

第21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19年2月9日(金)  
13:00～17:00

場所 JFE みやざき倶楽部

## 目 次

### I 研究発表

1. ポータブル探傷器ABCモードの開発 ..... 1  
菱電湘南エレクトロニクス(株) 市川 英
2. 3D超音波検査装置による溶接検査等への応用 ..... 5  
(株)東芝 電力・社会システム社 唐沢 博一
3. CFRPの超音波探傷評価 ..... 21  
独立行政法人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
4. 探傷感度に及ぼす曲率の影響に関する一実験 ..... 25  
(株)ジャスト研究所 名取 孝夫
5. TOFD法による溶接きずの検出と指示長さ測定 ..... 29  
清水建設(株)技術研究所 立川 克美

### II 故 丹羽 登先生追悼講演会

- 丹羽 登先生を偲ぶ 木村 勝美 ..... 35

---

第 21 回 千葉県非破壊検査研究会 研究発表会資料

デジタル超音波探傷器 UI-25

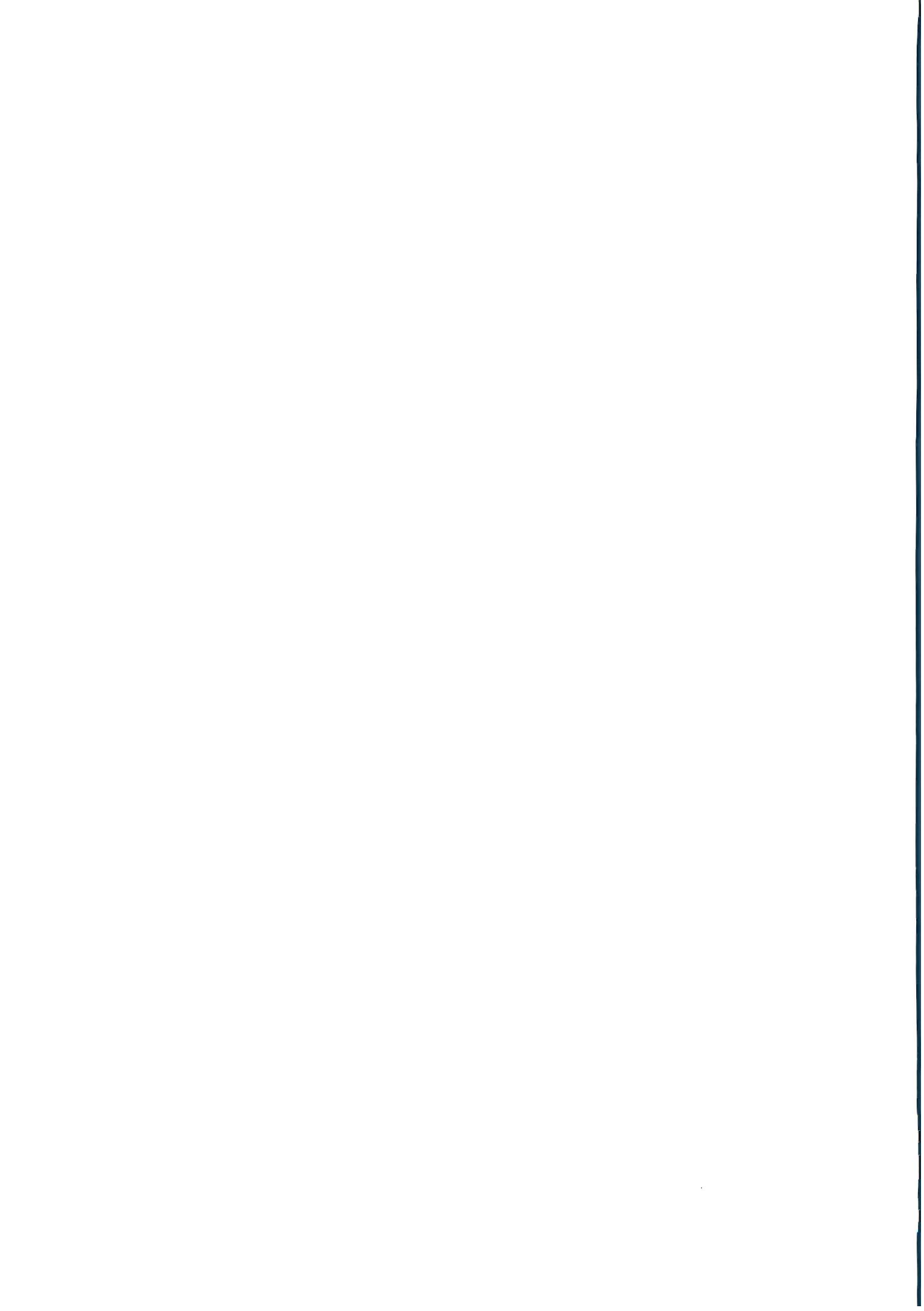
## ポータブル探傷器 A B C モードの開発

三菱電機グループ

**R<sub>SEC</sub>** 菱電湘南エレクトロニクス株式会社

市川 英

---



# デジタル超音波探傷器 UI-25

新製品

専用オプション機能

# ABCモード

本製品は当社製超音波探傷器UI-25にオプションで搭載が可能な専用アプリケーションです。

メーカー希望小売価格 税抜き350,000円（本体・センサ・スキャナ含まず）  
【構成】ABCモード探傷ソフト・PC解析ソフト

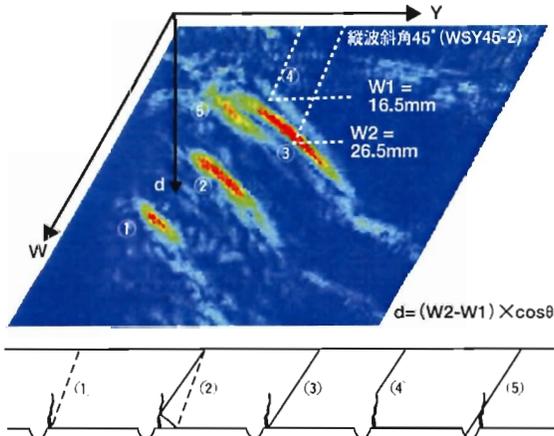
## 減肉厚測定・配管溶接部の超音波探傷試験は点から面への計測に

面での計測に有効なのが画像探傷です。デジタル超音波探傷器UI-25に専用機能を盛り込むことによって、新たな探傷試験が可能となります。必要となる機材は探傷器とスキャナ、センサーのみで、狭小箇所のご使用に適しています。



様々な機能が計測をサポートします。

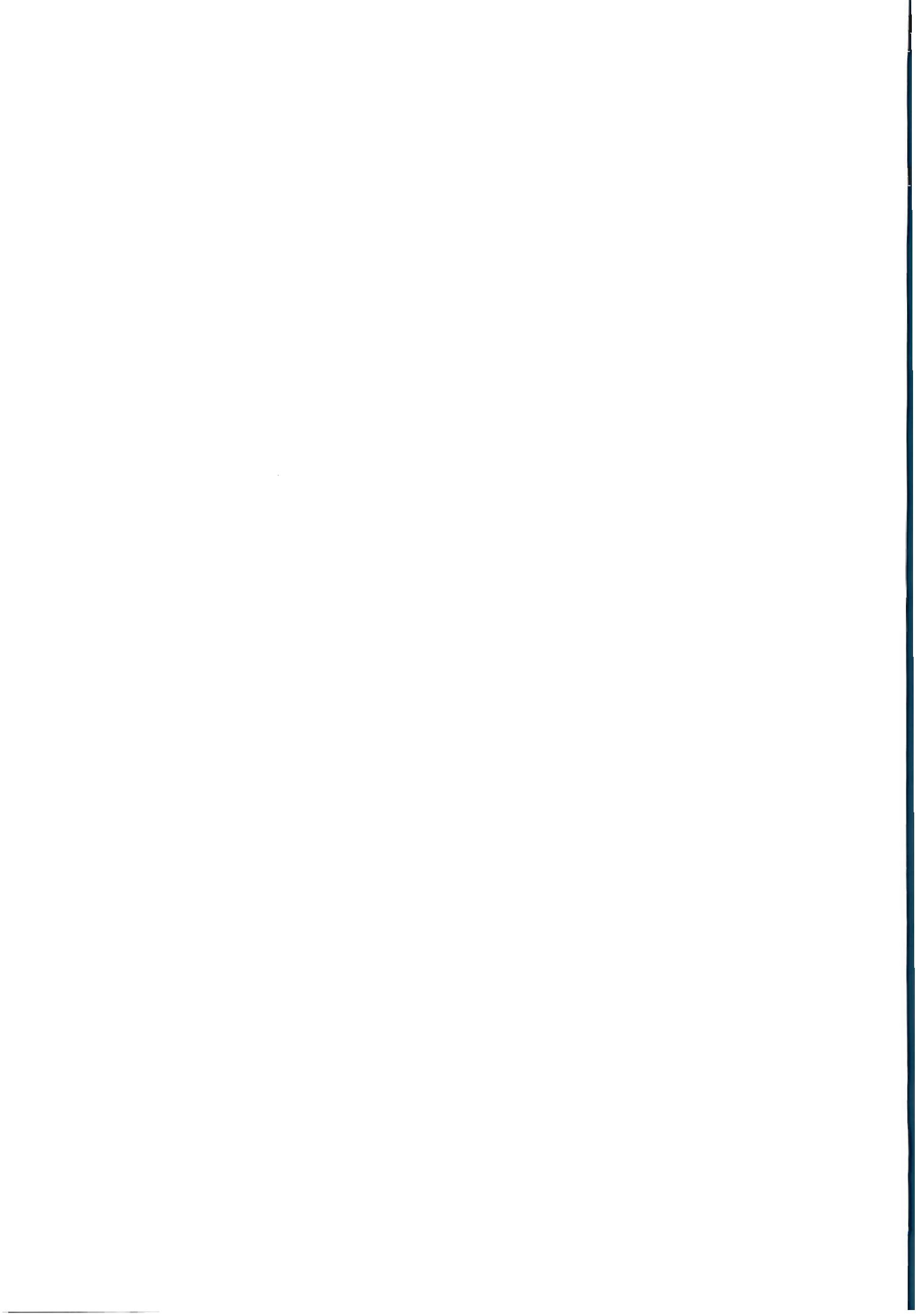
縦波斜角によるBスコープ断面図例



単軸スキャナー接続例

三菱電機グループ  
R<sub>SEC</sub> 菱電湘南エレクトロニクス株式会社

〒247-0066 神奈川県鎌倉市山崎25番地  
TEL 0467-45-3411 FAX 0467-44-7517  
URL: <http://www.rsec.co.jp>



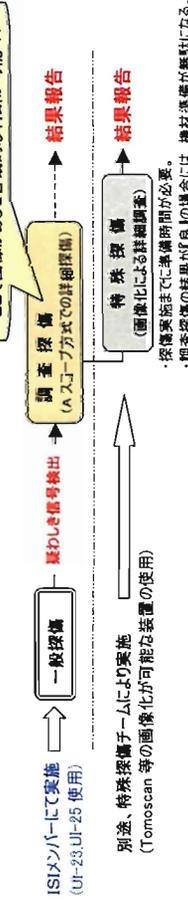
# ポータブル探傷器 ABC モードの開発

平成 18 年度 営業資料

## 【背景、経緯】

原子カプラントのオーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部の UT 検査では、異常部が検出された場合、

- ① 指示の識別(きずか否か)と ② きずの場合は寸法測定(指示長さ、高さ)が求められる。
- 現状、検査の流れは下記に示す通りであり、一般探傷で使用する A スコープ方式でのデータ採取に対して、客先担当や現場探傷者から改善のニーズがあった。



1. 客先側の A スコープ方式への不満
  - 1) 『異常部』の報告表現に個人差がある。
  - 2) 数値の羅列では説明不足。
  - 3) 解析図一枚では昼休性に欠ける。
2. 探傷者の A スコープ方式への不安
  - 1) 波形変化に目が追従しているのか?
  - 2) きずエコーと類似エコーの見分けが主観的では? (探傷者の固性によりフィルタが異なる?)
  - 3) 数値結果を解析図にしなければ解らない。

これらの問題を解決するには、一般探傷で使用するポータブル探傷器に特殊探傷で使用する B スコープ画像化アプリケーションを搭載するのが最良の方法である。(画像化による客観的定量評価は時代のすう勢) 原子カプラントでは、『I S I モード』搭載の UI-23、25 デジタル探傷器が最も普及していることから、UI-25 をターゲットにした画像化アプリケーション (ABC モード) を開発した。

## 【開発目標】

- 開発に先立ち、以下の目標を立て、UI-25 に搭載可能な『ABC モード』アプリケーションを開発した。
1. スキャナと直結できるインターフェイスを使用し、周辺機器を無くし簡素化させる。
  2. 全て本体バッテリーにより駆動し、AC 電源不要で携帯性に富むものにする。
  3. 多くのポータブル器に見られる 16 色では再現不足 ⇒ グラデーション可能な色数 (256 色以上) にする。
  4. B スコープや C スコープを表示している際にも、A スコープを常に表示させる。
  5. データを本体より取り出し、PC オフライン処理 (Windows) が出来るようにする。

## 【UI-25 ABC モード仕様】

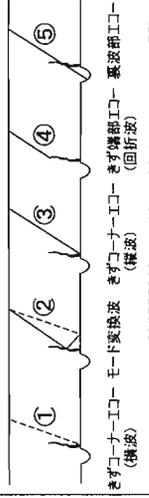
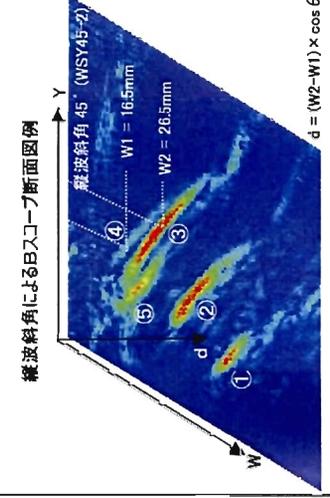
| 項目                                  | 仕様   |
|-------------------------------------|--|
| 1 エコー用インターフェイス                      | 2 相/リリス × 2 軸 (電源 (DC5V) は本体より供給)  |
| 2 データ取得最小ピッチ                        | 0.1mm (スキャン軸) × 0.1mm (ステップ軸)  |
| 3 1 画像データ最大ボリューム                    | 512 バイト (ビーム路程方向) × 45,000 ポイント (縦横) ≒ 23M バイト<br>ピッチ: 0.5mm × 0.5mm ⇒ 測定範囲: 100.0mm × 112.5mm |
| 4 取得ピッチと最大測定範囲 (例) (最大 45,000 ポイント) | ピッチ: 1.0mm × 1.0mm ⇒ 測定範囲: 200.0mm × 225.0mm<br>ピッチ: 5.0mm × 5.0mm ⇒ 測定範囲: 1000.0mm × 1125.0mm |
| 5 画像エリアサイズ                          | 縦 200 ドット × 横 400 ドット  |

## 【開発装置の特長】

＜スキャナ直結、AC 電源不要＞



＜客観的な識別 ⇒ サイジングが可能＞



＜その他＞

- 1) 256 色によるグラデーション表示を適用
- 2) 使い易い集中型インターフェイスで簡素化を実現
- 3) 類似機能を持つ他機種に比べ安価
- 4) 簡易的な TOFD も可能な設定を持つ
- 5) データを PC へ移し、オフライン処理が可能

## 【今後の展開】

1. ニーズに合ったスキャナ開発製作
  - 1) 水浸、自動などの結合
  - 2) 悪条件下対応のハビチューライズ
  - 3) 客先保有のスキャナとの結合
2. ニーズに合わせたソフトの開発製作
  - 1) 弊社画像探傷器機能の継承
  - 2) 水浸、自動など特化機能用の注文製作
  - 3) 他ソフトウェアに渡すためのデータ変換



## **3 D 超音波検査装置による 溶接検査等への応用**

2007年2月9日

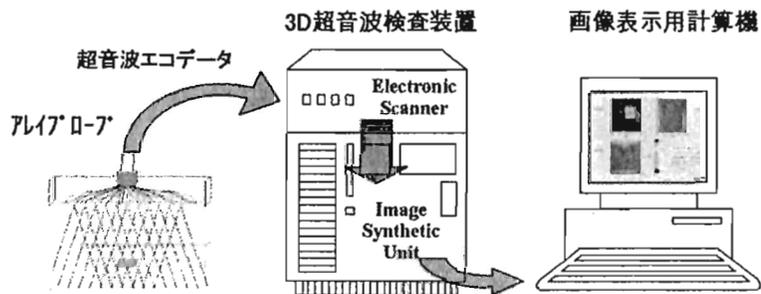
**株式会社 東 芝**

**電力・社会システム社 唐沢 博一**

## 3D超音波検査装置「Matrixeye™」の 概要及び原理説明

### 3D超音波検査装置「Matrixeye™」の特長

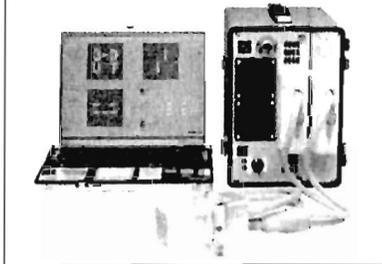
- ・ アレイプローブ(マトリクス、リニア)を用いて超音波データを高速収集
- ・ 開口合成処理を用いて高分解能の3D画像を生成
- ・ 開口合成処理を高速化するために並列演算技術を適用
- ・ デジタル画像処理、自動判定処理などの応用が可能



TOSHIBA

### 3D超音波検査装置「Matrixeye™」

#### (Matrixeye™ 256ch)



- 寸法 : 270 x 230 x 160 (mm)
- 重量 : 10kg
- AD変換器 : 200MHz 12bit
- プロセッシング : 32 並列回路
- 送受チャンネル : 256 ch
- 周波数帯域 : 2MHz - 35MHz
- 画像合成 : 開口合成
- 外部PC : 2.5GHz (80GB HDD)

#### (Matrixeye™ 64ch)



- 寸法 : 350 x 240 x 170 (mm)
- 重量 : 7kg
- AD変換器 : 100MHz 12bit
- プロセッシング : 32 並列回路
- 送受チャンネル : 64 ch
- 周波数帯域 : 2MHz - 35MHz
- 画像合成 : 開口合成
- CPU : Pentium III (1GHz)
- HD : 40GB

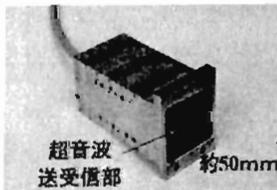
TOSHIBA

### 超音波プローブ(マトリクスアレイ)

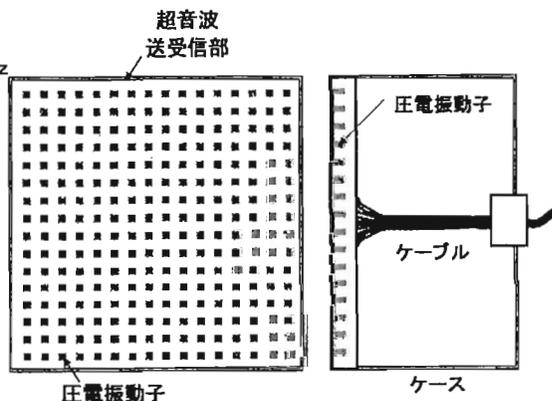
マトリクス配置した多数の圧電振動子で超音波送受信するにより、立体画像を走査せずに画像化可能

#### 設計仕様

- ・周波数 : 5MHz、10MHz、25MHz
- ・素子数 : 16 x 16個
- ・素子材料 : PZT
- ・開口寸法 : 45mm (at 5MHz)



超音波プローブの外観



超音波プローブの構造

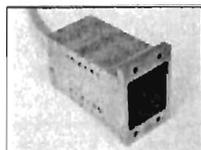
TOSHIBA

超音波プローブ (ラインナップ)

マトリクスアレイプローブ



5MHz\_8x8

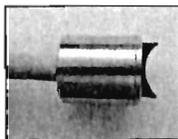


10MHz\_16x16



15MHz\_8x8

コンケーブタイプ (リニア)

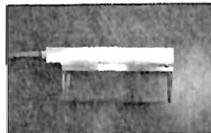


5MHz\_8x1

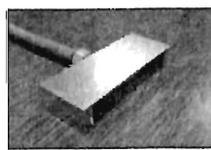


5MHz\_16x1

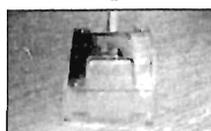
リニアアレイプローブ



2MHz\_64x1



5MHz\_64x1



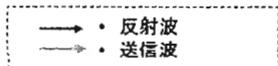
15MHz\_64x1

TOSHIBA

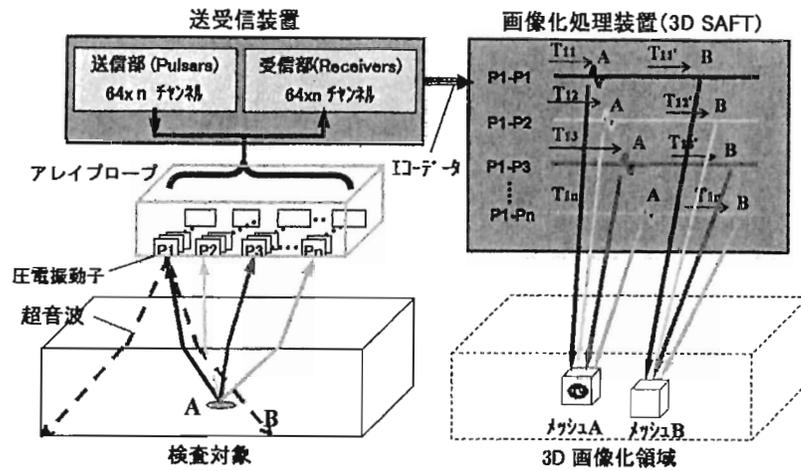
3D超音波検査装置のデータ収集 (マトリクスアレイ)

3D超音波検査装置「Matrixeye™」は、アレイプローブ内の各圧電振動子から指向角の広い超音波を順次送信し、そのつど検査対象内部からの反射エコーを全素子で受信する送受信処理を電子的に行い、高速化を図っている。

- 素子数 : 64 チャンネル
- データ収集時間 : <6.4ms (64T x 64R data)
- 送受信パターン : 任意のパターンを設定可能
- ゲイン : 80 dB (最大)
- サンプリング周期 : 100MHz (12bits)



- 特長 ①高解像度の3D画像化が可能  
 ②距離変化に対して解像度が一定(解像度  $\propto d/2d$ : 素子径)  
 ③波形加算して画像化をおこなうため、S/Nが改善



3D超音波検査装置「Matrixeye™」  
 による探傷技術

検査結果の表示 試験用に作製した200A鋼管溶接部の試験結果

X線フィルムと同様な平面画像とともに、断面画像を表示、出力、保存することが可能。3D画像化データの保存も可能

X線フィルム

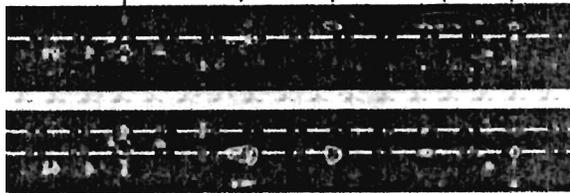


3D配管溶接検査システム

溶接部中心

0.0mm

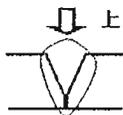
5.8mm ↓



検査性能

3次元画像表示機能により、溶け込み不足と他のキズとは明瞭に区別がつか

真上からの画像



真横からの画像

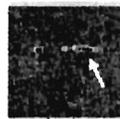


溶け込み不足



4275

溶け落ち



表面「ラインダ」処理痕



・折り返すと表面の位置  
していることがわかる

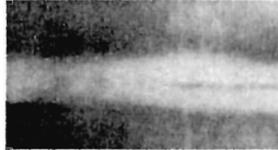
TOSHIBA

### 3D配管溶接部検査システム

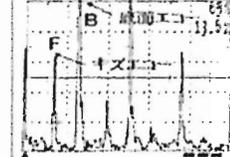
特長

- ・欠陥を可視化することにより、熟練工でなくても検査が可能
- ・3次元可視化により溶け込み不足状況が可視化可能

X線検査(可視化が可能)

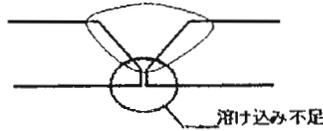


従来超音波検査



容易に歪みを判断できる装置が必要  
溶け込み不足の検査が必要(強度確保)

3D配管溶接検査



TOSHIBA

### 3D配管溶接部検査システム

特長

- ・配管溶接部の高速検査が可能
- ・データ取得の自動化が可能

X線検査



3D配管溶接部検査



- ・高速演算機能により、短時間で作業者負荷の少ない検査が可能  
⇒ 20分/1検査以下(設置、撤去含む)
- ・HDD内蔵ポータブル機でデータ自動取得が可能  
⇒ 3D画像を自動記録可能 (HDD:40GB)

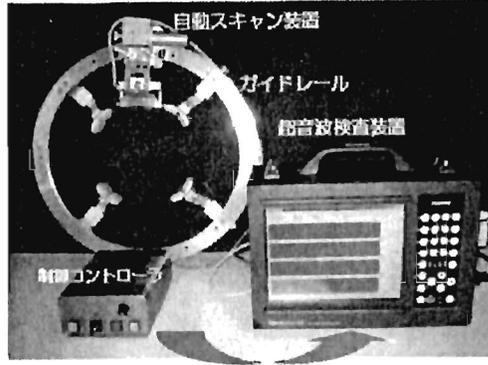
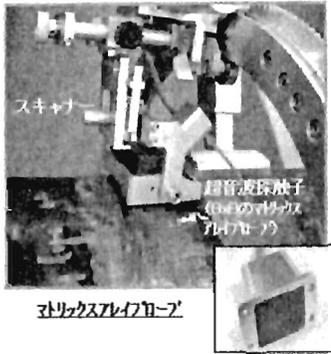
TOSHIBA

### 3 D 配管溶接部検査システム

ガス配管突合せ溶接部の検査システムを東邦ガス殿と共同開発

#### 特長

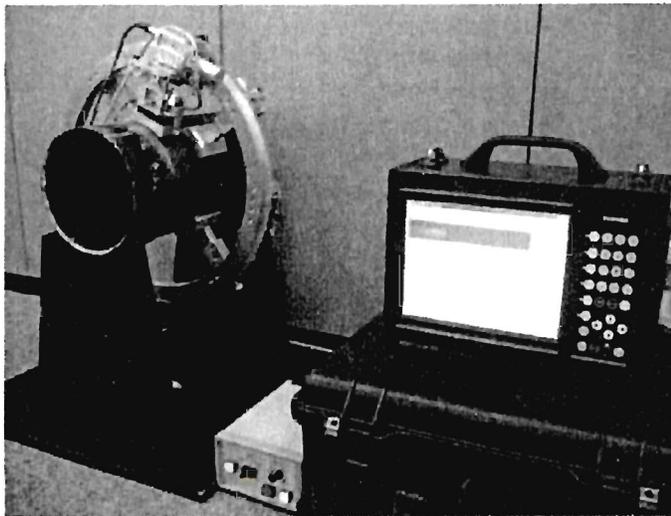
- ①直感性がある(欠陥位置、形状)
- ②溶込み不足長さが定量化ができる(3次元位置情報が判る)
- ③高速検査できる(20分程度/1検査)
- ④データ保管・管理ができる(電子媒体でのアウトプット)
- ⑤簡易に扱える超音波検査システム(1名で検査、合否判定)



データ取得、画像処理

TOSHIBA

### 3 D 配管溶接部検査システムの検査状況



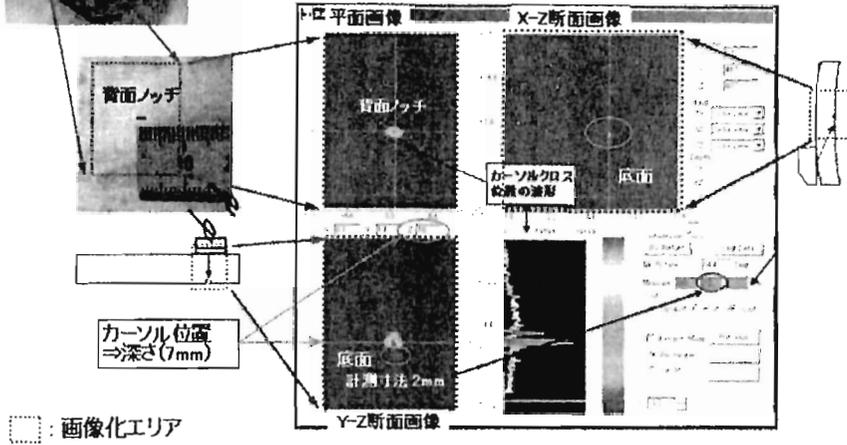
TOSHIBA

### Matrixeye™による3D斜角探傷結果



#### 背面ノッチの画像化結果

- ・横波・縦波による斜角探傷により3D画像表示が可能
- ・欠陥の深さ、サイジングが可能

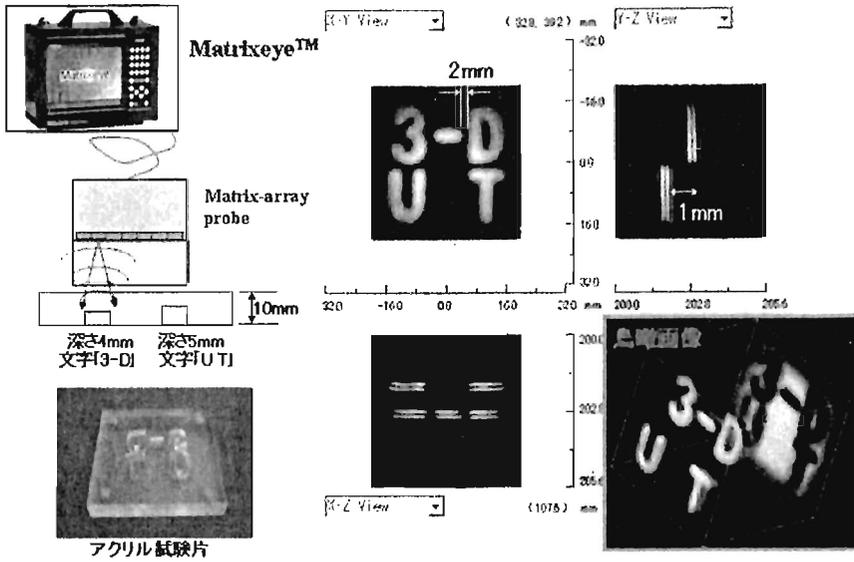


TOSHIBA

## 3D配管溶接部検査システム

TOSHIBA

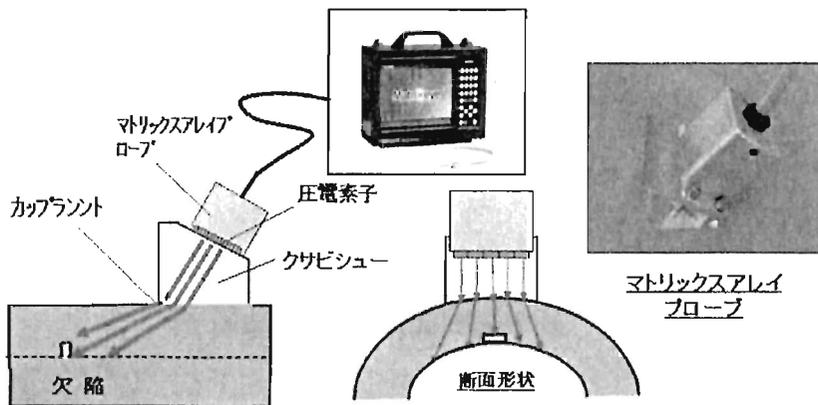
### Matrixeye™による垂直探傷技術

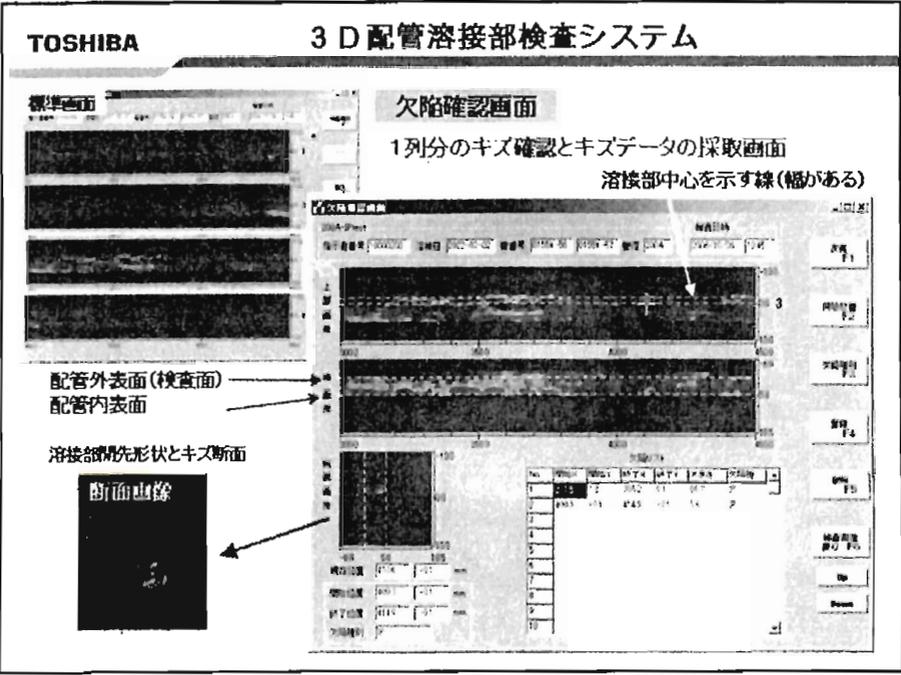
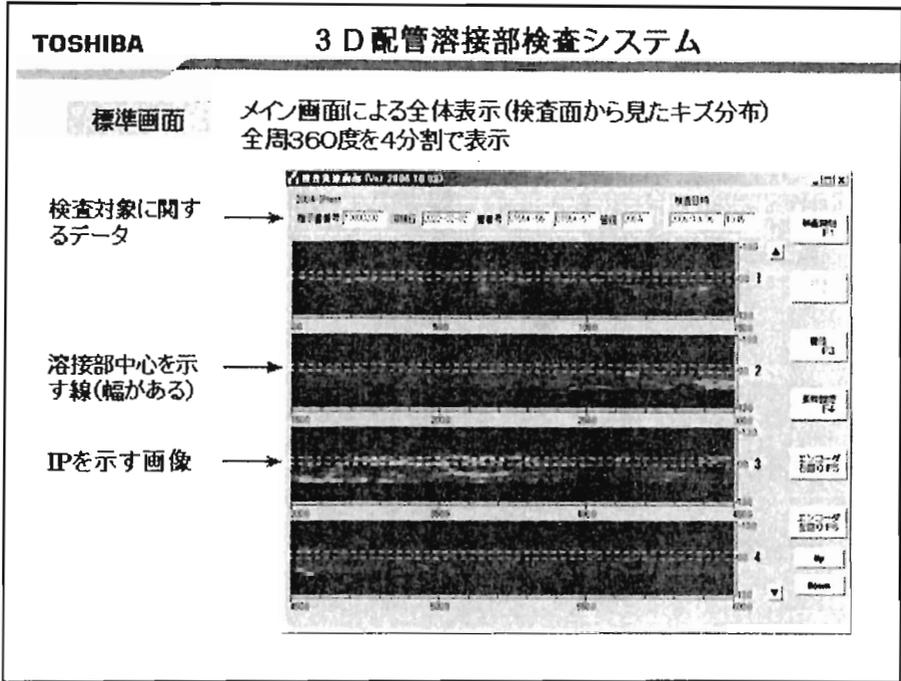


TOSHIBA

### Matrixeye™による3D斜角探傷

- ・溶接部の欠陥を8x8素子配置のマトリクスアレイプローブの先端にクサビシューを取り付けて斜角探傷用3D-UTで円筒形状ワークの内部検査を実施。
- ・円筒表面の屈折計算を全て考慮して3D画像を合成
- ・適切なシュー設計により、横波、縦波での探傷が可能





## まとめ

溶接鋼管円周溶接部検査に超音波開口合成法を適用し、マトリックスアレイプローブで3D画像化する3D配管溶接部検査システムを開発



①溶け込み不足を可視化

②検査の高速化

③データの電子化



溶け込み不足を簡易に検出するポータブル装置として、十分な性能を確認することができた

## スポット溶接検査システム

TOSHIBA

## スポット溶接検査システム

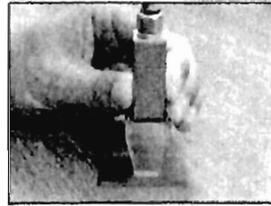
### 特長

1. マトリクスアレイプローブを使用し、スポット溶接内部を3次元で画像化(0.5秒/スキャン)し、接合部およびブローホール等を可視化
2. 画像から接合部を抽出し、接合径や溶接部厚さ、圧痕深さ等をデジタル値で出力し、合否判定を行うことが可能
3. スポット溶接用に専用に開発した小形プローブにより狭隙部にも対応可能



<検査装置本体>

・チャンネル数 : 64 channels  
・データ収集時間 : 0.2s  
・ゲイン調整幅 : 80 dB (Max.)  
・サンプリング周波数 : 100MHz (12 bits)



<スポット溶接用超音波プローブ>

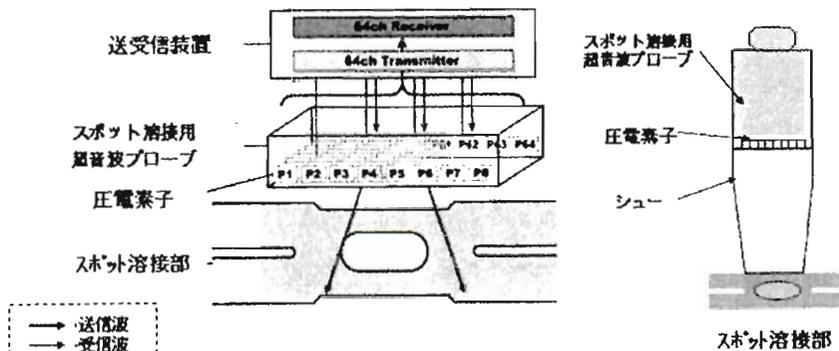
・開口寸法 : 12 x 12mm  
・周波数 : 10~15MHz  
・素子配置 : 8 x 8 (マトリクスレイ)  
・解像度 : X,Y 0.6mm, Z 0.2mm

TOSHIBA

## スポット溶接検査システム

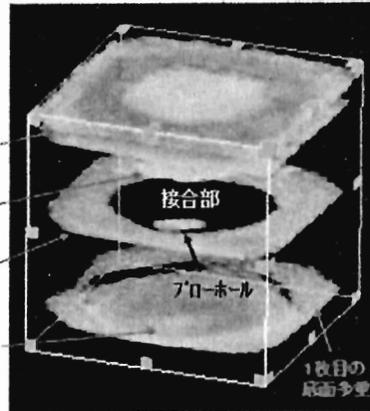
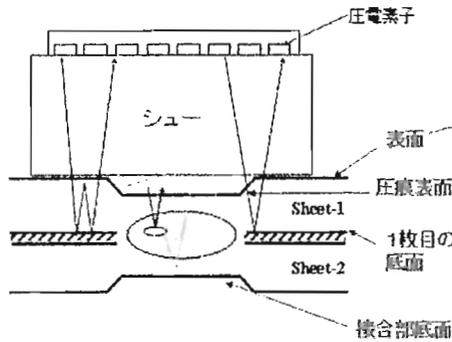
### 動作説明

- ・スポット溶接部表面のマトリクスアレイプローブを密着させて接合部を3D可視化
- ・可視化した画像でデータからコロナボンド部の径を自動測定して接合の良否を判定する



溶接部の画像化例

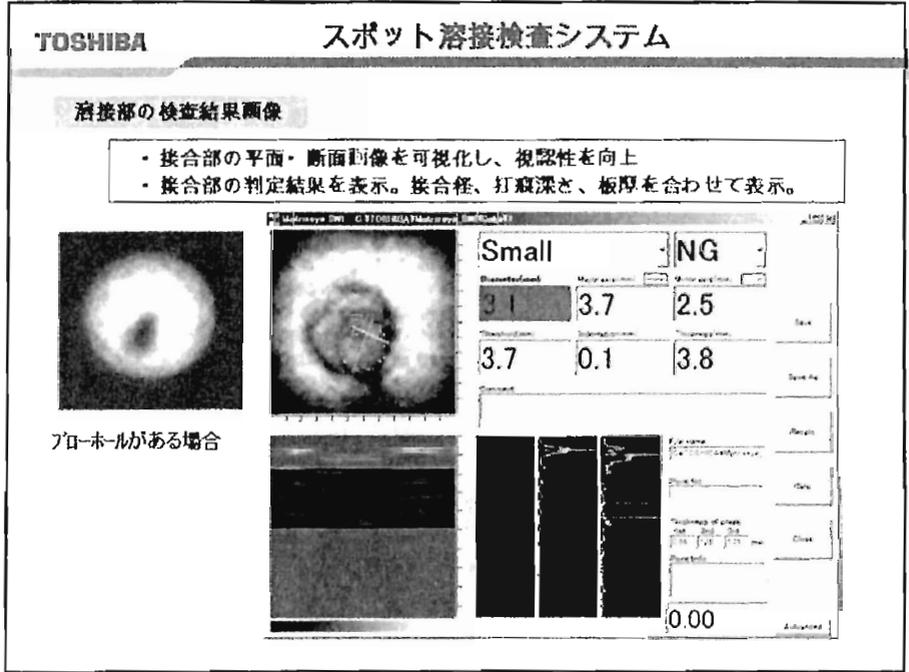
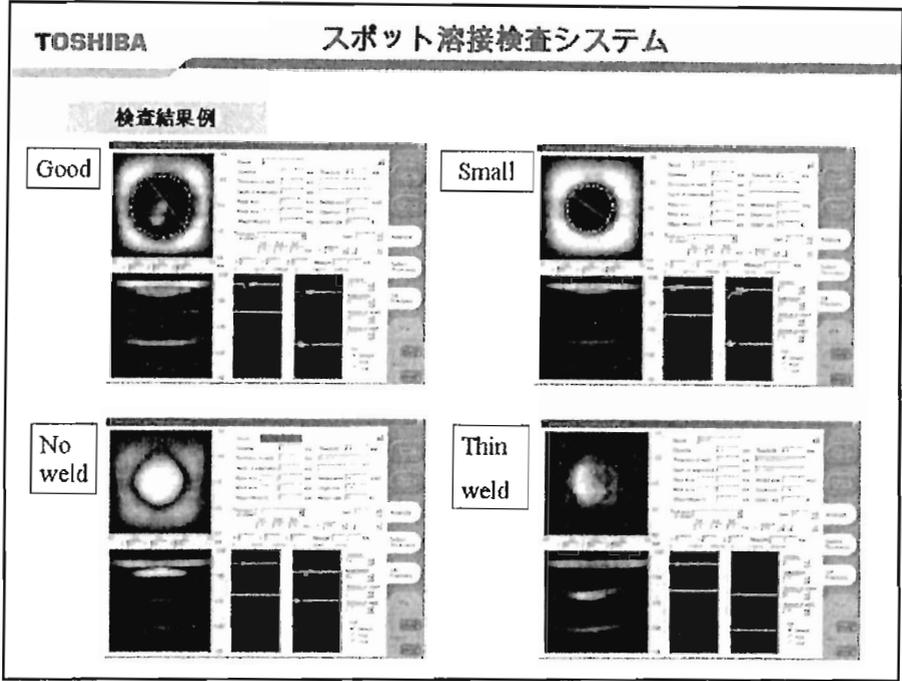
- ・ 正常な接合部は超音波が透過するため画像が抜ける。接合部の底面は、逆に接合部の反射強度が高くなる。
- ・ 以上の可視化画像からコロナボンド部の径を自動測定し接合良否を判定する。



スポット溶接画像 鳥瞰図

検査手順

1. 検査前
2. マトリックスアレイプローブをワークに接触し、検査スタート
3. 並行度を自動検知し、画像をフリーズし、計測開始
4. 接合状態の画像と自動判定結果を表示



## まとめ

スポット溶接部を小形のマトリックスアレイプローブを用いて開口合成法により3D画像化する検査装置を開発



①接合部を3D可視化

②接合径を自動計測

③接合の良否を判定

スポット溶接部を可視化し、接合の合否を自動判定するポータブル機を開発。  
現在、実機レベルでの検証を実施中。

## CFRPの超音波探傷評価

### Non-Destructive Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Plastics

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

Japan Aerospace Exploration Agency Masamichi MATSUSHIMA

複合材料の炭素繊維強化樹脂材料が広範囲に適用されている。軽くて強い性質を利用して軽量構造に最適であり、全体重量が軽減されて燃料消費が少なくする事が可能となる。しかし、損傷形態が金属材料と比較して複合材料特有は複雑であり、この損傷形態を定量的に評価する場合に超音波探傷を用いると板厚（積層）方向のはく離が明瞭に観察することができる。ここでは、CFRP板に衝撃損傷を与えて、はく離損傷を超音波探傷で観察を行った。

#### 1. まえがき

CFRPは、比重が1.7程度と軽く、強度は軟鋼と同程度の性質を持っている。この特性を生かして航空機・宇宙機の構造部材に適用されている、新型旅客機のB787, A380の機体に広範囲に使用される。特にBは主翼・尾翼・胴体にCFRP一体成型部材が適用され、Aは主翼中央キャリヤスル、圧力隔壁などに適用される。また、船舶や自動車の構造部材に適用が考えられている。しかし、エポキシ樹脂は熱硬化性であり、外力として衝撃力が加わると板厚方向ではく離やクラックが生じてしまい、衝撃後圧縮残留強度が低下する。この時の、衝撃エネルギーと衝撃損傷の関係を定量的にあきらかにすることは重要であり、CFRP板厚方向の損傷状況を超音波探傷反射法により定量的に画像に示した。

#### 2. CFRP

一般的に使われている炭素繊維は、ポリアクリロニトリル原糸を電気炉中で引張りながら蒸し焼きにして炭素繊維フィラメント（直径7ミクロン程度）を製造している、この環境で引張力や温度によって高強度、高弾性、低弾性の特性をもった炭素繊維が作られている。このフィラメントを束ねてトウ（束）にする、この束ねたフィラメントの本数を「K」で表している。（例9K：9千本、12K：1万2千本）この繊維束を一方に引きそろえて平面状態にしたものがUD材と呼ばれており、繊維束を縦横に織物状態にしたものがクロス材（織物）と呼ばれている。これらの繊維束にエポキシ樹脂を含浸させて圧力と温度を与えてFRPを成型することができる、しかし、この方法では平板状に近いものができるが、複雑形状で最適積層をすることは困難である。そこで、引きそろえた繊維束にあらかじめ樹脂を含浸させてBステージ状態にしたプリプレグシート（UD材厚み：1.2mm、ク

ロス材：2.5mm程度）を製作する。このプリプレグシートを任意の方向に積層してゆく方法を用いる、例えば擬似等方向性であれば（ $-45^{\circ} \cdot 0^{\circ} \cdot 45^{\circ} \cdot 90^{\circ} \cdot 90^{\circ} \cdot 45^{\circ} \cdot 0^{\circ} \cdot -45^{\circ}$ ）の組み合わせでn回重ねて積層する。（-45,0,45,90）sym.nで表している。

特に、FRPは「繊維体積含有率：Vf%」が大きな影響を及ぼすことがある、炭素繊維の引張強度・弾性率と比較して樹脂の強度・弾性率は2桁低いので繊維の体積含有率60%程度が望ましいと言われている。

### 3. 衝撃付与装置

ここでの、CFRPの衝撃力は工具（スパナなど）を腰から胸の高さで落とした程度と考えて、衝撃エネルギーとしている。衝撃付与装置としては、自由落下方式で衝撃タップ先端直径が12.7mm（1/2インチ）となっている、衝撃試験で重要な影響を及ぼす2度打ちを防止する目的で、空気式ショックアブソーバで2度打ちを機械的に押さえている。

衝撃後残留強度CFRP試験片を4点簡易固定金具で固定する方法を用いている。衝撃試験方法は、任意の落錘重量を固定し、高さを決めて衝撃エネルギーを設定している。

$$E = m * g * h \quad \dots \dots (1)$$

ここで、E：衝撃エネルギー、m：落錘重量、g：重力加速度、h：評定高さ

試験装置は、衝撃直前の落錘タップ速度を光電管で読み込み、タップに設置されているロードセルから荷重を読み取ってデータ処理をおこない、時間—荷重線図と時間—衝撃エネルギー線図が記録されている。

### 4. 超音波探傷

複合材料の非破壊検査方法はX線透過、軟X線透過、X線CT、超音波透過、超音波反射、赤外線サーモグラフィーなどがあり、簡易で安全な超音波探傷法が広く使われている。原理は、素材の音響インピーダンス（音の伝播程度）の違いによる、超音波パルスエコーの伝播波形を読み取って探傷を行う方法である。CFRP平板の超音波探傷試験（手動式反射法）は垂直に超音波プローブ（10MHz：チタン酸バリウム振動子）にカプラント（水、油、グリセリン）を介して探傷作業を行い、CFRP平板健全部の超音波波形は表面反射エコーと底面エコー（Aスコープ波形）が確認できる。不健全部（衝撃によるはく離が発生）は表面エコーと底面エコーの中間部にはく離部エコーの立ち上がりを確認できる。CFRP板厚方向の音速は、2700 から 3000m/秒程度であり、超音波反射法を用いるとCFRP平板健全部の厚み測定が測定できる。

$$t = 1/2 * v * t \quad \dots \dots (2)$$

ここで、t：CFRP平板厚さ、v：CFRP板厚方向の音速、t：表面エコーと底面エコーの経過時間

同様に、はく離部の反射エコーは時間軸に線形であるので、板厚方向の位置を同定することができる。また、超音波プローブの振動数によって検出傷の程度を決定する、高周波数（25MHz以上）を用いると微小な傷や表面の凹凸が測定できる、しかし、ダンピングが大きいため伝播深さが制限される。低周波は逆に検出可能傷が大きくなるが伝播深さは大きくなる。

$$d = v/f \quad \dots \dots (3)$$

ここで、 $d$ ：最小検出傷大きさ、 $v$ ：伝播速度、 $f$ ：プローブ周波数

CFRPの場合（音速 3000m/秒）、最小検出傷大きさは 5MHz プローブで 0.6mm、10MHz で 0.3mmである。

CFRP 平板局所の探傷であれば、この手動探傷法でおこなえるが板全体の探傷を行う場合には、X-Y方向にプローブを移動する自動探傷が必要となり、2種類の走査型探傷装置を用いて探傷を行う。一方は小型超音波探傷装置であり、試験片サイズの探傷に用いている。他方は大型ロボット式超音波探傷装置であり、4m×2m×1mサイズのCFRP構造部材の探傷を行うことができる。どちらも、超音波探傷波形からデジタル処理をおこない、PCで画像処理をおこなっている。特に、小型超音波探傷装置は、探傷位置データと波形データのデジタル処理をおこなって探傷終了後でも、CPU画像上でAスコープ波形を確認（Aスコープメモリ機能）することができる。

CFRP 平板の衝撃損傷を定量的に精密探傷を行うときには、水中に試験片をセットして行う、超音波プローブは曲率がつけてありフォーカスタイプとなっている。これは、20mmに焦点を持つ構造となっており、試験片板厚方向の任意の位置での精密探傷を行うことができる。

## 5. 結果・考察

CFRP 平板 {(45,0、-45,90) sym.4} に 3J の衝撃エネルギーで損傷を与えたときの、CFRP 平板を衝撃面からの超音波探傷画像（図 1）の中央部は衝撃タップの打痕であり半球の形状となっているために超音波エコーが散乱してしまい反射エコーが小さくなって白色となっている。円周方向にはく離が積層面を順番に広がっているのが観察できる。0°方向と 45°方向に伸びている損傷はCFRP 平板の底面近傍での0°層と 45°層が剥がれているのが観察できる。CFRP 平板の超音波探傷面をカッターで切断し、顕微鏡での断面観察結果を写真 1 に示した。この結果から中央上部の衝撃による打痕の下面から積層面に沿ってはく離が進展している状況が観察できる、特に超音波の性質から表面に平行な層間にはく離部分は、反射エコーが高く表示されるので強く表示される。しかし、斜めに積層面から積層面に進展しているクラックやはく離は、やや弱い表示となっている。

同様に衝撃エネルギーを変化させた時のCFRP 平板の超音波探傷を行った結果から衝撃エネルギーとはく離投影面積は比例関係となっている。これらの試験片で衝撃後残留圧

縮強度試験を行い問題となるのは衝撃エネルギーが小さくて衝撃面の打痕がはっきり確認できなくて、超音波探傷を行うと板厚方向に衝撃損傷が発生している場合であり、他の非破壊検査（X線、サーモグラフィ、コインタッピングなど）では、明瞭に観察することは難しい。

#### 6. あとがき

ここでは、水没させて探傷をおこなっているが、宇宙機構造部材は水の含浸を避けるのでカプラントを用いずに、空気式超音波探傷装置も開発されており、ロケットモータケースの非破壊検査法として適用されている。使用する超音波プローブの振動数が0.5MHz以下を用いており、最小検出傷大きさが6mm以上となるので、微小な傷の判定は難しいが、構造部材の固定方法は水没させないので簡便に探傷作業が行える。

以前行った、MVロケットノズルの適用されているグラファイト製素材の超音波探傷試験の探傷方法が日本非破壊検査協会規格となっている。航空機の一次構造部材に大型CFRP一体成型材が適用されようとしており、成型品の非破壊検査法として超音波探傷反射法が使われようとしており、微小な小型超音波プローブを横に1列（128、256個）に並べたアレイ型プローブを用いてスキャンを行い走査時間の短縮をはかろうとしている。



図1 損傷部の超音波画像

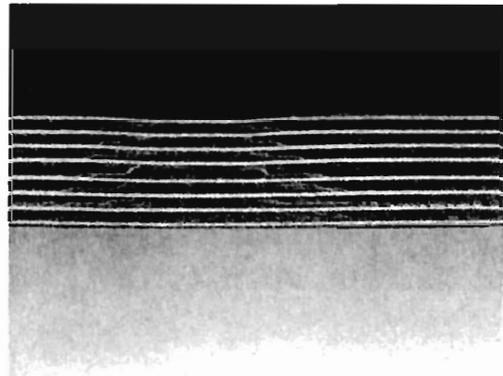


写真1 衝撃損傷部の断面観察（光学顕微鏡）

#### 参考文献

- 1) 邊 吾一、石川隆司：先進複合材料工学、倍風館
- 2) 非破壊検査評価工学、日本非破壊検査協会
- 3) 超音波探傷試験、日本非破壊検査協会
- 4) 石川隆司、松嶋正道、林 洋一：日本複合材料学会誌、22巻、2号、1996、p 64-75
- 5) 松嶋正道：繊維強化複合材料の非破壊評価：日本非破壊検査協会、49巻、9号、2000、p 588-591
- 6) 黒鉛素材の超音波自動探傷検査方法：日本非破壊検査協会規格、NDIS 2425

# 探傷感度に及ぼす曲率の影響に関する一実験

An experiment regarding the effect of curvature upon testing sensitivity

㈱ジャスト研究所 ○名取 孝夫

## 概 要

曲率を有する試験体を探傷する場合、探触子の接触面の曲率加工を行うか否かは議論を呼ぶところである。本実験は、一方向に曲率を有する試験体（パイプから一部を切り出したような形状）にφ4mm×深さ4mmの人工きずを加工し、長手方向及び円周方向に探傷した場合の探触子の移動距離に対するエコー高さの変化を測定した。探触子は、曲率加工を行ったものと曲率加工を行わない探触子に接触を安定させるためのジグを使用したものとした。探触子の走査は、それぞれ曲率を有する方向への走査とした。測定結果は、曲率加工を行わない探触子の場合、最大エコー高さを示す付近でのばらつきは若干大きく、その差異は1 dB以下で、また同じエコー高さまで低下する走査範囲は2 mm程度（約30%）とやや大きい傾向を示した。

### 1. まえがき

本実験は、曲率を有する試験体を探傷する場合に、探触子の接触面の曲率加工を行ったものと、曲率加工を行わないものの差異を確認する目的で行った。接触面の曲率を加工した場合、接触安定性は増し、また有効な振動子の面積は大きくなる。これに対して、接触面の加工を行わなかった場合は、安定した接触状態を確保するにはジグの使用が不可欠であるが、この場合でも線接触となり、有効な振動子面積が小さくなる。この差異が、探傷結果の感度に及ぼす影響を確認した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 使用した探触子

- (1) 長手方向に探傷する場合：5C10×10A70
- (2) 円周方向に探傷する場合：5C10×10A55
- (3) 曲率加工：曲率半径 220mm に加工したシューを貼り付ける。円周方向の場合、入射点位置を図2のように最も薄い部分とした。

#### 2.2 使用した接触を安定させるためのジグ

㈱ジャスト研究所製（図1に示す）

#### 2.3 試験体

- (1) 長手方向及び円周方向のそれぞれを作成した。
- (2) 板厚：1.9 mm
- (3) 寸法：90mm×90mm
- (4) 曲率半径：210mm
- (5) 人工きず：φ4×4mm 平底穴

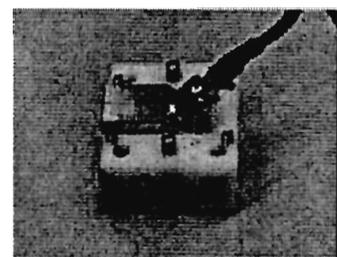


図1 接触安定用ジグ

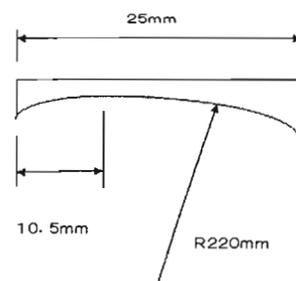


図2 円周方向に使用するシューの加工

(6) 形状：試験体を図3に示す。

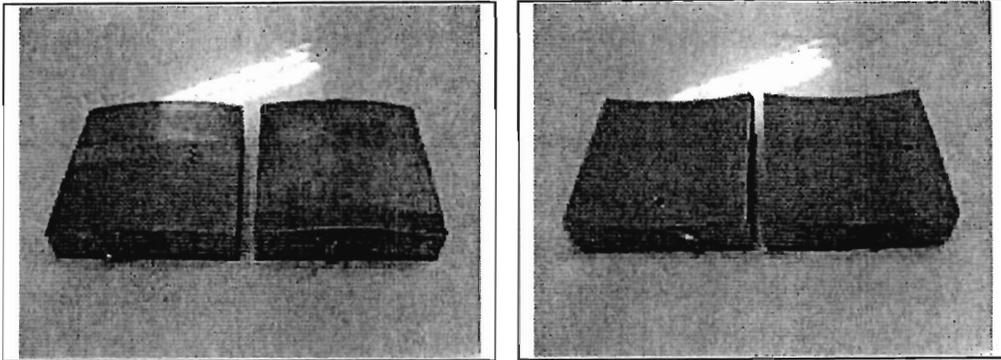


図3 試験体

#### 2.4 走査方法

探触子の走査方法を図4に示す。

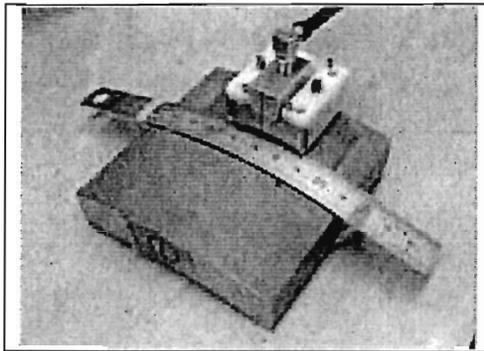


図4 (1) 長手方向の測定  
(曲率加工を行っていないもの)

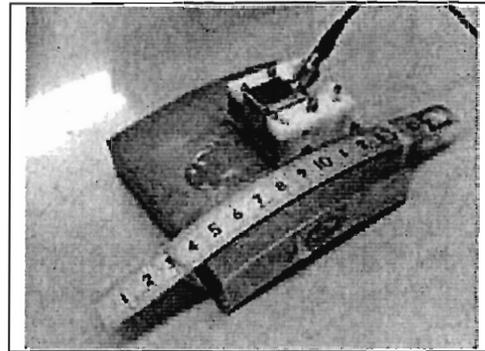


図4 (2) 円周方向の測定  
(曲率加工を行っていないもの)

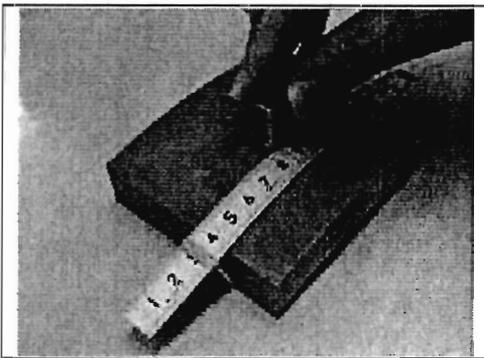


図4 (3) 円周方向の測定  
(曲率加工を行ったもの)

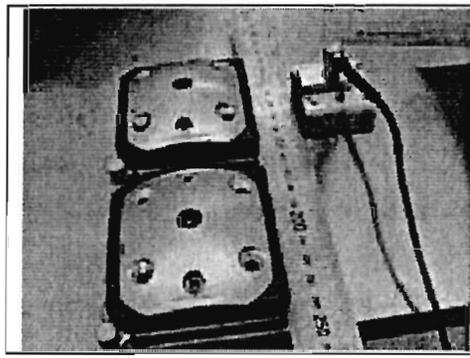


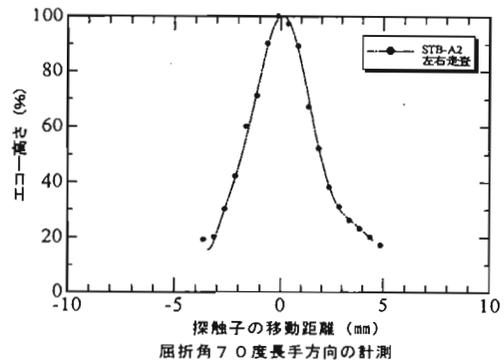
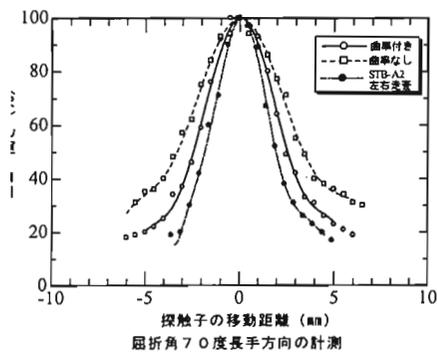
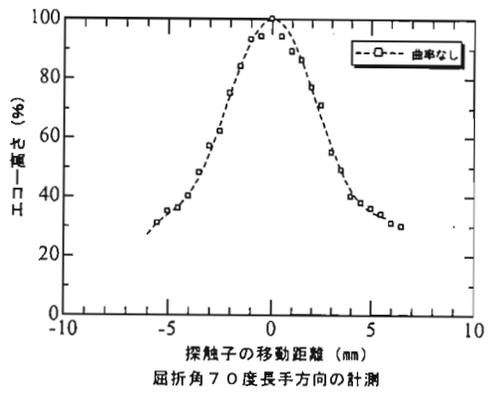
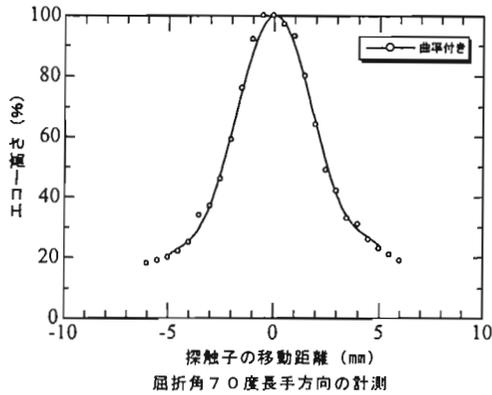
図4 (4) STB-A2 試験片の測定  
(5C10×10A70：左右走査)

#### 2.5 接触媒質

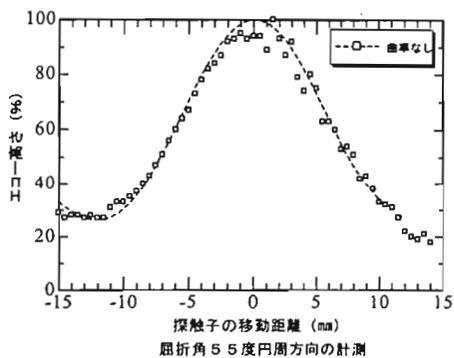
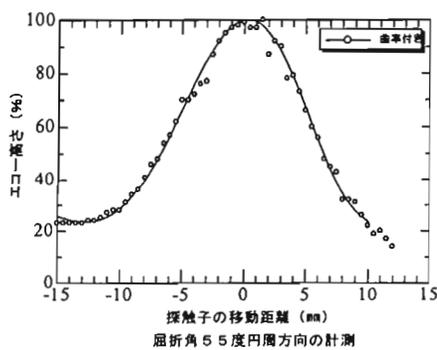
- (1) 試験体：ソニコート BSL
- (2) STB-A2：マシン油

### 3. 測定結果

#### 3.1 長手方向



#### 3.2 円周方向



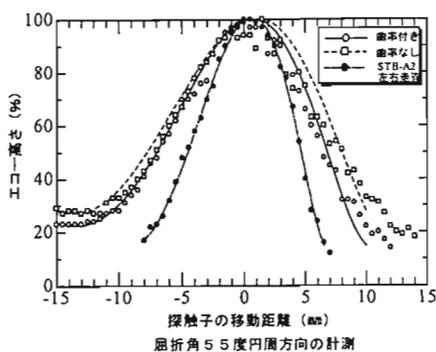


図 6 (3) 円周方向の重ね合わせ

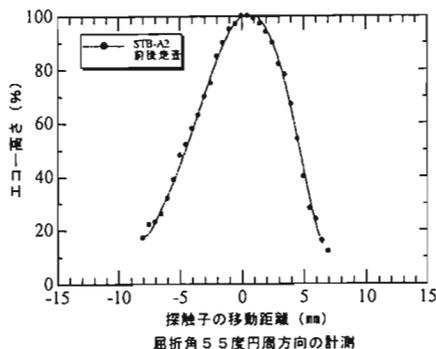


図 6 (4) STB-A2 前後走査

### 3.3 傾向

- (1) 曲率加工を行わない探触子の場合、最大エコー高さを示す付近でのばらつきは若干大きく、その差異は1 dB以下であった。
- (2) 曲率加工を行わない探触子の場合、同じエコー高さまで低下する走査範囲は、2 mm程度（約30%）とやや大きい傾向を示した。
- (3) 円周方向では、最大エコーを示す位置から遠ざかる方向で、エコー高さの高低が大きくばらつくようになる。この傾向は、曲率加工を行わない探触子の場合がより大きい。

### 4. まとめ

安定した接触状態を確保するジグの使用を前提とすれば、曲率加工を行わない探触子での探傷も曲率がエコー高さのばらつきに与える影響は許容範囲といえる。今後、更に曲率加工の有無の影響の要因を考慮した実験が蓄積されることにより、規格への反映も可能となつていくと思われる。

（参考）関係規格には下記のように規定されている。

JIS Z 3060-2002 付属書 3 及び付属書 4 の使用する探触子

探触子の接触面 探触子の接触面の曲面加工は行わない。曲率半径が 250 mm 以下の場合は探触子の接触を安定させるジグを使用するとよい。

ISO/FDIS 17640 7.3.3 曲率のある走査面に対する探触子の適合

試験面と探触子シューの底との隙間は0.5 mmより大きくてはならない。円筒面又は球面に対してこの要求事項は通常次の等式が満足された時に満たされる。

$D \geq 15a$       ここに  $D$ は部材の直径mm

$a$ は探触子シューの試験の方向の寸法mm。

もしもこの要求事項を満足できない場合には、探触子シューを試験面に適合させ、そしてそれに応じて感度と測定範囲を調整しなければならない。

# TOFD法による溶接きずの検出と指示長さ測定

Weld-defect Detection and Sizing by Using TOFD Technique

○立川克美\*

KATSUMI TACHIKAWA

千葉県非破壊検査研究会

Chiba research group for Non-Destructive Inspection

高田 一\*\*

HAJIME TAKADA

長瀬尚樹

NAOKI NAGASE

千葉県産業支援技術研究所

Chiba Industrial Technology Research Institute

名取孝夫

TAKAO NATORI

株式会社ジャスト研究所

JUST R&D Co., Ltd

古川 敬

TAKASHI FURUKAWA

財団法人 発電設備技術検査協会

Japan Power Engineering and Inspection Corporation

## 概 要

TOFD法はリアルタイムに溶接部の断面画像表示が可能で、きず高さの測定精度と作業効率の良い特長を有している。NDIS2324ではきず高さの測定に限定しているが、きずの指示長さ測定手法が確立されれば、非破壊試験分野における超音波探傷の信頼性を大きく高めることが可能となる。本研究では、きず指示長さ測定の方向性を確立することを目的に、千葉県非破壊検査研究会の会員企業が、板厚60mm以下の溶接継手を対象に集合実験を実施した。板厚と適用探触子の特性を考慮した条件で、探傷画像に基づいたきずの限界値を決定すると、精度よくきずの指示長さを測定できることが分かった。

KEYWORDS : TOFD technique, flaw sizing

## 1. はじめに

縦波の伝搬時間差を利用して、きずの高さを計測するTOFD法は、従来法である横波の一探触子パルス反射法と比較して高い精度できず高さを測定することができる。

この特長を生かし、NDIS2423-2001: TOFD法によるきず高さ測定方法が規格化された。NDIS策定当時はきず指示長さに関する実験データの報告例が少なかったため、高さの測定に限定した規格として制定された経緯がある。

TOFD法はエンコーダ付きスキャナーを用い、溶接線に対向する位置に送受信探触子を配置し、薄板であれば一回のスキャン、厚板においても送受信探触子の交軸点をずらした数回のスキャンで得られる溶接部の断面画像からきずを計測するもので、きずの検出性と記録性及び作業性に優れているのが特徴である。TOFD法にきずの指示長さ測定手法が確立されれば、従来のパルス反射法に優る超音波探傷方法として超音波探傷の信頼性を大きく高めることが可能となる。

この目的を達成するために、本実験では千葉県非破壊検査研究会（以下、CNDI）が主となり、千葉県産業支援技術研究所並びにJSNDI「接合部の超音波探傷研究委員会」の支援を受け、CNDI会員が保有するTOFD装置と探触子を用いた集合実験を実施し、きず指示長さ測定に有効な探傷条件及び測定条件の選択について研究を行った。

\* 清水建設(株)技術研究所

\*\* JFE技研(株)

## 2. 実験方法

### 2. 1 実験参加者

本実験ではCNDIと千葉県産業支援技術研究所が中心となり、(社)日本非破壊検査協会の「接合部の超音波探傷研究委員会」に属するTOFD探傷法WGと協力しながら本研究を計画した。実験に際してはデータの信頼性と中立性を保つため、TOFD法の探傷に十分な実績を有する検査会社6社、TOFD装置の製造販売メーカー4社、中立的立場の2機関を合わせて12者が参加した。参加チームを表1に示す。

### 2. 2 使用装置

参加チームの使用した装置をメーカー別に分類したものを表2に示す。現在国内で市販されている主なメーカーの機種が適用されたと見ることができる。

TOFD探傷では広帯域型の小径探触子が使用されるが、実験チームが用いた探触子は、振動子サイズ、周波数、ダンピング程度、接近限界距離等は種々のものがあり、多数の探触子を準備して実験に参加したチームもあれば、1種類の探触子で全ての試験体のデータ採取を行ったチームもある。

使用探触子の一覧を表3に示す。

表1 TOFD探傷実験参加チーム

表2 使用探傷器名

| 参加チーム名                 | 分類                  |
|------------------------|---------------------|
| 1 (株)シーエックスアール千葉営業所    | 検査・設備<br>保安専門会<br>社 |
| 2 (株)ダンテック関東支社千葉営業所    |                     |
| 3 (株)日鐵テクノリサーチ検査・計測事業部 |                     |
| 4 新日本非破壊検査(株)関東支社      |                     |
| 5 (株)アイ・エム・シー          |                     |
| 6 東電工業(株)検査技術センター      |                     |
| 7 (株)ジャスト研究所           | 探傷装置メ<br>ーカ         |
| 8 日本クラウトクレマー(株)        |                     |
| 9 菱電湘南エレクトロニクス         |                     |
| 10 ダイヤ電子応用(株)          |                     |
| 11 (財)発電設備技術検査協会       | 中立的機関               |
| 12 千葉県産業支援技術研究所        |                     |

| TOFD装置製造者    | 型式                 |
|--------------|--------------------|
| 日本クラウトクレマー   | USI- $\alpha$ TOFD |
| R/D テック      | $\mu$ TOMOSCAN     |
| 菱電湘南エレクトロニクス | UI-25              |
| ジャスト研究所      | UTステーション           |
| ダイヤ電子応用      | FINE-TOFD 2000     |
| ダイヤ電子応用      | multi-TOFD IV      |
| 新日本非破壊検査     | UマスターII            |

表3 使用探触子一覧

| 周波数 (MHz) | 屈折角             | 振動子サイズ   |
|-----------|-----------------|--|
| 5         | 45° 50° 60° 70° | $\phi 6$ , $\phi 0.25$ in (6.35 mm), 5×5, 7×7, 10×10 |
| 7         | 60° 70°         | 7×7  |
| 7.5       | 60°             | $\phi 0.25$ in (6.35 mm)                             |
| 10        | 60° 70°         | $\phi 3$ , $\phi 0.25$ in (6.35 mm), 7×7             |
| 15        | 60° 70°         | $\phi 0.25$ in (6.35 mm), $\phi 4$ , 7×7             |

### 2. 3 測定用試験体

実験に供する試験体はSM400材で、板厚（公称板厚値）6 mm, 12 mm, 25 mm, 36 mm, 60 mmの鋼突合せ溶接部を対象とした。試験体形状は図1に示すように、試験体寸法は板厚によって異なる。なお、試験体数は各板厚ともに2体準備したが、きず指示長さの評価試験に適用したのは表4の試験体で、開先形状及び対象とする評価きず個数を示した。

実験は、試験体が重量物であるため千葉県産業支援技術研究所に常設し、各チームはあらかじめ決められたスケジュール内で装置を持ち込み、データ取得を行った。

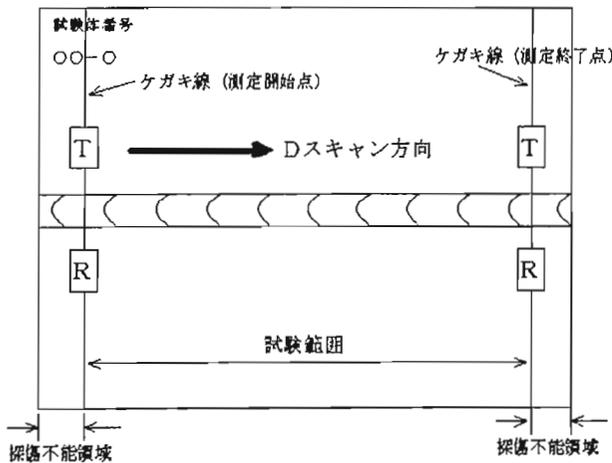


図1 試験体形状とTOFDスキャン

表4 試験体きず数

| 試験体  | 板厚 | 開先形状 | 評価きず数 |
|------|----|------|-------|
| 6-2  | 6  | V    | 3     |
| 12-1 | 12 | V    | 6     |
| 12-2 | 12 | V    | 4     |
| 25-1 | 25 | V    | 5     |
| 25-2 | 25 | K    | 6     |
| 40-1 | 36 | V    | 5     |
| 40-2 | 36 | K    | 4     |
| 60-2 | 60 | X    | 6     |

### 2. 4 探傷条件

#### (1) 探傷感度の設定

本実験では表5に示す探傷感度を採用した。探傷感度の設定はラテラル波を基本とする手法を採用し、公称屈折角60度及び70度の探触子ではラテラル波の波高値を40%及び80%とした。ラテラル波が得にくい屈折角45度の探触子では裏面散乱波を基準とし、裏面散乱波の波高値  $B_1 + 12\text{dB}$  を基本条件とした。上記3条件以外に、各参加チームが過去の探傷実績に基づいた試験条件の適用を可能とするために、独自の手法の項目を加えた。これら全ての探傷感度条件は、後の追跡調査を可能とするため、ラテラル波とRB試験体φ3横穴の下端から得られる回折波の波高値と比較した。

表5 探傷条件

| 項目            | 条件  |
|---------------|---|
| 探傷感度          | ①ラテラル波の波高値40%, ②ラテラル波の波高値80%,<br>③裏面散乱波 $B_1 + 12\text{ dB}$ ,<br>④その他 (チームによる独自の手法も可とする) |
| 送受信探触子ビームの交軸点 | ①板厚6t~36tの試験体は2/3tの深さ<br>②板厚60tの試験体は、1/3t及び5/6tの深さ  |
| Dスキャン         | ①探触子間距離 (2S) の中央が溶接部の中心にてスキャン<br>②送信側探触子がビード接近限界位置に配置にてスキャン<br>③受信側探触子がビード接近限界位置に配置にてスキャン |

## (2) きず指示長さの寸法測定条件

寸法測定条件を表6に示す。きずの指示長さは、全波形を収録したTOFD探傷データに基づき、Aスコープ表示を再現させながら最大波高値の-6dBをしきい値とする方法と、探傷結果が表示されたTOFD断面画像から計測する二つの手法を採用した。

断面画像からきずの境界値を推定する方法として、装置メーカー毎にカーソル法、ワイドビーム法、パラボラカーソル法等の名称で呼ばれている。これらは、超音波ビームの拡がりによるきず端部の放物線的な沈み込み部分に幾何学的カーソルを重ね合わせてきずの端部を決定するためのものである。本実験では、これらの手法を一括して「画像法」として分類した。

表6 きず指示長さの寸法測定条件

| 計測法    | 寸法測定条件                         |
|--------|--------------------------------|
| -6 dB法 | きずからの回折波が最大波高値の1/2を超える探触子の移動範囲 |
| 画像法    | TOFDのDスキャン画像から求める              |

## 3. 結果

参加各チームのデータは試験当日に探傷画像を提出し、指示長さは、2週間以内に指定された手法にて寸法測定し、千葉県産業支援研究所に送付した。

実きず長さの測定は試験体をビード止端部直近で切断し、側面から超音波映像装置を用いて水浸法による垂直探傷により得たCスコープ画像を基に計測した。板厚40mm以下の試験体については放射線透過試験フィルムも参考とした。

実験に用いた試験体には、当初予定した数を上回るきずが確認されたため、表4に示した試験体8体、合計39個のきずについて寸法測定を行った。



図2 TOFD探傷実施状況

### 3. 1 探傷、寸法測定条件ときず指示長さ

全ての試験体における実きず長さとしてTOFD寸法測定データを基に、板厚、探触子周波数、計測法による指示長さの標準偏差を求めた結果を表7に示す。

画像法と-6 dB法を比較すると、きず指示長さの測定には画像法の方が真値からの偏差が小さいことが分かる。また、測定についても画像法の方が作業効率は良いので、総合的に画像法が優れていると結論づけることができる。

表7の結果を基に、適用板厚と探触子の周波数及びきず長さの測定の標準偏差値を図3に画像法の寸法測定偏差として示した。さらに、-6dB法の結果を図4に示した。なお、板厚6mmで一部黒ヌキのプロットは、交軸点を4mmに設定したデータである。6mm板厚の試験材で交軸点を4mmに設定するには、屈折角70度の探触子で入射点間距離を22mmに設定する必要がある。しかし、各チームが持参した探触子やスキャナーの中にはこの条件に対応せず、交軸点が所期の探傷条件に合致しないまま探傷を行ったケースでは、薄板6mmの偏差が大きくなった。図5は板厚25mmの寸法測定結果を周波数別に整理し、実きず長さとの比較を行ったものである。

表7 計測法と試験周波数による指示長さの標準偏差

| 試験体<br>板厚         | 計測法   | 全データ     |     | 探触子の周波数  |    |           |    |          |    |          |    |
|-------------------|-------|----------|-----|----------|----|-----------|----|----------|----|----------|----|
|                   |       |          |     | 5MHz     |    | 7, 7.5MHz |    | 10MHz    |    | 15MHz    |    |
|                   |       | $\sigma$ | n数  | $\sigma$ | n数 | $\sigma$  | n数 | $\sigma$ | n数 | $\sigma$ | n数 |
| 6mm<br>(交軸 2/3t)  | 画像法   | 3.3      | 9   | 不可       | 0  | なし        | 0  | 3.4      | 6  | 3.8      | 3  |
|                   | -6dB法 | 18.5     | 9   | 不可       | 0  | なし        | 0  | 16.8     | 5  | 20.5     | 4  |
| 6mm               | 画像法   | 17.8     | 21  | 30.6     | 6  | なし        | 0  | 12.3     | 9  | 9.4      | 6  |
|                   | -6dB法 | 17.5     | 14  | 不可       | 0  | なし        | 0  | 17.3     | 8  | 19.5     | 6  |
| 12mm              | 画像法   | 6.0      | 95  | 6.0      | 32 | 6.3       | 10 | 4.4      | 41 | 10.0     | 12 |
|                   | -6dB法 | 9.2      | 66  | 6.9      | 10 | 10.6      | 10 | 9.2      | 34 | 11.3     | 12 |
| 25mm              | 画像法   | 3.5      | 136 | 3.8      | 81 | 2.6       | 20 | 3.2      | 35 | なし       | 0  |
|                   | -6dB法 | 4.1      | 110 | 4.5      | 57 | 4.3       | 20 | 3.3      | 33 | なし       | 0  |
| 40mm              | 画像法   | 6.0      | 104 | 5.8      | 64 | 7.8       | 16 | 5.7      | 24 | なし       | 0  |
|                   | -6dB法 | 7.0      | 86  | 6.4      | 46 | 7.7       | 16 | 7.8      | 24 | なし       | 0  |
| 60mm<br>(交軸 1/3t) | 画像法   | 4.6      | 33  | 5.6      | 18 | 3.9       | 6  | 3.2      | 9  | なし       | 0  |
|                   | -6dB法 | 3.3      | 30  | 4.1      | 15 | 3.1       | 6  | 2.6      | 9  | なし       | 0  |
| 60mm<br>(交軸 5/6t) | 画像法   | 5.1      | 54  | 5.4      | 35 | 4.7       | 7  | 5.0      | 12 | なし       | 0  |
|                   | -6dB法 | 8.5      | 53  | 10.1     | 34 | 2.0       | 7  | 6.7      | 12 | なし       | 0  |

$\sigma$ :標準偏差 n:データ数

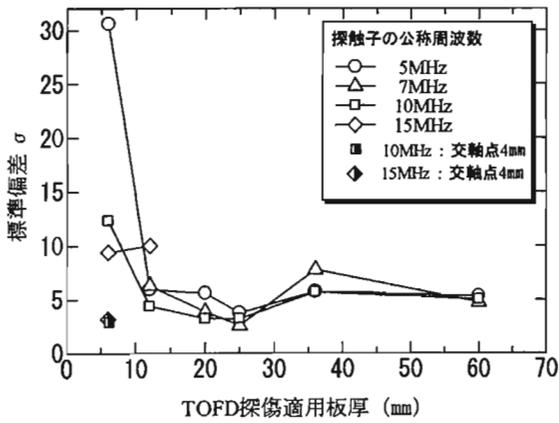


図3 画像法による寸法測定 of 偏差

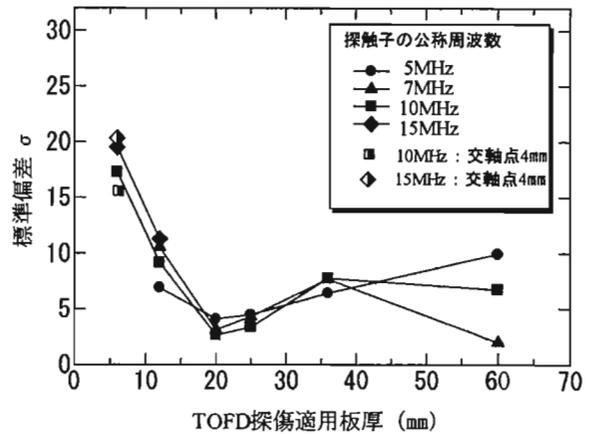


図4 -6dB法による寸法測定 of 偏差

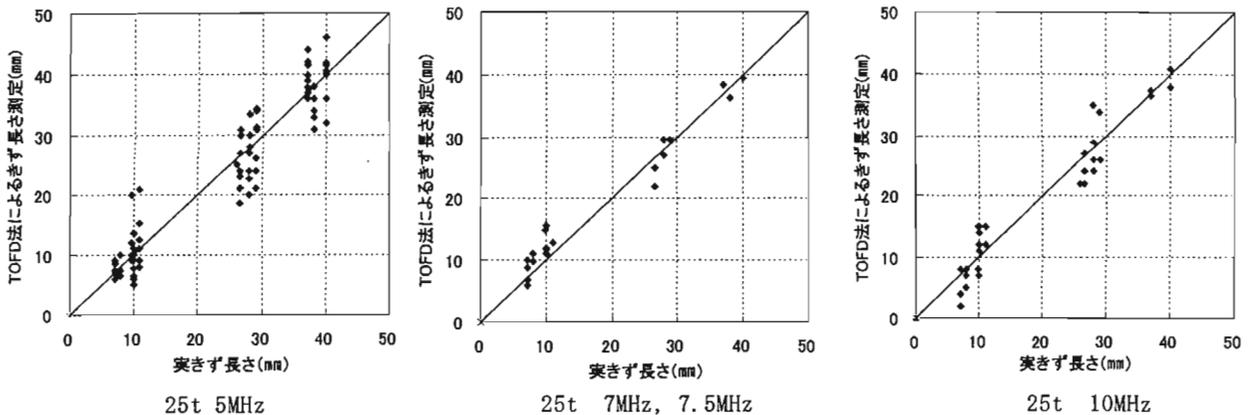


図5 画像法による板厚25mm試験体のきず指示長さの寸法測定結果

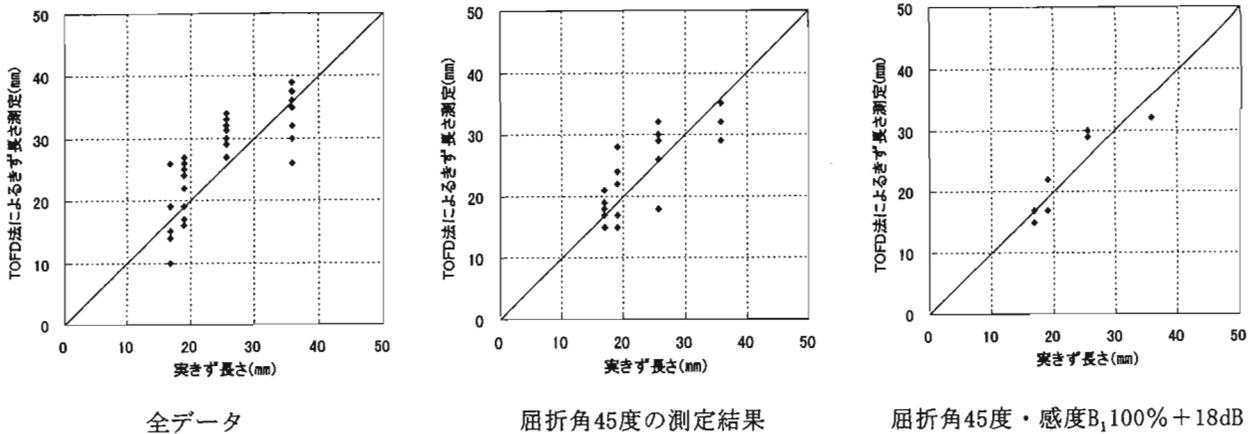


図6 板厚60t, 交軸深さ5/6 t の探傷感度と寸法測定結果

図6は板厚60mmでビームの交軸深さ5/6 t の寸法測定結果から屈折角45度に注目し、ラテラル波を探傷感度設定に用いない場合で、裏面散乱波を感度設定とした場合の結果を示したものである。探傷感度が $B_1 100\% + 12\text{ dB}$ ,  $+18\text{ dB}$ ,  $+24\text{ dB}$ の条件のうち $+18\text{ dB}$ で最も良い結果が得られた。

#### 4. まとめ

TOFD探傷の実験では12チームが参加し、板厚6mm~60mmの有効なデータが得られた。Dスキャンの画像データだけでも2,000点以上取得され、個々の欠陥データ数は10,000点以上に及ぶ。超音波映像装置とX線透過試験の結果を参考として、実欠陥長さとの相関を検討したところ以下の結論が得られた。

1. TOFD探傷においてきずの指示長さを計測する場合、装置に表示される探傷画面からパラボラカーソル法などの手法を用いてきずの端部を決定する方法や、回折波の信号強度を階調表示によって表示する手法で再現性と精度のよいデータを得ることができる。
2. 板厚12mm以下の薄板領域では、探触子の周波数は7MHz以上の広帯域、6mm程度の板厚になると10MHz以上の広帯域が有効となる。探触子は高ダンピング特性で、振動子径は $\phi 3\text{ mm}$ 程度の接近限界距離の短いことが必要条件である。
3. 板厚20mmから40mm前後においては、探触子の周波数は7~10MHzの広帯域が有効である。
4. 板厚60mmでは、探触子の2つの交軸点1/3 t および5/6 t で行うことの有効性が確認された。5/6 t では周波数5MHzの広帯域、屈折角45度で $B_1 100\% + 18\text{ dB}$ 程度の感度が有効である。
5. 探傷感度の設定はラテラル波の波高値を40%, 80%, 100% + 12dBの3段階で実験したが、対象板厚と探触子の屈折角と指向特性を考慮し、感度基準用試験片 (RB試験体) による一元的な感度設定も選択肢の一つである。

#### 5. 謝辞

本実験の実施にあたり、参加チームの皆様には貴重な時間を割いていただき、かつ多大なるご協力を戴きましたことに感謝申し上げます。さらに、超音波分科会・接合部の超音波探傷研究委員会からも種々のご指導を賜りましたことに深謝申し上げます。

#### 6. 参考文献

- 1) (社)日本非破壊検査協会, NDIS2423-2001: TOFD法によるきず高さ測定方法
- 2) CEN/TC 121/SC5-Nondestructive examination "Pr EN TS 14751 Welding · Use of time of flight diffraction technique (TOFD) for testing of welds"

特別講演

「丹羽 登先生を偲ぶ」

木村勝美



# 丹羽先生を偲んで

木村勝美

## 1. はじめに

丹羽先生は、2004年12月に脳梗塞になられ、手が幾らか不自由でワープロもぎこちないことを、先生から伺いました。しかし、電話口では全く異常を感じられないほど、きちんと話をされていました。1921年（大正10年）5月生まれ。2006/11/25 逝去（85歳）。

尾上先生のお話によると、ロケットの開発に貢献された斉藤成文先生の米寿のお祝いのパーティーが11月24日に開催され、丹羽先生も出席されました。そして、終わりごろに、少し調子が悪いと言われたそうです。そして、翌25日に急逝され、大往生を遂げられたこととなります。

木村は、丹羽先生のごく一部しか知らず、日本学術振興会と日本非破壊検査協会でお付き合いしたときの話が主体になりますが、超音波探傷の歴史と私のことについても少し触れます。かなり偏った話になることをお許し下さい。

## 2. 超音波をレーダーの校正に使う

超音波 techno 1996, No.7の丹羽先生の記事「超音波をレーダーの校正に使う」によると、

丹羽先生が東京帝大電気科の2年生だった1943年の夏に、電波兵器研究のために創設された陸軍多摩技術研究所の分室となった駒場の東大航空研究所でのレーダー研究に数人が分遣されました。

そのとき、フィリピンで捕獲した大型の超短波ヤギアンテナが時計台の上に、また屋上の小屋にはAスコープのパルス送受信機が設置されていました。

ヤギアンテナは、八木秀次先生が発明された超短波アンテナ（1926年特許）で、アメリカが実用化していました。現在テレビ用として使われています。

その電波報国隊は1944年3月に終わり、大学に引き揚げた丹羽先生は卒業研究を始められた。高木昇教授から命じられたテーマが超音波遅延素子の研究開発でした。それを使って、パルス反射形レーダーからのメインパルスに同期した同じ周波数のエコーを出し、レーダーを調整しようとするものです。

固体中の超音波エコーを見る超音波探傷器について、その電気的性能測定にパルスジェネレーターと

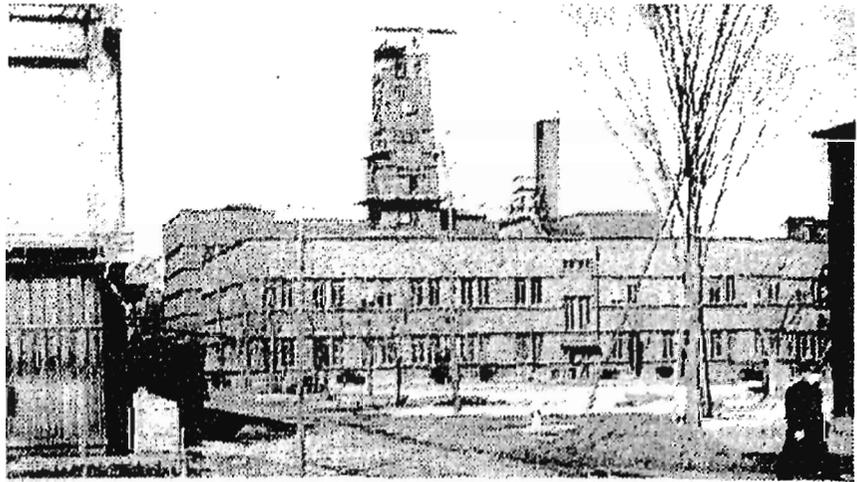


写真1 目黒区駒場の東京大学航空研究所時計塔上のレーダーアンテナ（1945年1月頃撮影）

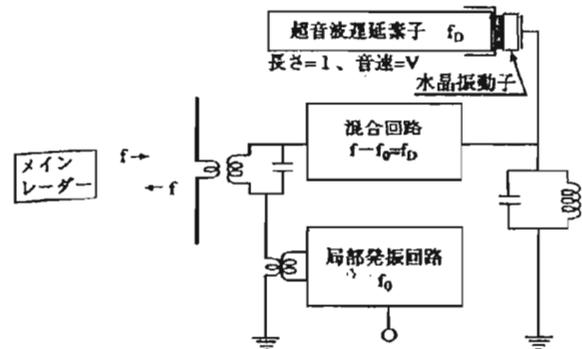


図1 超音波遅延素子とレーダー校正装置

パースト信号発生器を使う方法が JIS Z 2351 で定められています。同じ方法をレーダーに対して野外で実現しようという装置です。

図1のように、レーダーからのメインパルスと局部発振周波数から混合回路の中で中間周波数のパルスを作り、超音波遅延素子の振動子に加えます。機械的振動となった超音波パルスは溶融石英の遅延棒中を往復し、多重反射を生じる。探傷器で言えば  $B_1, B_2, B_3$  である。それが見えたときは感激した。装置はドイツから伝えられたレーボックスを基本にしたものです。

溶融石英の棒を切断して両端面を磨き、水晶板を仕上げで電極を付け、石英棒に接着する作業から始められた。溶融石英の代わりに、ガラス棒を使うことも行われたが、棒の中に気泡があり、そのエコー  $F_a, F_b$  が見られた。日本で最初の超音波探傷ではなかったかと考えている。

1944 年秋に卒業した後には、大学院特別研究生になった。較正装置を何台も作った。そして、製作した較正装置を持ってレーダー基地に行った。終戦時には、富山の基地でレーダーの調整をしていた。

パルス反射法の技術を習得していたので、敗戦後は比較的早くから超音波探傷器を試作し、工場を回った。

### 3. 共振型超音波厚さ計の研究

高木先生の下で、1950 年頃からされた研究を「超音波共振直視法による材料検査法の研究」として纏められ、1956 年 5 月に学位を取得されました。

論文は、1. はしがき、2. 超音波による材料検査法概観、3. 超音波共振法による材料検査法の理論、4. 材料中の超音波共振波形、5. 超音波共振直視装置の設計、6. 超音波共振直視装置における目盛方式、7. 超音波検査用探触子の設計、8. 凹凸面、曲面の超音波検査、9. 超音波厚み計用感度標準試験片、10. 本装置による板厚及び音速測定例、11. 本装置による材料中の欠陥及び減衰度検査から成っています。表紙は手書きで、本文はガリ版でした。

第1章「はしがき」に興味があったので以下にそのまま記します。

超音波による材料検査法は 1944 年、米国で提案されて以来、急速に発達し、最近では本邦でも材料試験法の有力な一手段として工業界で活用されるようになった。しかし超音波インパルスの反射を利用する所謂超音波探傷器についての研究は既に多く発表されているが、超音波の共振を利用する共振法についての研究発表は少ない。まとまったものとしては可聴型超音波厚み計による厚み測定に関する報告があるだけである。本稿は共振曲線をブラウン管上に直視することにより厚み測定だけでなく、共振法を広く材料検査に活用する方法を論じ、新しい方法による実用例を述べたものである。

著者は戦時中に、超音波インパルスによるレーダーの較正装置を手がけてきたので、1948 年頃、外国から超音波探傷器の情報が僅かずつ入ると共に東京大学において高木教授の御指導のもとにその研究、試作を始め、東大大山松次郎教授を主任研究者とする文部省科学試験研究に参加してその実用化を計ってきた。1951 年、日本学術振興会製鋼委員会の中に超音波探傷法協議会が東大山内二郎教授を主査として発足して以来、その会の幹事として超音波探傷法の研究連絡及其実用化に努めると共に、超音波探傷器用感度標準試験片制定の要望が起るや、基礎実験、形状素材の選定、試作品を各工場へ持廻っての



超音波共振直視法による  
材料検査法の研究

丹羽 登

実用化試験、等を行って同会が諸外国にさきがけて二種の標準試験片を制定、製作、配布するに到る迄の世話役を務めてきた。

これらの超音波探傷器に関する研究を行っている間に、インパルス反射法の根本的な欠陥である近距離の探傷には共振法が有利なこと、板厚測定ということは探傷以上に工業界での需要があり、それには共振法の方が探傷器より装置が簡単で薄物迄計れ、しかも精度が良いこと等に気が付き、超音波検査法の活用には是非インパルス法と共に共振法も併用すべきことを痛感した。

そこでインパルス法と平行して共振法の基礎研究を始め、先ず、1950年に可聴型超音波厚み計を試作し、その実用試験を行うと共に、ブラウン管を使った直視型超音波厚み計の設計、試作を始め、1951年末、化学工場のタンクで双方の比較試験を行った。その結果直視型の方が遙かに測定能力が高く、現場での測定にも便利なことを確めたので、それ以来専ら直視型装置の改良と適用範囲の拡大につとめ、特に直読目盛方式、リミットゲージ目盛方式を考案して測定の簡易化を計ってきた。特許は取られなかったようです。更に実験室で種々の材料検査の依頼に応ずると共に、諸種の工場からの要請にこたえて試作品を現場に運んで実用試験を行い、且つ個々の要求に対する装置の設計を行ってきた。

又この装置の感度を記録し、或いは感度を相互に比較するために感度標準が必要であるにもかかわらず国内国外共未だ作られていないので、先に超音波探傷器用感度標準試験片を制定したときの経験を生かして超音波厚み計用感度標準試験片に要求される諸特性を論じ且つその一例を提案、試作、試用してその有効なことを示した。

以下省略しますが、丹羽先生が何故、共振形超音波厚さ計の開発研究に取り組まれたのかが良く分かりました。

丹羽先生は実際に役立つことを重視されたようで、次に記す学振での仕事も、その後のロケットの検査でも、現場で実際に役に立つことを一生懸命やっておられます。このことは、お父様の丹羽保次郎博士が、写真電送装置を研究試作し、NE式として発表、昭和天皇の即位式にあたり、新聞写真の速報戦で欧米の製品を圧勝した。そして、ファックスの基礎を築かれたこと、と関係があるように思われます。

第4章の共振波形の一例を右に示します。共振形厚さ計ではこんな波形が出ます。

共振型厚さ計は20年以上前に姿を消してしまっただので、装置とブラウン管波形を、日刊工業の「超音波探傷法」に従って示します。

共振型厚さ計が姿を消した理由は、高感度で高分解能な探触子と遅延体付きの二振動子探触子、高感度な広帯域増幅器、及びデジタルシステムの出現によって、パルス反射式厚さ計が開発されたためと判断されます。

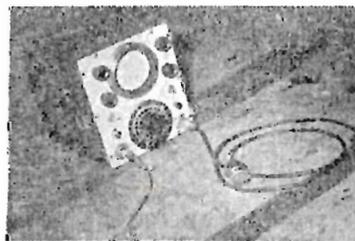


図 3-83 共振型超音波厚さ計の装置  
(解説書第3巻 TG-3-A)

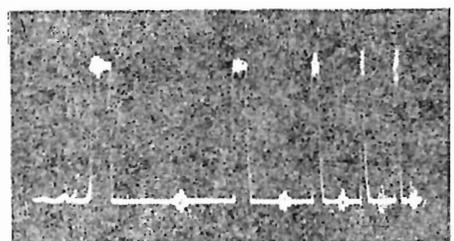


図 3-84 共振波形と周波数表示の重ね合わせ

#### 4. 日本学術振興会超音波探傷法協議会での活躍

超音波探傷器が開発され、イギリスとアメリカから輸入され、また国内では、島津製作所、日本無線、三菱電機、旭電気、東京超音波工業および帝国通信で製造されました。特許にからんだ Sperry と Krautkrämer の販売協定で、日本には Krautkrämer の探傷器は輸入されませんでした。

超音波探傷器の開発は、戦時中にソナーの開発に携わった技術者の方々によって行われたようです。ソナーの開発に携わっていた技術者は、探傷器を使って探傷している写真を見て、探触子と探傷器の構造が分かったと言われています。しかし、特許（アメリカの特許権 1944 年～1964 年）の関係で、鳥津製作所は早く撤退しました。旭電気と東京超音波工業も短期間で撤退したようです。

1950 年に造船所で鋼板および鍛鋼品の検査に使用され始め、製鋼所との間で問題になりました。

超音波探傷法は、下手をすると、無害な欠陥まで検出して、間違いに刃物のようなことになるので、適切に運用することが必要だったようです。

#### 4.1 標準化

そこで、山内二郎東大教授を主査とし、当時超音波探傷器を使用していた製鋼所と造船所の関係者、超音波探傷器の製作者、大学・研究所などの超音波探傷法の研究者などを委員として、1951 年 4 月に学振の製鋼第 19 委員会の中で、「超音波探傷法協議会」が発足しました。

超音波探傷法協議会の委員長は沢村宏先生、主査は山内二郎先生。丹羽先生は幹事で、高木昇先生、菊池喜充先生、井元艦二先生および前橋陽一さんが中立委員でした。その他、日本製鋼所、住友金属、三菱製鋼、新三菱重工、神戸製鋼、三菱電機、三菱日本重工、八幡製鉄、鉄道技研、三菱製鋼、石川島重工、日本無線、日本特殊鋼、日立製作所、新理研工業などが委員でした。

各委員の研究の結果、標準用語の制定、感度標準、標準試験片 S T B - I (1953 年) と S T B - II (1954 年) の制定と製作配布などを実施し、製鋼所、造船所などの超音波探傷技術の向上、相互比較の確立など、協議会の目的を達成することが出来ました。

丹羽先生は、新三菱重工神戸造船所の有馬春男さん達と協力して、S T B - I と S T B - II を制定するのに重要な役割を果たされました。

#### 4.2 超音波探傷の本の発行

1951 年から 1955 年までの 5 年間に、120 件もの研究報告が提出されました。その頃は、JSNDI の第 2 分科会よりも、超音波探傷法協議会の方が研究発表が盛んでした。第 2 分科会資料の数は 1952 年～1956 年で 75 件でした。

これらの研究成果を踏まえて、1956 年 1 月に丸善から「超音波探傷法」が発行されました。世界最初の超音波探傷の本です。

この本で、丹羽先生は、標準試験片と種々の超音波探傷法について、高木昇先生と共著の形で執筆されています。

その年の 7 月に、金属材料技術研究所が設置され、その年の終わり頃に、木村は超音

波探傷器を購入して、超音波探傷の勉強を始めました。木村の大学 1 年先輩の前橋陽一さんが、浜松町にあった東京都立工業奨励館で既に超音波探傷の研究をしておられました。それで、木村は奨励館に毎日のように通って、前橋さんに丁稚奉公するような形で、超音波探傷の勉強をしました。1960 年 5 月に

## 超音波探傷法

日本学術振興会  
編

1956

丸善株式会社

### 執 筆 者 名

|                       |  |                                    |
|-----------------------|--|------------------------------------|
| 1. まえがき               | 東京大学工学部  | 工藤 山内 二郎                           |
| 2. 超音波探傷法             | 東京大学電機工学部  | 工藤 菊池 喜充                           |
| 3. 探傷図形の分類とその判定法      | KK神戸製鋼所検査部長<br>新三菱重工工業区KK神戸造船所<br>KK神戸製鋼所検査部長                    | 工藤 伊丹栄一郎<br>有馬 春男<br>池田 公二         |
| 4. 超音波探傷法の原理          | 東京大学電機工学部  | 工藤 菊池 喜充                           |
| 5. 進歩、治癒に因する超音波探傷の使用例 | 新三菱重工工業区KK神戸造船所検査部長<br>" 神戸造船所検査部長<br>三菱日本重工工業区KK神戸造船所検査部長       | 工藤 伊丹栄一郎<br>有馬 春男<br>岡崎 正臣         |
| 6. 探傷における超音波探傷の使用例    | KK神戸製鋼所検査部長<br>KK日本製鋼所高尾製作所検査部長<br>KK神戸製鋼所検査部長<br>住友金属工業区KK製鋼研究所 | 工藤 伊丹栄一郎<br>高津 美<br>池田 公二<br>白坂 剛二 |
| 7. 増幅に関する超音波探傷の使用例    | 新三菱重工工業区KK神戸造船所検査部長<br>" 神戸造船所                                   | 工藤 伊丹栄一郎<br>有馬 春男                  |
| 8. 感度標準試験片            | 東京大学工学部<br>新三菱重工工業区KK神戸造船所<br>住友金属工業区KK製鋼研究所                     | 工藤 高木 昇<br>丹羽 英<br>有馬 春男<br>柴 榮一   |
| 9. 種々の超音波探傷法          | 東京大学工学部  | 工藤 高木 昇<br>丹羽 英                    |
| 10. 超音波探傷法の制定         | "  | "                                  |
| 11. 学振第 19 委員会報告文書    | "  | 日本学術振興会                            |
| 12. 超音波探傷法以外の参考文献     | 東京大学工学部  | 丹羽 英                               |

垂直探触子の DGS 線図の最初の研究（超音波探傷における傷エコー高さの近似計算）を超音波探傷法協議会で発表しました。これで、木村は学振に仲間入りできました。翌 6 月に STB 再製作委員会が発足し、それに参加させて頂きました。そして、STB-III（後の STB-G）の開発研究が始まりました。

### 4.3 日本での超音波探傷の理論と超音波探傷の普及

アメリカの特許で押さえられていた日本で、超音波探傷器を大っぴらに製造できるようになったのは 1964 年です。そして、クラウトクレマーの探傷器を輸入できるようになり、小型探傷器 USK4 が輸入され、性能が優秀であることが確認され、日本の探傷器メーカーとユーザーに大きな衝撃を与えました。

超音波探傷法の理論としての「傷の反射率」の大元は、実吉純一先生が大阪大学におられたとき、潜水艦検知用のソナーのために「音波と超音波の反射について」と題して、日本音響学会誌に 1943 年に発表された論文です。

菊池喜充先生が、それを超音波探傷に有用であるとして引用して、「反射率」として書いておられます。「傷の反射率」となったのは、1964 年に日刊工業から刊行された「超音波探傷法」からです。その本をうっかり捨ててしまいましたが、1974 年のものと余り変わらないようです。



日本学術振興会超音波探傷協議会が四国の新居浜で開催した講演会での超音波探傷の講演 1965 年



阿波踊りの見物に向かう船上で  
丹羽先生、前橋さん、秋園先生 1967 年 8 月

JSNDI の歴代会長と現役理事との懇談会  
1967 年 8 月

左から 木村、丹羽、中村（林）、一色、石井  
右から 中村（素）、橋本、高木、木原、柴田



日本学術振興会でお世話になった事務局の  
百瀬さんに感謝する会。

1968 年 4 月 9 日

後列左から 小笠原、舟久保、戸田、赤沢、  
間野、金子、平岡

前列左から 近藤、井元、丹羽、百瀬、木村、  
前橋、都丸



### 4.4 日刊工業から「超音波探傷法」を発行

1964 年には、1956 年の本と同じ名前の「超音波探傷法」ただし、2 倍半の厚さの 800 ページくらいの

本が、丸善ではなく、日刊工業新聞社から発行されました。

編集委員長 菊池喜充

編集幹事 丹羽 登、前橋陽一

編集委員 井元艦二、木村勝美、間野浩太郎、高橋俊雄（小笠原静夫）、酒井重雄（赤沢雄二）、前川静弥（高沖 亮）、佐藤忠雄（小野光造、都丸 要）、岡崎正臣（戸田正福、菊池晋一）、近藤敬吉

1964年版では、執筆者名が明らかにされていませんが、目次を詳しく調べてみると、大部分の項目名とページ数が1974年の改訂新版と殆んど同じですから、執筆者名も殆んど同じであると判断されます。

丹羽先生は、はしがき、共振形超音波厚さ計、共振法、感度標準試験片、学振感度標準試験片、厚さ測定、及び超音波探傷法関係の文献について執筆されています。

# 超音波探傷法

改訂新版

日本学術振興会  
製鋼第19委員会編

1974

日刊工業新聞社

1974年に発行された改訂新版では、菊池先生が編集委員長で、丹羽先生、井元先生、前橋さん及び木村が幹事でした。斜角探傷関係、厚鋼板の探傷、溶接部の探傷、管の探傷がかなり改訂され、自動探傷が追加されました。

## 4.5 学振での表彰

丹羽先生は、1969年に学振で功労者表彰を受けられました。超音波探傷法協議会の運営、STB-IとIIの開発、1956年と1964年の「超音波探傷法」の刊行に努力されたためと思われます。

右の写真は、日本学術振興会 製鋼第19委員会 超音波探傷法協議会 STB関係者を表彰 1977年5月 丹羽先生は表彰する側

左から木村、丹羽先生、山内先生(協議会)、松下先生(製鋼19委)



学振の超音波探傷協議会およびNDIの超音波分科会を指導された菊池喜充先生を仙台の病院にお見舞い。1980年

菊池先生は1984年10月に逝去。葬式にも皆で行きました。



改訂新版編集委員表

東北大学電気通信研究所教授 菊池喜充<sup>2</sup>

改訂新版編集幹事

神户大学工学部教授 井元艦二  
 東京大学宇宙線研究所教授 前橋陽一  
 金属材料技術研究所 木村勝美  
 金属材料技術研究所 岡崎正一

改訂新版執筆および執筆担当一覧

東京大学宇宙線研究所教授 丹羽 登 1-1~1-4, 2-5, 4-7, 6-1~6-2, 8-4, 1~2, 9-3, 9-5

岡山大学 教授 井元艦二 2-1~2-4, 2-7, 2-9, 1, 2-8, 2-4, 2-12, 2-17, 4-1, 4-2, 4-4, 6-1, 6-6, 7-7, 7-12, 7-7, 8-3, 10-1~10-7, 付2~2-20

金属材料技術研究所 木村勝美 2-5, 2-6, 2-8, 2-9, 1, 2-9, 2, 4-5, 1~4, 4-5, 1~2, 6-2, 6-4, 6-4, 1, 8-4, 8-5, 8-6, 8-12, 付20, 付21, 付3~6

青山学院大学 教授 岡崎正一 2-1, 1-3~4, 2-2, 6-3, 6-5, 6-6, 1, 7-2~4

大王電機(株) 技術部長 吉田 3-3, 3-4

(株) 東京電機 向本 天福 2-4, 6-7, 1~4, 14

三菱電機(株) 技術部長 高橋 2-7, 1

(株) 日本機械学会 学術調査 内田 大 郎 2-7, 2, 10, 8

日本鋼管(株) 技術研究所 富士 野 4-2, 4-5, 9-5, 11-2, 6

日本鋼管(株) 技術研究所 湯沢 隆二 5-6, 1~3, 5-6, 5, 9-4, 9-7, 2~5

金属材料技術研究所 野田 隆一 5-1~4, 5-5, 1~2, 5-6, 4, 5-7, 5, 8-12, 2, 8-12, 3

(株) 日本鋼管(株) 技術研究所 高橋 亮 7-5~10, 8-1, 7, 8-1, 3, 8-1, 4, 8-2, 8-3, 8-5, 8-11

新日本鋼管(株) 八幡製鉄所 青木 正一 7-11, 8, 9

新日本鋼管(株) 製鋼部 松本 幸人 7, 11

三菱重工(株) 製鋼部 松本 正 隆 8-1, 8, 2

## 5. ロケットの検査法の開発と検査の実施

東京大学宇宙航空研究所で開発が進められていた固体燃料ロケットのロケットモーターにおいては、内部の推薬と外側のケースとの間に接着不良があると、異常燃焼や爆発する可能性がある。また、推薬に亀裂があると、異常燃焼する。

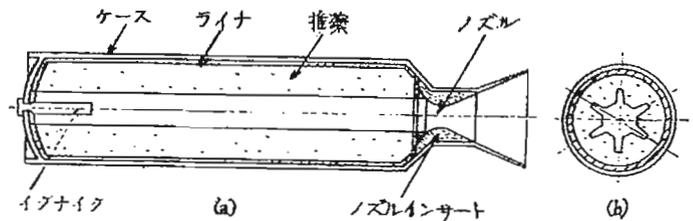
東京大学が中心となって開発してきたカッパ、ラムダ、ミューなどのロケットに対して、

丹羽先生は1964年頃から種々の非破壊検査法について検討された。そして、放射線透過試験、浸透探傷試験及び磁粉探傷試験を実施された。

接着の良否については、超音波のパルス反射法を使うのが最も有効であることが分かったので、多重反射図形が変化することを利用して、検査を行うことにした。

作業は、まず4MHzで検査を行い、接着不良部が発見されたとき、6MHzの小型探触子で不良部の範囲を詳しく調べた。これは、製造時ばかりでなく、保管中の変化もあるので、ロケット発射のための組み立て時にも実施された。

その他、ロケットの追跡の仕事や宇宙観測用のTV観測システムの開発もされたようです。



第1図 固体燃料ロケットの構造

## 6. 日本非破壊検査協会での活躍

### 6.1 非破壊検査法研究会の設立

1952年の春に、木原博船舶技術研究所溶接部長が非破壊検査の重要性を認め、船研の石井勇五郎研究室長が動かされました。そして、すでに学振で超音波探傷法協議会の幹事をしている東大の丹羽助教授を尋ねて相談をされました。そのとき、丹羽先生は27歳でした。7月に開催された非破壊検査の講演会の後で協議が行われた結果、名称を「非破壊検査法研究会」とし、その結成準備委員会が作られました。委員長は木原博、委員は井川博、小林卓郎、丹羽登、中村孝、石井勇五郎でした。更に協議の後、10月に設立総会が開催されました。日本非破壊検査協会となったのは3年後の1955年です。



JSNDIの歴代会長と現役理事との懇談会  
1967年8月

左から 木村、丹羽、中村(林)、一色、石井  
右から 中村(素)、橋本、高木、木原、柴田

### 6.2 日本非破壊検査協会会長に就任

丹羽先生がNDIの会長になられたのは1971年です。そのときの挨拶文を以下に記します。

このたび総会及び理事会の推挙により、光輝ある日本非破壊検査協会の会長に就任しました。微力ながら最善の努力を尽くす所存であります。

#### NDIの問題点

当協会の前身である非破壊検査研究会の発足当時から私は世話役をつとめ、すべての役付理事を経験してきました。すなわち会の運営について、いつでも



発言し、実行できる立場にあったわけで、かつ、及ばずながらその立場を当協会のために有効に使ってきたつもりです。したがって、会長になったから大改革を実施しようなどという大それた考えは持っておりません。会長一人で動かせるほど、現在の日本非破壊検査協会は小さくないからであります。

|           |                                 |
|-----------|---------------------------------|
| 学会か協会か    | 4本の枝（現場、研究、コンクール、認定）を広げている学会的協会 |
| 技量認定制度の充実 | 今後も強力にこの制度を押し進める                |
| 20年のあゆみ   | マンネリにならずに、着実な歩みを続ける             |

### 6.3 NDIの技量認定

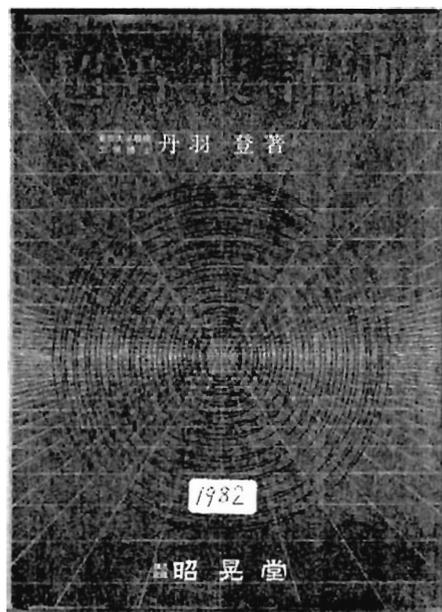
丹羽先生は、NDIの技量認定制度の運営に協力された他、技量認定の試験官もされました。此处に示す写真は、実技試験の立会いをされているところです。木村が、UT1級の試験を受けたときの面接試験官でしたから、UT2種と3種の試験官をされたことになります。超音波探傷実技試験の立会い 1975年11月



### 7. 「超音波計測」の執筆

「超音波計測」は、1982年に昭晃堂から刊行されました。この本は、超音波計測の原理、画像形成、工業での計測、海洋開発における計測、環境計測、医学・生物学における計測、物性測定、超音波の送受波とその伝播からなっています。

この本は評判が良く、色々な学校で教科書として使用されていると、丹羽先生から伺いました。



### 8. 千葉工業大学

丹羽先生は、1982年春に東京大学で定年を迎えられた後、千葉工業大学の教授になられました。そして、「非破壊検査工学」を始められたのが嬉しい、と書いておられます。

これで、千葉県との関係が再び深くなりました。そして、1981年に発足していた千葉県非破壊検査研究会の会員となられました。そして、会長もされました。

### 9. その他

1994年から日本非破壊検査工業会（当時の名称は非破壊検査振興協会）の事業に協力され、「適格事業者審査制度」の審査委員長、その後1997年からはISO 9000sの「審査登録機関認定」の諮問委員長をされました。

私が覚えている範囲及び調べた範囲で書きました。重要なことで漏れていることや間違っているところがあるような気がしますが、お許しを頂きたく存じます。