

# TOFD法によるきず評価に関する研究

素材開発室  
企画調整室  
千葉県非破壊検査研究会

立川 克美, 長瀬 尚樹, 吉田 浩之  
細谷 昌裕  
高田 一

## Research on Evaluation of Flaw Length by Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique

Katsumi TACHIKAWA, Naoki NAGASE, Hiroyuki YOSHIDA and Masahiro HOSOYA  
Hajime TAKADA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chiba research group for Nondestructive-Detection Inspection

超音波縦波の伝搬時間差を利用して欠陥高さを計測するTOFD法(time of flight diffraction)は、従来法である横波パルス反射法と比較して高い精度で欠陥高さを測定することができ、TOFD法の試験結果を断面画像として表示する記録性も有している。TOFD本手法は近年、欠陥やき裂高さの有効な測定方法として一部の産業分野で適用されている。この高さ測定の長所に加えて、欠陥の指示長さ測定手法を確立して規格化すれば、高い信頼性と記録性および経済的効果を併せ持つ新たな超音波探傷方法として関連業界への有効活用が期待できる。

本研究では、この目的を達成するために、欠陥指示長さ測定方法のJIS規格化を視野に入れた集合実験を実施したものである。

### 1. はじめに

安全で快適な社会生活を営むためには、産業設備や社会インフラを構成する各種構造物（発電設備、プラント、鉄道、橋梁、建築構造物など）の安全性確保が極めて重要となる。構造物の保守検査において、発生した亀裂などの欠陥高さ（深さ）測定は構造物の保守や残存寿命の推定にとって重要なファクターである。現在、適用されている非破壊試験方法のうち、放射線、超音波、磁気浸透などの各種非破壊検査法は、そのほとんどが欠陥の検出と長さ測定を目的としたものである。唯一、欠陥高さの計測法とされている超音波端部エコー法は、現状では必ずしも信頼性が高い方法とはいえず、発電設備プラントにおいて問題となる事態が発生している。

縦波を用いるTOFD探傷法は、現在主流とされている横波パルス反射法と比較して格段の測定精度であることが確認されている。この有用な探傷手法を各種構造物の製造ならびに保守検査に供するには、国家規格であるJIS規格や特定構造物の製作基準等に取り込まれることが必須条件となる。

本研究はTOFD法のJIS規格化を目的として実

施し、一回の走査で欠陥高さと長さ測定を同時に測定可能とする方法を開発し、検査の高能率化、信頼性と測定精度の向上をターゲットとしている。JIS化に向けた基礎データ採取には、複数のメーカーの装置と複数のチームによる実験データが必要で、千葉県産業支援技術研究所では当研究所に事務局を置く千葉県非破壊検査研究会との共同研究として、研究会に所属する検査専門会社、試験装置メーカーからの参加を得て本研究を実施した。

### 2. TOFD法の特徴

パルス反射の斜角探傷法は図1に示すように、探触子から発生した超音波を材料中に横波を伝搬させ、欠陥部から反射する超音波を同じ探触子で受信し、幾何学的計算により欠陥位置を特定するものである。欠陥指示長さは欠陥エコー高さが、定められたしきい値を超える探触子の移動距離で求められるが、超音波の散乱減衰、反射指向性、モード変換など複雑な超音波伝搬特性が超音波探傷の欠陥検出能と測定精度の信頼性を低下させる要因となっている。

これに対してTOFD法は図2に示すように、エン

コーダー付のスキナーにセットした送受信探触子を試験対象部を挟んでセットし、欠陥上端部からの散乱波と下端部の回折波の伝搬時間差を幾何学的に求める手法で、装置に組み込まれたコンピュータソフトによりリアルタイムに断面画像を表示することができる。

TOFD法は超音波の伝搬において減衰は生じるものの、材料中を最も速く伝搬する縦波モードを用いるため、横波パルス反射法と比較して極めて高精度で欠陥高さが求められる。過去の研究<sup>4)</sup>から、欠陥の密着度が検出性に影響を与え、欠陥の開口幅が $5\mu$ 以上になると画像構成に必要な信号強度が得られることが分かっている。

### 3. 実験参加者

本実験では千葉県産業支援技術研究所が中心となり、当研究所に事務局を置く千葉県非破壊検査研究会と非破壊試験関連 J I S 規格の原案作成に実績のある（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」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および中立性を保つために、TOFD探傷に実績のある民間の検査会社6社、TOFD装置の製造販売メーカー4社、中立的立場の2機関合わせて12者が参加した。参加チームを表1に示す。

### 4. 実験方法

実験では、板厚6mm、12mm、25mm、36mm、60mm、100mmの鋼突合せ溶接部を対象に12チームが参加した。試験体は重量物であるため研究所に設置し、各チームは装置を研究所に持ち込み、あらかじめ決められたスケジュール内でデータ取得を行うこととした。

#### 4.1 実験に使用した装置

参加者が使用した装置をメーカー別に分類すると、表2のようになる。使用探触子を表3に示した。

#### 4.2 試験体

測定試験に供する試験体はSM400材で、板厚（公称板厚値）及び試験体番号を表4に示す。

(a) 課題試験体：実験の手順書に示す条件に従

った計測方法による。

(b) フリー試験体：参加チーム独自の条件による検出性試験・評価試験により、その手法を明記する。

### 4.3 試験範囲

検出性試験における探傷領域は表4および図3に示すケガキ線範囲の全板厚とする。探傷は、片面側からのみとする。

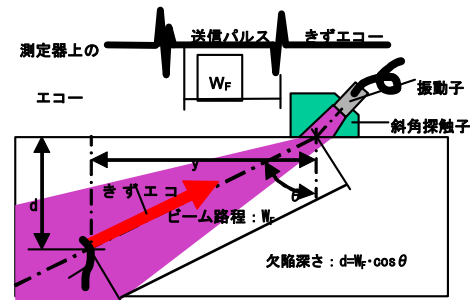


図 1

パルス反射法の概念図

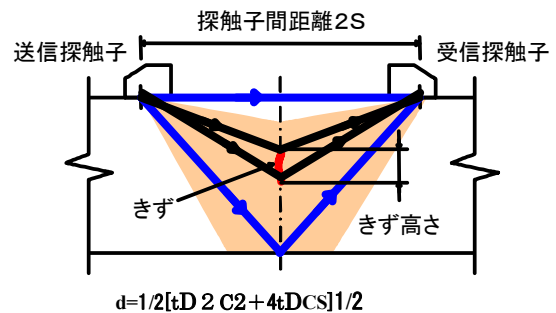


図 2 TOFD法の概念図

表 1 実験参加者名

番号	参加企業名	分類
1	(株)シーエックスアル千葉営業所	検査専門会社および設備保安専門事業者
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	装置メーカー
6	東電工業(株)検査技術センター	
7	(株)ジャスト研究所	
8	日本クラウトクレーマー(株)	
9	菱電湘南エレクトロニクス	中立的機関
10	ダイヤ電子応用(株)	
11	(財)発電設備技術検査協会	
12	千葉県産業支援技術研究所	

サイジング性試験は検出性試験の後に行う。対象欠陥は、各チームの判断に委ねた。

#### 4.4 試験項目

##### (1) 検出性試験

図3に示された探傷範囲を、各チーム独自の手法および全参加チーム共通の方法でDスキャンする。

##### (2) サイジング性試験

TOFD法による検出性試験終了後、欠陥高さの及び欠陥長さのサイジングを行う。サイジングは参加チームの共通方法としてしきい値を、欠陥からの回折波エコーの-6dB、-12dBおよび独自の方法の3通りとした。

速報として当日、測定部位毎のTOFD画像等をビットマップファイル又はExcelやWordに貼り付けて提出し、サイジングデータは試験終了後2週間以内に指定の様式に従い提出する。

#### 4.5 測定条件

##### (1) 探傷感度の設定

- ① 各社独自の方法（独自の方法を有しない場合は省略することができる）
- ② 本実験で指定する方法
  - (a) 独自の条件（ラテラル波の高さを記録し、RB試験片φ3とのdB差を記録）
  - (b) ラテラル波40±10%（RB試験片所定深さのφ3との比較を記録）
  - (c) ラテラル波80±10%（RB試験片所定深さのφ3との比較を記録）
  - (d) ラテラル波が得られない場合は裏面エコー100%程度+12dB（RB試験片φ3との比較を記録）

##### (2) 探触子の走査

図3で示した範囲を、Dスキャンにより指示された面から走査する。なお、探触子間距離（2S）の設定は使用する探触子の屈折角に基づいて、超音波ビームの交軸点が板厚の2/3tとなる深さ位置から求める。また、60t、100tの試験体については、交軸点を1/3t及び5/6tの2水準で行う。

##### (3) 試験体と実験風景

図4に試験体を示す。図5、図6は産業技術研究所が(財)双葉電子記念財団より自然科学研究助成を受けて導入した国産のTOFD探傷装置UTステ

表2 使用装置名

使用装置名
日本クラウトレーマ USI-α TOFD
R/Dテック μ TOMOSCAN
菱電湘南エレクトロニクス TOFD25
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
発電技研 イムシ計測
新日本非破壊検査 UマスターII

表3 使用探触子（全35種類）

周波数	屈折角	振動子サイズ
5	35° 45° 50° 60° 70°	φ6, φ0.25in (6.35mm), 5×5, 7×7, 10×10,
7	60° 70°	7×7
7.5	60°	φ0.25in (6.35mm)
10	60° 70°	φ3, φ0.25in (6.35mm), 7×7
15	60° 70°	φ0.25in (6.35mm), φ4, 7×7
20	60°	—

表4 試験体概要

試験体番号	板厚	開先形状	探傷範囲 (Xs~Xe)	備考
6-1	6	V	120 ~ 450	課題試験体
12-1	12	V	150 ~ 520	課題試験体
25-1	25	V	30 ~ 290	課題試験体
40-1	40	V	40 ~ 310	課題試験体
60-1	60	K	40 ~ 260	課題試験体
100-1	100	V	100 ~ 400	フリー試験体

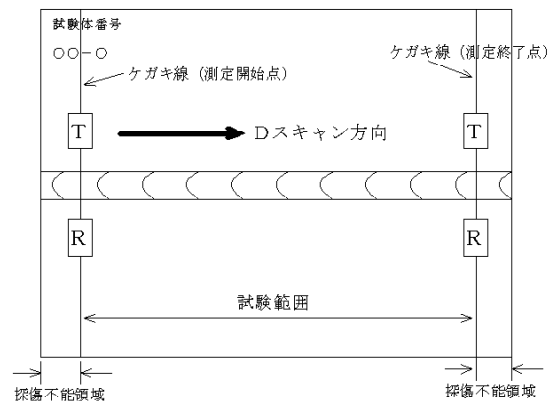


図3 溶接継手試験体形状と探傷方向

ーションを示す。図7に実験参加チームの実験風景を示す。

## 5. 結果

参加各チームはTOFD試験後、4.4(2)で指定した手法によって欠陥指示長さを測定し、産業支援研究所に送付した。研究所では受領したデータを基に欠陥位置の分類を行い、欠陥ごとの表を作成し

た。また、実欠陥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た垂直探傷法により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。



(a) 板厚40mm (36mm) の試験体



(b) 板厚100mmの試験体

図4 TOFD探傷用試験体



図5 助成金で導入したTOFD装置



図6 TOFD装置 (UTステーション) による計測



(a) BチームのTOFD測定風景



(b) KチームのTOFD測定風景

図7 各チームのTOFD実験風景

### 5.1 板厚6mmの試験結果

図8に板厚6mmのTOFDサイジングデータを示す。3カ所の欠陥についてまとめたが、このうち2カ所はほぼ同じ欠陥長さであったため、図の中では重なって見える。(a)は探傷感度別に整理したもので、横軸に実きず長さを、縦軸にTOFDによる欠陥の測定長さで示した。(b)は探触子の周波数別に整理し、(c)は欠陥の端部を決定する方法として欠陥信号最大値の-6 dB、-12 dBおよび各チームの独自の手法による決定方法にてプロットしたものである。

これらの結果から、測定に適正な探触子は周波数が10MHz以上、振動子サイズφ3以下が適正で、探傷感度はラテラル波が40%と80%との差はあまり認められないが、若干80%の方が良い結果が得られた。しかし、サイジングのしきい値の影響は回折波最大値の-6 dBをしきい値としてサイジングした条件では、ばらつき幅がかなり少なくなっている。-12 dBにしたものでは若干長めにサイジングされた。独自の手法については、実欠陥長さに合ったサイジングが行われたケースもある。この手法については今後更に検討を加える。

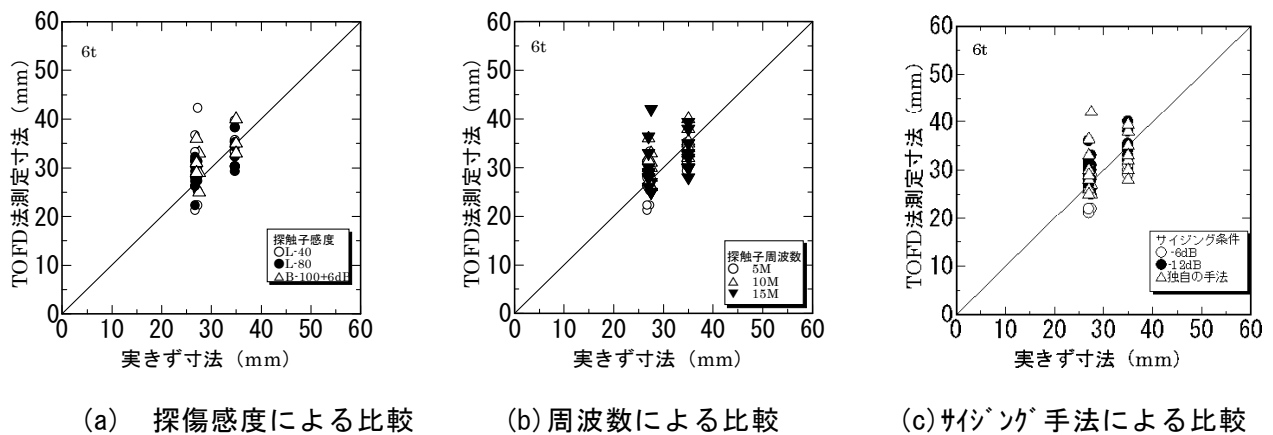


図8 板厚6mm試験体の測定結果

図9に6mm試験体6-1-1のX線透過試験フィルム結果を、図10にTOFD画像の一例を示す。

### 5.2 板厚12mmの試験結果

図11に示す板厚12mm試験体の探傷結果から、超音波の伝搬距離が長くなる影響を受け、探傷感度がラテラル波40%では不足気味になる。深い位置にある欠陥ほど伝搬距離が長くなるためこの影響は顕著に現れる。また、周波数15MHzの探触子では困難が伴う結果が得られ、上記試験条件では欠陥のしきい値を-12 dBにしてようやく実長さと同等に評価できる水準である。

使用探触子の周波数からは10MHz以下が適当で、15MHz探触子を使用する場合はSN比の高い探触子の使用が条件となり、この場合は感度はラテラル80%を推奨する。さらに、サイジングのしきい値を-12 dBまで下げる必要がある。なお、各チームのデータが大きくばらついた原因として、欠陥形状が途中でくびれていたために連続した欠陥であるにもかかわらず、2個の欠陥と判定したことによるもので、同一欠陥群として計測すればデータのばらつきはより小さくなる。



図9 試験体6-1-1のX線透過試験フィルム

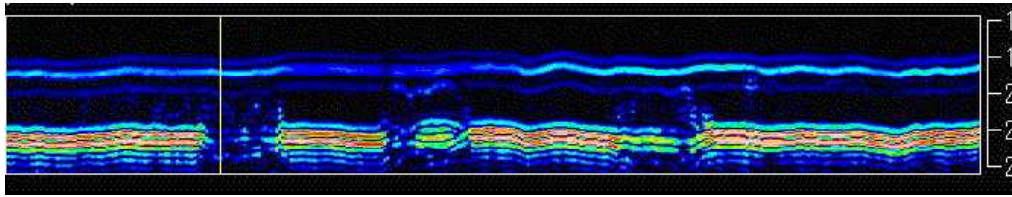
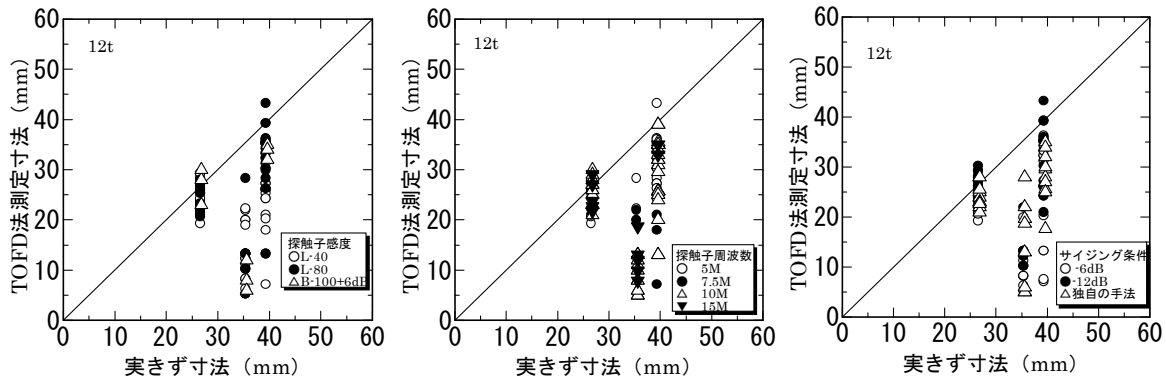


図 10 TOFD画像の一例 (板厚 6 mm)



(a) 探傷感度による比較 (b) 周波数による比較 (c) サイジング手法による比較

図11 板厚12mm試験体の測定結果

### 5.3 板厚25mmの試験結果

図12に25mm板厚の測定結果を示す。この板厚領域では使用探触子の周波数範囲は5MHz～10MHzの範囲であれば周波数の影響は特に認められなかった。探傷感度の設定についても、ラテラル40%と80%との優位差は認められないが、板厚底部に存在する欠陥の場合はしきい値を-12 dBとするのが適当で、浅い位置に存在する欠陥については-6dBをしきい値とする結果が良好である。また、独自の手法として用いられたパラボラカーソル法は、TOFD装置メーカーが装備したパラボラカーソルや十字カーソルなどと称されるサイジングソフトで、25mm板厚においては良好であった。また、データ数は少ないが、周波数的には7.5MHzの探傷においてよい結果が得られている。

板厚25mmの探傷では、参加チームの多くは5MHzの探触子を適用した。指示長さの測定結果が大きく分散しているところは、溶接欠陥作製の段階でメインの欠陥の近くに想定外の小欠陥が生じたのが原因で、この小さな欠陥を無視したケースと小欠陥を含めて一つの連続欠陥として判断したかにより大きく異なった。しかし、このケースでは過

小評価したデータは明らかに不適切な条件に当てはまる。TOFD探傷においても、パルス反射法と同様に、個々の分離した欠陥か、連続欠陥か、あるいは同一欠陥群として判別するかは今後の重要な課題となる。

### 5.4 板厚40mmの試験結果

40mm板厚の探傷では、ビーム交軸点における超音波の伝搬距離は屈折角60°で約100mmとなり、ラテラル波40%の感度では明らかに不足していることが分かる。この板厚で探傷感度はラテラル80%か底面エコー100%+6 dBが必要である。欠陥判別のしきい値においても-6 dBが適正とのデータが得られた。

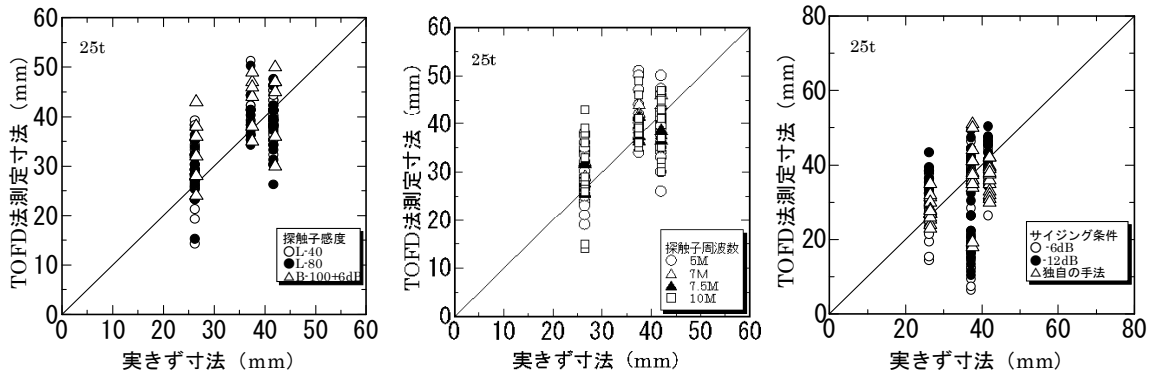
なお、深いきず位置では10MHz探触子の使用は過小評価される傾向にあるので、試験周波数は7.5MHz以下の探触子を適用すべきである。

### 5.5 板厚60mmの試験結果

板厚60の試験体では、K開先のルート部において、溶接全線に渡って溶込み不良が発生し、独立した2個の溶込不良の測定が不能となった。したがって、データ整理上は融合不良2個だけを検討の対象とした。60mmの試験体では1度のスキャンで溶接全断面をカバーできないため、交軸点

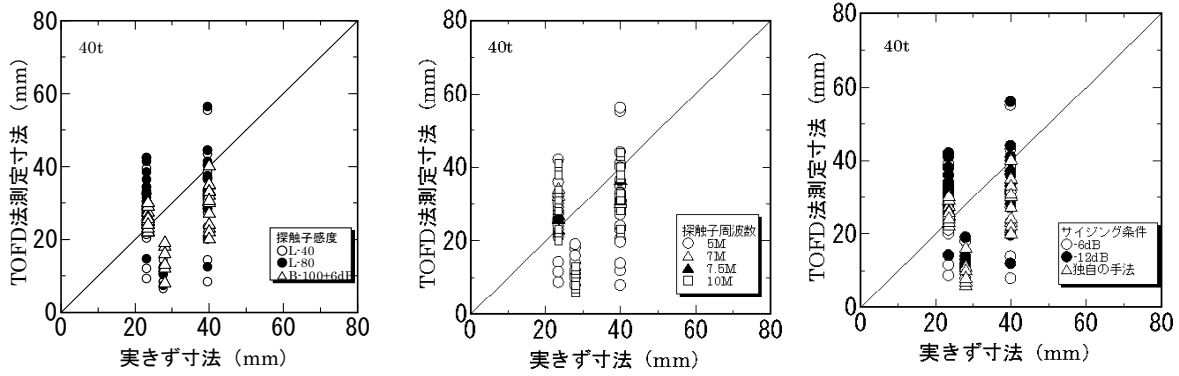
を表面からの深さ1/3 tと5/6 tにセットすることとした。板厚60mmの1/3は深さ20mmとなり、5/6 tは深さ50mmとなる。探触子の種類を複数準備した

チームは適用する探触子の周波数や屈折角はこの交軸点深さに適合するものが使用された。



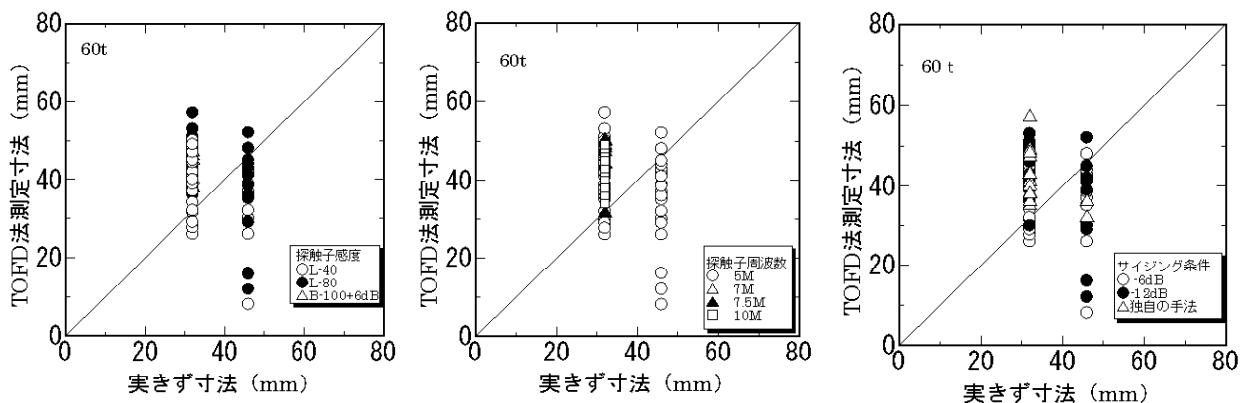
(a) 探傷感度による比較 (b) 周波数による比較 (c) サイジング手法による比較

図12 板厚25mm試験体の測定結果



(a) 探傷感度による比較 (b) 周波数による比較 (c) サイジング手法による比較

図13 板厚40mm試験体の測定結果



(a) 探傷感度による比較 (b) 周波数による比較 (c) サイジング手法による比較

図14 板厚60mm試験体の測定結果

図中の実欠陥長さ32mmのデータは浅い方（深さ15mmの位置に存在）の欠陥の測定記録を、実欠陥長さ46mmのデータは深い方（深さ50mmの位置に存在）の欠陥の測定記録である。

ラテラル波40%の感度では、浅い部分の欠陥のサイジングデータは中心位置が実欠陥長さとは一致

している。しかし深い部分では明らかに感度不足が生じている。ラテラル波80%の感度条件ではこれと逆の傾向となった。したがって、欠陥長さ評価には欠陥深さのファクターを加味した判断基準が必要であることを示している。

Bチームの画像



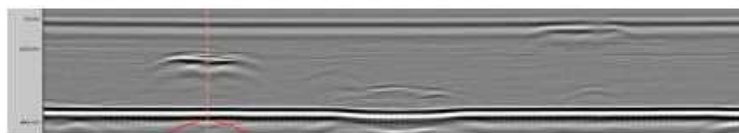
Cチームの画像



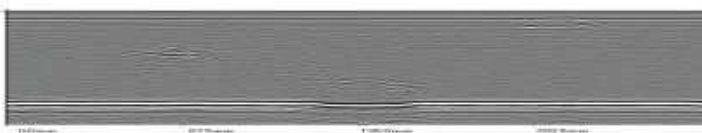
Dチームの画像



Eチームの画像



Fチームの画像



Gチームの画像



Hチームの画像



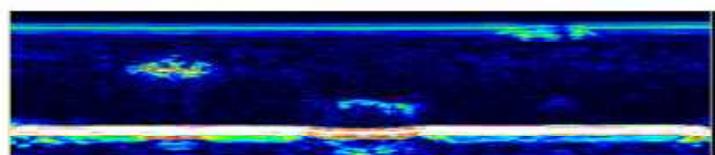
Iチームの画像



Jチームの画像



Kチームの画像



Lチームの画像

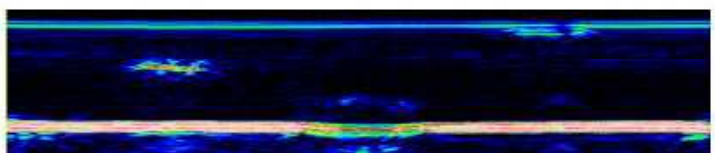


図15 板厚25mm試験体のTOFD画像



## 5.6 板厚100mmの測定

100mmの試験体は、ある橋梁メーカーで作製した欠陥入り試験体を譲り受けたものであるが、一部の欠陥は溶接線全線に渡って存在していた。また、本来あるべき欠陥は小サイズのものであり、今後更に実きず長さの特定に時間を要する。しかし、各チーム共に欠陥のTOFD画像は検出されているので、各チームが取得したAC波形データを基に更に検討を加える必要がある。

## 6. 測定チーム間の画像の比較

図15に25mm試験体のTOFD画像の一例を示す。これらの画像は表2で示した装置のうちの6機種による11チームの探傷画像を示した。この図からいえることは、検出性においては各機種ともほとんど差のないことがわかる。探傷感度であるラテラル波の強度が40%と80%のデータが混在しているため、欠陥部分のコントラストにも違いが生じている。欠陥部からの回折波の信号強度に比例する。画像の鮮鋭度は探触子の波形の影響を大きく受け、ダンピングの効いたSN比の良い高分解能探触子の適用が効果的であることがこの図から理解できる。

## 7. まとめ

TOFD探傷の実験では板厚6mm～100mmの溶接試験体を対象に12チームが参加して実施した。Dスキヤンの画像データだけでもトータル2,000点取得され、個々の欠陥データ数は10,000点以上に及ぶ。11体の試験体のうち、今回は6体を切断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. 板厚12mm以下の薄板領域では、探触子の周波数は7MHz以上で、6mm程度の板厚になると10MHz以上が有効となる。探触子は高ダンピング特性のもので、振動子径はφ3mm程度で接近限界距離の短いものが望ましい。感度条件は、ラテラル波80%で欠陥長さのサイジングでは回折波最大値の-6 dBをしきい値とするのが効果的である。
2. 板厚20mmから40mm前後においては、探触子の周波数は5～10MHzを適用し、板厚30mm以上の領域を探傷する場合は5MHz～7MHzの適用が望ましい。また、板厚方向の浅い位置に存在する欠陥と深い位置に存在する欠陥とでは、長さ測定のしきい値を変える必要がある。

3. 探傷感度の設定はラテラル波の波高値を40%、80%、100%+6 dBの3段階で実験したが、対象板厚によりこれらはいずれも有効である。また、探触子の屈折角と指向特性によりラテラル波の波高値が異なるため、感度基準用試験片（RB試験体）による一元的な感度設定基準が必要である。
4. 欠陥長さ測定は、各チーム共にほぼ同一のDスキヤン画像が得られ、TOFD探傷法は再現性が良好であることが証明されたが、近接する欠陥を個々の欠陥とするか、同一欠陥群とするかの定義を示す必要がある。
5. 溶接欠陥は開先面に接近した場所に発生する場合が多い。欠陥の検出率を高めるには、送受探触子の中心線を溶接部中心に合わせるスキヤンと共に、本実験で行ったD②、D③スキヤンのようなビードの接近限界まで近づけた走査は、欠陥検出性とサイジングの信頼性を高める上で必要不可欠である。
6. TOFD探傷で欠陥指示長さのサイジングを行うには、試験対象材料の板厚に応じた適用探触子の性能規定がサイジングデータの信頼性を向上させるために必要である。

## 8. 今後の方針

本実験においてTOFD法による欠陥指示長さ測定法の基準作りに必要な貴重なデータが多く得られた。その中から、今後の課題として次の項目が挙げられる。

- ①メーカーの異なる装置間における欠陥端部の判断基準の策定。
- ②使用探触子を適用板厚ごとに規定し、探触子の性能基準を定める。
- ③探触子の種類、適用板厚ごとの探傷感度の設定基準の作成。
- ④近接した欠陥の同一欠陥群を最終的にオペレータが実施する判断基準の作成

今回得られたデータには、これら諸問題の解決に結びつく膨大なデータが取得されている。本研究グループでは、参加チーム担当者が集合した検討会を開催する。そこで、探傷条件を絞り込み、画像とAC波形からのサイジング手法を限定したうえで、未切断のNo.2試験体に対して追加実験を加えながら早期に結論を出す予定である。

## 謝辞

千葉県産業支援技術研究所が本研究に使用したUTステーションは平成17年度(財)双葉電子記念財団の自然科学研究助成を受けて導入したもので、同財団に感謝の意を表す。

## 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 ti

me of flight diffraction technique (TOFD) for testing of welds”

- 3) 国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書：鋼路橋溶接部の非破壊検査手法に関する共同研究（I）回送実験による超音波自動探傷装置の特性評価
- 4) 立川克美，斉藤一夫，長瀬尚樹，吉田浩之，藤岡克美，宇田吉臣，井門良雄，林栄男，超音波探傷試験TOFD法に関する研究-密着した欠陥の検出性について-，千葉県産業支援技術研究所，2003年研究報告, No.3,