陥の有無による密度差によってのみ吸収量の差が生じる。その差が試験体透過後のX線量の差となり、蛍光板とCCDカメラで構成される検出器で可視化される。

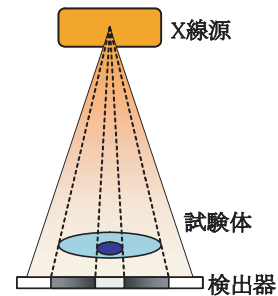


図4 軟X線撮影法の模式図

4.2 試験装置および試験片

軟X線撮影法に用いた装置は、SFX-100（ソフテックス製）で、測定条件は管電圧（X線管に印加する電圧）27kV、管電流（X線管内を流れる電子流）0.2mAである。

試験に用いた人工欠陥入り試験片を表2に示す。異物積層試験片が3種（T-1,T-2,A-1）、層間はく離試験片が1種（F-1）、きず加工試験片が2種（C-1,C-2）で、いずれも実物のたわみ板を切り出して製作した。各試験片の模式図を図5に、製作法を以下の(1)～(3)に示す。

- (1) 異物積層試験片：素材の約1/2厚さの中間層をナイフで完全にはく離した後、所定形状に加工したテフロンテープまたはアルミ箔をはく離面に積層し、エポキシ樹脂接着剤ではく離面の全面を再接着した。
- (2) 層間はく離試験片：素材の中間層を同様にはく離した後、エポキシ樹脂接着剤ではく離面の端部のみを再接着した。
- (3) きず加工試験片：内部きず試験片は、素材の中間層を同様にはく離した後、深さおよび面積の異なる数種類のきずをはく離面にカッターで加工し、はく離面の全面を再接着した。表面きず試験片は、数種類のきずを試験片表面にカッターで加工した。

表2 人工欠陥入り試験片一覧

No.	試験片名	積層品	積層品名	積層厚さ
T-1	異物積層試験片	テフロンフィルム	ニトフロンNo.900UL	0.05mm
T-2	異物積層試験片	テフロン含浸ガラスクロステープ	ニトフロンNo.973UL	0.13mm
A-1	異物積層試験片	アルミニウム箔	アルミホイル	0.012mm
F-1	層間はく離試験片	-	-	-
C-1	内部きず試験片	-	-	-
C-2	表面きず試験片	-	-	-

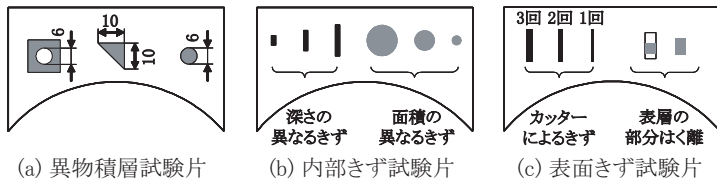


図5 人工欠陥入り試験片の模式図

(5) きず加工試験片は、内部きず (e)、表面きず (f) とともに検出可能である。

軟X線撮影法は、きずや異物等の厚みを持つ欠陥を短時間で検出でき、たわみ板の非破壊検査法としての有用性が認められた。しかし、層間はく離のように厚みが薄い欠陥に対しては、やや検出しにくい傾向がみられた。

4.3 試験結果

各試験片を軟X線撮影法で探傷した結果を図6に示す。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 1試験片あたりに必要な探傷時間は数分で、極めて短時間での検査が可能である。
- (2) 厚さ0.05mmのテフロン積層試験片(a)は、異物の検出が困難である。
- (3) 厚さ0.13mmのテフロン積層試験片(b)、および厚さ0.012mmのアルミ箔積層試験片(c)の各異物が検出可能である。アルミ箔はCFRPと比較して密度が大きいため、厚さが薄くてもX線吸収量の差が明瞭に現れたと考えられる。
- (4) 層間はく離試験片(d)では、はく離端部を確認することができる。

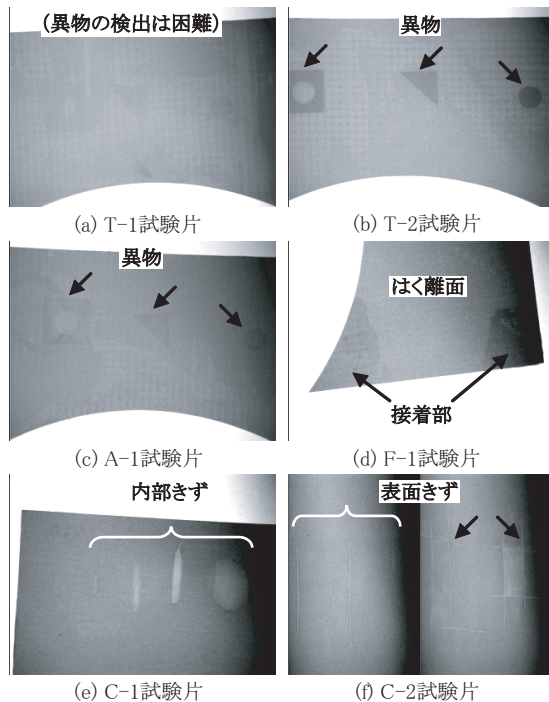


図6 軟X線撮影法による探傷結果

5. X線CT法による試験

軟X線撮影法では層間はく離の検出性能が低かったため、X線を用いる別の方法としてX線CT法による試験を行った。X線CT法とは図7に示すように、試験体を回転させながらX線を照射し、検出器で得られた像を再構築することによって、試験体の断層を撮影する方法である。

X線CT法に用いた装置は、SMX-100CT(ソフテックス製)で、測定条件は管電圧30~40kV、管電流90μAである。X線CT法を適用した例を図8に示す。12層の積層構造の下から2層目付近に発生した、幅2.0mm×深さ1.1mm、層間幅約0.01mmの極めて微細な層間はく離を検出することができた。しかし、試験体の数mm四方の探傷に20~30分の時間を要するため、検修作業で適用する手法としては作業性が悪い。X線CT法は、軟X線撮影法あるいは後述の水浸超音波探傷法で確認された欠陥を検証する方法として、有効であると考えられる。

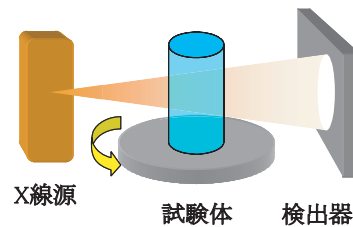


図7 X線CT法の模式図

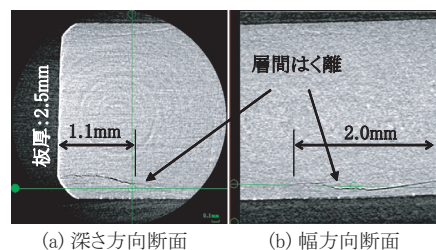


図8 X線CT法による探傷結果

特集：車両技術

6. 水浸超音波探傷法による試験

6.1 概要

水浸超音波探傷法の概要を図9に示す。試験体を水槽中に水没させ、探傷面と探触子の間を水で満たし、高周波の集束超音波ビームを試験体の厚さ方向に水を介して伝搬させる。探傷面との間隔をほぼ一定に保ちながら探触子をジグザグに走査させ、面全体を一定のピッチで探傷する。この時、試験体に欠陥等の不連続部が存在すれば、そこで反射するエコーが検出される。

ここで、探傷波形について図10を用いて説明する。波形の横軸は超音波の伝搬時間を、縦軸は超音波の受信電圧（エコー高さ）を表す。時間軸の最初に送信波が表示され、試験体表面での反射波がその後ろに表示される。さらに、試験体内部が健全であれば、底面での反射エコーがその後ろに表示される。探傷面と探触子の間隔は微妙に変動するため、表面反射波を基準として、ある遅延時間 τ および時間幅 Δ を持つ探傷ゲートを設定する。探傷ゲートを定義する時間変数 τ, Δ を調整することで、試験体のある深さ範囲に表示された波形の最大エコー高さに比例した電圧が出力される。

この出力電圧を探傷面の全データ点において取得し、電圧に比例したグレースケール等で各データ点を表示することによって、試験体全面のある深さ範囲における欠陥の有無を画像化することができる。

6.2 試験装置および試験片

水浸超音波探傷法に用いた装置は、超音波顕微鏡 HSAM 210 (日立建機製) である。主な仕様を表3に示す。

層間はく離の検出性能を確認する目的で、4種類の人工欠陥入り試験片 (No.1~4) を、実物のたわみ板を切

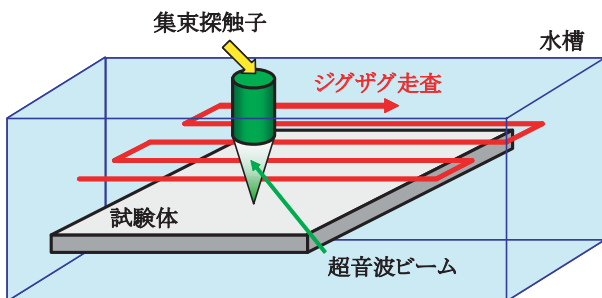


図9 水浸超音波探傷法の模式図

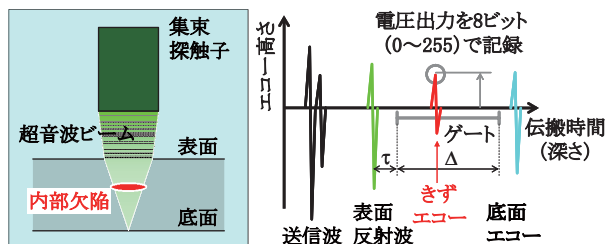
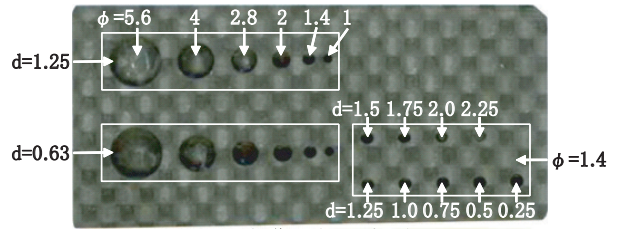


図10 水浸超音波探傷の波形

表3 水浸超音波探傷装置の仕様

表示領域	0.6 × 0.4 mm ~ 300 × 200 mm
表示点数	300 × 200 dot または 600 × 400 dot
表示階調	256段階 (グレースケール)
パルス最大出力	300 V
受信帯域	1 ~ 300 MHz



d: 探傷面(紙面裏側)から平底穴までの深さ

図11 平底穴試験片 (No.1)

り出して新たに製作した。各試験片の製作法を以下に、No.1試験片の詳細を図11に示す。

- (1) 平底穴試験片 (No.1) : 図11の紙面裏側が探傷面で、探傷面の裏側、すなわち試験片の底面に深さ0.25~2.25mm, 直径 ϕ 1~5.6mmの各種平底穴を加工した。
- (2) 部分はく離試験片 (No.2) : 素材の約1/2厚さの中間層をナイフで一部はく離させて作製した。
- (3) 全面はく離試験片 (No.3) : 素材の約1/2厚さの中間層をナイフで完全にはく離した後、エポキシ樹脂接着剤ではく離面の全面を再接着した。
- (4) 鋼球押し付け試験片 (No.4) : 試験体表面の1箇所を鋼球を押し付け、はく離による微細な音が聞こえた時点で除荷した。

6.3 探傷パラメータの検討

たわみ板の探傷における適正な周波数を調べるため、平底穴試験片 (No.1) を用いて試験した。表4は、試験に用いた集束探触子の一覧である。探傷周波数に対する探触子の特性上、焦点距離が異なるので、いずれの周波数でも、底面エコーが最大となるように探触子の上下位置を調整してから探傷した。

探傷結果の一例を図12に示す。この図を含む以下の結果は、図11と合わせるために左右反転させて表示している。周波数が25MHz, 15MHzの場合、穴の形状は明瞭であるが減衰が大きく、焦点と異なる深さの穴を検出し

表4 集束探触子の一覧

周波数	振動子径	焦点距離
25MHz	6.4mm	15mm
15MHz	6.4mm	15mm
10MHz	6.4mm	38mm

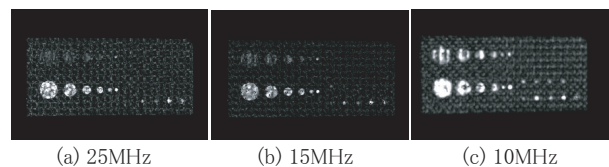


図12 探傷周波数の影響

にくい。一方、10MHzの場合、形状は少し不明瞭ではあるが、すべての深さの穴を検出しており、1回の探傷で見落としを防ぐためには10MHzが適正と考えられる。

次に、探傷時間を短くするためには、探傷ピッチを粗くするのがよいが、ピッチを粗くすると相対的に小さい欠陥を見逃す可能性がある。平底穴試験片(No.1)を用いて探傷ピッチ0.1~0.5mmで試験を行った結果、いずれのピッチでも最小径φ1mmの平底穴を検出することができた。探傷ピッチ0.5mmでたわみ板全面を探傷した場合の探傷時間は5~6分である。探傷ピッチが細くなるにつれて、ピッチの1~2乗に反比例して探傷時間は長くなるので、検修作業に適用する場合、現実的には探傷ピッチ0.2mm程度が限界であると考えられる。

以下では、周波数を10MHz、ピッチを0.2mmとして探傷を行った。

6.4 内部欠陥抽出処理

たわみ板の探傷波形の概要を図13に示す。探触子から送信された超音波は水中を伝搬し、たわみ板の表面および底面で反射する。さらに、たわみ板内部に層間はく離等の不連続部があれば、それに起因するエコーが発生する。これら3種類のエコーをゲートA~Cで監視することで、各種の損傷が検出される。

鋼球押付け試験片(No.4)をゲートA~Cで探傷した結果を図14に示す。表面ゲートAでは、フレットングや打こん等の表面損傷が検出される。内部ゲートBでは、層間はく離等の内部損傷が検出され、損傷部位でエコーが高くなる。底面ゲートCでは、健全部を通過した時にエコーが高くなり、表面あるいは内部に損傷がある箇所を通過した時にエコーが低くなるので、たわみ板の

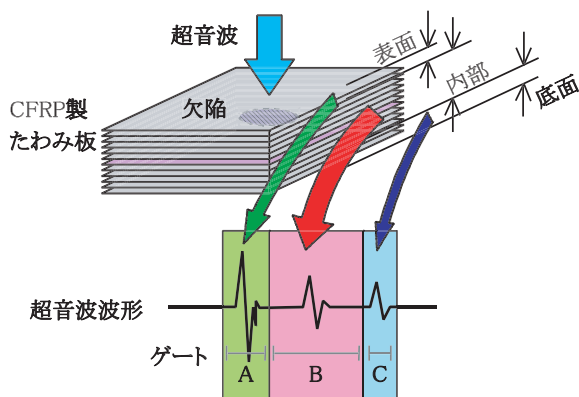


図13 たわみ板の探傷波形の概要

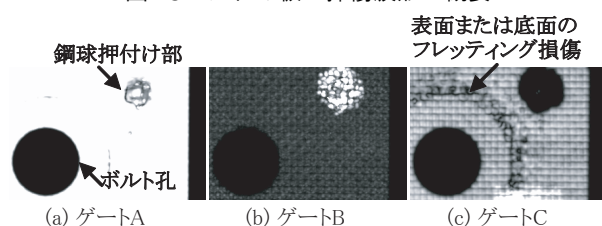


図14 鋼球押付け試験片(No.4)の探傷波形

深さ方向全体を反映した情報が得られる。

CFRPを探傷する場合、健全部であっても炭素繊維の網目状のエコーが現れ、欠陥を検出する際の妨害となる。ここで、ゲートBとCで検出されるエコーを比較すると、内部欠陥が存在すればゲートBのきずエコーが高くなり、逆に、ゲートCの底面エコーは欠陥で反射する分だけ低くなる。内部欠陥に対してエコー高さが反対に表示されるゲートBとCのエコー高さの差を取れば、相対的にきずエコーが増大し妨害エコーが減少するので、結果としてS/N比の高い探傷結果が得られ、たわみ板の内部欠陥をより明瞭に抽出することができる。

本研究で適用した、内部欠陥抽出処理の具体的な手順を以下に示す。

- (1) 内部ゲートBおよび底面ゲートCで試験体全面を探傷し、各データ点(i, j)におけるゲートBでの8ビット電圧出力 $V_B(i, j)$ と、ゲートCでの同出力 $V_C(i, j)$ を記録する ($0 \leq V_B, V_C \leq 255$)。
- (2) 各データ点(i, j)において、式(1)によって電圧出力 V_B と V_C の差分値 $V_{B-C}(i, j)$ を計算する。

$$V_{B-C}(i, j) = V_B(i, j) - V_C(i, j) \quad (1)$$

- (3) 各データ点の差分値 V_{B-C} は -255 ~ 0 ~ 255 の範囲となるので、差分の負の値を0とみなして0~255の値に整理し、式(2)によって $V_{B-C}^*(i, j)$ を得る。この結果、健全部の網目状の表示、および表面または底面の欠陥表示が消滅し、内部欠陥のみが抽出される。

$$V_{B-C}^*(i, j) = \begin{cases} 0 & (-255 \leq V_{B-C} < 0) \\ V_{B-C}(i, j) & (0 \leq V_{B-C} \leq 255) \end{cases} \quad (2)$$

- (4) 各データ点(i, j)で得られた V_{B-C}^* の8ビット値(0~255)を用いて、データ点全体をグレースケール画像として再描画する。

6.5 試験結果

No.1~4試験片を水浸超音波で探傷し、内部欠陥抽出処理を施した結果を図15に示す。エコーが高い欠陥部が白色で表示される。

抽出処理前の内部ゲートBおよび底面ゲートCの探傷画像では、CFRP積層板に特有な網目状の模様が現れるため欠陥の確認は難しいが、上述の抽出処理を施した後の画像では、たわみ板内部の欠陥のみが明瞭に表示される。特に全面はく離試験片(No.3)では、抽出処理後の画像でも網目状の模様が残っているので、層間を再接着した後でも接着状態が完全でないことが推定される。

6.6 経年取替品の探傷

経年取替品のCFRP製たわみ板に、水浸超音波探傷法および内部欠陥抽出処理を適用した例を図16に示す。このたわみ板は表1および図2に示した保守基準を満足し

表5 各非破壊検査法の特徴

非破壊検査法	長所	短所
軟X線撮影法	(1) 異物の検出に有効 (2) 板厚方向のき裂の検出に有効 (3) 探傷時間が短い(2~3分)	(1) 層間はく離をやや検出しにくい (2) X線装置および従事者の管理が必要
X線CT法	(1) 極めて微細なきずの検出に有効(μm単位)	(1) 多くの探傷時間を要する(数mm四方で20~30分)
水浸超音波探傷法	(1) 層間はく離の検出に有効 (2) 内部欠陥抽出処理によりきずの判定が容易	(1) 探傷時間がやや長い(5~6分)

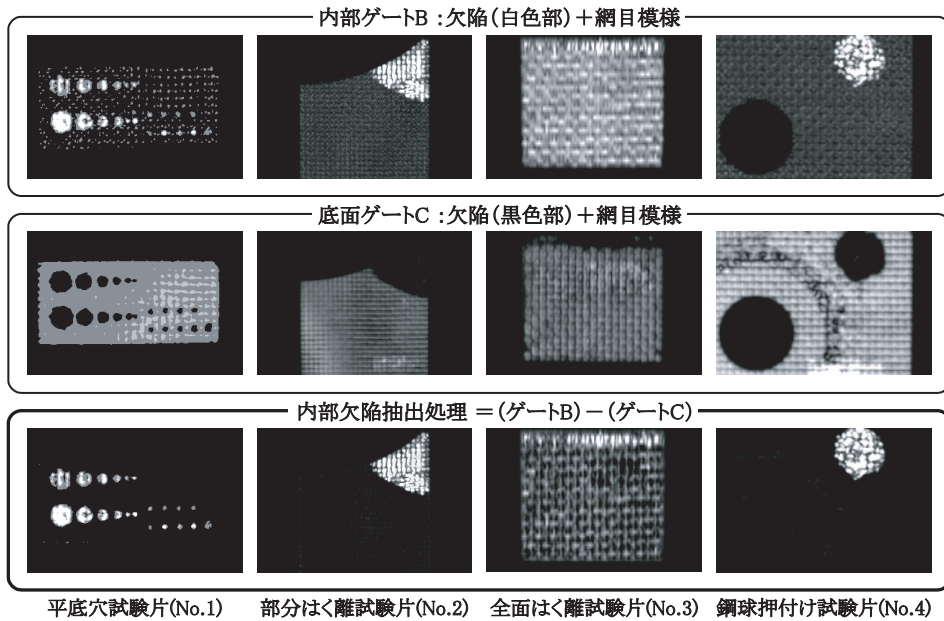


図15 探傷波形の内部欠陥抽出処理結果

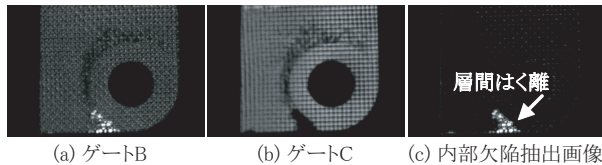


図16 経年取替品の超音波探傷結果



図17 欠陥検出部の浸透探傷結果

ていたが、探傷の結果、層間はく離と推定される画像が明瞭に検出された。

当該の欠陥像はたわみ板の外周部に存在したので、外周面より蛍光浸透液を浸透させて、蛍光浸透探傷を適用した。その結果、図17に示すように、水浸超音波探傷で画像が検出された箇所に、層間はく離が実際に存在することが確認された。

以上のことから、経年取替品のCFRP製たわみ板に存在する層間はく離の検出には、水浸超音波探傷法が有効であることが分かった。

7. まとめ

本研究で検討した各非破壊検査法の特徴を比較して表5に示す。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 軟X線撮影法は、きずや異物等の厚みを持つ欠陥を短時間で検出でき、たわみ板の非破壊検査法としての有用性が認められた。
- (2) X線CT法は探傷時間を要するが、極めて微細な層間はく離の検出が可能なので、他の非破壊検査法で確認された欠陥を検証する方法として有効である。
- (3) 水浸超音波探傷法および内部欠陥抽出処理をたわみ板に適用することで、CFRP積層板の代表的な損傷である層間はく離を明瞭に検出することができた。

文献

- 1) 三木光範, 福田武人, 元木信弥, 北條正樹: 複合材料, 共立出版, p.36, 1997
- 2) 小山潔, 星川洋: CFRP材に対する渦電流探傷試験の試み, 日本非破壊検査協会第10回表面探傷シンポジウム講演論文集, pp.9-12, 2007
- 3) 松嶋正道: 複合材構造の超音波探傷法, 非破壊検査, Vol.52, No.10, pp.536-538, 2003