

第22回

千葉県非破壊検査研究会・研究発表会

講演資料

日時 平成20年2月21日(木)
9:50~17:00

場所 幕張テクノガーデン

目 次

I 研究発表

1. 高圧ガス配管の腐食・劣化診断技術 -----
 (株)シーエックスアール ○田邊有作, 佐藤学, 白石宜時
2. 2層式エキスパンションベローズの内面腐食検査方法の開発 -----
 出光エンジニアリング(株) ○四辻美年, 非破壊検査(株) 広田信明
3. 非接触空中超音波探傷技術の現状と課題 -----
 ジャパンプローブ(株) ○高橋雅和, 星野秀和, 小倉幸夫
4. TOFD法による溶接きず高さの測定 -----
 千葉県非破壊検査研究会(清水建設(株)技術研究所) ○立川克美,
 (株)ジャスト研究所 名取孝夫, 千葉県産業支援技術研究所 長瀬 尚樹
5. 超音波フェイズドアレイ技術の突合せ溶接部と摩擦攪拌溶接部への適用例 -----
 オリンパス(株) 山本優一郎
6. フェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XSの使用例 -----
 日本ITES(株) 坂代一郎
7. ラインフォーカス開口合成法を用いた厚肉鋼材超音波探傷法の検討 -----
 JFE技研(株) ○松井穰, 飯塚幸理
8. 渦電流探傷 θ プローブによるCFRPの欠陥検出について -----
 日本大学生産工学部 ○三木公輔, 小山潔, 星川洋
9. 超音波によるCFRPの欠陥評価 -----
 千葉県産業支援技術研究所 ○長瀬尚樹, 西川康博, 福島清
10. CFRP構造の非破壊検査法 -----
 宇宙航空研究開発機構 複合材技術開発センター 松嶋正道

II. 特別講演

- 建設業のMOT (Management of Technology) ----- 51
 講師 NPO国際建設技術情報研究所 理事長 藤盛 紀明
 (清水建設(株)技術研究所 顧問)

第22回

千葉県非破壊検査研究会・研究発表会

講演資料

日時 平成20年2月21日(木)
9:50～17:00

場所 幕張テクノガーデン

目 次

I 研究発表

1. 高圧ガス配管の腐食・劣化診断技術 -----	1
(株)シーエックスアール ○田邊有作, 佐藤学, 白石宜時	
2. 2層式エキスパンションベローズの内面腐食検査方法の開発 -----	5
出光エンジニアリング(株) ○四辻美年, 非破壊検査(株) 広田信明	
3. 非接触空中超音波探傷技術の現状と課題 -----	7
ジャパンプローブ(株) ○高橋雅和, 星野秀和, 小倉幸夫	
4. TOFD法による溶接きず高さの測定 -----	15
千葉県非破壊検査研究会(清水建設(株)技術研究所) ○立川克美, (株)ジャスト研究所 名取孝夫, 千葉県産業支援技術研究所 長瀬 尚樹	
5. 超音波フェイズドアレイ技術の突合せ溶接部と摩擦攪拌溶接部への適用例 -----	23
オリンパス(株) 山本優一郎	
6. フェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XSの使用例 -----	29
日本ITeS(株) 坂代一郎	
7. ラインフォーカス開口合成法を用いた厚肉鋼材超音波探傷法の検討 -----	35
JFE技研(株) ○松井穰, 飯塚幸理	
8. 渦電流探傷 θ プローブによるCFRPの欠陥検出について -----	39
日本大学生産工学部 ○三木公輔, 小山潔, 星川洋	
9. 超音波によるCFRPの欠陥評価 -----	43
千葉県産業支援技術研究所 ○長瀬尚樹, 西川康博, 福島清	
10. CFRP構造の非破壊検査法 -----	47
宇宙航空研究開発機構 複合材技術開発センター 松嶋正道	

II. 特別講演

建設業のMOT (Management of Technology) -----	51
講師 NPO国際建設技術情報研究所 理事長 藤盛 紀明 (清水建設(株)技術研究所 顧問)	

高圧ガス配管の 腐食・劣化診断技術

(Thru-VUによる保温材施工配管検査)



株式会社 シーエックスアール
田邊有作 佐藤学 白石宜時

1

Thru-VUとは？

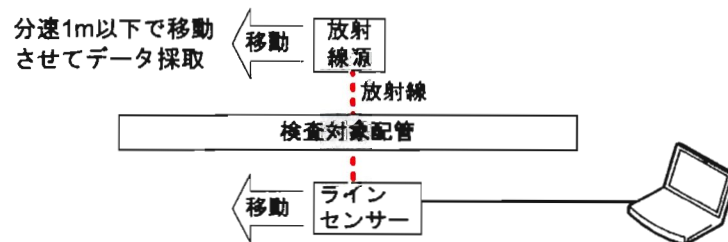
<はじめに>

保温材施工配管において、保温材を解体せずに配管の減肉調査を行う事を目的とした検査手法として、“Thru-VU”を御紹介させていただきます。

<Thru-VUとは？>

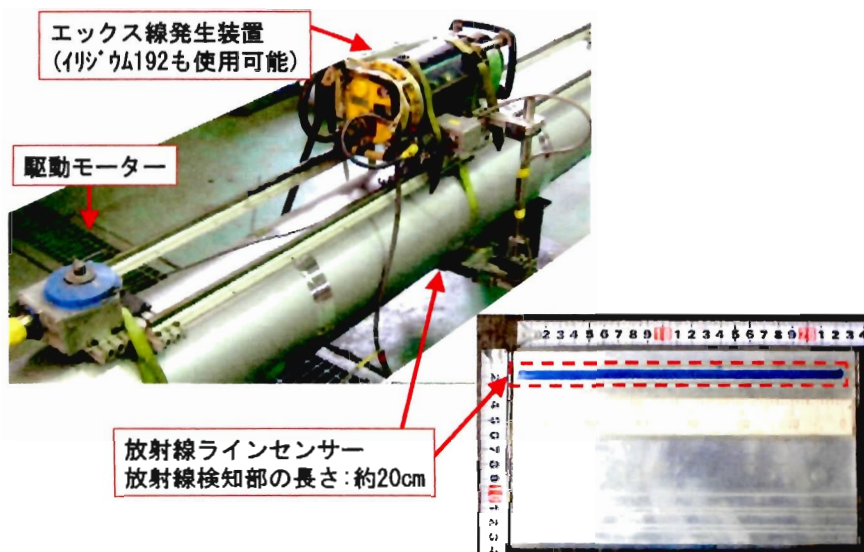
アメリカ・オガ・インターナショナル社の放射線ラインセンサーを使用したデジタルRTシステムです。

データ採取及び画像化処理は、ノートパソコンで実施可能。



2

Thru-VU検査装置

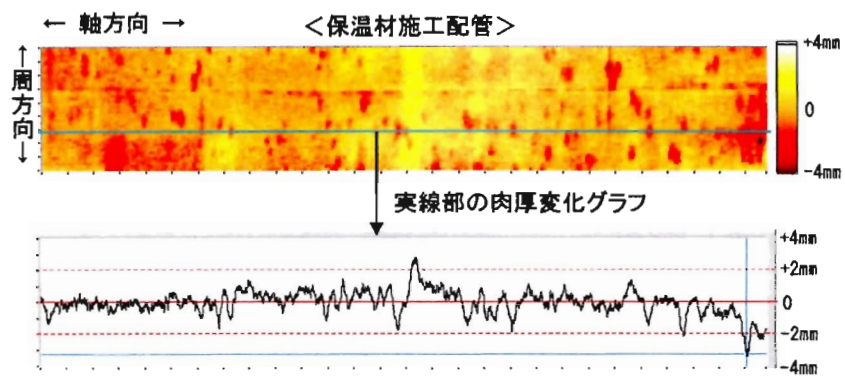


検査結果画像の見方

画像はRTフィルムの見方と似ています。

- ・ 明るい部分・・・他の部位と比較して肉厚が厚い
- ・ 暗い部分・・・他の部位と比較して肉厚が薄い

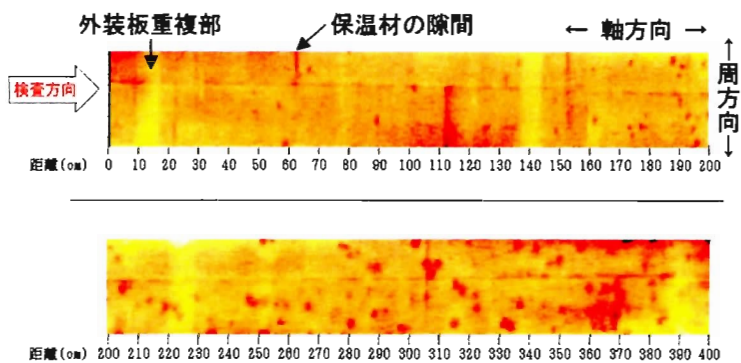
画像例では、局部腐食減肉が多数見受けられています。



4

保温材施工配管の検査例

局部腐食減肉が全長(4m)に点在している配管。
検査結果はカラー画像でわかり易く、減肉深さ・減肉の発生位置が
一目瞭然です。
(画像例では、全長を3分割して調査した画像を繋げています。)

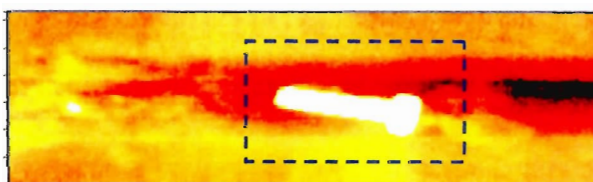


5

配管内の異物検査例、堆積物検査例

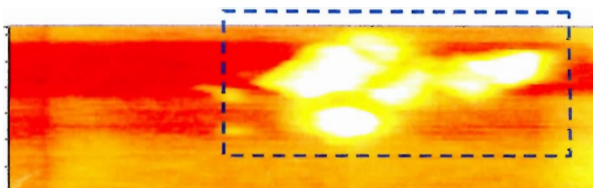
<異物検査例>

点線内：ボルト



<堆積物検査例>

点線内：堆積物



6

Thru-VU概要

- ◆放射線源：イリジウム192(ガンマ線)、エックス線発生装置
- ◆検査目的：減肉調査、異物調査、堆積物調査等における一次検査
異常部については二次検査を推奨
- ◆検査速度：水平配管 軸方向 50m/日
(配管周方向の検査範囲を放射線センサー長さ約20cm分とした場合)
- ◆ 前処理：不要
- ◆データ採取、画像化処理はノートパソコンで実施可能。

<保温材施工配管>

実績に基づく値であり、配管状況により変化あり

配管内容物	適用管径(最大)	検出限界
有	20B	φ 15mm d = 1.5mm
無	30B	φ 5mm d = 1.0mm

7

配管検査実績

2007年12月現在

適用先	適用管種	検査距離
石油精製	原油配管・スロップ水配管・ 高温配管(内容物温度300°)・他	33 km
石油備蓄 油槽所	原油配管・製品油送配管・他	10 km
電力	蒸気配管・燃料輸送配管・他	1 km
化学	蒸気配管・水配管・他	1 km
鉄鋼・ガス・水道	ガス配管・水道管	1 km
		合計46km

8

2層式エキスパンションベローズの内面腐食検査方法の開発

Development of internal corrosion inspection method for double layer expansion bellows

○四辻 美年

MITOSHI YOTSUTSUJI

出光エンジニアリング㈱

Idemitsu Engineering Co.,Ltd

広田 信明

NOBUAKI HIROTA

非破壊検査㈱

Non-Destructive Inspection Co.,Ltd

概 要

石油・石油化学プラント及び備蓄の原油配管等にステンレス製（SUS材）伸縮継手（エキスパンションベローズ）が多数使用されている。

特に、大口徑で、且つ2層式エキスパンションベローズの場合、内面側のベローズに発生する腐食を確認するためには、従来、ベローズを開放して、内面から目視検査等を実施していた。そこで、設備の信頼性向上及び保全コストの観点から、ベローズを開放せずに、外面から検査できる手法を開発した。検査手法は、渦流探傷試験と超音波探傷試験の併用による腐食検査法である。

キーワード：渦流探傷試験、超音波探傷試験、腐食、エキスパンションベローズ、SUS材、

1. 緒言

通常、配管及び機器等の腐食検査としては超音波法が適用され、また熱交等の薄肉厚細管には渦流探傷法が適用されている。

両手法には各々長所と短所があり、超音波法は定量的な評価が可能だが、外面からの検査では2層式エキスパンションベローズの内層側に発生している腐食検査には適用できない。また高速な探傷が困難である。一方、渦流探傷法は試験条件（浸透深さ）を変えることで2層ベローズの内層側の探傷が望めるが、結果の定量性に若干欠ける等の特徴がある。表1に2層式エキスパンションベローズの腐食検出を目的とした各々の特徴を示す。

保守検査では、検出性はもとより探傷速度（能率）も同時に要求される。今回単独 NDI 手法では要求される数々の条件を満足させることが難しいため、渦流探傷試験及び超音波探傷試験法のそれぞれの長所を生かした併用策を検討した。

表1 超音波探傷試験と渦流探傷試験の特徴

項 目	超音波探傷試験	渦流探傷試験
1 結果の定量性	良い	欠ける
2 2層ベローズ内層側の腐食検出	不可	可能
3 試験体の肉厚	厚物に適する	薄肉に適する
4 探傷速度	遅い	早い
5 結果に与える環境因子(油、スケール等)	小	大

2. 試験方法

先ず渦流探傷試験法により2層式エキスパンションベローズの腐食の有無および発生している位置の特定を行い、次に渦流探傷試験で得られた指示部を超音波探傷試験により、外層の健全性確認と損傷程度の定量化を図った。

渦流探傷試験法としては自己誘導自己比較方式を採用し、安定した探傷および各種径のエキスパンションベローズへの対応を図るため、コイルの上下位置を可変できるリフトオフ調整機能を付けた。また、プローブホルダーにV字型タイヤを付け円滑な高速走査を可能とする構造とした。

超音波探傷試験法は、試験体内厚が1~2mm程度の薄肉内面に発生する小さな腐食の検出と同時に定量化が求められるため、周波数10MHz、2振動子型探触子を採用した。

3. テストピースによる実験

SUS 平板 1mm に腐食と割れを模擬した $\phi 2 \times 0.25d$ 及び $\phi 2 \times 0.5d$ の平底穴と長さ 50 のスリット状の放電加工傷を入れたテストピースを使い渦流探傷試験による検出性をテストした。尚試験は 2 層エキспанションベローズを想定し、傷のない厚さ 1mm の SUS 同板材を重ねて行った。また実際の探傷を想定し実機から切出した 2 層エキспанションベローズ (厚さ 1.5mm+1.5mm) の内層側に $\phi 2$ mm ドリルを使用して小さな穴を開け同条件による実験を行った。

SUS 平板厚さ 1mm のスリット $0.25d \times 50$ の検出性がやや悪いが、他の傷は明瞭に検出することができた。(図 1 参照) 次に厚さ 1.7mm の 1 層エキспанションベローズに人工傷 (深さ 0.5mm~0.7mm) を加工した場合の実験結果を図 2 に示す。

平板テストピース(t1.0+t1.0t)
加工きざ深さ

2 層エキспанションベローズ(t1.5+t1.5)

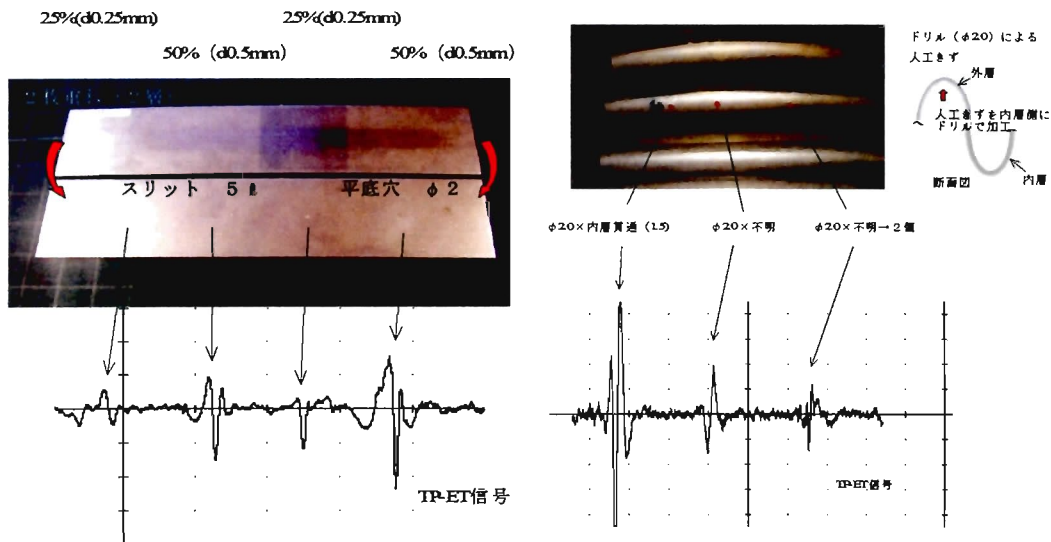
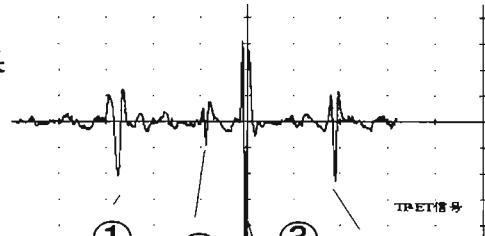


図 1 平板及び 2 層エキспанションベローズの人工傷による実験

1 層エキспанションテストピース (t1.7)



ET 結果



UT 結果

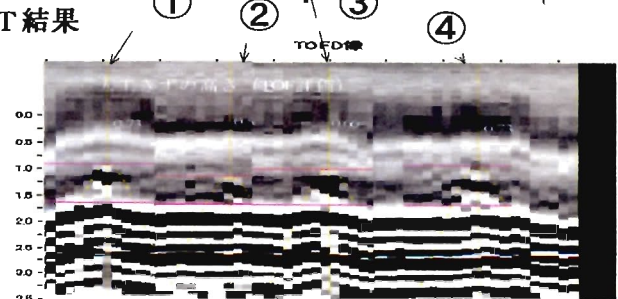


図 2 1 層エキспанションベローズの人工傷による実験

4. 結言

渦流法及び超音波法を併用した 2 層エキспанションベローズの腐食検査結果、

- 1) 内外層肉厚 1mm+1mm の内層側 $0.25d \times \phi 2$ の平底穴の検出が可能となった。
- 2) 割れを想定したスリット状の放電加工傷 $0.25d \times 50$ の検出性はやや劣るが、 $0.5d \times 50$ は明瞭に検出できた。
- 3) また、実機での検査結果、深さ 0.6mm の腐食を検出できた。

非接触空中超音波検査技術の現状と課題

The Present and Subject in Non-Contact Air Coupled Ultrasonic Testing

高橋 雅和、 星野 秀和、 小倉 幸夫
Masakazu Takahashi, Hidekazu Hoshino Yukio Ogura
ジャパンプローブ(株) Japan Probe Co. Ltd

概要

非接触空中超音波検査(Non-Contact Air Coupled Ultrasonic Testing 以下 NAUT と呼ぶ)は通常の超音波探傷では適用困難な高温下の環境にある試験体、常時モニタリングが必要な材料、直接水や油等の接触媒質の適用が困難な場合にも適用可能で、多くの利点がある。以下 NAUT 技術の現状、適用例及び課題を述べる。

キーワード：矩形バースト波、音響インピーダンス、透過率、斜め入射

1. はじめに

通常の直接接触法による超音波探傷試験では超音波を伝搬させるために探触子と試験体の間に油、水等の接触媒質(超音波を伝搬させる媒質)が必要である。良好且つ安定した音響結合を得るためには探触子は一定に保持する必要がある。また、高温・低温の試験体には適用困難な場合がある。また、試験体によっては材料改質の問題などから適用が制限される場合がある。

これに対して接触媒質として空気を利用し非接触で超音波探傷試験が可能な NAUT では(1)探触子の走査時安定したエコーを送受信できる、(2)接触媒質を適用できない試験体でも非接触で試験が可能である、(3)直接接触法では適用困難な高温・低温材料、狭隘部分や複雑な形状の試験体にも適用できる、等の利点がある。

NAUT は以前から海外で研究がなされ実施されてきた¹⁾。その主なる適用例は、航空機に使用されるハニカム構造物・CFRPやゴム・木材等であり、金属に適用された例は殆どない。その理由は金属に適用するためには、空気と金属の音響インピーダンスの相違で送受信に約90dBの損失が生じるからである。最近、ハイパワーで送受信可能な矩形バースト超音波パルサ・レシーバの開発やそれに伴うプリアンプ及び高感度の探触子が開発され、これらの装置及び技術によって、金属にも十分適用が可能になってきた²⁾。以下 NAUT の装置、金属への適用例等について述べる。

2. NAUT法³⁾

通常の超音波探傷では図1に示すように超音波を伝搬させるため探触子と試験体の間に油、水等の接触媒質(超音波を伝搬させる媒質)が必要であるが、NAUTでは図2のように空気を媒体とするので、非接触で超音波探傷が可能である。しかし、探触子から空中に超音波が伝搬する場合に、探触子と空気及び試験体の音響インピーダンス(音速と密度の積)の相違によって、大きなエネルギー損失が生ずる。そのために金属の探傷では

- (1) ハイパワーで送受信できる超音波パルサ・レシーバ
- (2) 高感度の空中超音波用探触子
- (3) プリアンプ(60dB程度)等が必要である。

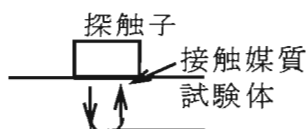


図1 通常の超音波探傷

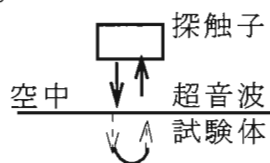


図2 非接触空中超音波探傷(NAUT)

3. バースト波を発生させる装置

NAUTではバースト波で送受信することが有効である。バースト波を発生させる装置としてファンクション・ジェネレータ、ファンクション・シンセサイザ、トーンバーストジ

エネレータなどがある。しかし、高出力のバースト波を発生するものは少ない。最近、矩形バースト波デジタル超音波パルサ・レシーバが開発された^{4), 5)}。この装置はパソコンによる制御及びデータ管理が出来ること、高電圧の矩形バースト波を発生させることができて、周波数や波数及び電圧を可変でき、またバッテリー駆動が可能などの特長がある。

図3はNAUTに用いられるバースト波パルサ・レシーバとNAUTの実験状況を示す。

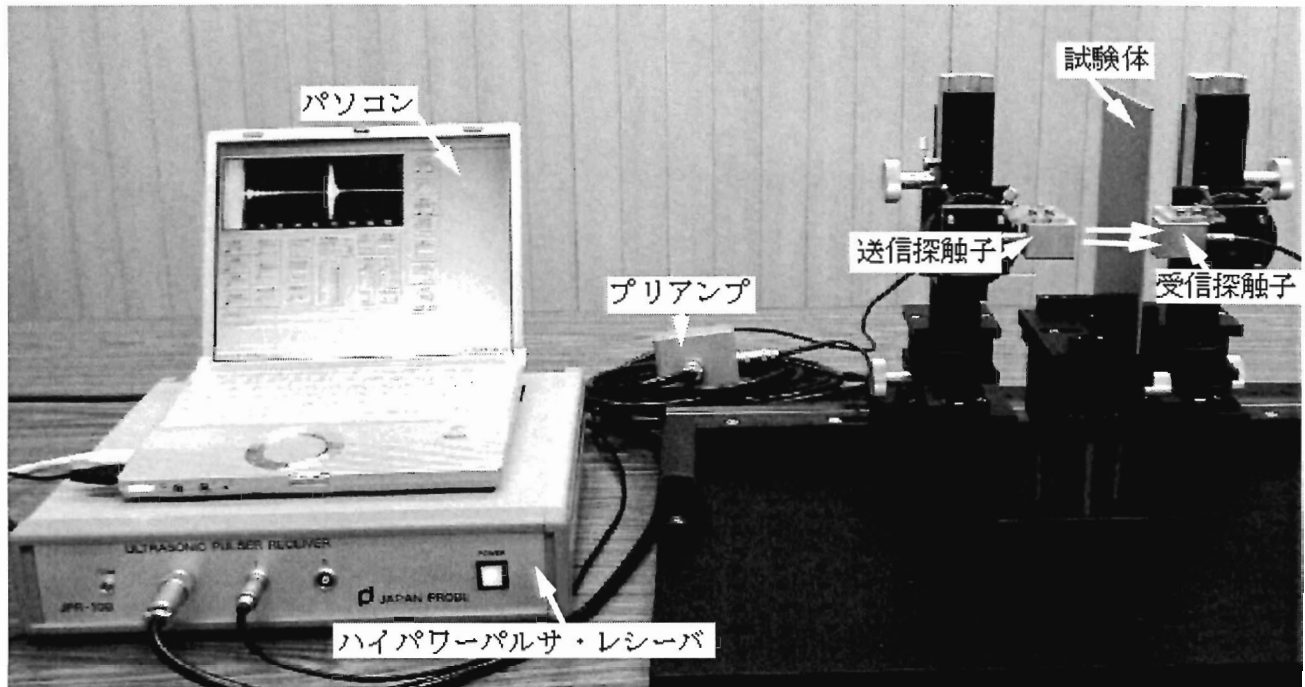


図3 バースト波パルサ・レシーバとNAUTの実験状況

4. NAUTの実験結果及び適用例

4. 1 空気⇒⇒試験体⇒⇒空気の伝搬経路の透過率

図4に示すように探触子⇒⇒空気⇒⇒試験体⇒⇒空気⇒⇒探触子の経路を考え、空気と試験体の音響インピーダンスを Z_1 、 Z_2 とすると、超音波が空気を伝搬してA面で試験体を透過⁶⁾して再びB面で空気中に透過する透過率 t_{1-2-1} は、超音波が空気⇒⇒試験体に透過する透過率 t_{1-2} とB面で再び試験体⇒⇒空気に透過する透過率 t_{2-1} の積で表わされる。

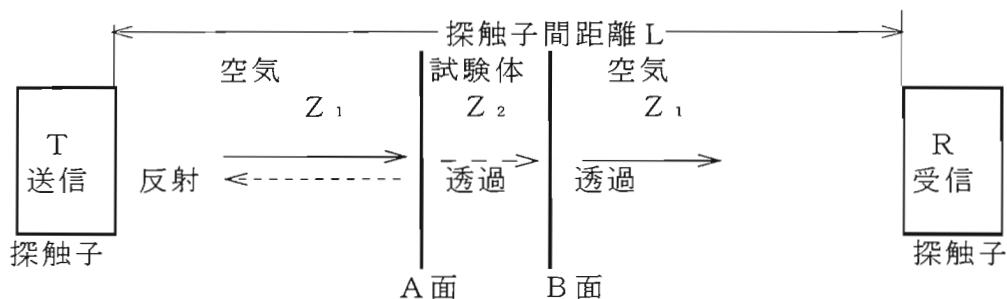


図4 空気⇒⇒試験体⇒⇒空気の伝搬経路

t_{1-2} 、 t_{2-1} は式(1)、空気⇒⇒試験体⇒⇒空気の透過率 t_{1-2-1} は式(2)で与えられる。

$$t_{1-2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad t_{2-1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \text{----- (1)}$$

$$t_{1-2-1} = t_{1-2} \cdot t_{2-1} = \frac{2Z_2 \cdot 2Z_1}{(Z_1 + Z_2)(Z_1 + Z_2)} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \text{----- (2)}$$

例えば、空気と鋼の場合は $Z_1 = 340\text{m/s} \times 0.0013 \text{ g/cm}^3 = 0.442 \text{ m} \cdot \text{g/s/cm}^3$ 、
 $Z_2 = 5900\text{m/s} \times 7.8/\text{cm}^3 = 46020 \text{ m} \cdot \text{g/s/cm}^3$ 、従って、式(2)の透過率は 0.0000399
 (-88.0dB)、又CFRPの場合には、 $Z_2 = 4483\text{m} \cdot \text{g/s/cm}^3$ 程度であるからその透過率
 t_{1-2-1} は 0.000394 (-68.1dB)となる。実験した結果では鋼で-90.2dB、CFRPで-71.3dB
 であり計算値とよく一致した。

4.2 音響インピーダンスと透過率の関係⁷⁾

実験は図5に示すような方法で実験を行い式(3)の透過率Tを求めた。

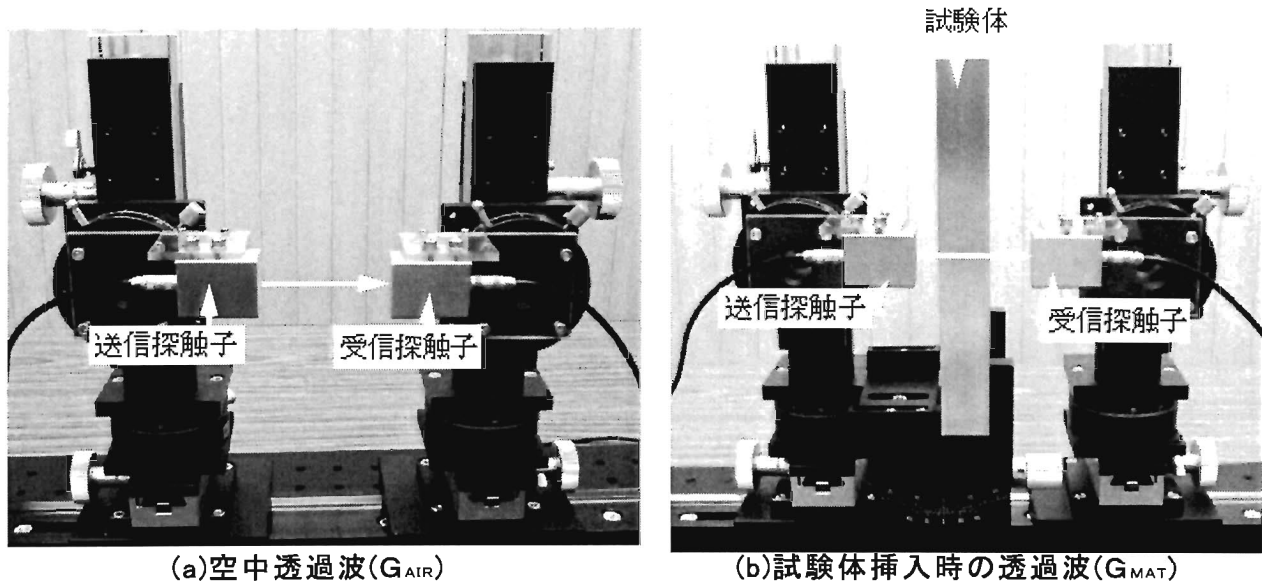
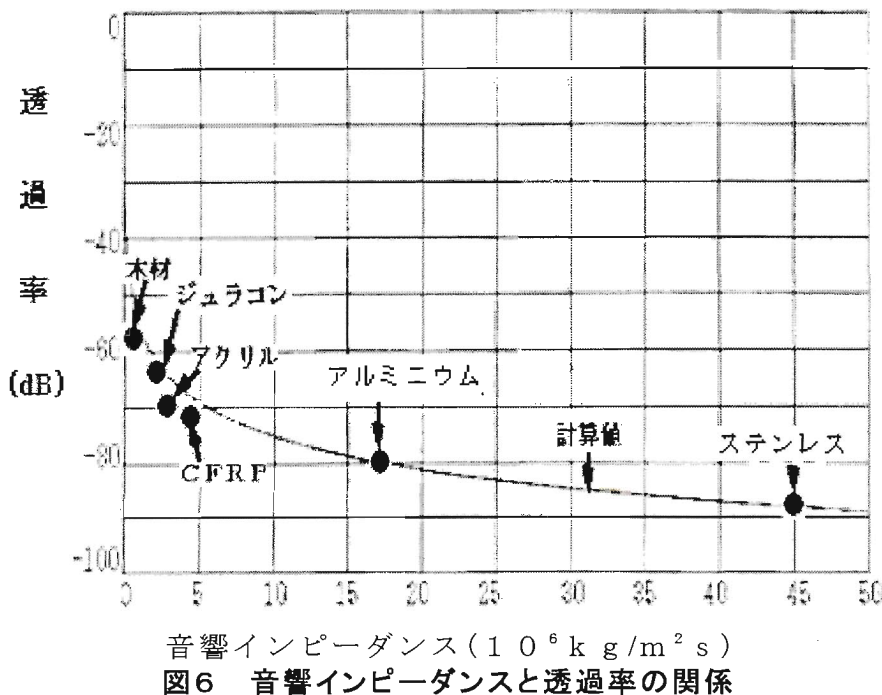


図5 透過率の実験方法

図6に各種音響インピーダンスと透過率の関係を示す。図中実線は計算値、●は実験値である。計算値 t_{1-2-1} は式(2)、実験値Tは式(3)で求めた。



$$T = G_{AIR} - G_{MAT} \text{----- (3)}$$

G_{AIR} は図5で空中の透過波のゲイン値、 G_{MAT} は試験体がある場合の透過波のゲイン値である。図6から分かるように実験値と計算値はほぼ一致している。NAUTで式(3)のTを求めれば各種試験体の音響インピーダンスの測定が可能である。

4.3 斜め入射による透過率

図6は超音波が試験体に垂直入射した場合であるが、斜め入射することで更に効率良く超音波を透過できる。

液体中を伝搬する縦波超音波が、図7に示すように、板に斜めに入射して透過するとき、その透過率は理論的に導かれている^{8)~11)}。この理論は空気伝搬超音波が板を透過する際の透過率の計算にも同様に用いる事ができるものと考えられる。この理論によれば入射角 θ におけるエネルギー透過率 T_c は式(4)で示される。

$$T_c = \frac{4 N^2}{4 M^2 + (N^2 - M^2 + 1)} \text{----- (4)}$$

ここに、

$$N = \frac{Z_l \cos^2 2\theta_l}{Z \sin k_{ly} d} + \frac{Z_t \sin^2 2\theta_l}{Z \sin k_{ly} d}, \quad M = \frac{Z_l \cos^2 2\theta_l}{Z \tan k_{ly} d} + \frac{Z_t \sin^2 2\theta_l}{Z \tan k_{ly} d} \text{----- (5)}$$

$$Z = \frac{\rho v}{\cos \theta}, \quad Z_l = \frac{\rho_l v_l}{\cos \theta_l}, \quad Z_t = \frac{\rho_t v_t}{\cos \theta_t}, \quad k_{ly} = \frac{\omega}{v_l} \cos \theta_l, \quad k_{ty} = \frac{\omega}{v_t} \cos \theta_t \text{----- (6)}$$

$$\sin \theta_l = \frac{v_l}{v} \sin \theta, \quad \sin \theta_t = \frac{v_t}{v} \sin \theta \text{----- (7)}$$

である。ここで、 v は空気中の音速、 v_l 、 v_t は板材の縦波と横波の音速、 ρ は空気の密度、 ρ_l は板材の密度、 d は板の厚さ、 θ は入射角、 θ_l 、 θ_t は板中での入射角 θ に対する縦波と横波の屈折角、 k_{ly} 、 k_{ty} は板の厚さ方向の縦波と横波の波数成分、 Z 、 Z_l 、 Z_t は入射角を考慮した音響インピーダンス、 ω は超音波の角周波数をそれぞれ示している。

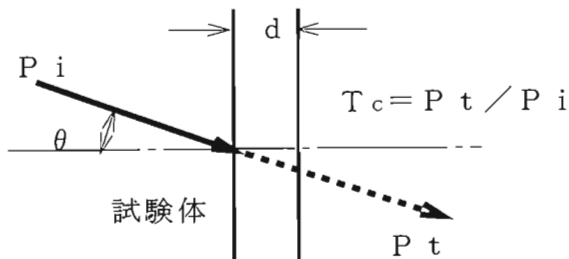


図7 板波の斜入射の透過率の計算方法

図8に厚さ1mmのアルミニウム板の透過率の実験結果と計算結果の比較¹²⁾を示す。実験結果と計算結果は良く一致している。

図9に透過率に関する fd (周波数 f と試検体の板厚 d の積)と入射角 θ の関係を示す¹³⁾。図中○、□及び△は最大透過率を示す実験値で計算値と良く対応している。

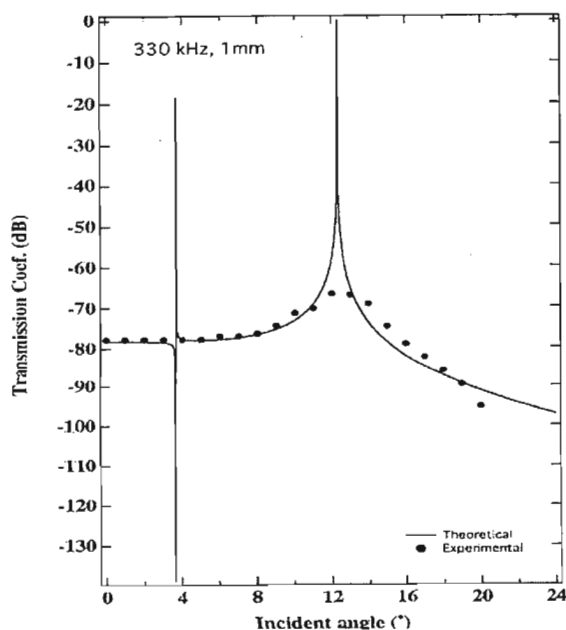


図8 入射角と透過率の実験値と計算値の比較 (330KHz)

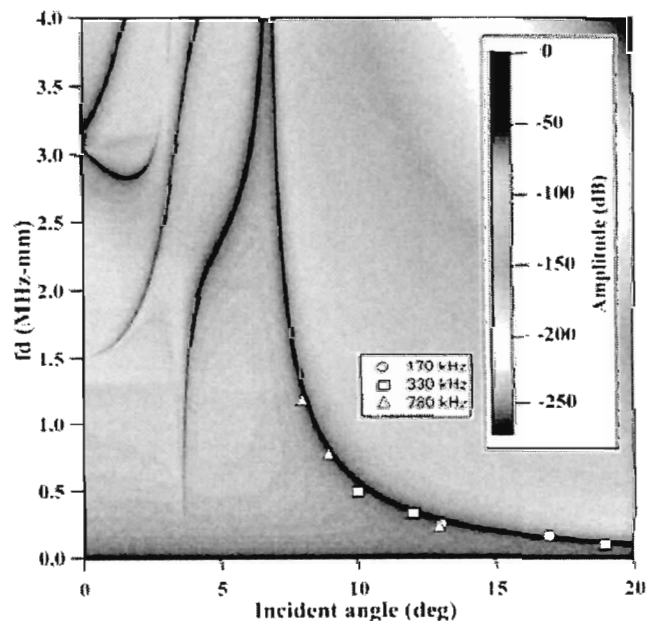


図9 透過率に関する fd と入射角 θ の関係

4.4 CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の探傷例

図10に厚さ3mmのCFRPの中央部に衝撃荷重を加えて生じた層間剥離を透過法で探傷した透過波の分布とその波形例を示す。

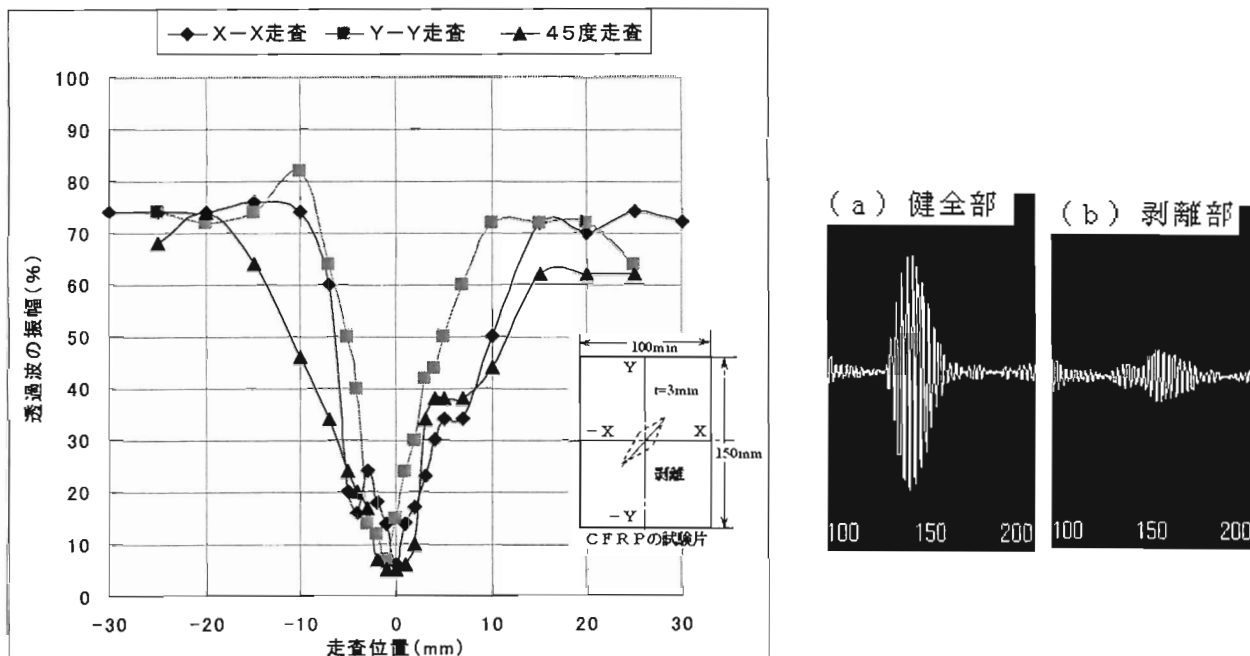
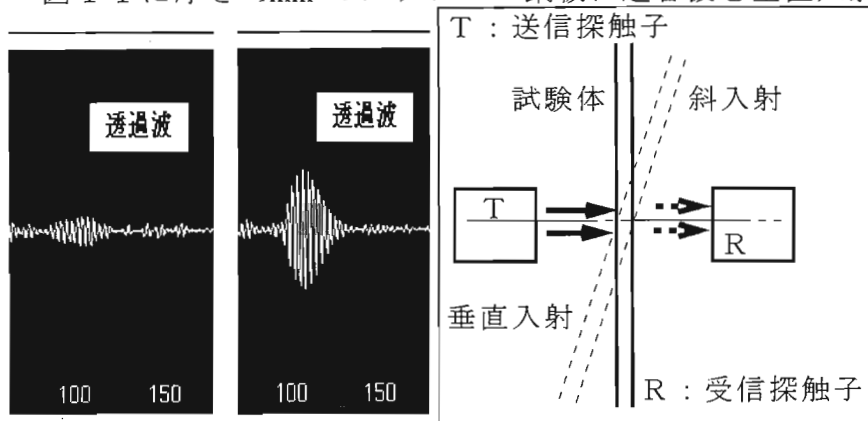


図10 透過法によるCFRPの走査位置と透過波の分布及び波形例

探触子は 0.4K14 × 20N で公称周波数 400KHz である。図10の(a)健全部と(b)層間剥離部の透過波の例に示すように剥離部分では透過波は減少する。

4.5 ステンレス鋼板の探傷例

図11に厚さ1mmのステンレス鋼板に超音波を垂直入射及び斜入射させた時の比較



を示す。垂直入射(a)では殆ど透過波は得られず、これに対して試験体を10～12°傾斜した斜入射(b)では約15dBの感度が向上する。この場合のモードは板波である。

(a)垂直入射 (b)斜入射 (c) 実験方法

図11 厚さ1mmのステンレス鋼板の探傷例

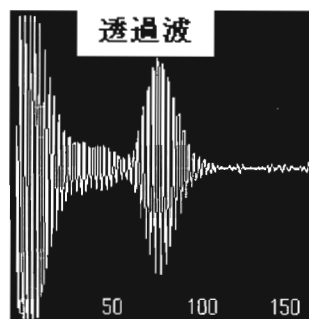
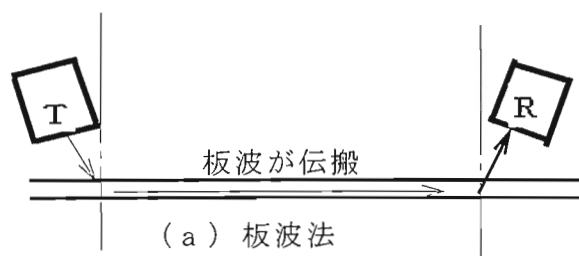
4.6 片面透過法による鋼板の板波探傷例

板波(薄い板状の固体を伝搬する波)を用いて厚さ1mmのステンレス鋼板を探傷した例

を図 1 2 に示す。

T : 送信探触子

R : 受信探触子

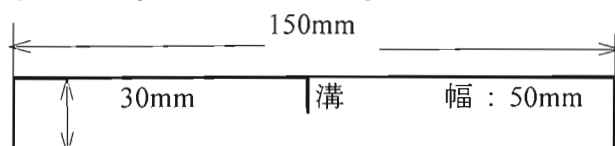


(b) 透過波

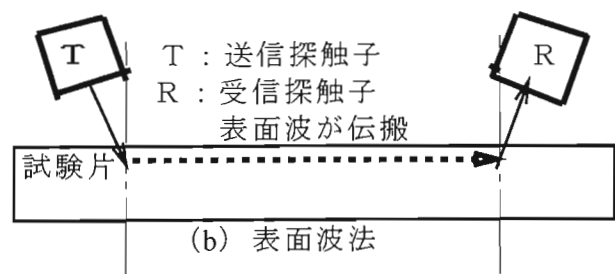
図 1 2 片面透過法によるステンレス鋼板の板波探傷例

4. 7 表面波を利用したアクリル板の探傷例

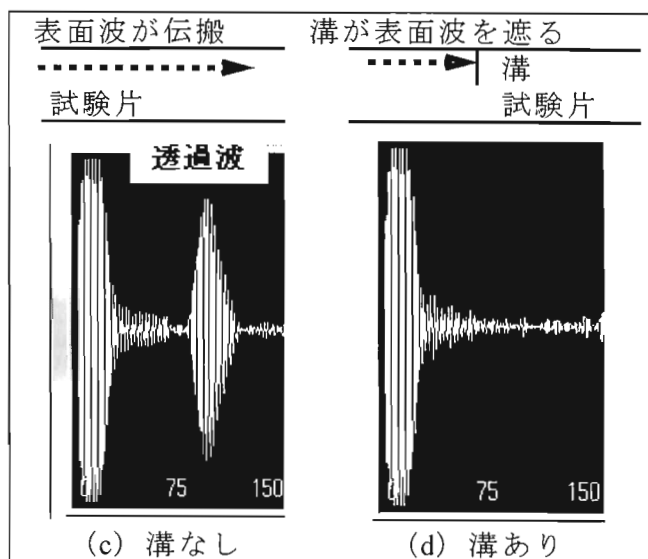
図 1 3 に示すように厚さ 30mm のアクリル板を表面波(表面近傍だけエネルギーが集中して伝わる波)を用いて探傷した例を示す。図 1 3 (d)は溝によって表面波が遮られて探触子 R では受信していない。



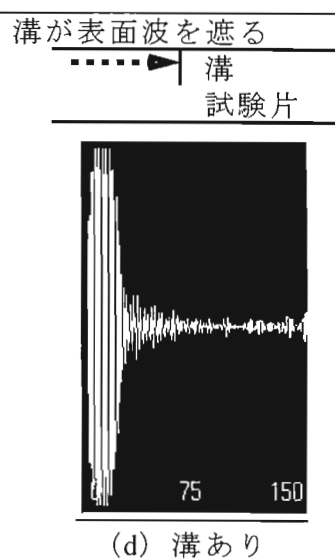
(a) 試験片



(b) 表面波法



(c) 溝なし



(d) 溝あり

図 1 3 表面波を利用したアクリル板の探傷例

4. 8 その他の応用

- (1) 試験体内で縦波から横波にモード変換させて縦波・横波の音速を同時に測定する方法。
- (2) 試験体の表層に超音波を伝搬させてコーティング層などの膜厚を推定する方法。
- (3) パイプの検査。
- (4) 曲率を有する複雑な製品、例えば自動車のエンジンインシュレータ等への適用。

5. まとめ

NAUT を実現するためには、ハイパワーで送受信可能な超音波パルサ・レシーバ、高感度な探触子及びプリアンプが必要である。ハイパワーパルサ・レシーバには矩形バースト波を用いることが有効である。

今後の課題として、パルサ・レシーバ及び探触子の更なる感度向上、探触子の広帯域化、信号処理による SN 比の向上などが挙げられる。

参考文献：

- 1) 例えば、H.Hillger,DLR,Ing, Buro Dr.Hillger, Braunschweig,R.Meier: Inspection of CFRP Components by Ultrasonic Image with Air Coupling, 8th ECNDT Barcelona, (2002)
- 2) 高橋雅和、馬場比路志：やさしい解説、バースト波（その3）、非破壊検査誌 Vol,56(1), pp45-46, (2007)
- 3) 高橋雅和、馬場比路志、小倉幸夫：矩形バースト波を用いた空中超音波計測技術、UTシンポジウム、6-1、PP.94-104, (2007)
- 4) 高橋雅和、馬場比路志：やさしい解説、バースト波（その1）、非破壊検査誌 Vol54(11), PP.591-592, (2006)
- 5) 高橋 修、馬場比路志：バースト波超音波パルサー・レーザ、検査技術、5、(Vol.11), PP.62-66, (2006)
- 6) 非破壊検査協会：超音波の反射と透過、超音波探傷試験Ⅲ、PP.24-25, (2004)
- 7) 高橋雅和、星野秀和、小倉幸夫、北川秀昭、楠元淳一、金谷章宏：矩形バースト波を用いた空中超音波探傷に関する検討、平成19年NDI春季大会、PP.13-16, (2007)
- 8) H. Reissner, Helv. Phys. Acta, 7,PP.140-150, (1934)
- 9) W. T. Thompson,J. Appl. Phys., 21,PP.89-93, (1950)
- 10) 鳥飼安生、藤森聡雄：日本音響学会誌, 10,PP.9-13, (1954)
- 11) A. Safaeinili et al, Materials Eval., Oct.PP. 1186-1190,(1995)
- 12) 高橋雅和、星野秀和、小倉幸夫、西野秀郎、北川秀昭、楠元淳一、金谷章宏：非接触エアUTの板材の斜め入射透過率に関する検討（2）、平成19年NDI秋季大会、PP.31-34, (2007)
- 13) 西野秀郎、小倉幸夫、星野秀和、高橋雅和、北川秀昭、楠元淳一、金谷章宏：非接触エアUTの板材の斜め入射透過率に関する検討（1）、平成19年NDI秋季大会、PP.27-30, (2007)

報を取得した。

2. 2 きずの種類と波形の分類

試験体に挿入したきずの種類は、(a) V開先の溶込み不良、(b) K開先の溶込み不良、(c) 融合不良で、(a)及び(c)の中には表面に開口したものもある。なお、本実験においてはTOFD法による波形信号から、きずを表2に示すように定義した。

表1 試験体

試験体	板厚	開先形状	評価きず数
6-1	6	V	3
12-1	12	V	6
25-1	25	V	6
25-2	25	K	8
40-1	36	V	5

表2 波形情報によるきずの分類

きずの性状	きずの種類	波形情報
表面開口きず	① 表面に近い融合不良	ラテラル波は消滅し、下端回折波が得られる。
裏面開口きず	② 溶込み不良	ラテラル波と上端部の信号が有る。裏面反射波の位置に変化有る。
内部きず	③ 融合不良	きずの上下端部から散乱波及び回折波が同時に出現する。
	④ 内部の溶込み不良	

3. 結果

図1は対象としたきずの一例で、25-1試験体(板厚24.9mm)のDスキャン画像の中から6個のきずを選択して波形調査の対象とした。このきずの範囲内を1mmピッチ毎に波形を観察し、きず高さを測定する上で必要なきず波形情報をI~IVのタイプに分類した。

- I : 上端部散乱波のみ観察されたもの
- II : 下端部回折波のみ観察されたもの
- III : 上端部散乱波と下端部回折波が同時に観察されたもの
- IV : 上端部散乱波と下端部回折波の識別が困難なもの

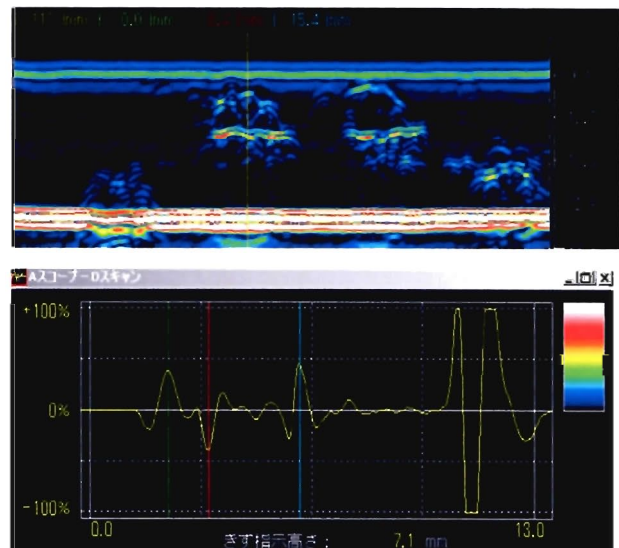


図1 25-1試験体のTOFD画像

この方法により分類した結果を以下に示す。

総じて、裏面に開口したV開先の溶込み不良(IP)においては、Iが期待されるが、きず高さが低い場合や密着した先端形状の場合は十分な信号レベルが得られてない。またきずの先端に体積を持つ場合はIVの分類に属するものも確認された。

内部きずの融合不良(LF)やK開先の溶込み不良では上端部と下端部からの信号が同時に得られやすいはずであるが、きず指示範囲の走査ピッチ上での出現率は20%程度であった。TOFD法はきずの検出性に優れた特性を持ち、今回確認した範囲では0.2mmのきず高さを有するものが検出された。しかし、このような微小なきずに対し、高さ測定を行うには、今回の実験で用いた板厚範囲では、上端部エコーと下端部回折波の時間差が僅かであり、深さの測定は困難であった。

3. 1 板厚6mmのTOFD結果

表3 6-1試験体きずの位相情報の分類

分類項目	TOFDによるAスコープ波形の位相情報 (試験体1mmピッチ)		
きず位置	X=67~94	128~158	208~241
きずの種類	IP ②	IP ②	IP ②
上端エコーのみ	13	13	17
下端エコーのみ	0	0	0
上端下端出現	0	0	0
上下端の識別不能	15	18	17
測定対象エコーの出現率(%)	46	42	50

(注)表中の、きずの種類で示す○囲み数字は表2のきずの種類に対応する

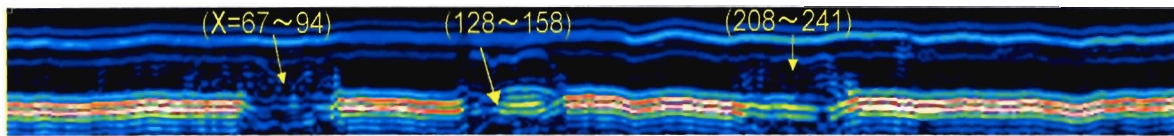
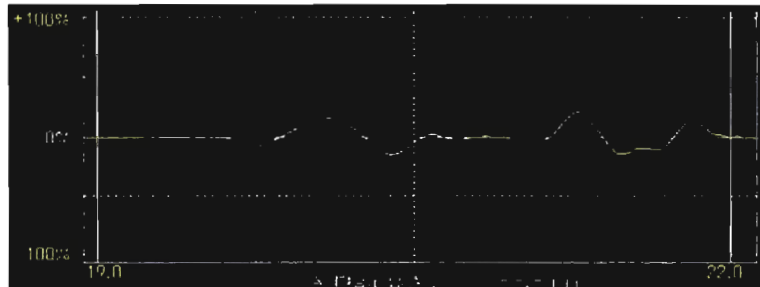
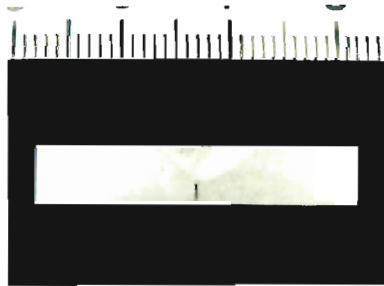
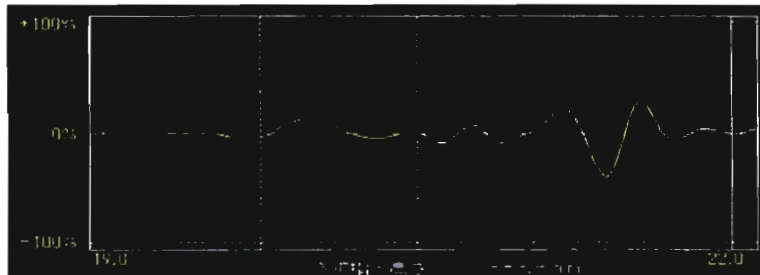
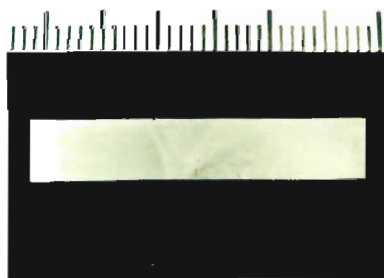


図2 6-1試験体のTOFD画像と測定対象きず位置



X=135mmのマクロ試験結果とAースキャン



X=155mmのマクロ試験結果とAースキャン

図3 6mm板厚における上端散乱波の出現状況

板厚6mmでは、ラテラル波の不感帯の影響を受けやすく、X=135mmの画像で示すように、高さ2mmの溶込み不良の上端散乱波の信号は、ラテラル波に近い位置に現れる。図3に示す6mm板厚試験体に適用した探触子は10K3LA70である。周波数と振動子サイズの改善を図ると更に検出性の向上が期待できる。

3. 2 板厚 12 mmの TOFD 結果

表 4 1 2 - 1 試験体きずの位相情報の分類

分類項目	TOFDによるAスコープ波形の位相情報 (試験体 1 mmピッチ)					
	X=19~53	82~96	106~132	146~176	180~222	289~312
きず位置	X=19~53	82~96	106~132	146~176	180~222	289~312
きずの種類	IP ②	LF ③	LF ③	LF ③	LF ③	LF ①
上端エコーのみ	27	0	0	0	0	0
下端エコーのみ	0	15	9	5	0	24
上端下端出現	0	0	1	0	15	0
上下端の識別不能	8	0	13	26	28	0
測定対象エコーの出現率(%)	77	0	4	0	35	100

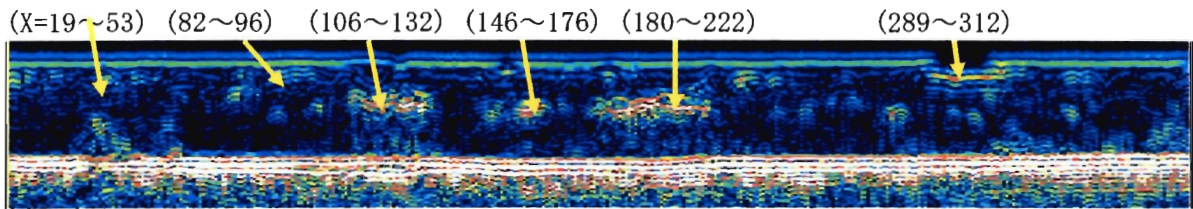
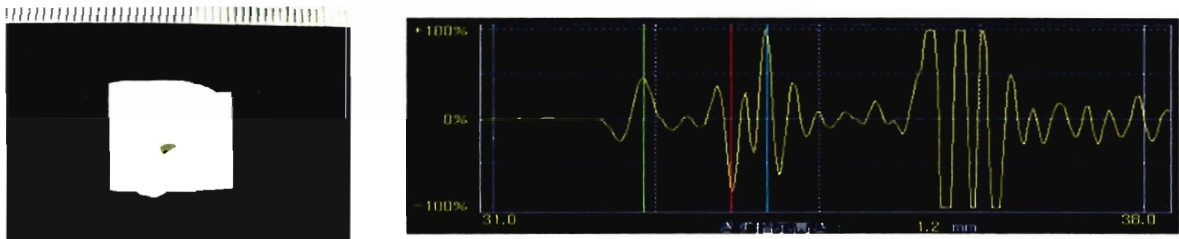
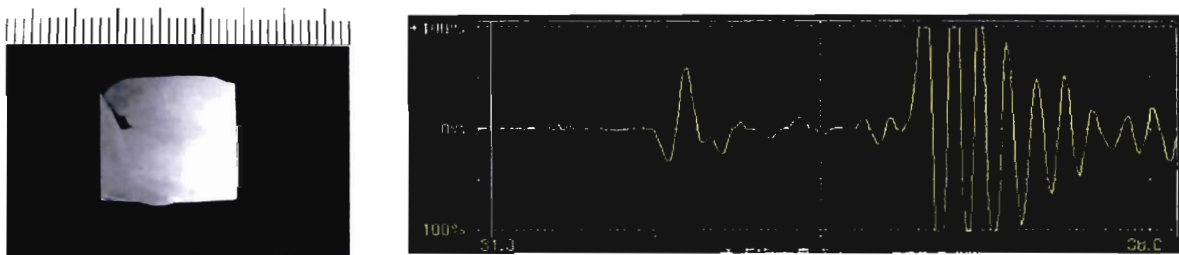


図 4 1 2 - 1 試験体のTOFD画像と測定対象きず位置



X=205mmのマクロ試験結果とA-スキャン(上下端有り)



X=300mmのマクロ試験結果とA-スキャン (ラテラル消失・下端回折波のみ)

図 5 12mm板厚における波形の出現状況

図 5 の X = 205mm は上下端が明瞭に現れた例である。また、X = 300mm は表面に開口したきずで、ラテラル波は現れず、ラテラル波と同位相の下端回折波が現れている。

3. 3 板厚25mmのTOFD結果

25-1 試験体はV開先溶接, 25-2 試験体はK開先溶接にて作成した。

表5 25-1 試験体きずの位相情報の分類

分類項目	TOFDによるAスコープ波形の位相情報 (試験体1mmピッチ)					
	X=27~74	89~137	144~152	155~202	207~223	224~260
きず位置	X=27~74	89~137	144~152	155~202	207~223	224~260
きずの種類	IP ②	LF ③	LF ③	LF ③	LF ③	LF ③
上端エコーのみ	24	0	0	0	0	0
下端エコーのみ	0	11	9	0	4	4
上端下端出現	0	30	0	29	0	0
上下端の識別不能	24	8	0	19	13	25
測定対象エコーの出現率(%)	50	61	0	60	0	0

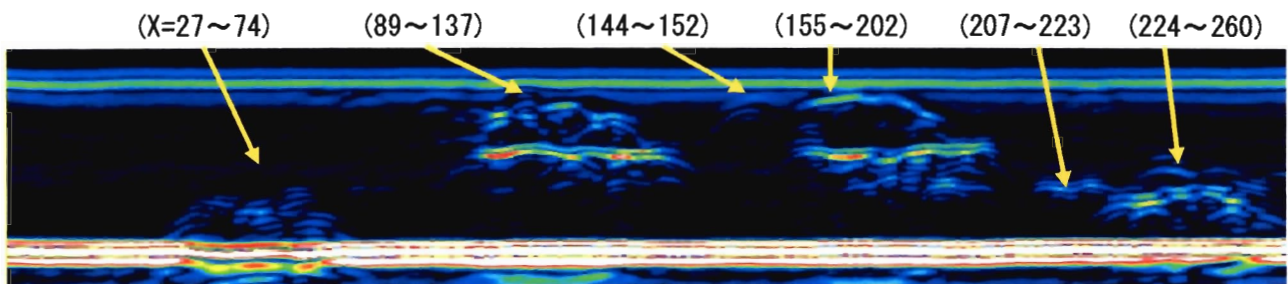


図6 25-1 試験体のTOFD画像と測定対象きず位置

表6 25-2 試験体きずの位相情報の分類

分類項目	TOFDによるAスコープ波形の位相情報 (試験体1mmピッチ)							
	X=14~22	28~38	39~63	64~74	96~104	116~156	170~180	201~235
きず位置	X=14~22	28~38	39~63	64~74	96~104	116~156	170~180	201~235
きずの種類	IP ④	IP ④	LF ③	LF ③	IP ④	IP ④	LF ③	LF ③
上端エコーのみ	0	0	6	2	0	5	4	0
下端エコーのみ	2	8	0	0	4	7	7	7
上端下端出現	2	0	0	0	3	19	0	16
上下端の識別不能	5	3	19	9	2	10	0	12
測定対象エコーの出現率(%)	22	0	0	0	33	48	0	46

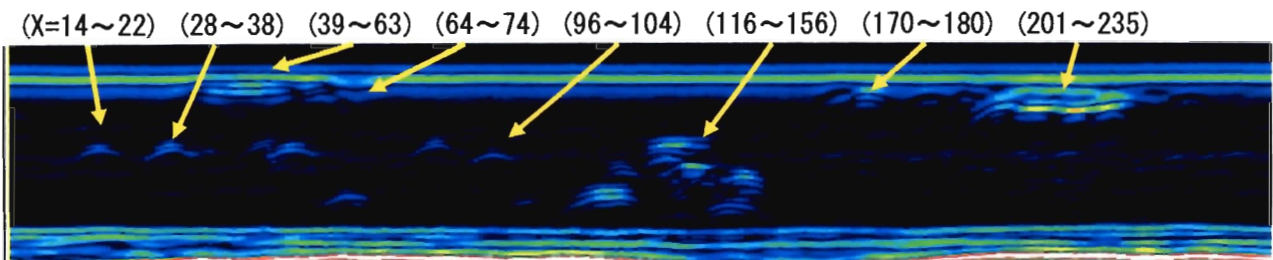


図7 25-2 試験体のTOFD画像と測定対象きず位置

3. 4 板厚36mm (40-1試験体) のTOFD結果

表7 40-1試験体きずの位相情報の分類

分類項目	TOFDによるAスコープ波形の位相情報 (試験体 1 mmピッチ)				
きず位置	X=1~36	43~81	110~164	187~228	266~270
きずの種類	IP ②	LF ③	IP ②	LF ③	IP ②
上端エコーのみ	22	6	14	12	5
下端エコーのみ	4	9	5	0	0
上端下端出現	0	15	0	0	0
上下端の識別不能	10	9	36	30	0
測定対象エコーの出現率(%)	61	38	25	0	100

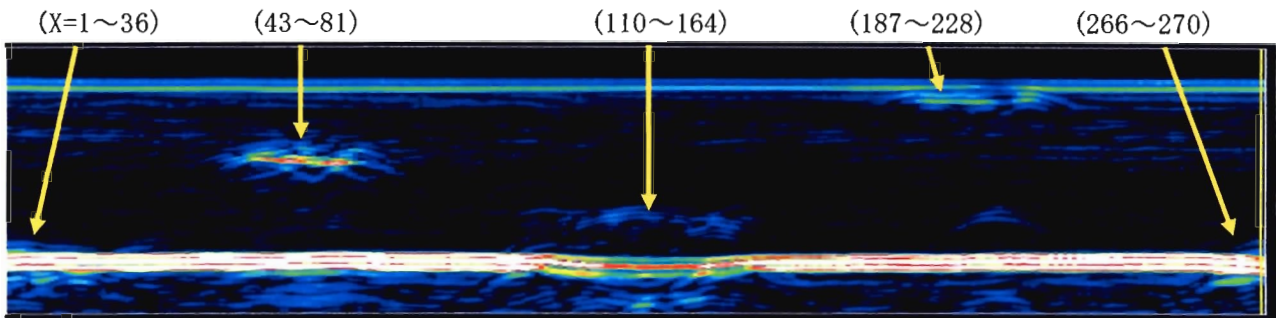
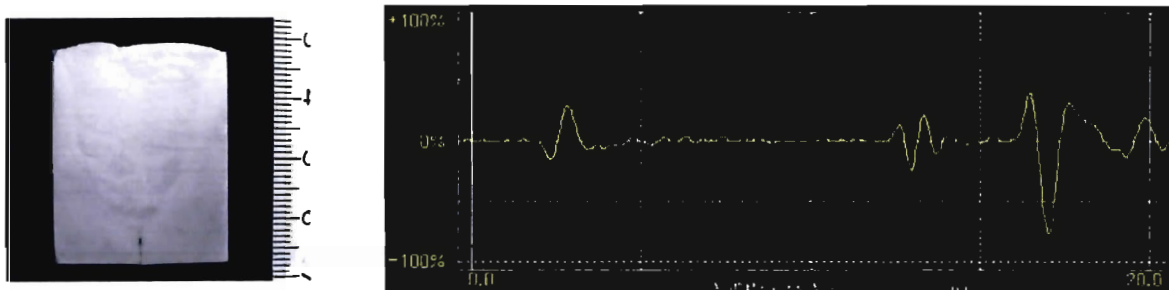
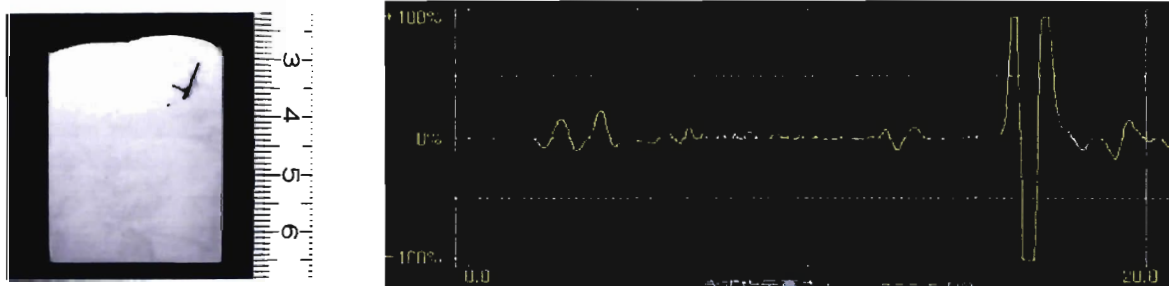


図8 25-1試験体のTOFD画像と測定対象きず位置



X=130mmのマクロ試験結果とAスキャン (IP)



X=212mmのマクロ試験結果とAスキャン (ラテラル波の不感帯と下部のLF)

図9 板厚 36 mm試験体の溶込み不良と上層部融合不良のAスコープ波形

3. 5 高さ測定が困難なきずの事例

図10は上端散乱波と下端回折波が同時に出現した箇所のAC波形とマクロ写真で、高さ測定が容易に実施できる例である。

これに対して図 11 はきず高さが小さく、上端散乱波と下端回折波の伝搬時間差が少ないために両波形が十分に分離していないか、上端又は下端のいずれか片方のみが現れる場合で、きずの検出はできているが、高さ測定が困難な例である。

図 12 は表層部に近いきずで、ラテラル波の不感帯であるエンベロープ内に上端散乱波が重なるため、上端部のエコーと判断できないケースである。

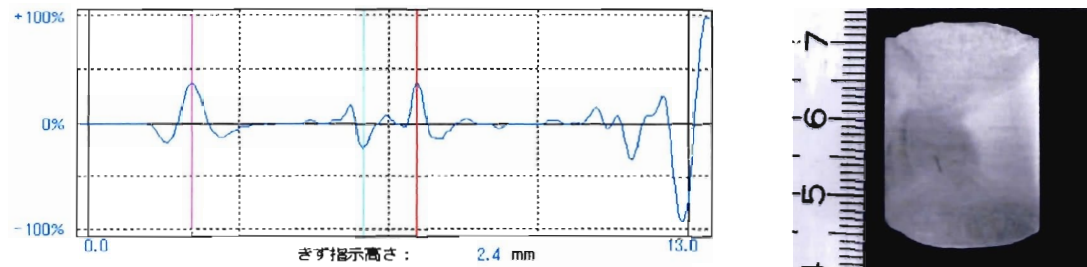


図 10 上端散乱波と下端回折波が同時に出現した波形と溶接部マクロ

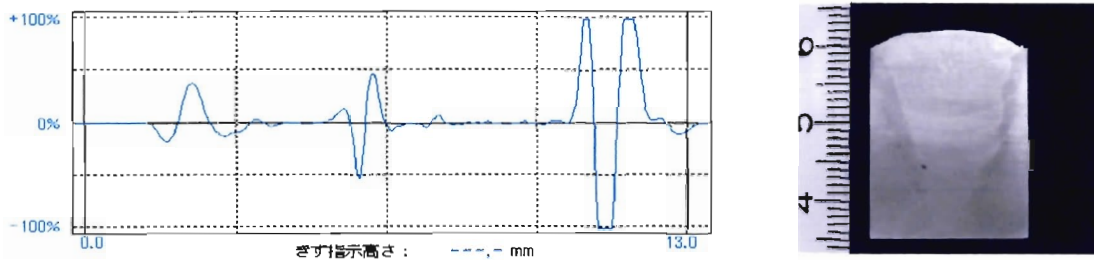


図 11 上端散乱波と下端回折波の分離が困難な波形と溶接部マクロ

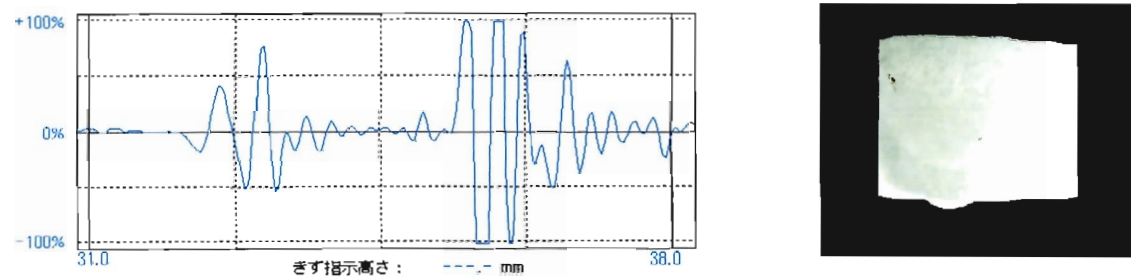


図 12 ラテラル波の不感帯内に上端散乱らしきものが存在するケース

図 13(a)はマクロ試験によるきず高さの実測値と TOFD 法による測定結果を比較したものである。TOFD 探傷による高さ測定結果はマクロ試験結果と良く一致しており、自然きずに近いじょうたいで作製された溶接きずにおいても、良い精度で測定可能なことが分かった。

しかし、マクロ試験による実きず高さ 4 mm 付近に TOFD 法によるきず高さは 1 mm 前後と測定された誤差の大きい集団が存在する。本実験では探傷条件として、Pr EN TS 14751 Welding-Use of time of flight diffraction technique (TOFD) for testing of welds で推奨する送受信の探触子間距離 (2S) の設定を超音波ビームの交軸点が板厚の 2/3 になるように設定した。しかし、この条件では板厚方向の深さ 10 mm 以内のきず位置を正確に捉えられないことがある。本実験では、送受信探触子を探触子を溶接部に近接 (接近限界付近まで) した位置で探傷したデータを採用すると、図 13(b)に示すようにこの大きな誤差は解消される。

図 14(a), (b)は溶込み不良及び融合不良のきず高さが対象エコーの検出性にどのような関連性を持っているかについて、示したものである。この結果から、概ねきず高さが 2 mm 以上あれば TOFD による

きず高さ測定が可能となる。

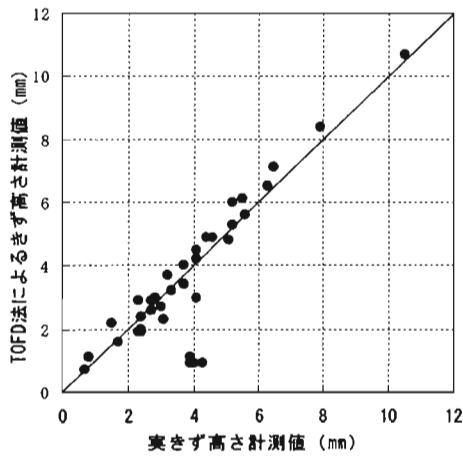


図 1 3 (a) 実きず高ささとTOFD法のきず高さ

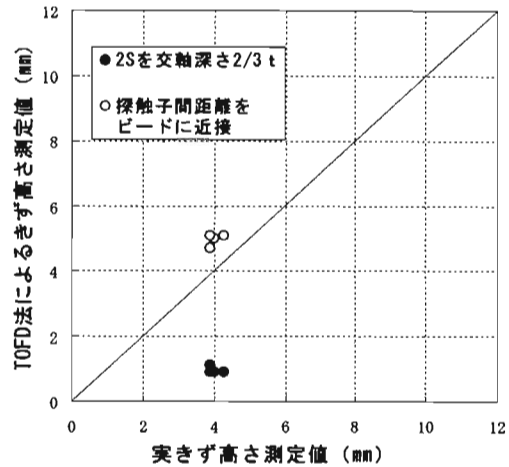


図 1 3 (b) 探触子間距離を狭めた場合の効果

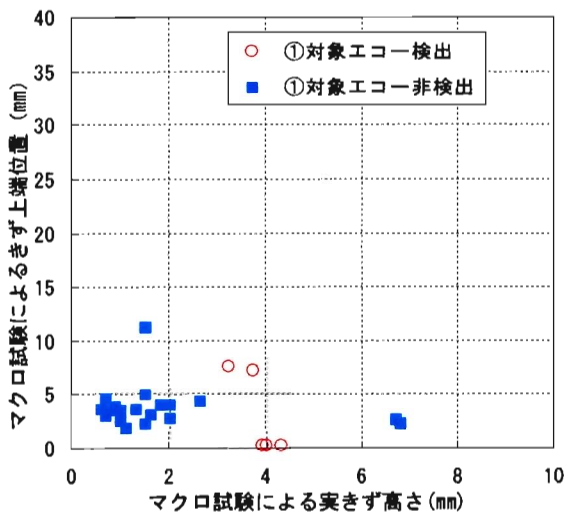


図 1 4 (a) きず高ささと対象エコーの検出性
(溶込み不良)

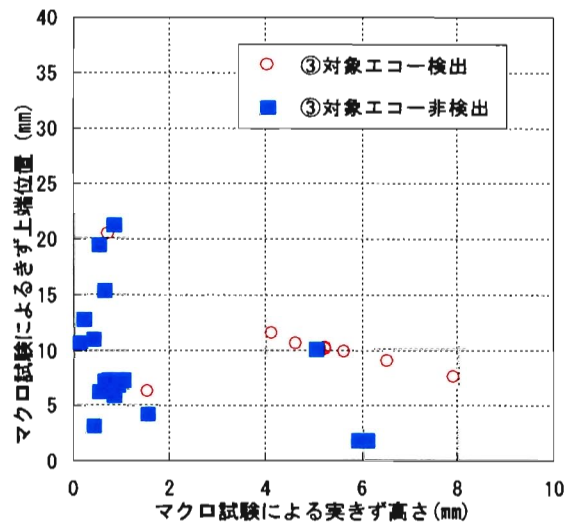


図 1 4 (b) きず高ささと対象エコーの検出性
(融合不良)

4. まとめ

自然きずに極めて近い溶接きずを対象に、TOFD法によるきず高さ測定に必要な波形情報について検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) きず高さ測定に必要な上端部散乱波と下端部回折波が同時に出現する割合は20%前後である。
- 2) 上端部散乱波と下端部回折波が同時に出現する場合のきず高さ測定精度は、3mm以下の誤差で測定可能である。表面から10mm強の範囲について次項の改善を図れば、1mm以下の誤差で測定可能である。
- 3) 表面から10mm強の範囲に存在するきずの測定精度を高めるには、超音波ビームの交軸点が板厚の2/3になる探触子間距離(2S)の設定の他、溶接部に最接近する位置での走査が必要である。

超音波フェイズドアレイ技術の突合せ溶接部と摩擦攪拌溶接部への適用例

Welding Part and Friction Stare Welding Inspection by Phased Array Technology.

○山本 優一郎
YUICHIRO YAMAMOTO
オリンパス株式会社
Olympus Corp.

概 要

・Olympus は一般的な現場での適用を目的として、ポータブルフェイズドアレイ探傷器 OmniscanP.A を開発した。本稿では OmniscanP.A の紹介と併せて、突合せ溶接の探傷例、近年革新的なアルミの溶接方法として注目を集めている「摩擦攪拌溶接 (FSW)」の探傷例を紹介する。

キーワード 超音波探傷装置 フェイズドアレイ OmniscanP.A FSW

1. 緒 言

超音波フェイズドアレイ技術が、研究室レベルから実用に耐えるシステムとして市場に登場したのはおよそ 10 年前となる。その後 10 年以上にわたるフィールド使用を経て、検査時間の短縮、検出、サイジング能力など多くの点で旧来の超音波探傷法よりも優れていることが確認された。フェイズドアレイを使用すれば、殆どのケースで検査能率を大きく向上させることが出来るが、最近まで初期投資額が高いことや設定が複雑なことから、原子力等の高度探傷等に使用されるに留まっていた。本装置は開発目標をフェイズドアレイ技術の利点をより汎用的に利用できることに置き、取扱いと設定を従来のフェイズドアレイ探傷装置を大幅に簡素化して手動/自動のいずれでも簡便に適用できることとした。以下、本装置の説明・機能・適用例について報告する。

2. 装置概要

本装置の外観を図 1・図 2 に示す。本装置はディスプレイ一体型で、市販のリチウムイオンバッテリー 2 本で約 8 時間の動作が可能である。従来複雑であったフェイズドアレイの設定は、メニュー選択での設定を採用したことにより、従来に比べ大幅に簡単になった。

本装置はモジュール方式を採用しており、背部モジュールを交換することで超音波フェイズドアレイ・渦流アレイの両探傷が可能。



図 1 本装置正面外観

(最大 8ch マルチチャンネル UT・渦流・RFT/MFL モジュールも順次発売予定)

サイズは 321mm×209mm×125mm と非常に小さく、バッテリー1本を含む総重量は約 4.6kg。全操作は基本的に片手のみでの操作が可能であり、狭い箇所での作業や高所作業での長時間使用による作業への負担を大きく軽減する。また、屋内外での使用を想定した堅牢・防塵・防滴仕様で、空冷ファン非採用の為原子力の汚染区域内でも、簡単な養生をするだけで使用することが可能であるし、仮に本装置が損傷してもハードディスク非採用の為、大事なデータを確実に保護する。

本装置に搭載しているソフトウェアには、欠陥のサイジング・レポートの作成等、探傷・解析時に必要とされる機能は全て揃っている。本装置で取込んだデータは容易に他 PC に移すことができ、高度解析ソフトウェア Tomoview2.7 R3 との互換性を持つ。これにより他 PC での高度な解析も可能となる。

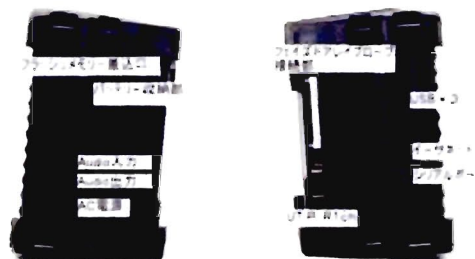


図2 本装置側面外観

表1 本装置基本仕様

サイズ	321×209×125
重量	4.6Kg
バッテリー駆動	バッテリー2本で最大約8時間
本体部	一体型 (POとも接続可能)
同時制御チャンネル数	16(32chバージョン/リリース予定)
総チャンネル数	128
その他のUT	1ch (TOFDも可)
送受信遅延時間	2.5μs
掃引周波数	最大20KHz
周波数帯域	0.75MHz - 18MHz
可変感度	0 - 74dB
アレイ制御	リニア、セクター、Multi Depth Focus
Focal laws	256
エンコーダ入力	2軸まで可
プローブ認識機能	有
USBポート	×3 マウス キーボード・プリンター接続可能
データストレージ方法	内蔵メモリ 他PO(イーサネット接続)、コンパクトフラッシュ、USBメモリ
Network interface	10/100Base-T

3. 探傷条件設定

従来フェイズドアレイ機器での設定方法は難しく、ある程度の技能者でないと使用が難しいというイメージがあった。主な設定項目として、探触子の設定、ウェッジの設定、フェイズドアレイの設定(各振動子の電子制御設定)、スキャン設定の4つが挙げられるが、Omniscan は各項目の設定に関して簡単な情報を入力するだけで、最適な探傷条件を自動的に計算する。以下に各設定項目に対する説明を行う。

3.1 探触子の設定

フェイズドアレイプローブは多数の振動子が一列に並んでおり設定には各振動子の幅とパルス幅の情報が必要となる。OlympusNDT社製のフェイズドアレイプローブにはインテリジェントチップ(探触子の情報を記録したチップ)が搭載されており、本装置に接続するだけでプローブの自動認識を行う。例としてOlympusNDT社製 5L6411 プローブは、周波数が 5MHz で 0.6mm の振動子が 64 個並んでおり、パルス幅は $1/(2 \times 5 \times 10^6) = 100\text{ns}$ で求められる。この情報を、プローブを繋いだ際に得た周波数の情報(5MHz)を元に本装置にて自動的に計算を行う。インテリジェントチップを搭載しない従来のプローブに関しては、事前にプローブの情報を本装置に保存することにより簡単に選択・呼出しをすることが出来、上記と同じように本装置にて自動的に計算を行う。ここでの説明は本装置にて行われる自動計算の一例である。

3.2 ウェッジの設定

ウェッジの設定にはウェッジ材質の音速、ウェッジサイズのオフセット、ウェッジ角度の情報が必要となる。OlympusNDT 社製の標準ウェッジの各情報は本装置に既登録されており、ウェッジの型式を選択するだけでウェッジ内のビーム路程等の計算を自動的に計算する。その他のウェッジに関しては 3.1 項と同じ様に、事前にウェッジの情報を本装置に保存することにより、簡単に選択・呼出しをすることが出来、選択するだけで自動的に計算を行う。

3.3 フェイズドアレイの設定

フェイズドアレイとは、各々の振動子から発信される音波を時間制御して、一定の距離で同時に音波が到着するよう制御したものである。設定項目はスキャン方法、同時制御振動子数、焦点距離、スキャン範囲と大きく分けて 3 つの項目がある。スキャン方法には大きく分けて、振動子方向に電子スキャンを行う“リニアスキャン”と、角度を変化させて一定範囲をスキャンする“セクタースキャン”の二種類がある。この項目でスキャン方法を決定すると、それに応じた設定項目がアクティブ（設定可能）に、関係ない項目はブランク（設定不可）になる。例としてリニアスキャンを選択した場合、電子スキャン範囲を選択する項目がアクティブになり、最大入射角度の設定項目がブランクになる（最小入射角度の設定は可能）。逆に、セクタースキャンを選択した場合、最大・最小入射角度の選択項目がアクティブになり、電子スキャン範囲の項がブランクになる。これにより、作業者の設定ミスを事前に予防することが出来る。後は同時制御振動子数と焦点距離に関して各々数値を入力するだけで、各々の振動子から発信される音波の時間遅延を本装置にて自動的に計算を行う。作業者が入力する項目は 4 項目に留まり、従来の設定方法に比べ、大幅に簡単になり、作業者の設定ミスを事前に予防する。もちろん、設定した条件は本装置に保存することが出来、いつでも呼出すことが可能である。

3.4 校正

フェイズドアレイの場合、多くのフォーカルロウを使用して探傷を行う為、従来は各々のフォーカルロウに対して一回一回校正をかける必要があった。本装置では、全てのフォーカルロウを一度に校正することが可能である。校正方法も簡単で、基準欠陥を指定して一回スキャンさせるだけで、感度調整・音速・ウェッジディレイの校正を一度に行うことが出来る。図 3 は校正時の画像である。



図 3 校正画面

4. 溶接部探傷結果例（突合せ溶接部探傷）

被検体の写真と実際の探傷事例をそれぞれ図4・5に示す。被検体に人工欠陥としてドリルホールとEDMノッチを各位置に入れてある。周波数5MHz・16振動子の探触子と、45度横波用のウェッジを使用して、30度～70度までの各ステップ0.5度ピッチで探傷を行った。従来の1チャンネル探傷器を使用した場合、様々な角度で同じ箇所を検査しなければならないが、フェイズドアレイの特徴として一度に様々な角度を振って探傷を行うことが出来るので、1スキャンで全ての角度で得られるエコーを取得して画像表示することが可能である。

図6は溶接部に沿ってスキャンを行い、結果を画像化したもので、図7は各画像の説明である。B・C・Sスキャン上に見られる赤もしくは青で表される画像が人工欠陥であり、エコー高さでの色分けがされている。（エコー高：赤→エコー低：青）。AスキャンはCスキャン上での青カーソルの交点（Sスキャン上青カーソル）でのAスキャンである。この様にフェイズドアレイを使用して探傷を行うことにより、被検体内部の欠陥位置・サイズを全体で捉えることが可能である。全Aエコーを取込んでの画像表示なので、従来通りAエコーでの欠陥評価も可能であるし、B・C・Sスキャンの画像を使用した欠陥のサイジングも本装置上で可能である。

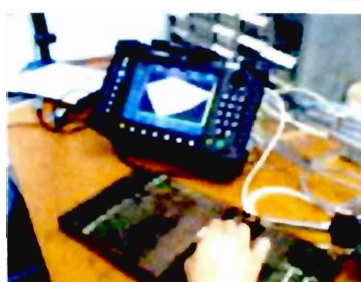


図4 探傷例



図5 サンプル外観

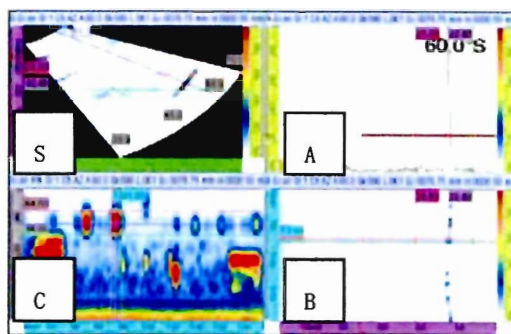


図6 探傷結果画像

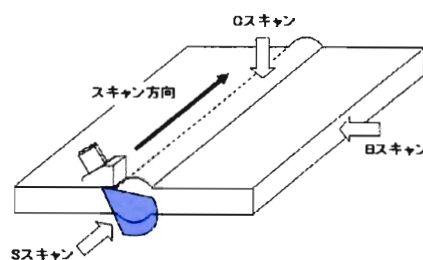


図7 探傷結果画像説明

5. 摩擦攪拌溶接（FSW）の探傷例

FSWは非溶融状態の下での接合技術であり、ミリング形のツールが回転するとき発生する熱で材料が塑性化（プラスチック状に軟化）した状態を利用してプレートを接合する。FSWでは欠陥は、原理的にはどの位置にも、またどの角度にも存在するが、実際には軸方向ないし周方向に発生することが多い。ここでのX-rayや超音波による体積検査は、

方向依存性があるので欠陥の位置関係に十分注意を払って検査を実施する必要がある。一般に、突合せ溶接には次の五種類の欠陥が生ずる。

- 1 溶け込み不足
- 2 中空部、気泡の存在 (Wormholes)
- 3 突合せ面の不良 (Kissing bond)
- 4 接合面に発生する欠陥 (Faying surface defects)
- 5 開先端面 (Root toe) の欠陥

従来の探傷法では FSW の欠陥のいくつかは検出が極めて困難であった。また FSW で表面に生じる小さな局部もり上がり (リップ部=lips) がラスタースキャンの適用を困難にする。

フェイズドアレイでは溶接幅方向へのスキャンを電子的に行うので、従来の超音波探傷法で必要なラスタースキャンが不要である。これによりスキャン方向は溶接線に沿っての一軸スキャンで済み、検査時間の大幅な削減となる。そして、フェイズドアレイは入射角を最適な任意の角度に設定できる。たとえば従来使われていた通常タイプの 45° 探触子に代わり、 30° から 70° の任意の範囲で、検出確率

(POD=Probability of detection) が最大値を示す角度を選んで検査できる。又、S/N 比は全体的に高い。図 8 に本装置を使用した FSW の探傷状況を示す。(図 9 は本装置拡大図)



図 8 探傷例



図 9 本装置探傷時の拡大図

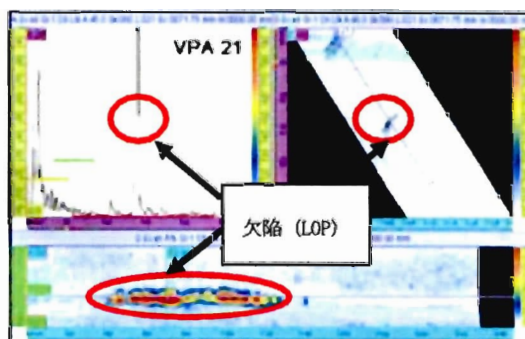


図 10 探傷結果表示

9. 高度解析ソフトウェア Tomoview2.7R3

本装置にて取込んだデータは、高度解析ソフトウェア“ Tomoview2.72R3”との互換性を持つ。これによりデータとの CAD 同時表示（3D CAD も可能）や、指定範囲内エコーに対しての自動 6dB 評価（評価方法は任意に設定可能）等の優れた機能を使用することが出来る。これはほんの一例である。

10. おわりに

本稿では、バッテリー駆動ポータブルフェイズドアレイ探傷器の紹介を適用事例と併せて紹介した。今回紹介した適用事例以外にも、原子力分野・産業分野・航空機分野・フィールドインスペクション分野等で本装置の適用が世界的に広まりつつある。これはフェイズドアレイを使用した検査の有用性が認められただけではなく、軽量、バッテリー駆動、ディスプレイ・解析ソフト一体型、高度解析ソフトウェア Tomoview2.7R3 との互換性という本装置の特徴が、様々な現場での検査要求に柔軟に対応できるからということも挙げられる。

従来、材料や溶接部の内部探傷には旧来の超音波探傷が広く使用されていた。フェイズドアレイも基本的には超音波であるが、検査時間の短縮・検出精度・サイジング・全データのデジタル保存等の利点から、世界的に旧来の超音波探傷法からフェイズドアレイへの移行が急速に進みつつある。今後日本でも、旧来の超音波探傷法からフェイズドアレイへの移行が進んでいくものと確信する。

フェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XS の使用例

日本 I T e S 株式会社 坂代一郎

概要

近年超音波探傷の新たな手法として、国内ではフェイズドアレイ探傷器による探傷が注目を集めている。ここでは昨年発売されたフェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XS を使用した適用例を紹介する。

1. はじめに

電子高速セクタ走査原理は J.D.Krause が電子高速リニア走査原理は N.Bom がそれぞれ 1967 年に考案したとされている。

クラウドクレーマーブランドでは米国 Krautkramer-Branson 社（現 GE Inspection Technologies 社）が 1986 年に航空機の大型パネル探傷用フェイズドアレイ探傷装置の納入例を西ドイツ Krautkramer 社（現ドイツ GE Inspection Technologies 社）が 1988 年に BAM へのフェイズドアレイ探傷装置の納入例を公表している。当時の装置はいずれも電子装置だけでも大型であったが、近年電子技術の発達により、小型・軽量・バッテリー駆動可能なフェイズドアレイ探傷器も登場してきている。本稿では昨年発売された GE Inspection Technologies 社製フェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XS を使用した適用例を紹介する

2. フェイズドアレイ・リニアアレイの概要

フェイズドアレイ及びリニアアレイの手法は複数の振動子を持つ探触子に対し、同時又は時間差を持って振動子を励振させることによりあたかも超音波ビームを走査するイメージで制御している。

フェイズドアレイによる斜角探傷のビームのイメージを図 1 に、フォーカスのイメージを図 2 に示す。リニアアレイのイメージを図 3 に示す。

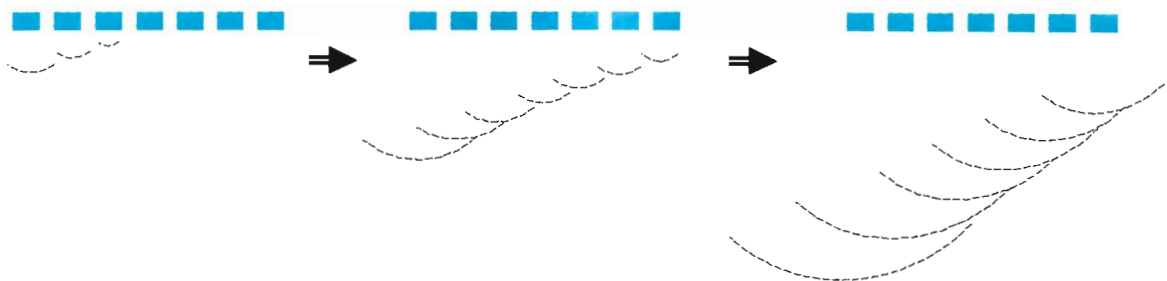


図 1 フェイズドアレイによる斜角の超音波ビームのイメージ

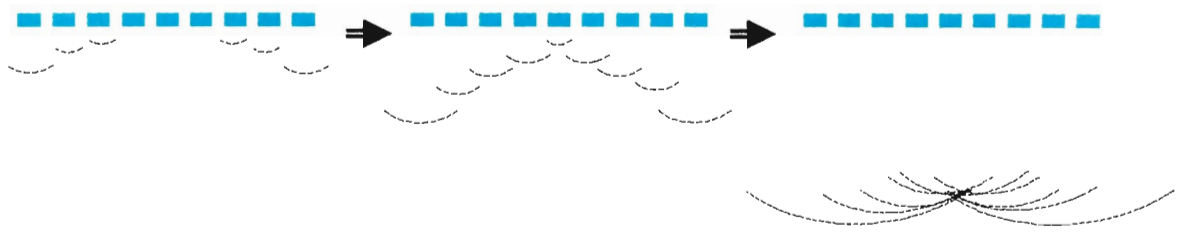


図2 フェイズドアレイによるフォーカスの超音波ビームのイメージ



図3 リニアアレイの超音波ビームのイメージ

3. フェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XS の概要

今回使用例を紹介する、フェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XS は従来型の超音波探傷器とフェイズドアレイ探傷器の機能を持ち、機能切り替えによりどちらでも使用できる。Phasor XS の主な仕様を表1に示す。

表 1 Phasor XSの主な仕様

仕様	一般探傷	フェイズドアレイ
パルサー	スパイクパルス	双頭スクエアパルス
パルス電圧	最大300V	±25～75V
パルス立ち上がり時間	15nsec以下	
ダンピング	50or1000Ω	
一探/2探切替	有り	一探触子法のみ
アンプ帯域	0.3～15MHz(-3dB)	0.3～10MHz(-3dB)
検波モード	全波・正半波・負半波	全波・正半波・負半波
アナログゲイン	0～110dB	0～40dB
デジタルゲイン		0～39.9dB
フィジカルプローブ		64ch
ヴァーチャルプローブ		16ch
パルス幅		40～500nsec
パルスディレイ		0～1024uSEC
受信ディレイ		0～1024uSEC
音速設定	1000から16000m/s	1000から16000m/s
測定範囲	12.5m(MAX)	1m(MAX)
表示ディレイ	10.3m(MAX)	1m(MAX)
TCG	15ポイント(6dB/usec)	15ポイント(6dB/usec)
ゲート	2ゲート	2ゲート
表示モード		リニア、セクタ
表示スコープ	Aスコープ	Aスコープ・Bスコープ
設定条件保存		内部メモリ・SDカード
レポート保存		SDカード
表示画面		VGA TFT480×640
表示言語	日本語・英語・フランス語・ドイツ語・スペイン語・中国語	
バッテリー動作時間	約6時間	
防塵・防滴	IP54	
寸法	171×282×159(H×W×D)	
重量	3.8Kg(バッテリー含む)	

4. Phasor XS の使用例

1) 従来型探傷器としての使用例

概要にも述べたが Phasor XS には従来型の超音波探傷器として使用できる。この場合の性能を示すデータの一例として、近距離分解能の測定を行った。深さ 1mm、 $\phi 0.5$ の平底穴を遅延材付き探触子で探傷した例を図 4 に示す。また、深さ 1.25mm、 $\phi 0.4$ の横穴を遅延材付き探触子で探傷した例を図 5 に示す。いずれも、この超音波探傷器が高分解能の性能を持つことを示しており、通常の超音波探傷器としても高性能であることを示している。

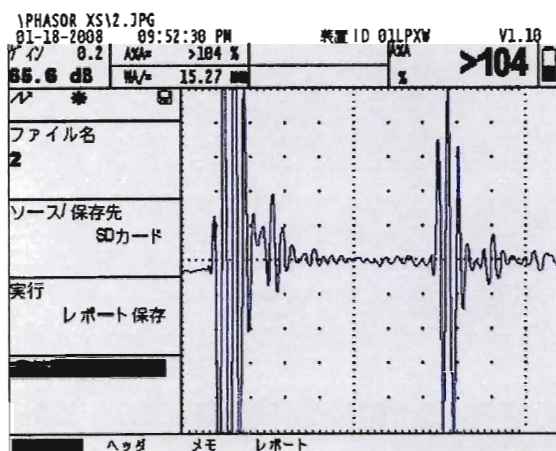


図 4 深さ 1mm、 $\phi 0.5$ mmFBH

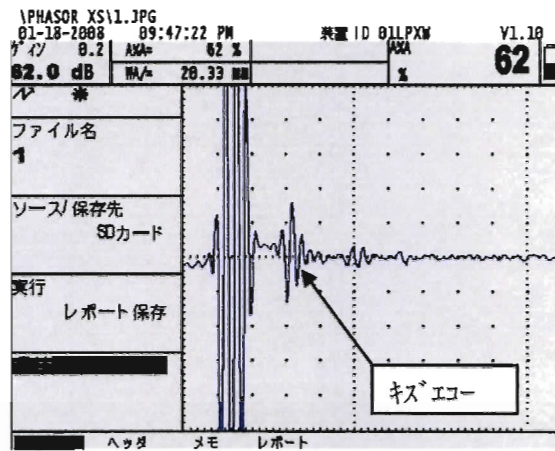


図 5 深さ 1.25mm、 $\phi 0.4$ mmSDH

2) フェイズドアレイ探傷器としての使用例

①斜角セクターキャン

斜角探傷のセクターキャンの手法を用い高さの測定を行った。模擬試験片を探傷したデータを図 6 に示す。この試験片にはスリット加工した人工きずがありノギスでの測定値を以下に示す。スリットの高さ：6.8mm、スリット幅：1.4mm、試験片の厚さは 25.5mm

これをビーム路程からの計算できず深さ 18.8mm であることから、きず深さ 6.7mm となった。

また、Phasor XS はフリーズ画面でライン状のカーソルを用い、反射源までの深さや反射源間の距離、指示長さ、エコー高さ等をデジタルで表示することが出来る。

この機能を使用して、きず高さを測定すると 6.79mm となった。

いずれも実測に近似測定値を示した。

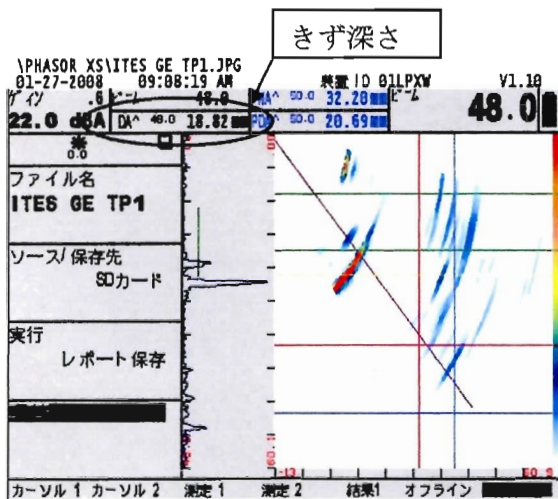


図 6-1 斜角探傷セクタスキャンデータ

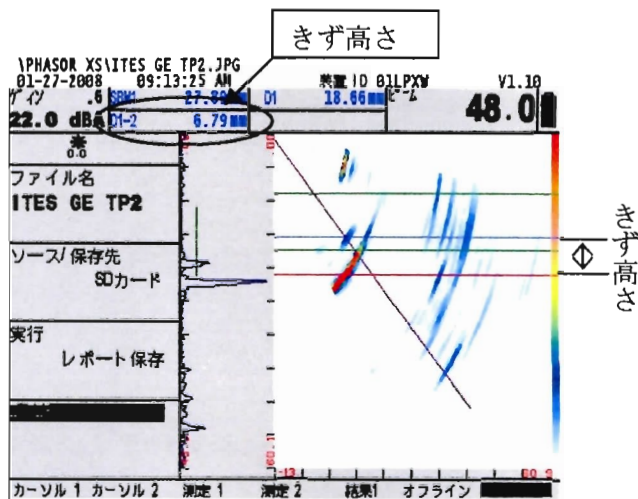


図 6-2 斜角探傷セクタスキャンデータ ラインカーソルツケイ測定

同様にきず高さ測定で深さ 1mm、 $\phi 0.5$ の人工きずを探傷した。試験片の厚さは 5mm であった。

ビーム路程からの計算できず深さ 1.0mm であることから、きず深さ 4.0mm となった。フリーズ画面でライン状のカーソルを用いた測定では、きず高さを測定すると 4.1mm となった。いずれも実測に近似の測定値を示した。

試験片を探傷したデータを図 7 に示す。

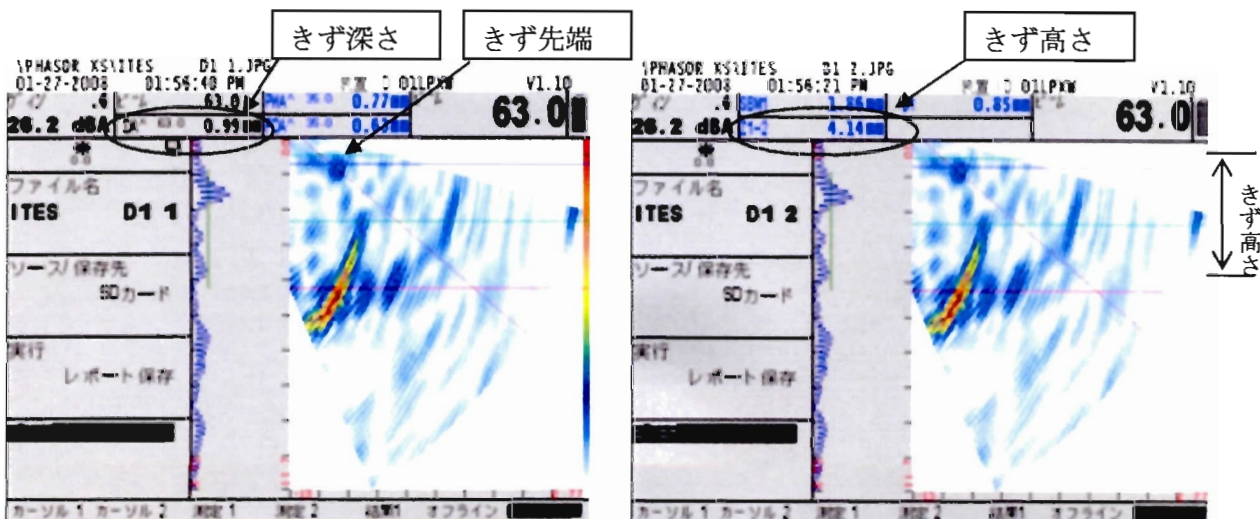


図 7 深さ 1mm、 $\phi 0.5$ の探傷データ

フェイズドアレイ探傷器で斜角のセクタスキャンを用いた場合は、底面から進展したきずは底面ときずのコーナーエコーときず先端の端部エコーが B スコープ内に観察でき、画像上からもきず高さの測定が可能で有ることが解る。

②リニアスキャンによるCFRP探傷例

リニアスキャンの手法を用い水ギャップ法でCFRPの探傷を試みた。

試験片は薄い部位で2.5mm、補強された厚い部位で5.3mm、立て部材6mmのT型の形状をしている。

試験片の写真を図8にデータを図9に示す。



図8CFRP試験片

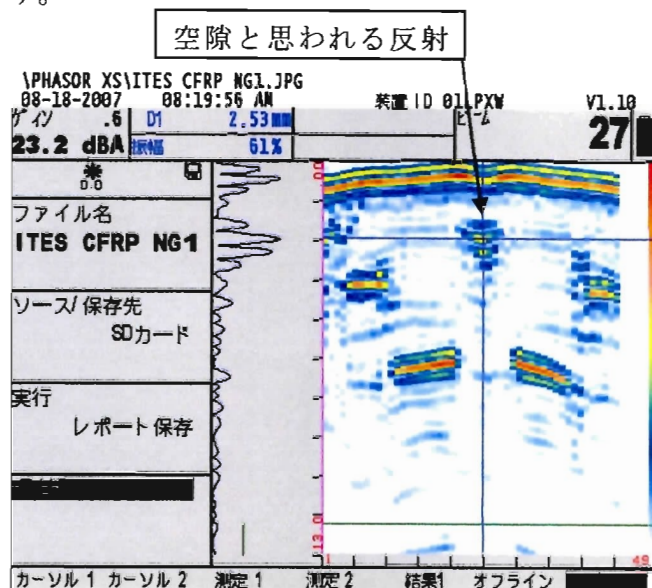


図9CFRP試験片の探傷データ

T型の交点部分に反射が観察出来空隙ではないかと推定できる。

③リニアスキャンによる厚さ測定例

底面の腐食を模擬した試験片を用いて、厚さ測定を試みた。

試験片は材質鋼。母材の厚さは10.5mmである。これに、腐食を模した加工を行っている。

試験片の写真を図10にデータを図11に示す。

底面の形状の違いが表現され、底面の腐食部で厚さ測定が可能であることが解る。



図10 厚さ測定試験

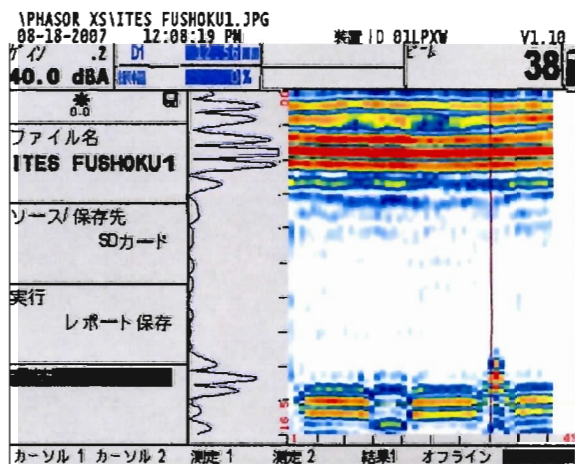


図11 厚さ測定試験片の探傷データ

5. まとめ

フェイズドアレイ搭載超音波探傷器 Phasor XS の使用例をここに紹介した。本装置はフェイズドアレイ探傷器としては機能を限定した部分は有るが使用例から示すとおりフェイズドアレイ探傷器として十分にその機能を発揮できる。バッテリー駆動タイプで重量も従来のデジタル探傷器並みであることから、フィールドにでて新たなアプリケーションが展開されていくものと考ええる。アレイ走査により探触子を走査せず B スコープがポータブル探傷器で得られるようになったことにより情報量が増えた超音波探傷器としてきずの評価に貢献できるものと考ええる。

6. 謝辞

本稿をまとめるに当たり、CFRPのテストピースを貸与いただいた、宇宙航空研究開発機構 複合材技術開発センター 松嶋正道先生並びにデモ機を貸与いただいたGEインスペクション・テクノロジーズ・ジャパン株式会社様に感謝申し上げます。

7. 参考資料

- 1) (社) 日本画像医療システム工業会：医療画像電子博物館
- 2) Krautkramer GmbH&Co(現 GE Inspection Technologies)：the echo32
- 3) Krautkramer GmbH&Co(現 GE Inspection Technologies)：the echo33

ラインフォーカス開口合成法を用いた 厚肉鋼材の超音波探傷法の検討

○松井 穰 飯塚 幸理

J F E 技研 (株)

概要

厚肉鋼材の深内部を探傷する方法について検討を行なった。ラインフォーカス探触子と開口合成を組み合わせることで、小さい開口でも大開口で探傷するのと等価な探傷ができ、より少ない水量で音響結合のための局部水浸部を安定させて音響結合できる見込みが得られた。

KEYWORDS : Ultrasonic flaw detection, Syntehtic aperture method, Line Focus

1. 緒言

厚肉鋼材の深内部の局部水浸部探傷法について検討を行なった。

従来、厚肉の部材に対してφ50mmのポイントフォーカス型探触子を用いて探傷した例が報告されている¹⁾。しかしφ50mmといった口径の大きな振動子を用いて、局部水浸法への気泡の混入といった不安定は要因を取り除くことが非常に困難となる。今回、水柱法を用いた厚肉鋼材の深内部探傷について、ラインフォーカス型探触子と開口合成法を組み合わせた方法を検討し、良好な結果が得られたので報告をする。

2. 超音波ビームと検出能

まず、局部水浸法を用いて厚肉鋼材の内部欠陥を探傷するために必要な仕様を検討するために、人工疵サンプルを用いて実験（全没水浸法で実験）を行なった。人工疵サンプルは深さ110mmの位置にφ10mm～φ3mmの平底孔を加工したものである。超音波の周波数は、2MHz以上だと減衰が激しかったため、1MHzとした。

Fig. 1に実験結果を示す。Fig. 1から振動子が大きくビーム幅が狭いほど、より小さい欠陥までS/N（信号対ノイズ比）良く検知できており、振動子の口径をφ50mm以上とすることで、欠陥の実態に合った空間分解法でφ3mmまでの検出力を持つことが分かる。従って、厚肉鋼材深内部を探傷するためには、φ50mm以上の大口径が必要であり、自動探傷装置において鋼材と音響結合するための水柱部の安定化が課題となる。

そこで、上記の課題を解決する方式として開口合成法の適用を検討した。

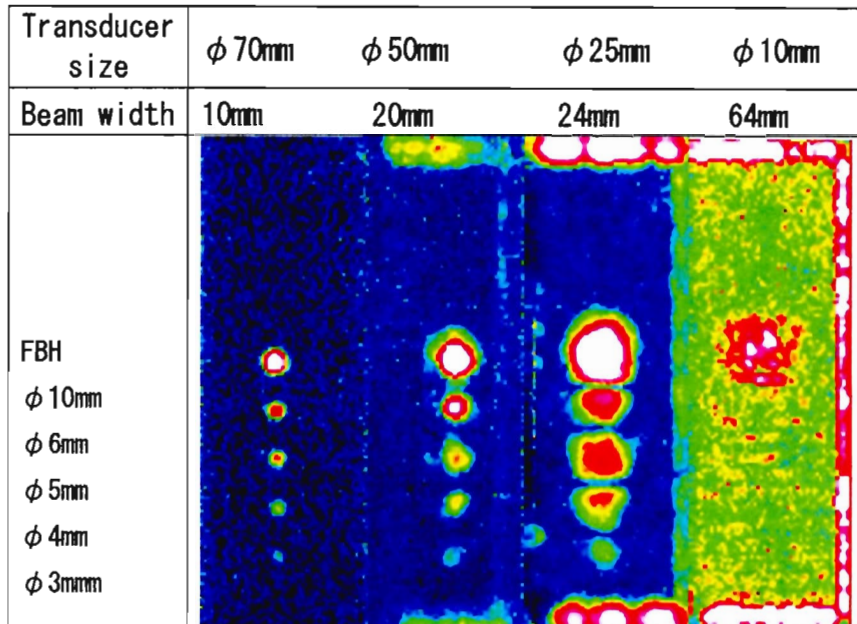


Fig.1 Relation between Transducer size and detection ability

2. ラインフォーカス開口合成法

Fig. 2に検討をおこなったラインフォーカス開口合成法を示す。局部水浸部を安定化するには、振動子の径を小さくすれば良い。しかし、振動子の径を小さくすると、超音波のビーム幅は大きくなってしまい欠陥像がぼやけてしまう。

そこで、開口合成法を適用することで振動子の径を小さくすることを試みた。開口合成法は、集束探触子とは別に十分広い指向角を持つ小さな探触子で走査して、走査範囲内で得られた反射信号を任意の深さ位置で集束するように合成して、振動子の径を見かけ上、大口径として高い分解能で欠陥像を得る技術である²⁾。

しかしXYスキャナーのような自動探傷装置を考慮したとき、開口合成法はそのスキャン方法や信号合成の計算時間が課題となる。

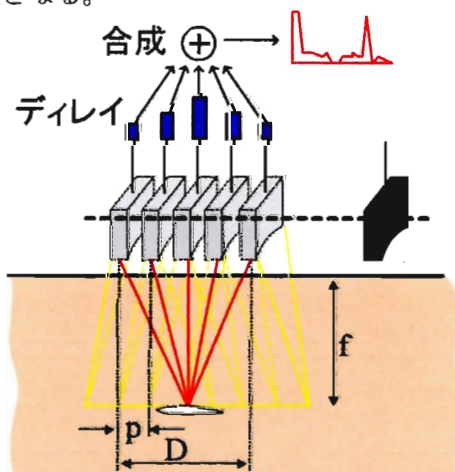


Fig.2 Line focus syntehtic aperture method

この課題に対して、Fig. 2に示すように長方形の探触子（ラインフォーカス型探触子）を用いて、スキャン軸方向（x軸方向）は広い指向角のビームで走査して開口合成計算を行い、ステップ軸方向（y軸）に対しては狭い指向角のビームで走査するようにし、計算量を半分にした。開口合成の具体的な計算手順は以下のとおり。

1) 予め式(1)の遅延時間を求めておく。

$$\Delta t'_i = \frac{\sqrt{[(i-n/2) \cdot p]^2 + f^2} - f}{C} \cdot 2 \quad (i=0 \sim n) \quad \dots (1)$$

$$\Delta t_i = \Delta t'_0 - \Delta t'_i \quad (i=0 \sim n)$$

ここで、 p は探傷ピッチ、 f はフォーカス深さ、 C は材料の音速、 $n = D/p$ 、 D は等価開口幅（開口合成計算する範囲）である。

2) 1つのラインフォーカス探触子を用いて、位置を変えながら探傷し、生波形 $x_j(t)$ ($j=0 \sim N$)を収集する。

3) 式(2)の開口合成計算を行なう。

$$y_j(t) = \sum_{i=0}^n x_{j-i-\frac{n}{2}}(t - \Delta t_i) \quad (j = n/2 \sim N - n/2) \quad \dots (2)$$

4) このようにして求めた出力波形 $y_j(t)$ で探傷評価を行なう。なお、ここで1)の遅延時間を求める際には、局部水浸法では水媒体や屈折を考慮すべきであるが、周波数が1MHzというように低い場合には、厳密にそれらを考慮して計算した場合と式(1)との差は波長の1/10以下であるため、式(1)でも十分である。

3. 実験結果

ラインフォーカス開口合成法を用いた探傷方法の効果を確認するための実験をおこなった。Table1に実験条件を示す。実験は音響結合を全て局部水浸法として実験を行なっている。30mm×10mmの開口面積はφ20mmに相当するため、生データの結果と同等であるが、Fig. 3から分かるように開口合成処理を行なうと肉厚中央部のS/Nが大幅に向上すると同時に空間分解能が向上することがわかった。

Table1 Outline of experiment

Sample	Steel brock, Thickness:140mm
Article flaw	flat-bottomed hole φ10, 6, 5, 4mm Depth 110mm
Transducer	1MHz composite size 30×10mm
Transducer for comparison	1MHz composite size φ20mm
Distance of water	40mm
Scan pitch	0.8mm

Fig. 4は開口合成演算の等価化開口幅Dと欠陥S/Nとの関係を整理した結果で、D=50mm程度が最大のS/Nを与えることが分かる。この値は振動子幅10mmで形成されるビーム幅でほぼ一致した。D=50mmのとき、振動子の大きさは見かけ上、30mm×50mmとなり、φ44mm面積に相当する。

図4から分かるように振動子径 $\phi 50\text{mm}$ で探傷した結果とほぼ同等のS/Nが得られていることから、ラインフォーカス開口合成法により、振動子面積を小さくしても大開口で探傷するのと同じ効果が得られるといえる。

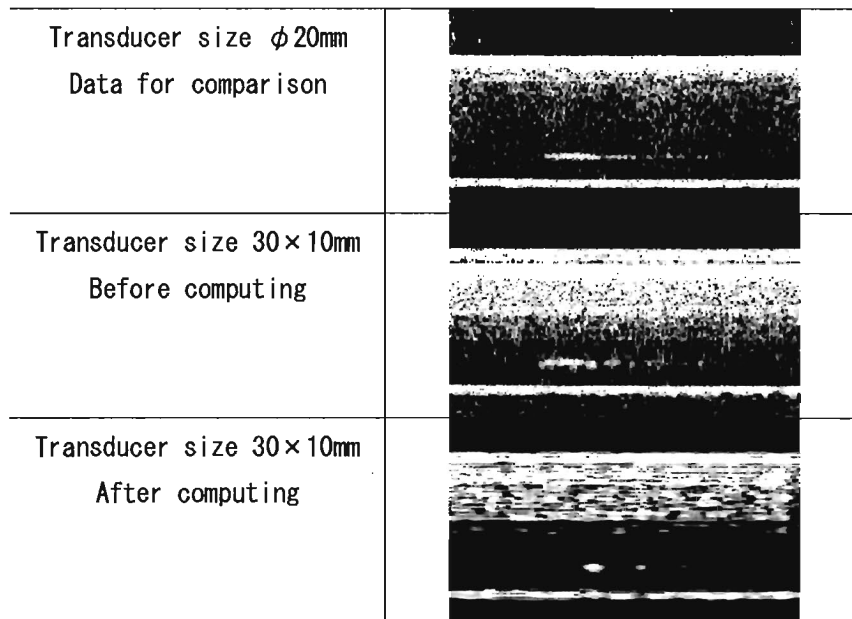


Fig. 3 Effect of Line focus syntehtic aperture method

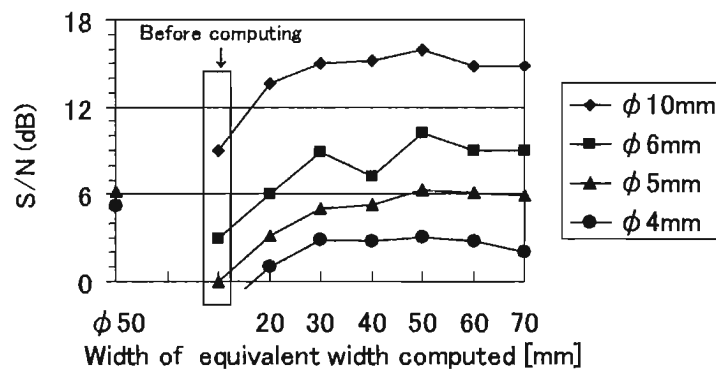


Fig4. Relation between S/N and equivalent width computed

4. 結言

厚肉鋼材深内部探傷では、低周波化のため大開口での探傷が必要であり、水柱が不安定になることや、大量の接触媒質水を用いることは設備設置上、場所やコストの点で制約となるといった問題があった。これに対して、ラインフォーカス型探触子と開口合成法を組み合わせることにより局部水浸を安定させるために振動子の大きさを小さくしても大口径探触子で探傷するのと等価な結果が得られることを確認した。

文献

- 1) 高田一：深い位置にある内部欠陥検出における高分解能化技術，材料とプロセス，Vol. 18(2005)-337
- 2) (社)日本非破壊検査協会編 新非破壊検査便覧 p. 321, 1982年

渦電流探傷 Θ プローブによる CFRP の欠陥検出について

Defect Detection in CFRP by Eddy Current Θ Probe

○三木 公輔*、小山 潔**、星川 洋**

Kousuke MIKI, Kiyoshi KOYAMA and Hiroshi HOSHIKAWA

*日本人学大学院 生産工学研究科、**日本人学 生産工学部

*Graduate School of Nihon University, **College of Industrial Technology, Nihon University

概 要

リフトオフ雑音が小さく SN 比の高い渦電流探傷 Θ プローブを用いて CFRP における内部欠陥の渦電流探傷試験を行った。実験の結果、明確な探傷信号を検出することが出来たが、CFRP を構成する CF シートの繊維方向及び積層方向によって探傷信号に現れる雑音の大きさと方向が異なることを確認した。

キーワード：渦電流探傷試験、CFRP、欠陥検出、 Θ プローブ

1. まえがき

炭素繊維強化複合材である CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)は比剛性かつ比強度に優れるという性質から、航空機をはじめ構造部材など様々な分野で適用されることが多くなっている。しかし、CFRP は外的衝撃等により積層間に内部剥離が起こり、その剥離部分において強度が著しく低下することが問題であり、その剥離部分の検出が必要である。現在、CFRP の検査手法として主に超音波試験や放射線透過試験が用いられている。

CFRP は導電性をもつことから、本来金属の検査に用いられる渦電流探傷試験の適用の可能性があると考える。渦電流探傷試験は非接触で高速度に省スペースで行えることから他の検査手法にない利点を持つ。しかし、金属のように導電性が大きく異方性のないものに比べ CFRP に渦電流探傷試験を適用するのは難しい。本研究ではリフトオフ雑音が小さく SN 比の高い渦電流探傷 Θ プローブを用いて CFRP の内部欠陥について渦電流探傷試験を試みた。

2. CFRP の構造と導電性

CFRP には炭素繊維をシート状にした CF シートの繊維の方向及び積層方法によって多種類のものがあるが、ここでは実験に用いたクロス繊維

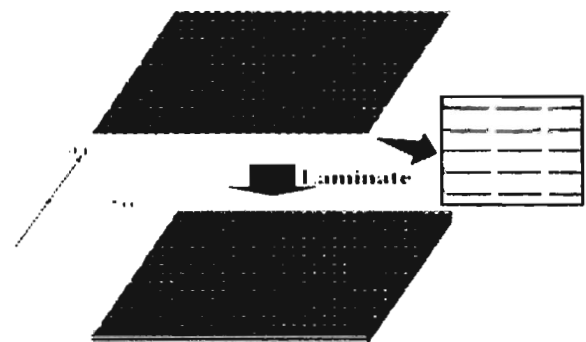


図1 クロス繊維 CFRP 試験体構造図 (CFRP I)

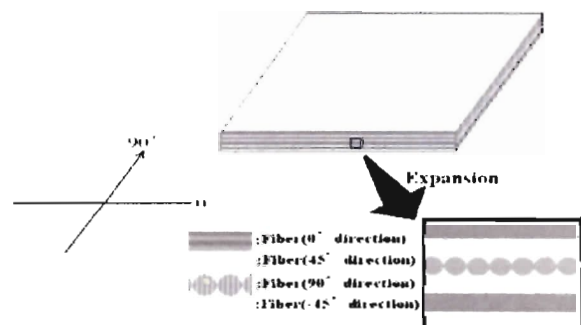


図2 疑似等方 CFRP 試験体構造図 (CFRP II)

CFRP(CFRP I), 疑似等方 CFRP(CFRP II), 一方向繊維 CFRP(CFRP III)の三種類の内、クロス繊維 CFRP, 疑似等方 CFRP の二種類の構造と導電性について述べる。

クロス繊維 CFRP の構造は図 1 のように 0° 方向と 90° 方向の繊維が編みこまれた CF シートを積層して作成されたものとなっている。同一 CF シート内では導電性があるが、積層された CF シート間では導電性が極めて小さくなっている。

疑似等方 CFRP の構造は 0° 方向だけに編まれた CF シートを $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ$ にそれぞれ傾けたものを順に交互に積層した $[(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ)4, \text{sym}]$ のものを図 2 に示した。同一 CF シート内では繊維方向にのみ導電性があるが、繊維方向に対して直交方向と積層された CF シート間では導電性が極めて小さい。

CFRP の構造は上記のようにになっているため金属に比べ導電性が小さく、主に金属の検査に用いられる渦電流探傷を適用するのは容易ではない。

3. CFRP の欠陥検出原理

渦電流探傷 Θ プロブの構造を図 3 に示す。渦電流探傷 Θ プロブは円形横置の励磁コイルと矩形縦置きを検出コイルから構成されている。励磁コイルは試験体に電磁誘導により渦電流を誘導する。検出コイルは欠陥により変化した渦電流で発生した磁束を検出し、信号を発生する。

渦電流は基本的には励磁コイルの巻線方向に流れるが、CFRP は金属と違って、繊維方向にのみ導電性を有するので誘導される渦電流は繊維方向による流れとなる。また、今回の実験に使用した内部剥離は CF シートの層間に正方形の絶縁体を挟んだものを使用したため、欠陥を正方形に表し、欠陥による渦電流の流れの変化を図 4 の(a)~(c)のように模擬的に示した。

CFRP に欠陥がない場合には励磁コイルの巻き線方向とほぼ同方向に渦電流が誘導され、検出コイルの巻線方向には流れず、信号は発生しない。渦電流探傷 Θ プロブでは原理的にはリフトオフ雑音は発生しない⁽¹⁾が、プローブを走査すると試験体を構成する繊維方向による雑音が発生する。

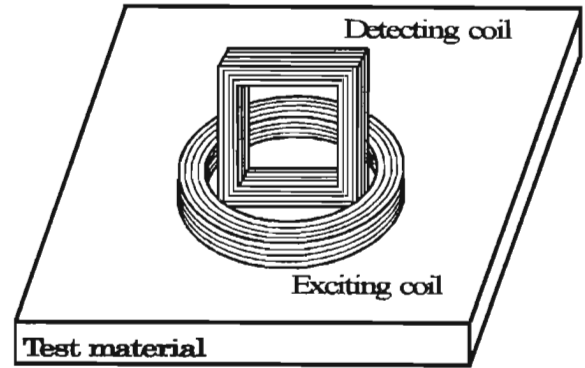


図 3 渦電流探傷 Θ プロブの構造

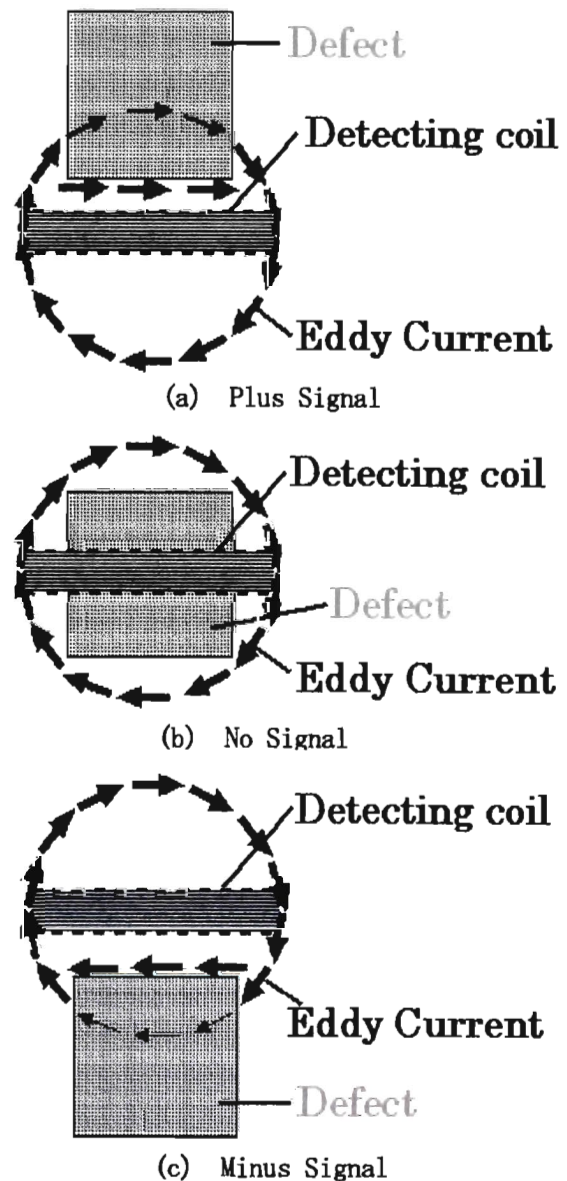


図 4 内部欠陥による渦電流の流れ変化

CFRP の欠陥がある場合の欠陥による渦電流の流れ変化を図 4 の(a)~(c)に示す。CFRP に欠陥がある場合には、誘導された渦電流が欠陥に沿って流れ、検出コイルの巻線方向と同方向に流れる渦電流を欠陥検出信号として発生する。検出コイルに誘導される渦電流は、欠陥の前後で逆向きとなるので得られる信号もまた、逆極性となる。従って、左から右に流れる電流を正の電流とした時、プローブが欠陥に近づいてきた時には図 4(a)のように正の信号 (Plus Signal) が得られ、逆に欠陥から遠ざかる時には、図 4(c)のように負の信号 (Minus Signal) が得られる。また、欠陥とプローブが重なった時には図 4(b)のように、信号が発生しない (No signal)。

4. 実験条件及び実験方法

実験に用いた渦電流探傷 Θ プローブの励磁コイルの寸法は外径 9mm 巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ であり、検出コイルの寸法は幅 7mm 高さ 7mm 巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ である。

試験体にはクロス繊維 CFRP、疑似等方 CFRP、一方向繊維 CFRP の三種類を用いた。クロス繊維 CFRP は、 0° と 90° 方向にクロスに編まれた 0.2mm 厚の CF シートを交互に 15 枚積層した厚さ 3mm で縦 160mm、横 160mm のものを用いた。疑似等方 CFRP [$(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ)4, \text{sym}$] は、 0° 方向だけに編まれた 0.2mm 厚の CF シートを、 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ$ に傾けたものを交互に 15 枚積層した厚さ 3mm で縦 160mm、横 160mm のものを用いた。一方向繊維 CFRP [$(0^\circ, 90^\circ)2, \text{sym}$] は、 0° 方向だけに編まれた CF シートを $0^\circ, 90^\circ$ に傾けたものを交互に 15 枚積層した厚さ 3mm で縦 160mm、横 160mm のものを用いた。また、今回の実験では CFRP の内部剥離の中でも完全に繊維の破断した状態を模擬し、表面から 1mm の位置の CF シート間に厚さ 1mm で 10mm 角の絶縁体をはさんだものを作成し内部剥離として用いた。

CFRP は金属に比べて導電率が小さいことから探傷信号が小さいと予想され、探傷信号を大きくするために、誘導される渦電流を大きくするため試験周波数を 2MHz に設定した。走査方向及び範囲については、内部欠陥を中心に x, y 方向共に $\pm 25 \text{mm}$ の範囲 0.5mm 間隔で渦電流探傷 Θ プローブを二次元に走査し測定を行った。

5. 実験結果

5.1 導電性の測定結果

励磁コイルのインピーダンスを、中空状態にある場合 AIR と CFRP ($0^\circ, 90^\circ$)、CFRP ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ$)、CFRP (cross)、BRASS(真鍮)の四種類についてプローブをそれぞれの板の上に置いた場合について探傷試験と同じ試験周波数を用いて行った。図 5 には、励磁コイル正規化インピーダンスとして示した。図中では、クロス繊維 CFRP を CFRP I、疑似等方 CFRP を CFRP II、一方向繊維 CFRP を CFRP III と示した。この図から CFRP は BRASS と比べて、導電性が非常に小さいことが読み取れる。また、CFRP の導電性は AIR に近く CFRP は金属に比べて誘導される渦電流が小さいことがわかる。さらに、繊維方向別による導電性についても CFRP I と CFRP II と CFRP III を見比べると、CFRP II と CFRP III は近い値であるが CFRP I とは値が大きく異なるこ

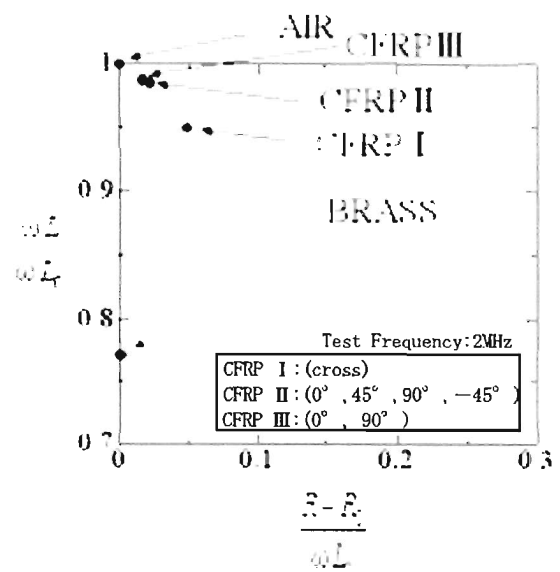


図 5 励磁コイル正規化インピーダンス

とがわかる。

5.2 クロス繊維 CFRP(CFRP I)の探傷信号

図6にクロス繊維 CFRP の剥離厚さ 1.0mm で 10mm 角である内部欠陥の検出信号を示した。渦電流探傷試験は交流で行っており、得られる信号は複素電圧となる。そこで、励磁電流と同位相のものを実数成分、励磁電流に対して 90° 進相のものを虚数成分として (a) には実数成分 (b)には虚数成分の信号に分けて示した。内部剥離においても白線で囲んだ部分に欠陥検出信号があらわれていることがわかる。

クロス繊維 CFRP の内部欠陥では探傷信号は明確なことがわかる。

5.3 疑似等方 CFRP(CFRP II)の探傷信号

図7に疑似等方 CFRP の剥離厚さ 1.0mm で 10mm 角である内部欠陥の検出信号を示した。(a) には実数成分 (b)には虚数成分の信号を示した。虚数成分の白線で囲んだ部分に小さい欠陥検出信号が現れていることがわかる。

しかし、疑似等方 CFRP の内部欠陥では、信号の振幅は異なるが雑音が多いため欠陥検出信号を見分けるのが困難であることがわかる。これは、CFRP の繊維方向の導電性に比べて、積層方向の導電性の方が小さいためと考えられる。

5.4 一方向繊維 CFRP(CFRP III)の探傷信号

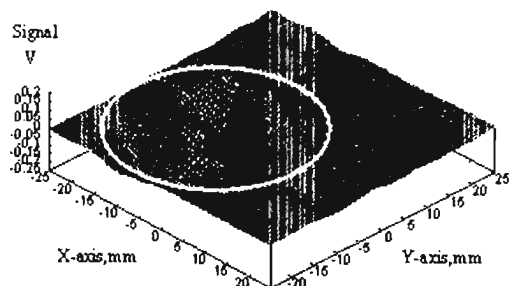
今回の実験では一方向繊維 CFRP $[(0^\circ, 90^\circ)_{2,\text{sym}}]$ についても探傷実験を行ったが、探傷信号を見分けるのが非常に困難であった。

6. まとめ

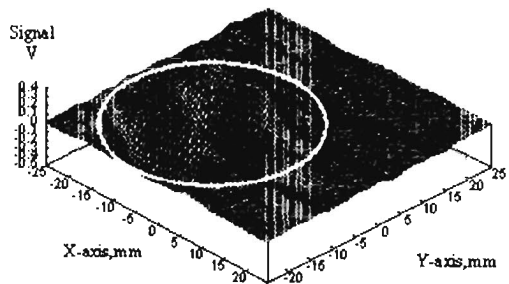
本研究では、渦電流探傷 Θ プローブを用いてクロス繊維 CFRP、疑似等方 CFRP、一方向繊維 CFRP の三種類の試験体に対する内部欠陥の検出を試みた。実験の結果、クロス繊維 CFRP の内部欠陥において探傷信号は明確であった。しかし、疑似等方 CFRP と一方向繊維 CFRP の内部欠陥においては、雑音が大きく探傷信号を見分けるのが容易ではないことがわかった。本実験から電流が流れるための閉回路が繊維方向によって形成しにくくなり雑音の原因となっていることがわかった。

今後は探傷信号を識別する信号処理について検討が必要である。また、実験条件についても、試験周波数や、プローブの種類について検討が必要である。

参考文献 (1) 星川洋、小山潔、柄澤英之:リフトオフ雑音が発生しない渦電流探傷用新型上置プローブに関する研究、非破壊検査、第 50 巻 11 号 pp. 736-742 (2001)

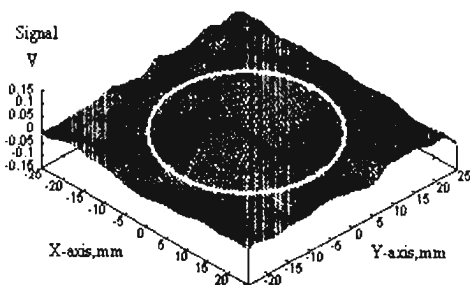


(a) In-phase component

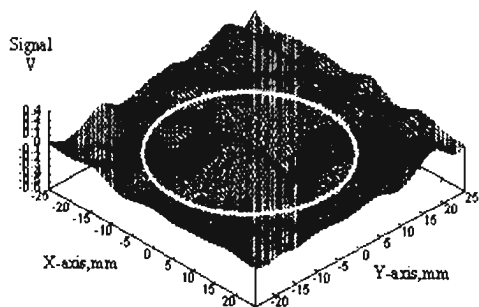


(b) Quadrature component

図6 クロス繊維 CFRP の探傷信号
(内部欠陥)



(a) In-phase component



(b) Quadrature component

図7 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ)$ 繊維 CFRP の探傷信号
(内部欠陥)

超音波による CFRP の欠陥評価

The defect evaluation of CFRP by ultrasonic wave

長瀬 尚樹
NAOKI NAGASE

西川 康博
YASUHIRO NISHIKAWA

福島 清
KIYOSHI FUKUSHIMA

千葉県産業支援技術研究所
Chiba Industrial Technology Research Institute

概 要

CFRP は軽量で高強度・高剛性であることから、様々な分野への適用が進んでいる。本研究では CFRP 積層板（強化材:CF クロス, マトリックス:エポキシ樹脂, 積層数:10ply, 板厚:1.9mm）の各層間に剥離を模擬した欠陥を入れた試験体を作成し、水浸式パルス反射法により超音波探傷を実施した。本稿では周波数やフォーカス距離の異なる探触子により得られた A スコープ（波形表示）を用いて、観察表面近傍にある欠陥の距離分解能の比較や厚み方向における減衰の比較を行った結果について紹介する。

KEYWORDS : Non-destructive inspection, CFRP, Ultrasonic wave

1. 緒 言

CFRP は軽量で高強度・高剛性であることから、主として航空宇宙用の構造材料として用いられてきたが、近年、汎用機器への適用も進んでいる。特に燃費の節減等の低環境負荷用途として省エネ技術への活用が期待されている。CFRP は面外強度には優れているものの面内強度、特に衝撃による剥離により圧縮強度が低下する。成形中に発生するボイドや使用中に生じる剥離や亀裂などの欠陥を検出することは健全性を確保するのに重要である。

筆者の経験では、CFRP に衝撃試験を行った試験片を水浸式パルス反射法で超音波探傷を行うと、試験片に合った適当な探触子の選定やどの層から現われている波形であるかの判断が困難であった。本研究では、板厚 1.9mm の CFRP 積層板（強化材:CF クロス, マトリックス:エポキシ樹脂）における各層間に剥離を模擬した人工欠陥入り積層板を作製し、水浸式パルス反射法により超音波探傷を行った。A スコープ（波形表示）により (1) 周波数やフォーカス距離の異なる探触子による距離分解能の比較 (2) 各層間の厚み方向における減衰の状況について調べた。

2. 実験方法

2・1 人工欠陥入り CFRP 試験片の作製

CF（炭素繊維）クロスプリプレグ（三菱レイヨン社製 TR3110-331GMPa）10 枚をステンレス製の型に設置して卓上型ホットプレス機を用いて 2MPa の圧力をかけながら 130℃ で 2 時間保持して成形し、圧力を保持したまま自然冷却した後取り出した。人工欠陥として、成形前に積層したプリプレグ 1～10 の各層間に厚み 0.04mm, 20mm×20mm のアルミテープを厚み方向に重ならないように入れた。また、成形の際には CF クロス内の空気を抜くために積層した CF プリプレグをバキュームバック内に入れて真空引きした状態で行った。成形した積層板は幅 119mm×長さ 159mm, 板厚は 1.9mm である。

Fig.1 に成形した積層板を図示する。

2・2 人工欠陥入り試験片の超音波探傷

超音波探傷は、超音波映像装置（日立建機(株)製 AT7500）を用いて水浸式パルス反射法で行った。使用した探触子の周波数及びフォーカス距離（水中焦点距離）は5MHz-40mmfocus, 10MHz-40mmfocus, 15MHz-25mmfocus, 20MHz-20mmfocus の4種類（Table.1）である。

探触子から試験体までの水距離は表面エコー（Sエコー）が最大となる位置とした。探傷は各層間に入れた人工欠陥位置からの波形（Fエコー）を観察した。また、各層間の人工欠陥において、健全部のSエコーに対する減衰を確認するため、各層のFエコーの波形強度をモニタ上の目盛線を基準にして、Sエコーと比較して減衰を調べた。

3. 人工欠陥入り試験片の超音波探傷結果及び考察

(1) 各周波数による波長

今回使用したCFRP積層板は板厚が1.9mm、積層数10Plyのため1plyあたりの厚みは約0.2mm程度である。積層した表面エコーと裏面エコーの往復伝搬時間を計測したところ $1.25\mu s$ であった。測定した往復伝搬時間 t と板厚 h から成形したCFRP積層板の音速 c は式 $c=h/t$ より $3040m/s$ と計算できる。また、各周波数 f ごとの波長 λ は式 $c=f\lambda$ より計算するとTable.2のように表すことができる。

(2) 探触子による波形の比較

Fig.2に探傷の概要図を示す。観察する波形をFig.3:1-2層間のFエコー(モニタ上90%)、Fig.4:6-7層間のFエコー(モニタ上45%)、Fig.5:底面エコー(モニタ上45%)として、それぞれモニタ上の基準線にエコー感度を調整して撮影した波形写真を示す。図に横軸1/2と記した波形写真では装置によるもので横軸のスケールが他の写真と比較して1/2となっている。

Fig.3に示すように5MHz及び10MHzでは、Sエコーに1-2ply間のFエコーが含まれた。Table.1より5MHzでは理論上の波長が0.6mmで、10MHzの波長は0.3mmで表面から1-2ply間までの距離約0.2mmより長くSエコーとFエコーが分離できないためである。一方、15MHz及び25MHzでは波長が短いため表面エコーときずエコーが分離していることがわかる。

Fig.4の6-7層間では、5MHz,10MHzでは表面エコー、Fエコー、底面エコーがはっきりと確認できるが、15MHz及び25MHzでは底面エコーを確認することが難しく表面近傍からのノイズと思われるエコーが大きくなっている。高い周波数で深い位置の欠陥を検出しようとして音圧レベルを上げると界面からの散乱エコーが大きくなるためと考えられる。

Table.2 Frequency and wavelength

周波数(MHz)	波長(mm)
5	0.608
10	0.304
15	0.203
25	0.122

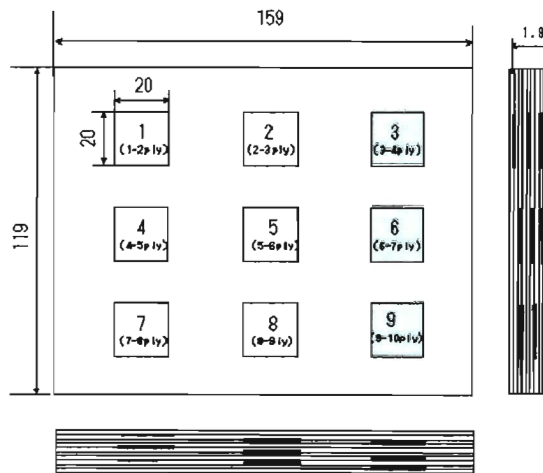


Fig.1 Test piece of the CFRP laminate.

Table.1 Frequency and focus distance of probe

周波数 (MHz)	フォーカス距離 (mm)
5	40
10	40
15	25
25	20

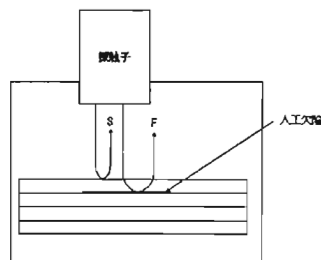


Fig.2 Flaw detection situation

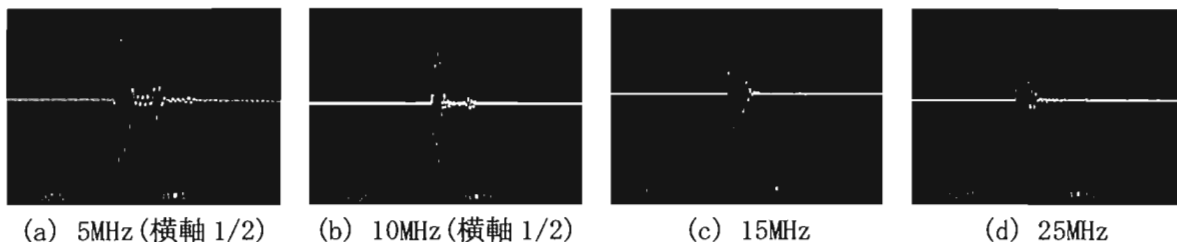


Fig.3 Ultrasonic waveform in the 1-2 intercalation

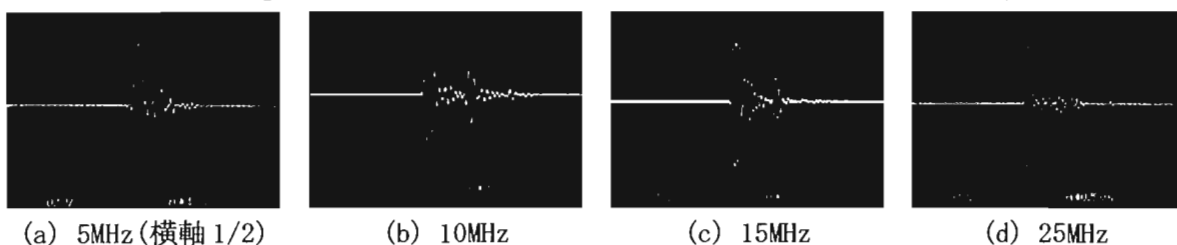


Fig.4 Ultrasonic waveform in the 6-7 intercalation

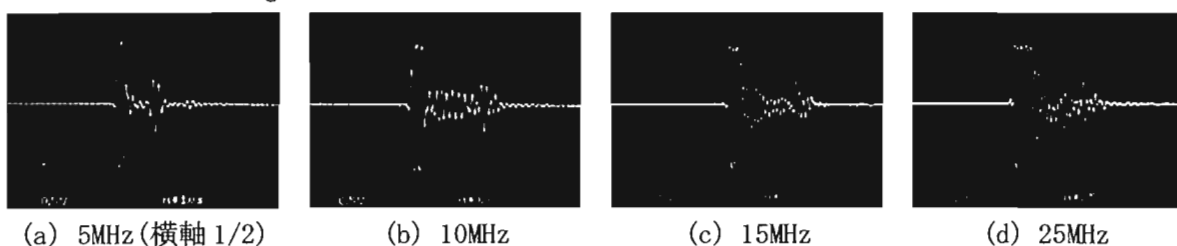


Fig.5 Ultrasonic waveform of bottom face

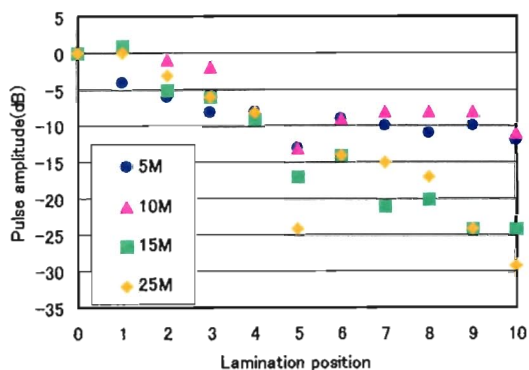


Fig.6 Pulse amplitude in the laminate



Fig.7 Ultrasonic testing image(10MHz)

Fig. 5 の底面エコーでは、5MHz の S/N 比が高い。今回で使用した積層板より板厚の厚い積層板では、5 MHz が有利になると考えられる。

(3) 探触子による減衰の比較

Fig. 6 に表面エコーと比較した各層間位置における F エコーをプロットしたグラフを示す。層間位置 1~4 までは各探触子とも同じような減衰の傾向を示した。層間位置 4 ではどの探触子でも 9dB 程度減衰することがわかる。層間位置 5 ではどの探触子でも大きく減衰しているが、これは中央部にボイドが多く含まれたためであると考えられる。詳細は後述する。層間位置 6 以降になると、15 及び 20 MHz の探触子では、5MHz 及び 10MHz と比較して F エコーの減衰が大きくなる。この理由は(2)に示したとおり高い周波数では散乱や内部摩擦による減衰が大きくなるためと考えられる。また、15MHz 及び 25MHz の底面エコーは表面エコーと比べて 25dB 以上減衰することがわかった。本来、周波数による指向性や減衰の比較を行う場合は比較する場合は円形振動子で同じ探触子径を用いるのが通常であるが、

今回、用いた探触子はフォーカスタイプであるため、周波数による単純な比較はできない。しかし、実際にCFRPの探傷を行う際の参考データとして記載した。

10MHzで探傷した画像をFig.7に示す。中央部付近にはボイドが多く含まれているが、先に記した層間位置5においてどの探触子でも大きく減衰したのはこのためであると考えられる。これらのボイドは成形の際にポンプで真空引きを行う時間が短かく、中央部の空気が抜けなかったために発生したものと考えられる。

10MHzの探触子を用いれば板厚方向の層間剥離についてはゲート位置の設定により、全体的に探傷できることが可能であることがわかった。しかし、層間位置9付近では減衰により健全部とのコントラストの小さい欠陥画像となる。

4. 結言

今回、CFRP積層板(板厚:1.9mm)の各層にアルミテープを入れた欠陥入り試験体を作製し、水浸式パルス反射法によりFエコーの観察を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 15MHz及び25MHzの探触子を用いれば、表面エコーと浅い層間位置1のFエコーを分離して検出することが可能で、減衰を考慮しても層間位置1~4では、高感度な探傷が可能となる。
- (2) 本研究で用いた試験体で10MHz探触子を用いれば、板厚の各層にある欠陥を探傷できることがわかった。

謝辞

本研究にあたっては、(独)宇宙航空研究開発機構の松嶋主任研究員より衝撃試験片を貸与していただき、また、実験の際には貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松嶋正道：先進材料の非破壊評価 繊維強化複合材の非破壊評価，日本非破壊検査協会 Vol.49, No.9, Page588-591
- 2) 超音波探傷試験，日本非破壊検査協会
- 3) 邊 吾一，石川隆司：先進複合材料工学，培風館

CFRP構造の非破壊検査法

Non-Destructive Test Method of CFRP Structure

宇宙航空研究開発機構 複合材技術開発センター 松嶋 正道

JAXA ACF MASAMICHI MATSUSHIMA

KEYWORDS: 複合材、CFRP, 超音波、X線透過、サーモグラフィー

1. はじめに

新鋭旅客機B-787は、燃料消費効率を高める目的でCFRP構造が主翼、尾翼、胴体などに適用されている。構造様式は一体成型で作られており、ノンファスナー様式となっているので、ファスナー孔周りからのクラックが発生しない設計となっている。A380は主翼中央翼（キャリースルー）や後部圧力隔壁などに適用されている。どちらもノンメンテナンスを掲げている。しかし、運用中の非破壊検査は必要と考えており、従来の金属材料構造に適用されていた検査法とは異なった、各種検査法が考えられている。

2. Carbon Fiber Reinforced Plastic

複合材料で一般的に良く知られている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）はポリアクリロニトリル原糸を高温で引張りながら焼成した炭素繊維を熱硬化エポキシ樹脂で成型している。炭素繊維1本の直径は7 μ 程度の微細なものであり、これを数千から万の束にしている（6000本：6K、12000本：12Kと表示されている）。この強化繊維は、一方向に引きそろえたものにエポキシ樹脂を含浸させて半乾燥状態にしたプリプレグシート（UD）で製品化されている。また、織物形状で同様に含浸したクロスシート（Cloth）も製品化されている。それぞれの厚みは（UD：1.2、Cloth：2.5mm）程度であり、このシートを任意の角度に積層を重ねて温度と圧力を加えてCFRPを成型する。航空機や宇宙構造部材は、型に合わせて積層し脱泡と型なじみをよくするためにシートでくるみ真空に引いた状態で、大型の成型釜（オートクレーブ）を用いて一体成型を行っている。従来の金属構造とCFRP一体成型部品を図1に示した。



図1 金属構造とCFRP補強平板の表裏画像（CFRPはノンファスナー）

繊維強化複合材料は、繊維方向は強くて剛性もあるが、直角方向は強度と剛性も低い性質をもっている。この性質を利用して最適設計を行うことができる、つまり設計段階で主応力や境界条件が明確であれば、繊維方向を主応力に合わせることで効率の良い構造設計をすることができる。圧力容器であれば、長手方向に亀裂が発生する事例が多くみられるので周方向に繊維を巻くと、補強効果が得られ、膜構造で内圧を受ける場合は $\pm 45^\circ$ に積層すると補強効果が得られる。航空機の翼は、大きな曲げ荷重をうけるので上面は圧縮を受け、下面は引張りを受ける。そこで図1に示した、T型補強材料ウェブの長手方向にUD一方向繊維を多く積層して、曲げ変形を補強する。また、表面材スキンに $\pm 45^\circ$ 方向繊維を積層して、座屈を補強している。このように、金属材料とは異なる構造様式をとっているために、非破壊評価も一考を要する。

3. 各種非破壊評価

非破壊検査は、損傷形態によって検査法を選択する必要がある。例えば、クラックのように幅が微小で、長さ方向に亀裂があるような場合には軟X線やX線透過法が適用されている。X線用フィルムの粒子が微細であり、0.1mm程度までの探傷が可能である。もっと微細な亀裂(5ミクロン程度)は、軟X線マイクロフォーカスCTを用いて探傷をおこなっている。図2に軟X線透過画像と図3にマイクロフォーカスCT画像を示した。CFRPは、医療用X線CTのベット表面材に適用されており、X線の透過率が非常に良い特性をもっているため、軟X線を用いて探傷をおこなっている。また、造影剤を試験片端面から浸透させて、図2の探傷結果を得ている、長手方向に引張り荷重を加えて、90度方向のクラック発生と左右両端からのデラミネーション(はく離)が確認できる。図3は三次元織物CFRPの探傷結果であり、繊維が斜め方向と横方向の繊維を確認することができる。圧縮荷重を加えて、 45° 方向にクラックが発生しているのが確認できる。



図2 CFRP引張試験片の軟X線画像

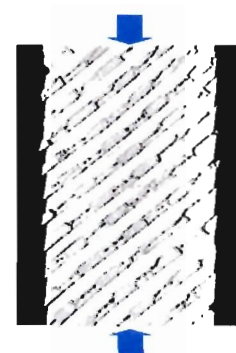


図3 三次元CFRPせん断画像

CFRPは、脆性のために衝撃荷重を受けると板厚方向にはく離が起きてしまい、底面に向かって螺旋階段のようにはく離が広がることが知られており、超音波探傷を用いてはく離を定量的に求める方法を用いている。図4に衝撃損傷によるはく離進展を超音波探傷で用いた結果を示した。表面から、積層角度の順番に -45° 、 0° 、 45° 、 90° とはく離が広がってゆくのの確認できる。また、反射法をもちいているので、はく離の板厚方向の位置も確認することができる。CFRP板厚方向の音速が $2700\sim 3000\text{m/秒}$ 程度なので、プローブ周波数が 10MHz であれば、最小探傷サイズは 0.27 から 0.3mm である。はく離の境界線をはっきり画像化するために、 $20\sim 25\text{mm}$ フォーカスタイプを用いている。図5に 2MHz のプローブを用いた画像を示す。両図を比較すると周波数が低い 2MHz プローブの画像がぼけているのが確認できる。

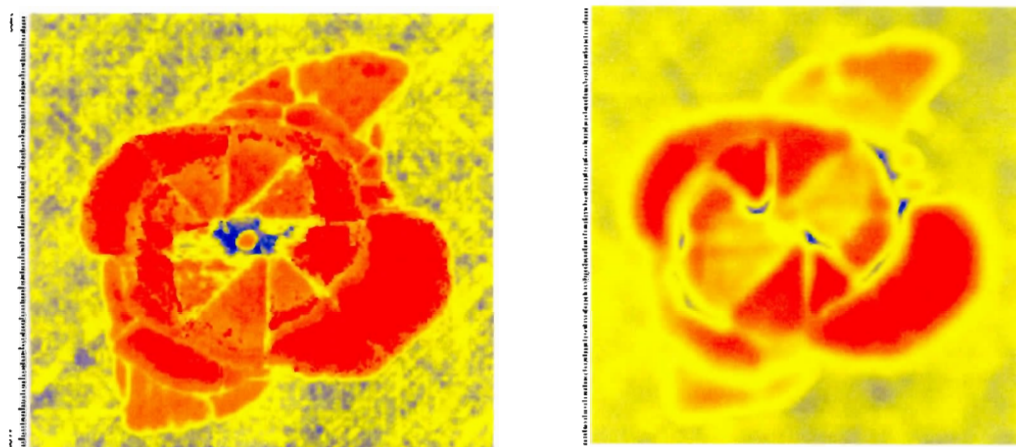


図4 CFRP平板衝撃損傷画像(10MHz) 図5 CFRP平板衝撃損傷画像(2MHz)

CFRP試験片サイズであれば、軟X線透過や超音波探傷も簡便に行えるが、構造体のように大きなサイズの場合には、大型ロボット超音波探傷機などを用いて探傷を行っている。図6にCFRP構造体試体の探傷現場を示した。図中の供試体はCFRP補強平板(翼表面部)であり、局部水浸反射法を適用して探傷を行っている。

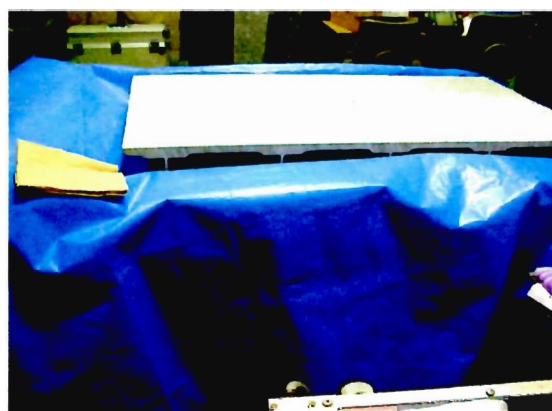
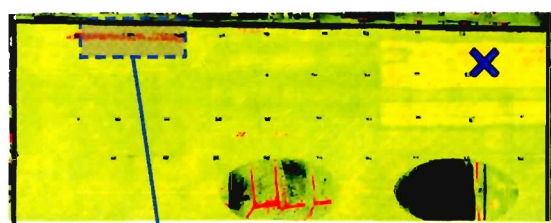


図6 CFRP大型補強平板供試体

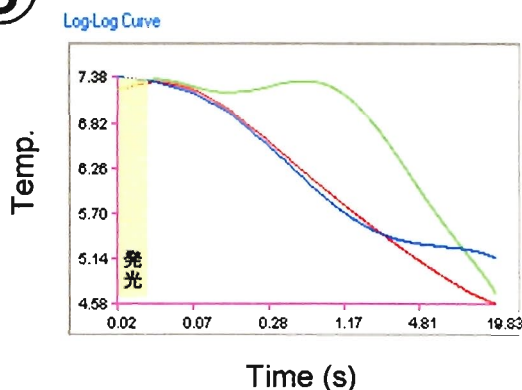
もっと、簡便に構造体全体の非破壊評価を行う時には、パルスサーモグラフィーを用いて探傷をおこなっている。サーモカメラを中央にセットしたボックスタイプでストロボを点灯して、表面を微量過熱して、表面から裏面に熱伝導の様子を時系列に測定を行って、温度分布をリアルタイムで計測をおこなっている。はく離部があると、熱伝導が低くなるために温度分布に差が生じる。しかし、この方法は表面近傍のはく離は確認できるが、深い部分のはく離の探傷は難しい特長がある。利点としては、強度試験や疲労試験中に試験片を試験機から外さないで、探傷ができる。探傷サイズは4mm程度以上であるが、構造全体の評価や圧縮実験時のバックリング観察には、有効である。図7に観察結果を示す。CFRP補強平板の補強材の未接着部と健全部が確認できる、図中の右側の線図は、表面の温度変化と時系列を示しており、一番上の線が、未接着部の温度変化を表しており、熱伝導が悪い結果を表している。

パルスサーモグラフィー探傷結果

③



コーナーパッドアップ部の未含浸



未含浸部は表層(ツール面)近傍のみで、発生

図7 パルスサーモグラフィー探傷結果 (右側; 探傷画像、左側; 温度変化と時間)

4. むすび

新型大型旅客機B-787のCFRP構造が多く適用されており、炭素繊維は日本メーカーを用いており、主翼、尾翼、機体も重工メーカーが製作しており、最初の大型注文もエアラインが予定している。製造時の非破壊評価や運行中の機体検査法として超音波探傷が注目されており、より簡便、安価で高性能の探傷装置の期待されている。また、超音波プローブもマトリクスやアレイタイプも開発されており、空中超音波探傷装置も開発されている。

特 別 講 演

建設業のMOT (Management of Technology)

NPO 国際建設技術情報研究所

理事長 藤盛 紀明

(清水建設(株) 技術研究所 顧問)

建設業のMOT

NPO 国際建設技術情報研究所 理事長
藤盛 紀明

2008年2月21日

建設業の技術戦略

1. 建設業のMOT、知識と教育システム
2. 長寿命建設業の歴史に学ぶ企業戦略、企業風土と技術開発
3. 建設技術史から企業戦略を語る、何が建設技術を進歩させたか
4. 建設業の研究開発管理論、セミナーに研究は必要か
5. 建設業の知的財産戦略、知識戦略の基礎知識
6. 建造物の安全安心技術、地震耐日本の建設技術の基本を知る
7. 生産業と機械化・自動化・ロボット化、テクノロジフル・マーケットフル
8. 建設業と環境、情報、エネルギー、戦略立案・戦略性・実用性とは
9. 企業大学技術戦略と建設業の技術戦略、ロビー活動のあり方
10. 新しい空間と材料開発、産業・商社における材料の持つ意味
11. 循環型社会と建設業、新ビジネス立ち上げの難しさ
12. 都市再生の技術戦略、大規模プロジェクトのプロセス学ぶ
13. 建設業の海外戦略と技術開発、海外技術移転との準備方法
14. 日本人・日本建築・日本の後から未来を語る、時には本質を考えよう
15. 夢の実現に向けて、MOTの基本

キャリアパスとMOT

- 一般技術者・R&D技術者
- プロジェクトリーダー・現場所長
- 課長・工事長・主任研究員
- 部署・部門リーダー
- 経営者・CIO

(レベルによって講義内容に変化)

MOTとは

技術を経営に活かすための
戦略の立案・推進

- 経営戦略・技術戦略
- 技術戦略・個別戦略
- 技術商品開発・事業育成
- ベンチャー起業・企業発展

(上記を推進できる
仕組みづくり・人材育成)

実践的なMOT

非論理の世界で生き残る術

商品化・事業化・売り方

具体的事例・自らの認識

実践的な組織論

体験に基づくコミュニケーション論

直観力・想像力・創造力育成

人間力・カリスマ性の拡大

ダーウィンの海を渡るためのMOT

- 業界で異なる
- 企業で異なる
- 事業分野で異なる
- 時間で変わる
- 個人で変わる

研究
開発

製品化
ビジネス展開

皆さん個人個人の力量が大切

MOTスコープの変遷

1. 技術開発管理 Managing R&D
2. 技術移転 Technology Transfer
3. 技術革新 Technological Innovation
4. 技術戦略 Technology Strategy
5. 技術による事業育成 Business Incubation
6. ベンチャー起業育成 Corporate Venturing

私のMOT関連体験

1980年代後半

- MIT スローンスクール
- ハーバード大 AMP
- SRI バテル ADL
- オライオンベンチャー

日本のMOT

米国流のMOTと同じで良いか？

企業売買リターン確保ONLY
日本社会に馴染むか？

受注産業のMOTのあり方は？
建設業のMOTのあり方は？

私の仮説

建設(受注)産業のMOTはMOH (Human Relations)

必要なのは「人間力」
夢を実現する情熱

2. 長寿命建設業の歴史から学ぶ企業戦略

企業風土と技術開発

建設会社の寿命

会社名	創業年	継続年数
金剛組(高松建設に吸収)	578年	1429年
清水建設	1804年	203年
鹿島	1840年	167年
大林組	1892年	115年
大成建設	1917年	90年
竹中工務店	1610年	397年

2 長寿命建設業の歴史に学ぶ企業戦略

経営戦略は各社の風土に左右される

清水建設
(大工業一本)
普通のコアコンピタンス

VS

鹿島建設
(自在な経営戦略)
変幻自在な
コアコンピタンス

R&D戦略は企業風土に左右される

企業との対価による実理融合MOT戦略開発
近畿工業大学附属大学 工学マネジメント研究科

総合建設業長寿命の要因

信用第一・お客様第一
品質第一
社会変革への機敏な対応
新技術への挑戦
絶えざる経営革新
社会・産業への貢献
優れた番頭

Copyright 2005 Shimizu Corporation. All Rights Reserved

3 建設の技術史から未来の技術戦略を探る

日本人の原点と技術

歴史的に見て
何が建設技術を進歩させたか？

技術進歩は建設産業に
どのような影響を与えてきたか？

地球と人類の未来のために
建設業は何をなすべきか？

建設の技術史から未来の技術戦略を探る

自然との共生

新しい文化の流入と建設技術

技術を革新する巨大プロジェクト

大災害への挑戦が技術を産む

世界・アジアの流れの中で

日本の伝統的自然観と未来技術

企業との対価による実理融合MOT戦略開発
近畿工業大学附属大学 工学マネジメント研究科

日本古代建築様式は
約4世紀毎に変化
(菊竹清訓)




Copyright 2005 Shimizu Corporation. All Rights Reserved

兵庫県南部地震 1995

中間層破壊



大災害が技術を
進歩させる



4. 建設業の研究開発管理論

企業の研究所は何のためにあるか

今日の戦いに勝つ
明日の戦いにも勝つ
未来の準備をする
海外マーケットにも対応する

企業ブランド向上の原点
企業の社会的貢献を果たす

R&D・技術の役割



5. 建設業の特許戦略

基本的な特許知識は不可欠

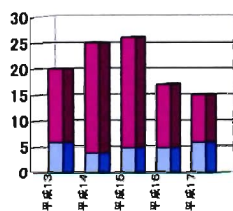
建設業・建設技術と特許
同業大手の特許動向分析
特許の保持と廃却
大学・官庁との共同研究と特許
海外との特許契約
社内外係争事例
特許マップ

知的財産戦略とは



- 経営戦略・技術戦略と如何にして一体化するか
- 特許情報を如何に技術戦略に役立てるか

係争関連件数の推移



□ 他社が侵害 ■ 他社の権利を侵害







	他社が侵害	他社の権利を侵害
平成13	6	14
平成14	4	21
平成15	5	21
平成16	5	12
平成17	6	9

6. 安全・安心技術

建設業R&Dの基本
は安全・安心技術

(安全・安心の最先端技術を学ぶ)

過去の地震被害

 <p>1923関東地震</p> <ul style="list-style-type: none"> レンガ造の美空荘 地盤による被害の差 火災放火 「日本興業銀行」 (内務省庁: 耐震構造) 尖閣騒動 	 <p>1968十勝沖地震</p> <ul style="list-style-type: none"> RC造の社せん断破壊 (7-7弱間隔)
 <p>1948福井地震</p> <ul style="list-style-type: none"> 都市圏下型地震 全壊率60% 「震度7」 	 <p>1973富嶺県沖地震</p> <ul style="list-style-type: none"> RC造の短柱破壊 業務ブロック型倒壊
 <p>1964新潟地震</p> <ul style="list-style-type: none"> 「液体化(大輪船底) 基礎・杭の液状 石油タンク火災 	 <p>1995兵庫県南部地震</p> <ul style="list-style-type: none"> 関西で地震「7」 中部層状性 鉄骨柱脆性破壊 都市心7弱破壊 「新耐震」実証

地震被害と事業継続性

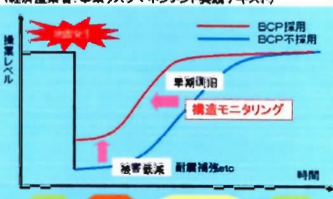
最終赤字710億円

震災中被害影響額870億円に

生産継続中断による日本経済への打撃

事業継続計画(Business Continuity Plan)

災害や事故等の発生に伴って、通常の事業活動が中断した場合、可能な限り短い期間で、事業活動上最も重要な機能を再開できるように、事前に計画・準備し、継続的メンテナンスを行うプロセス。
(経済産業省: 事業リスクマネジメント実践テキスト)



BCP採用
BCP不採用

早期復旧
構造モニタリング

地震発生 耐震補強etc

平常時 緊急対応 復旧時 平常時

「三年復興、半導体分野からの復活」(決定) (2006.11.23)

震災から3年経たずには震災前の水準には戻らず

震災から3年経たずには震災前の水準には戻らず

7. 生産革新と機械化・自動化・ロボット化戦略

生産QCDSEの最先端
生産のIT化
水平分業と垂直統合

ロボット開発失敗の歴史
完全自動化工法
建築業協会の研究成果
要素技術から街へ・空間へ

テクノロジーブル・マーケットフル







清水建設のロボット研究開発(80年代)

~1980 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90

基礎研究

- 耐火振動吹付
- サイロライニング
- 床けれん清掃
- 鉄骨自動玉外し
- 天井パネル取付
- コンクリート床柱上
- 外壁塗装吹付
- 鉄骨柱溶接

スマートシステムの変遷に学ぶ

Smart System	New Smart System	General-use Smart System
 <p>Jinriki Bank Nagoya Bldg (1993)</p>	 <p>Makuhari SH-1 High-rise apartment (1994)</p>	 <p>Hotel Metsu Kawasaki (1996)</p>
 <p>Nisseki Yokohama Building (1997)</p>	 <p>Singapore HDB Center (2002)</p>	 <p>Denso's new building (2000)</p>

9. 国家科学技術戦略と建設業の技術戦略

「第2次・第3次科学技術基本計画(2001 小泉首相)」
「国土交通省R&D方針」
セネコンの技術開発戦略

企業戦略・技術戦略と
国家戦略とのあり方は?

(日本におけるロビー活動のあり方)

第3期科学技術基本計画

分野別推進戦略の内容

ライフサイエンス分野 情報通信分野 環境分野 ナノ材料分野 エネルギー分野 ものづくり分野 社会基盤分野 宇宙分野

重点推進4分野 推進4分野

8つの分野毎に策定

- 状況認識
- 目標設定
研究開発目標・成果目標を政府の責任部署とともに明記
- 重要な研究開発課題
今後5年間に政府が取り組むべき重要な課題を抽出
- 戦略重点科学技術
特に今後5年間に集中投資すべき科学技術を選定
- 研究開発の推進方策
取組を円滑に遂げ「活きた戦略」を実現する方策を明記

10. 新しい空間と新しい材料

21世紀の構造材料を求めて(BMI)
新素材への挑戦(CFRP)

鉄・コンクリートの革新
革新構造材料による都市再生
(府省連携プロジェクト)

(産業・商品における材料の持つ意味)

革新的構造材料

1. 超高強度コンクリート材料
RO造超高層マンション

2. 超高強度鋼・高性能鋼材
超微細粒鋼(超鉄鋼)

3. 炭素繊維強化樹脂等の先進複合材料
CFRP立体トラス部材

革新材料と既存材料のミックスによる新構造システムの開発
健全性評価・モニタリング・修復技術の開発

イノベーション戦略会議
Council on Innovation(COIN)

CFRP

東洋 株式会社 1997
都市再生機構 2009

超鉄鋼による国際都市の実現

Steel material with two times greater strength and life twice as regular steel

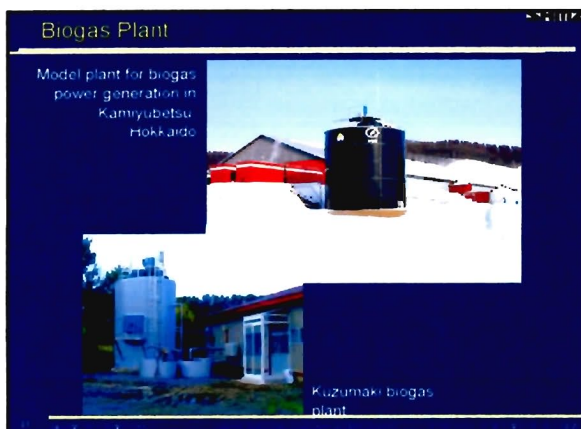
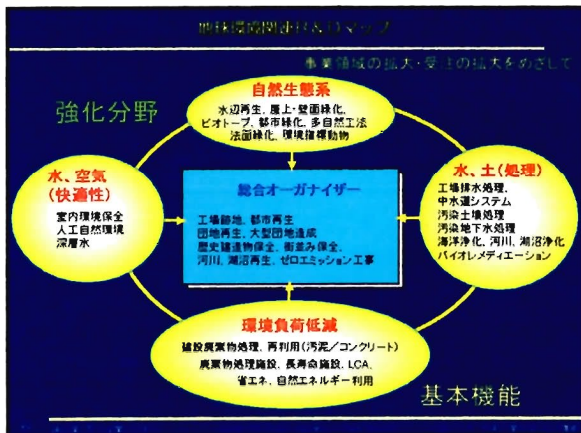
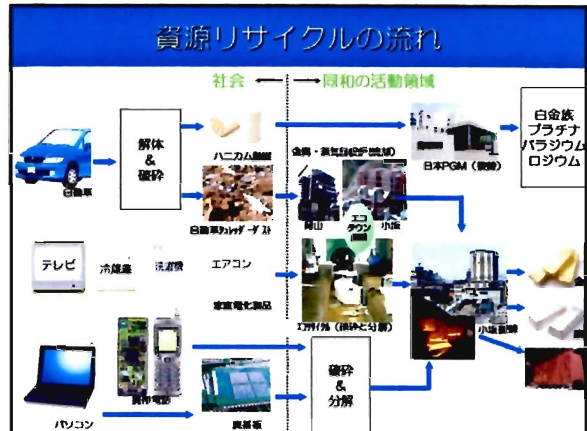
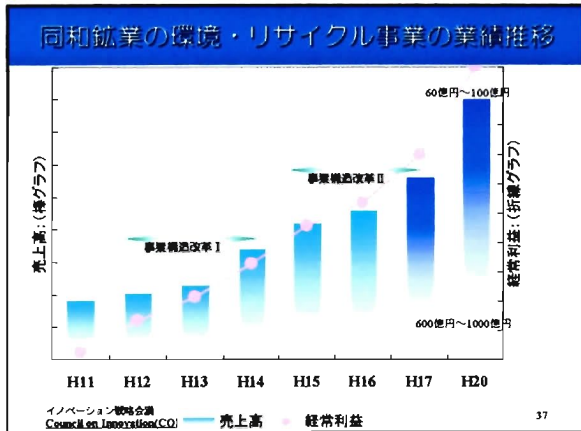
- Reduce the weight of buildings through the use of strong steel
- Reduce the total life cycle cost of buildings using materials with extended service life

11. 循環型社会と建設業

同和鉱業の成功に学ぶ

建設産業での失敗
(循環型建設技術の現状)
完全リサイクルコンクリート
循環型構法
バイオマス技術開発
マイクログリッド

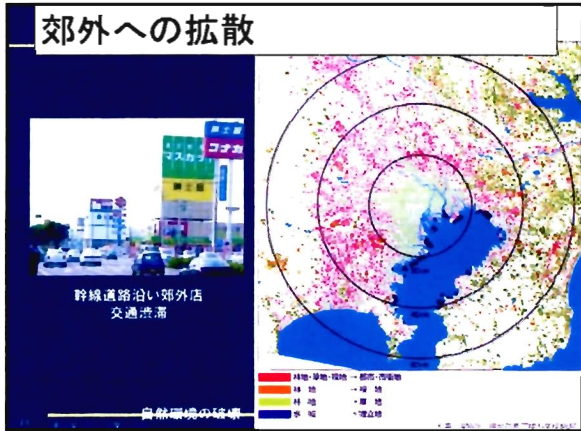
課題 建設業は循環型社会をビジネスに出来るか?



12 都市再生の技術戦略

世界の都市に学ぶ
幕張開発の実例
豊かな環境の創造・多様性が豊かさを与える
都市防災
大型開発と技術
街区版CASBEE
PFI

議論課題・都市再生プロジェクトに新技術は必要か



地方シャッター街の活性化

商店主のやる気を
どのようにして出させるか？

俺の時代は食べる！

有能なリーダーが必要

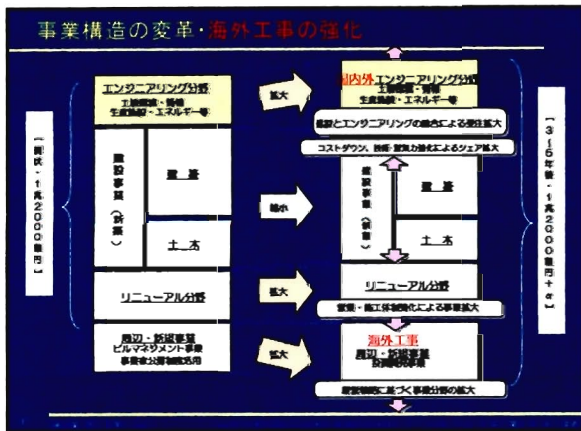
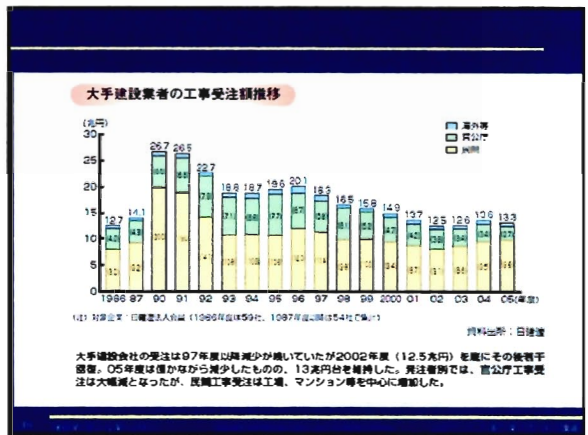
13 建設業の海外戦略と技術

海外事業の必然性

S TECHNOLOGY CENTER AMERICA
の失敗に学ぶ

海外の建設技術
アジアにおける建設事業
アジアの大学とのネットワーク

議論課題: 海外技術戦略のあり方



アジア大学連携

- 共同研究による関係強化

東京 上海 北京 台北 新加坡
大阪 上海 北京 台北 新加坡
福岡 上海 北京 台北 新加坡
長崎 上海 北京 台北 新加坡
仙台 上海 北京 台北 新加坡
札幌 上海 北京 台北 新加坡

14. 日本人・日本建築・日本の街
の本質から未来を語る

狭い視野を脱却して
多様な発想が出来るように

(時には本質を考えよう)

里山・漁村



日本人の心の
故郷

桂離宮 桂園亭



15 夢の実現

