

第 1 5 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13年1月31日（水）  
13：00～16：50

場所 千葉県機械金属試験場

## 目 次

I	研究報告	
1.	TOFD 法に関する基礎実験 (その 1) -----	1
	ジャパンプローブ(株) ○高橋雅和, 幸崎 進, 佐保忠秀	
2.	TOFD 法に関する基礎実験 (その 2) -----	9
	ジャパンプローブ(株) ○高橋雅和, 幸崎 進, 佐保忠秀	
3.	青色 LED 照明の蛍光浸透探傷試験及び 蛍光磁粉探傷試験への適用 -----	17
	栄進化学(株) 相村英行	
4.	超音波自動探傷装置の開発 -----	23
	ジャスト研究所(株) ○名取孝夫, 機械金属試験場 立川克美 東京理科大学基礎工学部 羽田野 甫	
II	フリーディスカッション	
	題目: NDI 認証・認定問題を考える	

# TOFD法に関する基礎実験（その1）

Basic Experiments of TOFD(Time of Flight Diffraction) Technique(Part 1)

ジャパンプローブ（株） ○ 高橋 雅和  
幸崎 進  
佐保 忠秀

## 概要

TOFD法は有効な探傷法で、古くから多くの実験・研究・解析が行われ実用化されている。その多くは自動探傷の適用例やTOFD法の有効性、最適条件での探傷結果である。いわゆるTOFD法に関する基礎実験については殆ど見あたらない。そこで今回、CEN規格に記述されている技術情報について基礎実験をおこなった。

## 1. はじめに

TOFD法は有効な探傷法で、欧州では古くから<sup>1)・2)</sup>多くの実験・研究・解析が行われて実用化されている。日本でも多くの実験・研究<sup>3)・4)・5)</sup>が行われているが、しかし、その多くは自動探傷の適用例やTOFD法の有効性、最適条件での探傷結果等で、TOFD法に関する基礎実験については殆ど見あたらない。また、TOFD法に関して日本には技術基準・規格がないのが現状である。欧州ではBS規格<sup>6)</sup>、CEN規格<sup>7)</sup>があり、多くの技術情報が記載されている。そこで、本研究ではCEN規格に記述されている内容についてEDM Notchを用いて、基礎的実験を実施したので、基礎実験結果とその考察を述べる。

## 2. 実験内容

### 2. 1 検討項目

- 1) Lateral wave、EDM Notch 上端部・下端部、底面エコーの位相の確認。
- 2) TOFD法に使用される探触子の性能。
- 3) TOFD法と反射法の比較特質の検討
- 4) 手動探傷法（簡易探傷法）での Notch の位置及び高さの推定。
- 5) 探触子間距離とEDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差

### 2. 2 探触子：実験に使用した探触子は表1による。

表1 実験に使用した探触子

探触子の形式	感度(A1)	入射点	P-DELAY	屈折角	周波数	波数(CEN)
B5Z5×5LA45(1330)	30.0dB	5.0mm	3.03 μs	45.5°	5.15MHz	2.5波
B5Z5×5LA45(1331)	30.0	4.0mm	3.03 μs	45.2°	5.24	2.5波
B5Z5×5LA60(1332)	32.5	5.0mm	3.03 μs	59.0°	5.08	2.5波
B5Z5×5LA60(1333)	32.5	5.0mm	3.03 μs	59.6°	5.12	2.5波
5C10×10LA45(1256)	31.0	10.0mm	3.97 μs	46.0°	5.00	3.0波
5C10×10LA45(1257)	36.5	9.5mm	3.97 μs	46.2°	5.50	3.0波
5C10×10LA60(1258)	33.0	9.5mm	4.24 μs	61.0°	5.25	2.5波
5C10×10LA60(1259)	33.5	9.5mm	4.24 μs	60.8°	5.50	2.5波
B5C10N						2.0波

探触子の周波数分析は半円試験片R100mm、幅70mmで、反射源はR100mmを使用した。

入射点・屈折角はSTB-A1を使用した。

Notchの位置及び高さの推定に、垂直探触子(B5C10N)で端部エコーの位置を測定した。



2. 3 試験片：図1の試験片にEDM Notchを加工した。電極幅は0.20mmである。

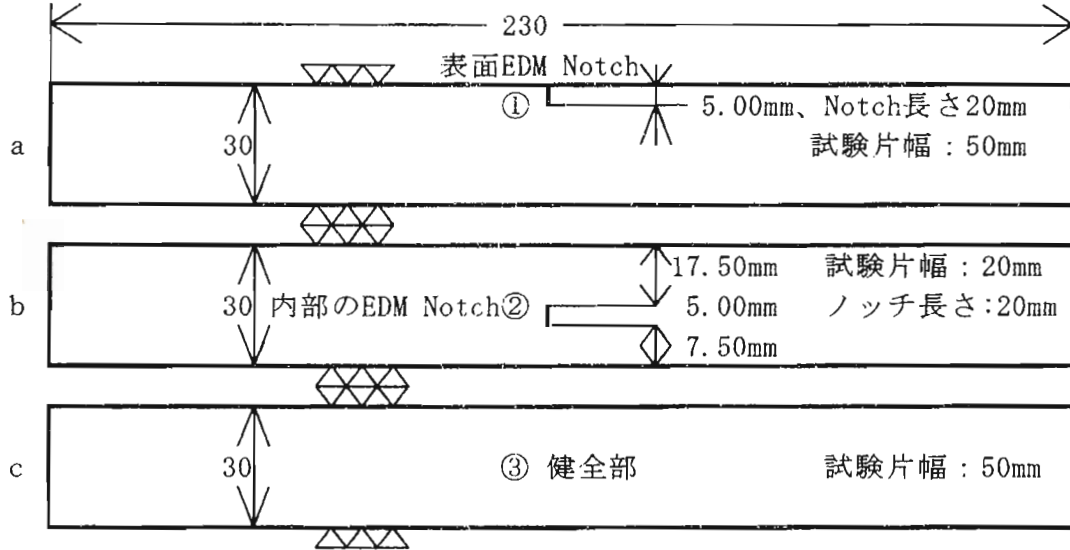


図1 TOFD法用試験片 (材質SB410)

2. 4 超音波探傷器：三菱電機(株)製 UI-22、クラウトクレマー(株)製USD15

2. 5 接触媒質：スピンドル油

### 3. 実験結果及び考察

3. 1 Lateral wave、EDM Notchの上端部・下端部、底面エコーの位相の確認。

図1のbの試験片でLateral wave、底面エコー及びEDM Notchの上端部・下端部のエコーの位相を確認した。探傷図形は図3に示した。

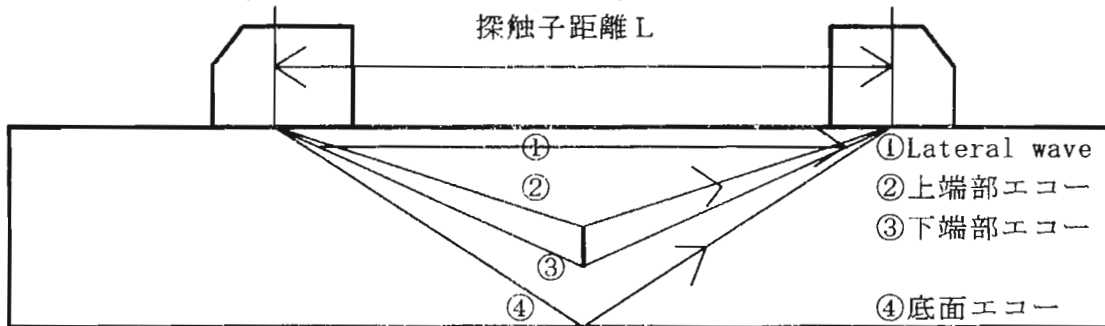


図2 実験方法

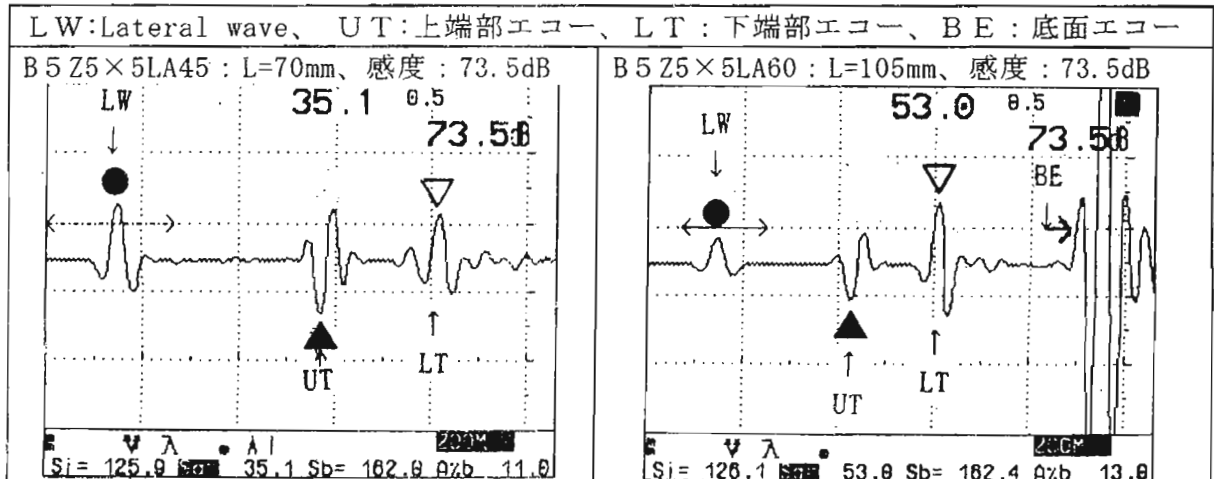


図3 Lateral Wave、EDM Notchの上端部・下端部及び底面エコーの位相 (横軸2mm/div)

- 1) Lateral Waveと底面エコーは位相は反転していることが確認できた。
  - 2) Lateral WaveとEDM Notchの上端部エコーの位相は反転していることが確認できた。
  - 3) EDM Notchの上端部・下端部のエコーの位相は反転していることが確認できた。
- 全体として、CEN規格の4. 1項の記述通りの位相の確認ができた。

### 3. 2 TOFD法に使用される探触子の性能。

TOFD法に使用される探触子の性能としてCEN規格の6. 1項に規定される内容で、波数について確認した。CENによれば、Lateral wave及び底面エコーで波数2波を超えないことと規定されている。図4に示すように、Lateral waveの波数は2波以下でCEN規格を十分満足しているが、底面エコーでは満足していない。TOFD法では端部エコーを対象にしている。底面の如く大きな反射源で波数を規定するのは不合理である。

### 3. 3 TOFD法と反射法の比較特質の検討

TOFD法は反射法と比較して次の利点がある。

- 1) TOFD法では、Lateral wave、底面エコーが存在して、きずエコーの区別が容易にできる。
- 2) AC波形により位相情報が得られ、きずの上端部・下端部の判定が容易にできる。
- 3) 端部エコーが対象で、エコー高さが得られれば、ビーム路程（時間差）より比較的容易にきずの位置、高さが推定できる。
- 4) 探触子の入射点、屈折角が不明確でも、Lateral waveときずエコーの時間を測定すれば比較的容易にきずの位置、高さが推定できる。
- 5) Lateral wave、底面エコーは音響結合の目安となる。
- 6) 探触子間距離を一定に、例えば溶接線に対して直角走査して、きずエコーの最短距離（時間）を求めれば、きずは2探触子間の距離の midpointの真下にある。これもきず位置の推定の有力な情報である。

欠点として次のことが考えられる。

- 1) 2個の探触子を同時に走査するので探触子の保持機構が複雑である。
- 2) 表面及び底面近傍のきずの検出が困難である。
- 3) 1対の探触子の走査では、板厚全範囲の探傷が困難で、必要により検査範囲を分割して複数組の探触子の走査が必要である。

図5にTOFD法と反射法の探傷図形の比較を示す。

図5の左側のTOFD法では、Lateral Waveと底面エコーよりきずの上端部・下端部エコーの位置は容易に判断出来る。また、位相情報で上端部・下端部エコーの区別が容易である。これに反して、図5の右側の反射法では、Lateral Waveと底面エコーが存在しないため、どれがきずの上端部・下端部エコーかが容易に判断出来ない。

DC波形では、TOFD法及び反射法できずのエコーの判断が困難である。TOFD法でAC波形がきずのエコーの判断に非常に有効であることは理解できる。

### 3. 4 手動探傷法（簡易探傷法）でのきずの位置及び高さの推定。

TOFD法と言えば従来自動探傷を意味し、探傷結果は画像処理・評価するのが一般的な印象で、装置そのものもシステム化されている。しかしながら、必ずしも、自動探傷装置によらなくても、AC波形を利用して、Lateral Wave、端部エコーのビーム路程を正確に測定すれば、手動探傷法（簡易探傷法）でもきずの位置及び高さの推定が容易であることを確認した。その概要を図6に示す。

きずの位置及び高さはLateral Wave、EDM Notchの上端・下端部エコーのビーム路程を測定し式(1)、(2)で求めた。

● Lateral Wave

■ 底面エコー

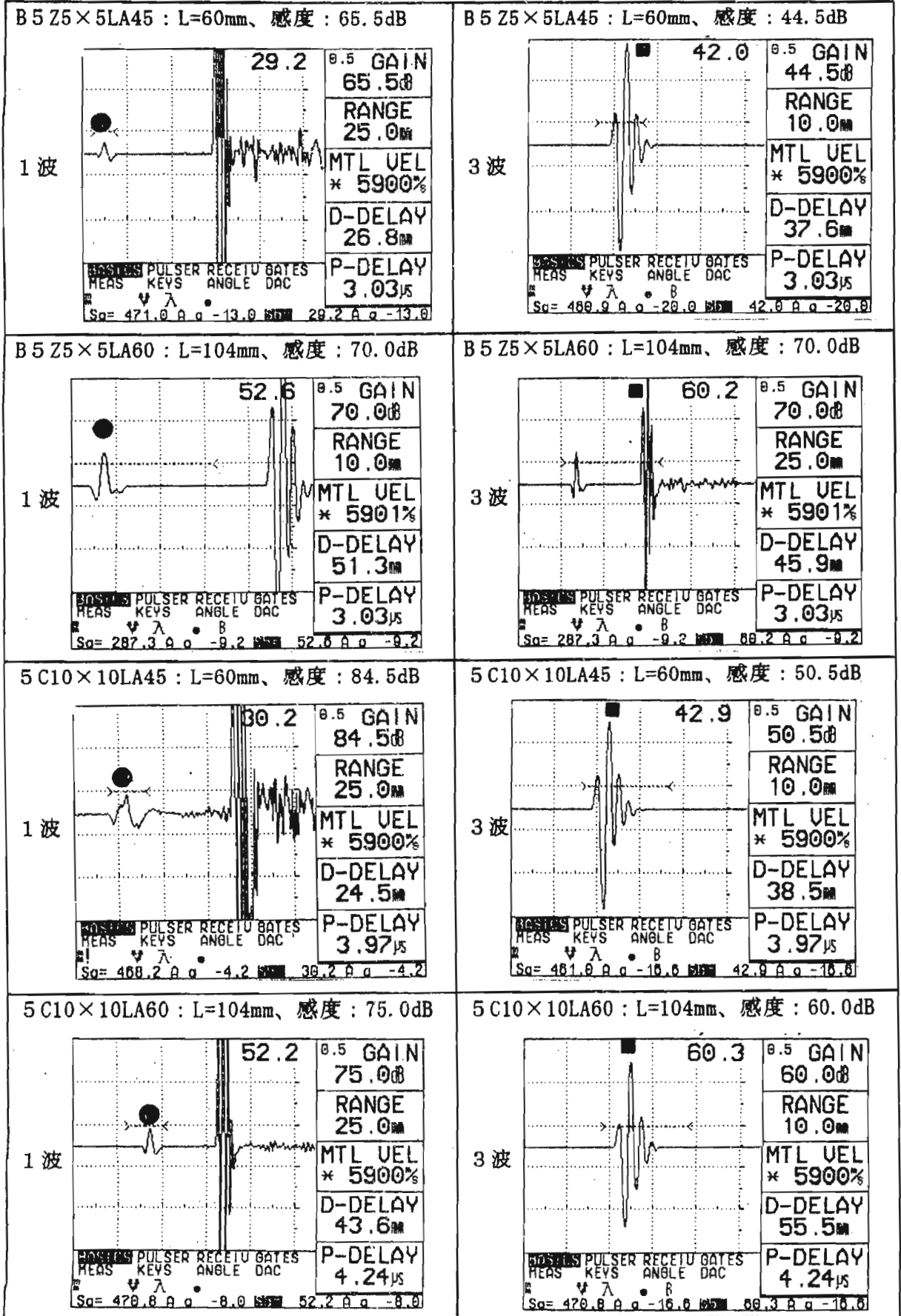


図4 TOFD法用探触子の波数に関する探傷図形

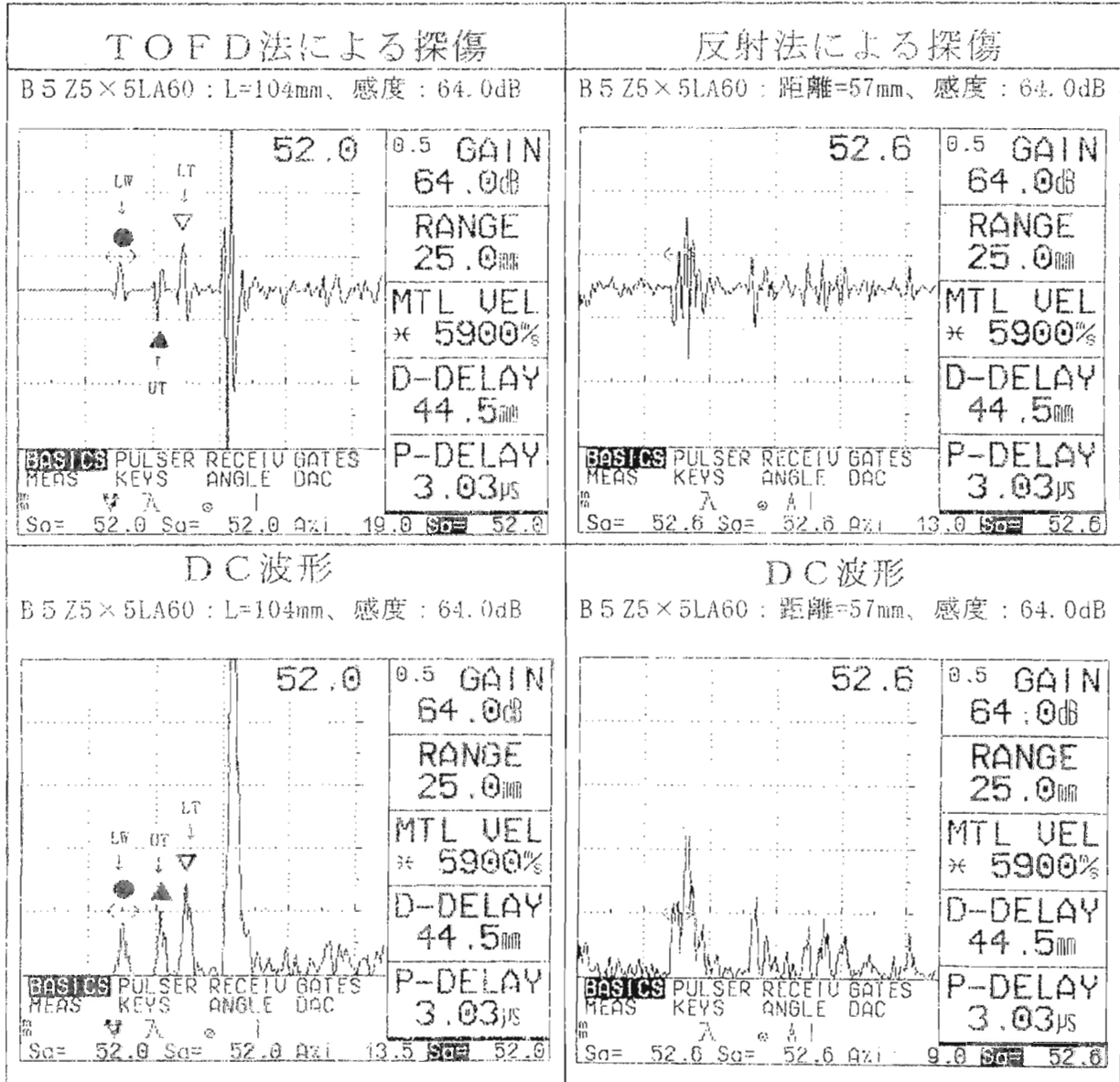
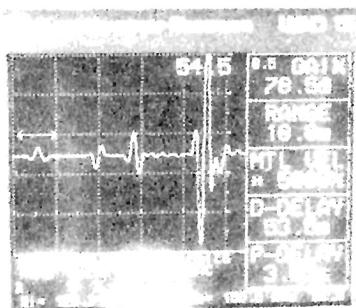


図5 TOFD法と反射法の探傷図形の比較



AC波形  
B 5 Z5 × 5LA60

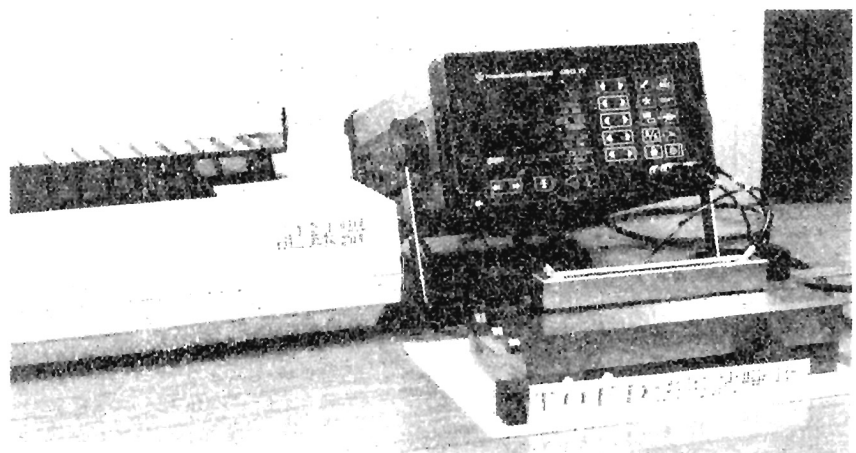


図6 手動探傷法（簡易探傷法）の概要

$$d_{UT} = (W_{UT}^2 - W_{LW}^2)^{1/2} \text{-----} (1)$$

$$H = (W_{LT}^2 - W_{LW}^2)^{1/2} - d_{UT} \text{-----} (2)$$

ここで、 $d_{UT}$  : 上端部までの深さ (mm)、 $H$  : Notch の高さ (mm)、 $W_{LW}$  : Lateral Wave のビーム路程 (mm)、 $W_{UT}$  : 上端部エコーのビーム路程 (mm)、 $W_{LT}$  : 下端部エコーのビーム路程 (mm)。

今回のNotchきずの位置及び高さ推定では、探触子間距離を固定し、Lateral wave、Notchの上端部・下端部のエコー及び底面エコーの位置にゲートを移動させながら、測定範囲・D-DELAYを切り替えて測定した。今回TOFD法の測定のknow howは習得できた。

そのknow howは、

- 1) Lateral waveを素早く認識すること。Lateral waveが非常に重要な役割をはたす。
- 2) Lateral wave、Notchの上端部・下端部のエコー(及び底面エコー)のビーム路程を正確に読みとること。
- 3) その精度は超音波探傷器のゲート機構(ビーム路程読みとり最小単位)に依存する所が大きい。今回の超音波探傷器のゲート機構では最小読みとり単位は0.10mmであるので、式(1)、式(2)できずの位置を求めると最大±0.20mmの誤差を有することになる。
- 4) 探触子間距離を固定して、ビームがきずを横切るように走査したとき、最小のビーム路程が得られたとき、きずは探触子間距離の中心にあり、この時の深さが正しい。
- 5) 今回試作した探触子保持具は実験結果の再現性と安定性に十分役立った。

図7はTOFD法で求めた Notch きずの推定位置と実測位置の関係を示す。きずの推定位置はほぼ満足の結果が得られた。

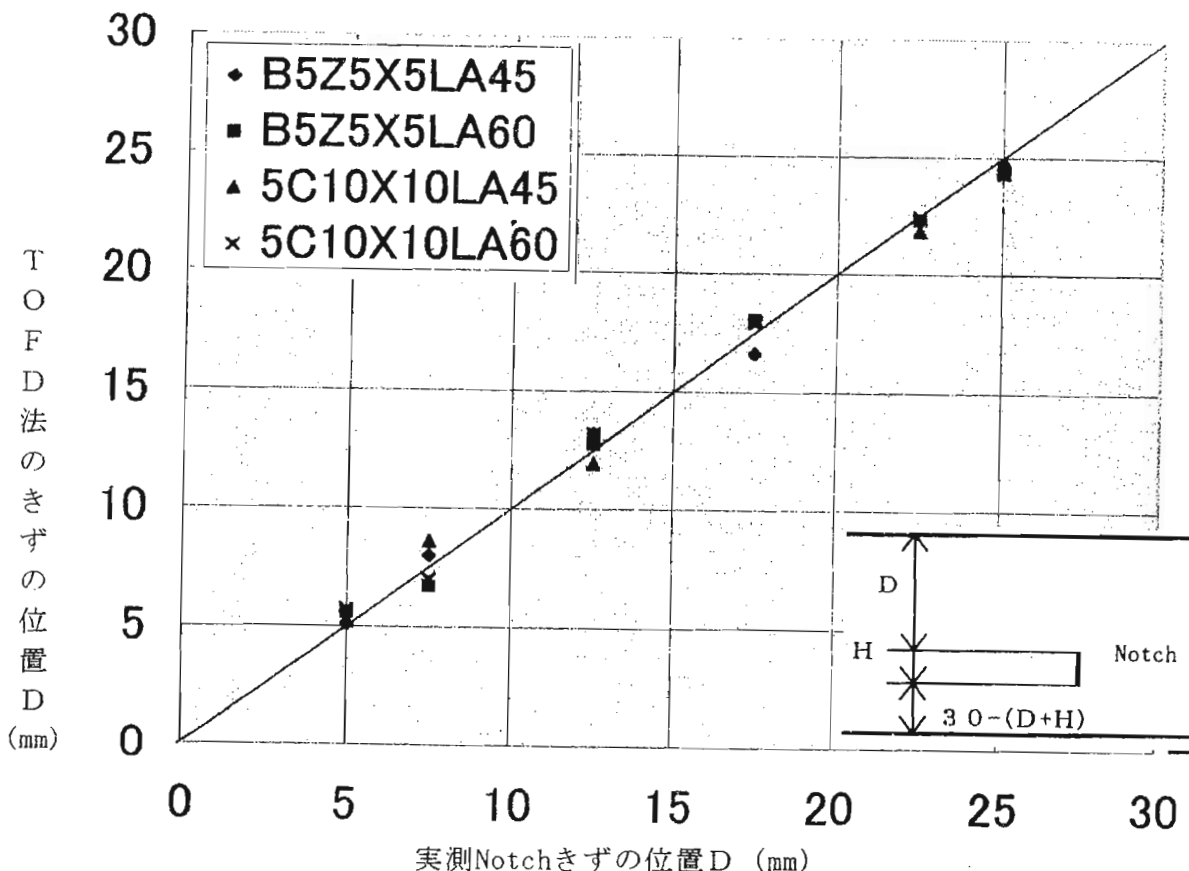


図7 TOFD法で求めた Notch きずの推定位置と実測位置の関係

探触子間距離の中心 ( $S = L/2$ ) よりYだけきずの位置がずれたときのビーム路程Wは大きくなりきず深さ推定の誤差の原因となる。これを防止するには、探触子を走査して、最



小ビーム路程になる位置が正しいきずの深さである。ここで、 $S = L/2$ 、 $Y$ は中点からのずれ量、 $W$ はビーム路程、きず深さ $d$ とすると式(3)の関係がある。

$$W = [((S+Y)^2 + d^2)^{1/2} + ((S-Y)^2 + d^2)^{1/2}] / 2 \text{ ----- (3)}$$

$dW/dY = 0$ の条件は $Y = 0$ の時である。きず深さ $d_{Y=0}$ を基準にすると、誤差 $\delta$ (mm)は式(4)による。図8は探触子間距離の中心( $S = L/2$ )より $Y$ だけきずの位置がずれたときの誤差を示す。

$$\delta = d - d_{Y=0} \text{ ----- (4)}$$

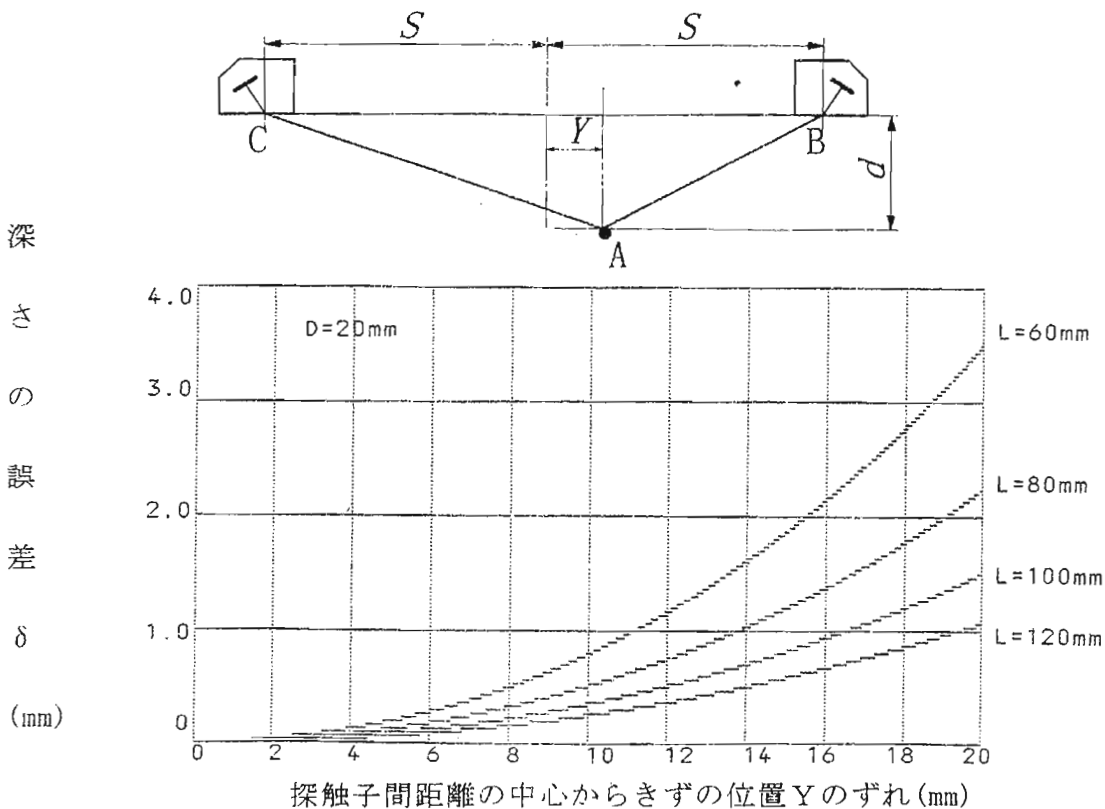


図8 探触子間距離の中心からのきずの位置 $Y$ と誤差との関係

### 3. 5 探触子間距離とEDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差

TOFD法できず高さを推定する場合に、きずの上端部・下端部のエコーが分離できて、そのビーム路程が測定できることが前提となる。これがきず高さ測定の限界を決める要素である。そこで、今回の試験片で、探触子間距離 $L$ とEDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差 $\Delta W$ の関係を計算で求めた。図9は探触子間距離 $L$ とEDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差 $\Delta W$ の関係を示す。条件は、Notchの高さ $H = 5$ mm、Notchは表面から $D = 0-25$ mmにある場合である。その結果、ビーム路程差を大きくするには、探触子間距離を小さくする必要がある。仮に2波長離れた時、高さ5mmのNotchを識別出来ると仮定すると、2MHzで $\Delta W_{2\lambda} = 5.9$ mm、5MHzで $\Delta W_{2\lambda} = 2.36$ mm、10MHzで $\Delta W_{2\lambda} = 1.18$ mmとなる。2MHzで $\Delta W_{2\lambda} = 5.9$ mmとなるから、図9の $\Delta W$ の条件を満足していないので、2MHzでは分解能という観点から不適当であることを示している。 $\Delta W$ は式(5)による。

$$\Delta W = ((D+H)^2 + (L/2)^2)^{1/2} - (D^2 + (L/2)^2)^{1/2} \text{ ----- (5)}$$

ここで、 $L$ :探触子間距離(mm)、 $D$ :表面からEDM Notchの深さ(mm)、 $H$ :Notchの高さである。式(5)から、TOFD法で、きずの上端部・下端部のエコーの検出と分解能が判明すれば、検出したいきずの高さ、位置(試験片の厚さ)より適正な探傷周波数、探傷角度(探触子間距離)を決めることが出来ることになる。この点に関して更に検討したい。

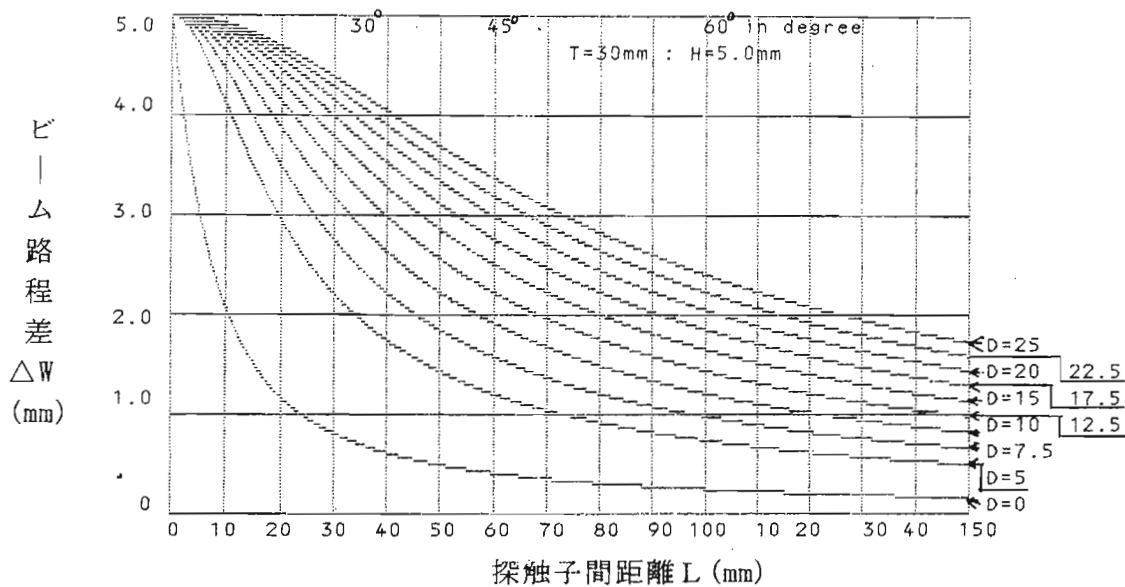


図9 探触子間距離Lの変化による上端部・下端部のビーム路程差 $\Delta W$

## 5. 結論

- EDM Notch を用いて TOFD 法の基礎実験を実施した。その結果次のことが確認できた。
- 1) Lateral Wave、Notch の上端部・下端部のエコー及び底面エコーの位相反転の関係が確認できた。
  - 2) TOFD 法に用いる探触子の波数は反射源が底面エコーでは 3 波程度となる。
  - 3) AC 波形を利用して、Lateral Wave、端部エコーのビーム路程を正確に測定すれば、手動探傷法（簡易探傷法）でもきずの位置及び高さの推定が容易にできる。
  - 4) 探触子間距離を固定して、ビームがきずを横切るように走査したとき、最小のビーム路程が得られたとき、きずは探触子間距離の midpoint の真下で、この時の深さが正しい。
  - 5) 探触子間距離と EDM Notch の上端部・下端部のビーム路程差の関係を明確にした。
  - 6) 手動探傷法（簡易探傷法）での多くの know how が得られた。

## 参考文献

- 1) J. A. G. Temple: Time of flight inspection: theory, Nucl, Energ, 22, No.5, Oct, pp335-347, (1983)
- 2) J. A. G. Temple: The Amplitude of Ultrasonic Time-of-flight Diffraction Signal Compared with Those from a Reference Reflector, Int. J. Pres. Ves & Piping, 16, pp 145-159, (1984)
- 3) 芝田三郎、上妻強志、米山弘志: TOFD・UT 法によるきず検出技術の開発、第 3 回 UT 超音波シンポジウム、III-4、pp85-92, (1996)
- 4) 大泉治喜、渡瀬保夫: TOFD 技術とその適用、検査技術、11, pp34-42, (1998)
- 5) 萬年利克: TOFD 法における亀裂先端と超音波散乱について、検査技術、5、pp1-6, (1999)
- 6) preENV 583-6 Time of flight diffraction Technique as a method for defect detection and sizing, January, (1997)
- 7) British Standard: BS 7706 Guide to Calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaws, (1993)

# TOFD法に関する基礎実験（その2）

Basic Experiments of TOFD (Time of Flight Diffraction) Technique (Part 2)

ジャパンプローブ（株） ○ 高橋 雅和  
幸崎 進  
佐保 忠秀

## 概要

TOFD法は有効な探傷法である。前回CEN規格に基づく基礎実験を報告した。今回更に、探触子間距離を変えた時の、EDM Notchの上端部・下端部エコーのビーム路程差、きず位置の推定精度等について実験的に求め計算結果と比較検討した。その結果、実験結果は計算値と良く一致している。探傷周波数2MHzでは本実験条件では(板厚30mm、Notch高さ5mm)満足な結果が得られなかった。また、Notchの上端部・下端部エコーの散乱強度を測定した。TOFD法の多くの技術情報が得られ、今後のTOFD法の最適条件の検討に活用したい。

## 1. はじめに

TOFD法は有効な探傷法である。CEN規格<sup>1)</sup>に基づく基礎実験<sup>2)</sup>を報告した。その主なものは、探傷周波数5MHzで①Lateral wave、EDM Notch 上端部・下端部、底面エコーの位相の確認、②TOFD法に使用される探触子の性能、③TOFD法と反射法の比較特質の検討、④手動探傷法(簡易探傷法)でのNotchの位置及び高さの推定、⑤探触子間距離とEDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差等であった。

本研究では更に2MHz、10MHzの実験を行い、前回計算に基づくNotchの位置及び高さの推定結果を実験で確認した。その結果、予測した通りの実験結果が得られ、実験結果と計算結果は非常に良く一致した。また、Notchの上端部・下端部エコーの散乱強度を測定した。TOFD法の多くの技術情報が得られ、今後のTOFD法の最適条件の検討に活用したい。以下その基礎実験結果と考察を述べる。

## 2. 実験内容

### 2.1 検討項目

- 1) 探傷周波数2MHz、5及び10MHzの実験。
- 2) Lateral waveの距離特性。
- 3) 探触子間距離を変えた時の、EDM Notch 上端部・下端部の位置の推定及びビーム路程差の確認。
- 4) 探触子間の midpoint とNotch位置のずれによる測定誤差の検討。
- 5) EDM Notchの上端部・下端部エコーの散乱強度の確認検討等である。

### 2.2 探触子：実験に使用した探触子は次の6種類である。

表1 実験に使用した探触子

探 触 子 形 式	数 量
B10Z5×5LA60、B10Z5×5LA45	各2個
B5Z5×5LA60、B5Z5×5LA45	各2個
B2Z5×5LA45、B2Z5×5LA60	各2個

探触子の周波数分析は半円試験片R100mm、幅70mmで、反射源はR100mmを使用し、波数はCEN規格に基づき測定した。入射点・屈折角はSTB-A1を使用した。

2. 3 試験片：図1の試験片にEDM Notchを加工した。電極幅は0.20mmである。

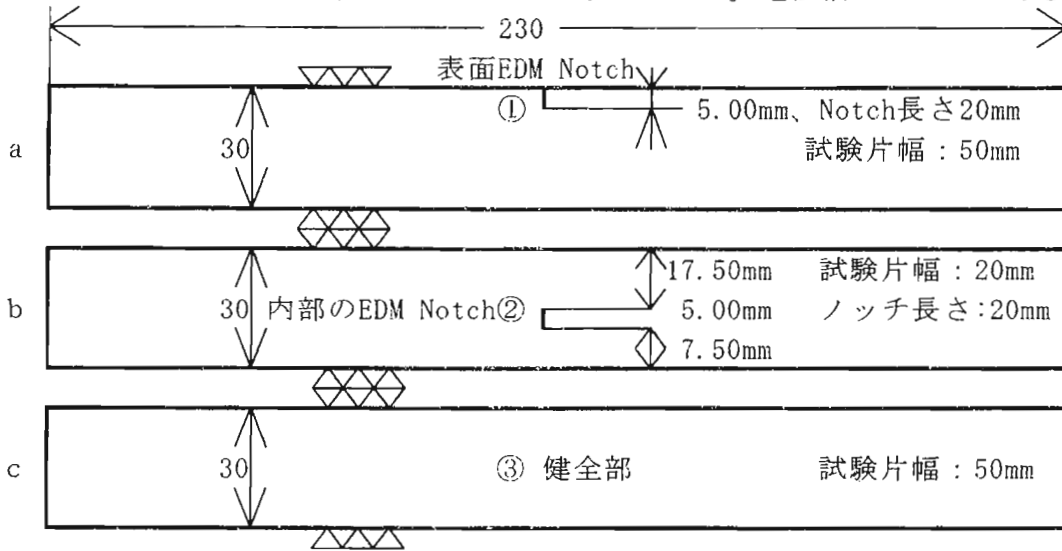


図1 TOFD法用試験片 (材質SB410)

2. 4 超音波探傷器：三菱電機(株)製 UI-22、クラウトクレマー(株)製USD15

2. 5 接触媒質：スピンドル油

### 3. 実験結果及び考察

3. 1 探傷周波数を変えた時のEDM Notchの上端部・下端部エコーの評価

前回の実験は5MHzであった。今回の試験片のNotchの寸法では、計算上2MHzの探傷周波数では、Notchの上端部・下端部エコーの評価は困難が予想された。実験の結果、予想通り、Notchの上端部・下端部エコーの評価は出来なかつた。図2は探傷図形の一例を示す。探傷周波数10MHzの結果は3. 3項で述べる。

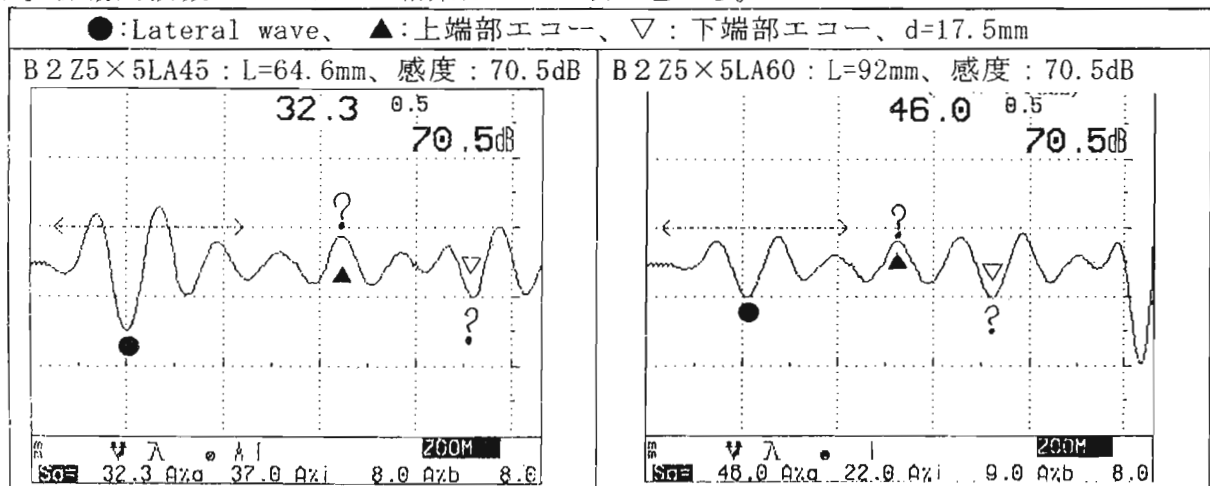


図2 探傷周波数2MHzでのNotchの探傷図形(横軸2mm/1div)

3. 2 Lateral waveの距離特性

図1の試験片の健全部に2個の探触子を対向させ、探触子の前面間距離L(mm)を変えた時のLateral Waveの距離特性を測定した。図3はその結果を示す。図よりL=0⇒30~40mmに変化させるとLateral Waveは約20dB低下する。探触子の形式にもよるが、L=100~130mm程度で、-40dBとなり、Lateral Waveのレベルは非常に低い。Lateral Waveは試験片の表面を伝搬するCreeping Waveであるから、表面で縦波が横波にモード変換するために、



その距離特性は急激に低下する。従来のCreeping Waveの距離特性の実験値<sup>3)</sup>やEromolvの文献値<sup>4)</sup>  $L^{-1.6-2.0}$ より遙かに大きい。このことより、検査材料の幾何学的寸法によつては、TOFD法でのLateral Waveの位相及び時間情報を”きずの評価”に利用出来ない可能性が生ずる。

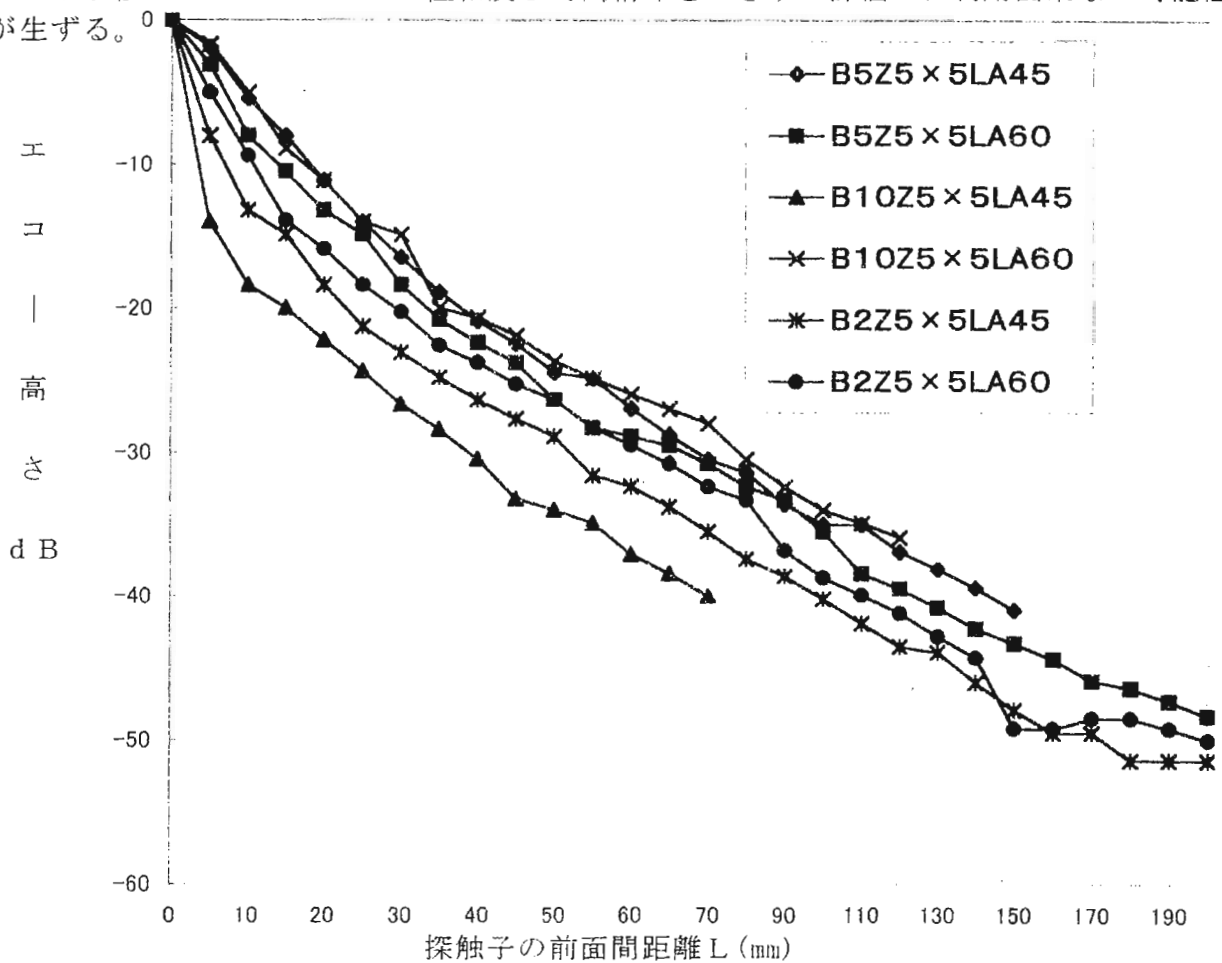


図3 Lateral Waveの距離特性

3. 3. 1 探触子間距離を変えた時の、EDM Notchの上端部・下端部の位置の推定。

図4は探触子間距離Lを変えた時の、EDM Notchの上端部・下端部の位置の推定の実験方法を示す。図5はその実験結果である。探触子間距離Lを表2の如く変えても、Notchの上端部・下端部の位置の推定は精度は十分で一部のデータを除けば、±0.5mm以内である。

表2 探触子間距離Lの変化範囲と精度

Notchの位置深さ	周波数	探触子間距離L	角度範囲	推定位置範囲
7.5mm(上端部)	5MHz	20-100mm	53.1° -81.2°	7.3-8.0mm
	10MHz	15-90mm	45.0° -80.5°	7.2-7.7mm
12.5mm(下端部)	5MHz	20-100mm	38.7° -76.0°	12.5-12.8mm
	10MHz	15-90mm	31.0° -74.5°	12.3-12.6mm
17.5mm(上端部)	5MHz	50-150mm	55.0° -76.9°	17.3-17.6mm
	10MHz	55-185mm	57.5° -79.3°	17.3-17.6mm
22.5mm(下端部)	5MHz	50-150mm	48.0° -73.3°	22.3-22.7mm
	10MHz	55-185mm	50.7° -76.3°	22.3-22.6mm
25.0mm(上端部)	5MHz	60-150mm	50.2° -71.6°	24.8-25.3mm
	10MHz	50-150mm	45.0° -71.6°	24.8-25.1mm

適正な探触子間距離Lを固定しても、Notchの位置の深さ7.5mm～25mmの範囲は検査出来る

ことになる。Notchの位置の深さ  $d_{UT}$ 、 $d_{LT}$ は式(1)及び式(2)で計算した。

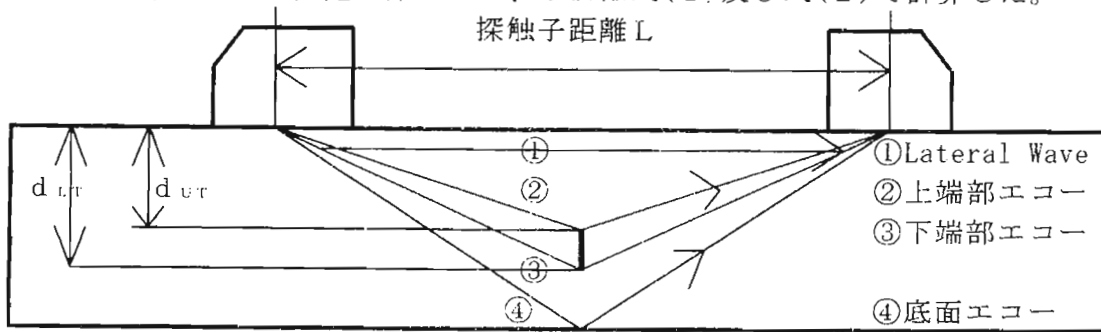


図4 Notchの上端部・下端部の位置の推定の実験方法

$$d_{UT} = (W_{UT}^2 - W_{LW}^2)^{1/2} \text{----- (1)}$$

$$d_{LT} = (W_{LT}^2 - W_{LW}^2)^{1/2} \text{----- (2)}$$

但し、 $d_{UT}$  : Notchの上端部の深さ、 $d_{LT}$  : Notchの下端部の深さ、 $W_{LW}$  : Lateral Waveのビーム路程、 $W_{UT}$  : Notchの上端部のビーム路程、 $W_{LT}$  : Notchの下端部のビーム路程である。

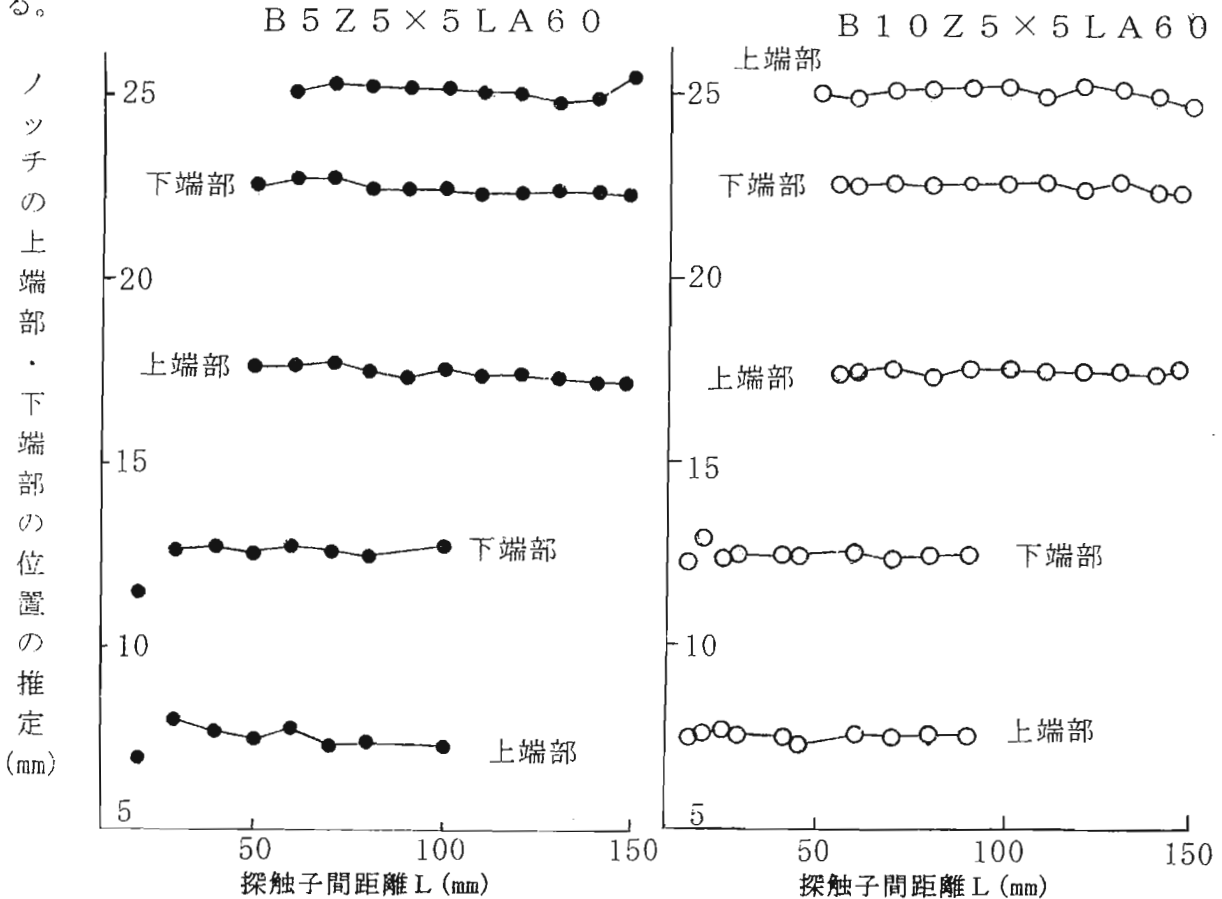


図5 探触子間距離Lを変えた時のNotchの上端部・下端部の位置の推定結果

3. 3. 2 探触子間距離を変えた時の、EDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差 TOFD法できず高さを推定する場合に、きずの上端部・下端部のエコーが分離できて、そのビーム路程が測定出来ることが前提となる。これがきず高さ測定の限界を決める要素である。そこで、今回の試験片で、探触子間距離LとEDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差の関係を計算と実験で求め比較した。図6は探触子間距離LとEDM Notchの上端部・下端部のビーム路程差 $\Delta W$ の関係を示す。条件は、Notchの高さ $H=5$ mm、Notch

は表面から  $d_{UT}=17.5\text{mm}$ 及び $7.5\text{mm}$ の場合である。その結果、計算と実験結果は非常に良く一致した。ビーム路程差を大きくするには、探触子間距離を小さくする必要がある。仮に2波長離れた時、高さ5mmの Notch を識別出来ると仮定すると、2MHzで $\Delta W_{2\lambda}=5.9\text{mm}$ 、5MHzで $\Delta W_{2\lambda}=2.36\text{mm}$ 、10MHzで $\Delta W_{2\lambda}=1.18\text{mm}$ となる。2MHzで $\Delta W_{2\lambda}=5.9\text{mm}$ となるから、図6の $\Delta W$ の条件を満足していないので、3.1項の実験の如く2MHzでは分解能という観点から探傷には不適當であることを示している。計算での $\Delta W$ は式(3)による。

$$\Delta W = ((d_{UT} + H)^2 + (L/2)^2)^{1/2} - (d_{UT}^2 + (L/2)^2)^{1/2} \text{-----} (3)$$

ここで、L：探触子間距離(mm)、 $d_{UT}$ ：表面からEDM Notchの上端部の深さ(mm)、H：Notchの高さである。実験で求めた $\Delta W_{EX}$ は、式(4)による。

$$\Delta W_{EX} = (W_{LT} - W_{UT}) \text{-----} (4)$$

今回の実験から、TOFD法で、きずの上端部・下端部のエコーの検出と分解能が判明すれば、検出したいきずの高さ、位置(試験片の厚さ)より適正な探傷周波数、探傷角度(探触子間距離)を決めることが出来ることになる。

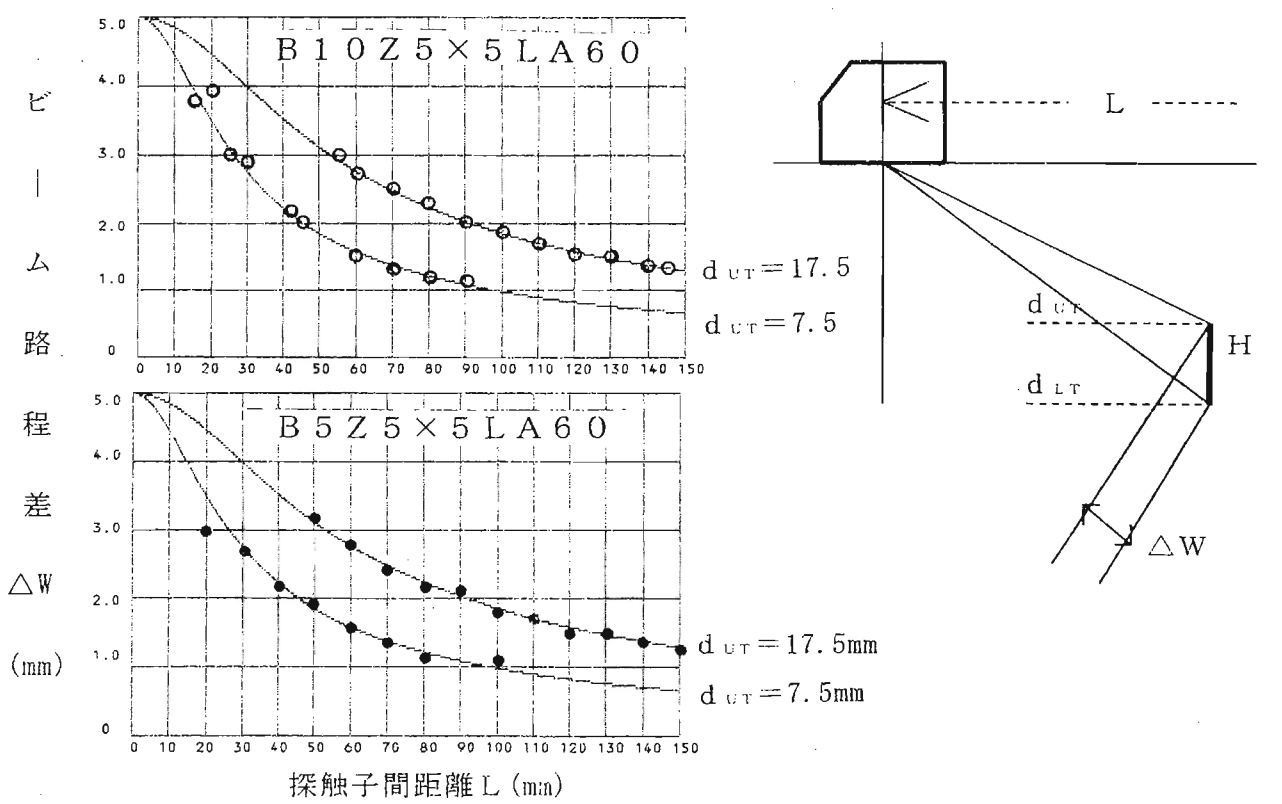


図6 探触子間距離Lの変化による上端部・下端部のビーム路程差 $\Delta W$

図7は探触子間距離Lと上端部・下端部のビーム路程差 $\Delta W$ に関する探傷図形である。明らかに探触子間距離Lが大きくなると、 $\Delta W$ が小さくなっている。

3.4 探触子間の中心とNotch位置のずれによる測定誤差の検討。

探触子間距離の中心 ( $S = L/2$ ) よりYだけきずの位置がずれたときのビーム路程Wは大きくなりきず深さ推定の誤差の原因となる。これを防止するには、探触子を走査して、最小ビーム路程になる位置が正しいきずの深さである。ここで、 $S = L/2$ 、Yは中点からのずれ量、Wはビーム路程、きず深さdとすると式(5)の関係がある。

$$W = [((S+Y)^2 + d^2)^{1/2} + ((S-Y)^2 + d^2)^{1/2}] / 2 \text{-----} (5)$$

$dW/dY = 0$ の条件は $Y = 0$ の時である。きず深さ $d_{V_0}$ を基準にすると、誤差 $\delta$ (mm)は式(6)による。

● : Lateral Wave, ▲ : 上端部エコー, ▽ : 下端部エコー,  $\Delta W$  : 上端下部部ビーム路程差

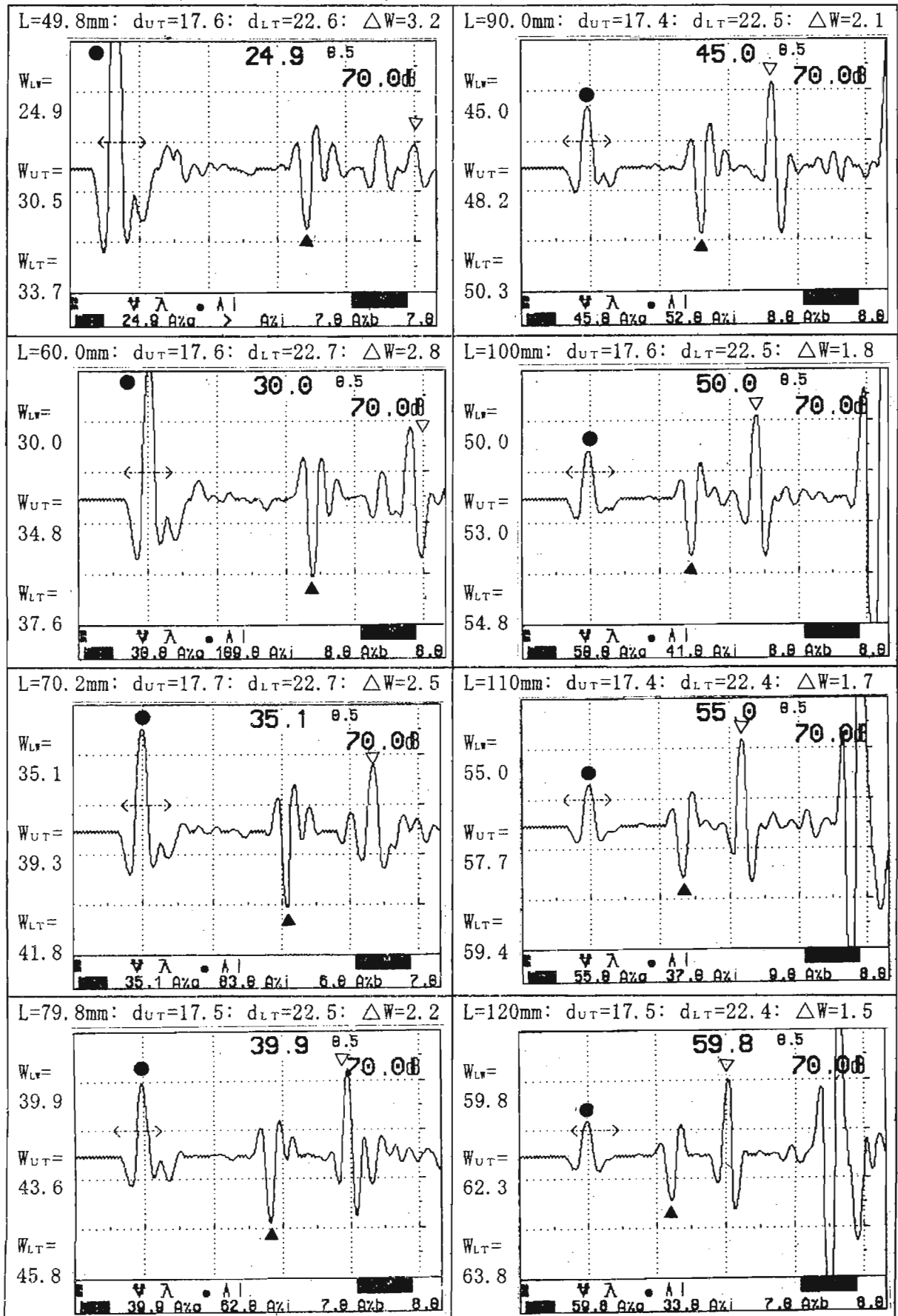
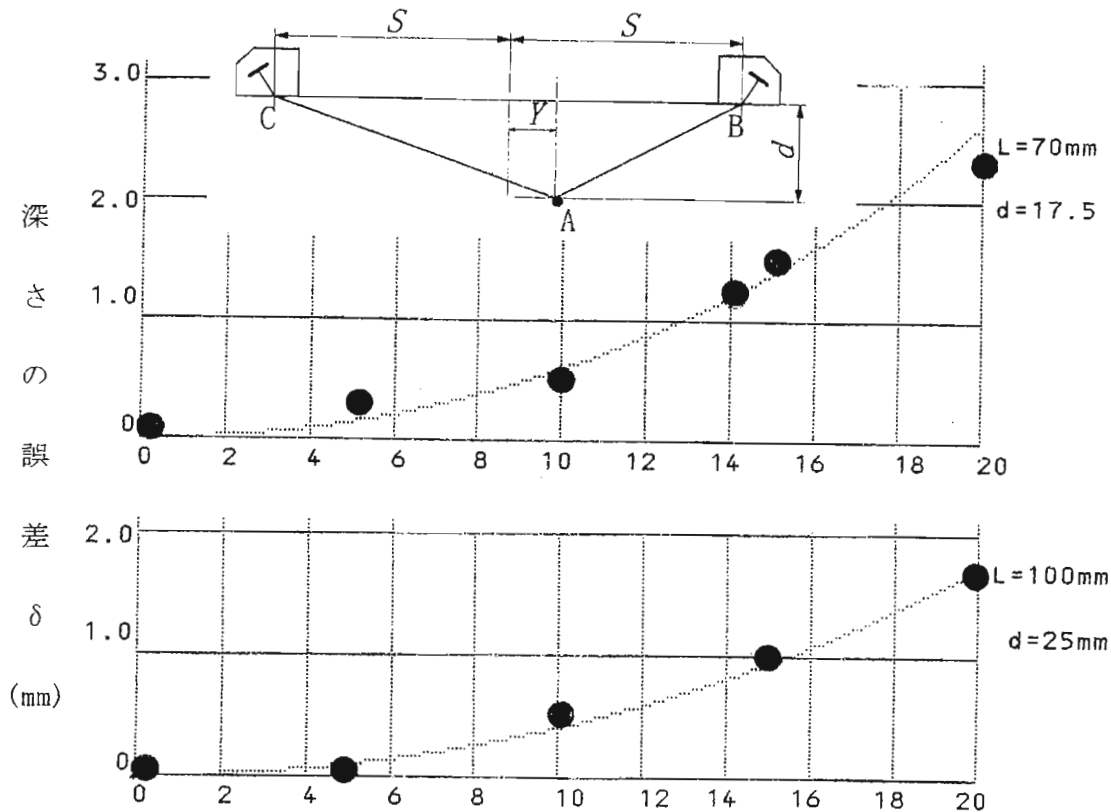


図7 探触子間距離と上端部・下端部のビーム路程差 $\Delta W$ に関する探傷図形(B5Z5×5LA60)



$$\delta = d - d_{Y=0} \text{-----(6)}$$

図8は探触子間距離の中心 ( $S = L/2$ ) よりYだけきずの位置がずれたときの誤差を示す。これについて実験と計算を比較した結果、実験と計算は良く一致した。



探触子間距離の中心からきずの位置Yのずれ(mm)

図8 探触子間距離の中心からのきずの位置Yと誤差との関係

今回の検討で、探触子間距離Lが小さい程、きずの深さが浅い程、Yの影響が大きくなる、誤差 $\delta$ を仮に0.5mm以内にするには、 $L=70\text{mm}$ 、 $d=17.5\text{mm}$ では、 $Y=8\text{mm}$ 以下、 $L=100\text{mm}$ 、 $d=25\text{mm}$ では、 $Y=10\text{mm}$ 以下にする必要がある。

### 3.5 Notchの散乱強度

TOFD法での上端部・下端部の散乱エコーを検出し、探触子間距離を固定し左右に走査する。ピークエコー点を $Y=0$ とし左右に $Y=30\text{mm}$ 程度変化させこの時のYと上端部・下端部の散乱エコー高さ $U_{TH}$ 、 $L_{TH}$ を測定して、Notchの散乱強度とした。

図9は測定方法を示す。図10は実験結果を示す。

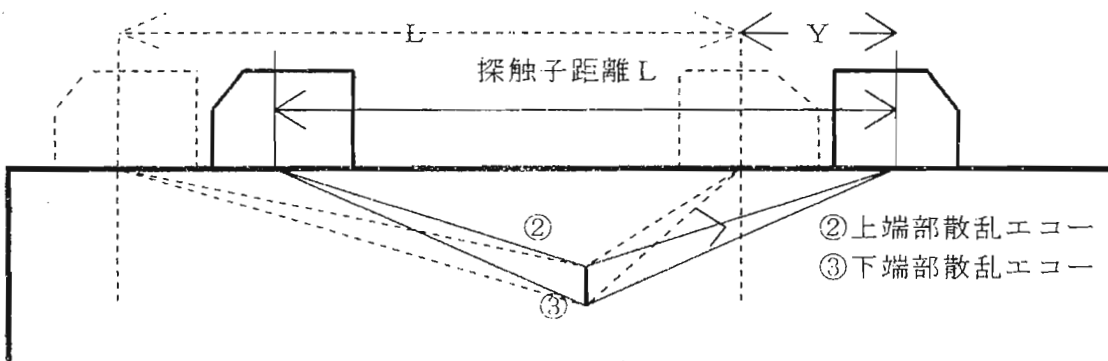


図9 Notchの散乱強度測定の実験方法

図10によれば、散乱強度は周波数の影響を受け、5MHzより10MHzの方が散乱強度は、Yの影響が大きい。また、Yが左右に変化してもほぼ対称である。

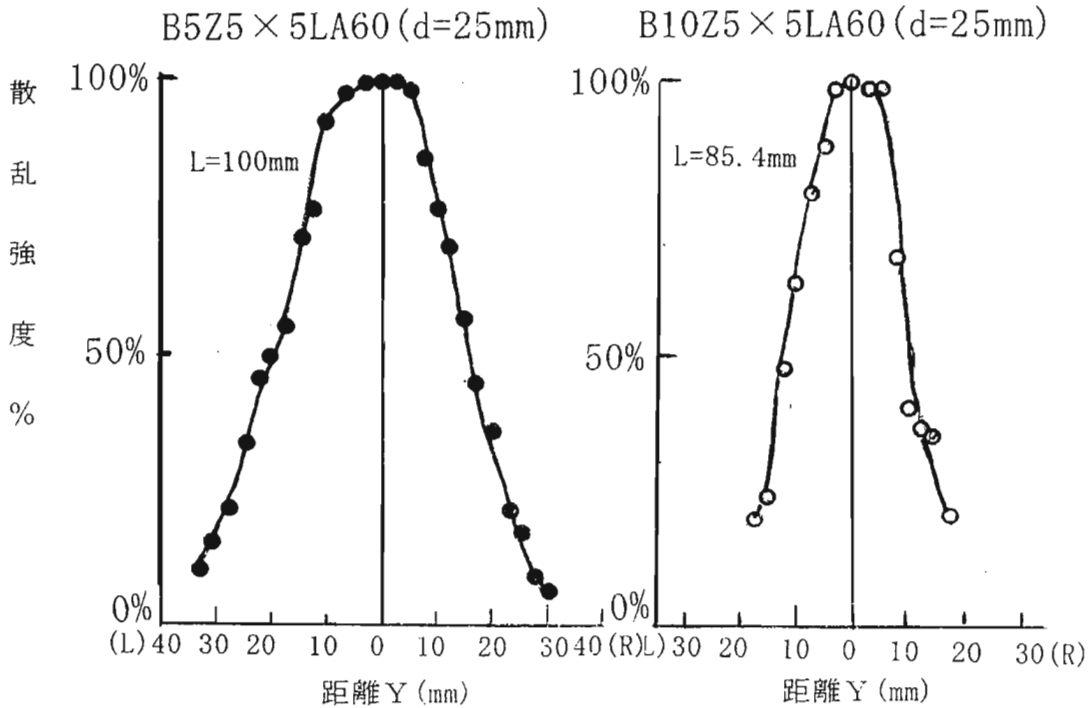


図10 Notch の散乱強度の実験結果

## 5. 結論

EDM Notch を用いて TOFD 法の基礎実験を実施した。その結果次のことが確認できた。

- 1) 探傷周波数 2 MHz では今回の試験条件(試験片厚さ 30mm、Notch の高さ 5mm)では、分解能の点から探傷に不适当である。
- 2) Lateral Wave の距離特性が明らかになった。試験材の幾何学的寸法によっては、Lateral Wave を TOFD 法の情報に使用出来ない可能性がある。
- 3) 探触子間距離をかなりの範囲変化させても、EDM Notch の上端部・下端部の位置の推定は十分出来る。
- 4) EDM Notch の上端部・下端部のビーム路程差の計算と実験結果は非常に良く一致していることが確認できた。
- 5) 探触子間距離の midpoint からのきずの位置ずれと推定誤差の計算と実験結果は非常に良く一致していることが確認できた。
- 6) Notch の散乱強度が明らかになった。

前報と今回の TOFD 法の基礎実験で多くの know how が得かれ、不明点が明らかになった。今後この結果を TOFD 法の最適探傷条件の検討に役立てたい。

## 参考文献

- 1) preENV 583-6 Time of flight diffraction Technique as a method for defect detection and sizing, January, (1997)
- 2) 高橋、幸崎、佐保：TOFD 法に関する基礎実験(その1)、超音波分科会資料、No. 21638, pp86-93, (2000)
- 3) 高橋、戸田、星野：クリーピング波の伝搬特性に関する実験的検討、第三回超音波シンポジウム、IV-3、pp109-116, (1996)
- 4) I. N. Eromlov, N. P. Razygraev, V. G. Shecherbinskii: THE USE OF HEAD-TYPE ACOUSTIC WAVES FOR ULTRASONIC MONITORING, pp27-33, Soviet Journal of NDT, 14, (1973)

# 青色LED照明の蛍光浸透探傷試験及び

## 蛍光磁粉探傷試験への適用

栄進化学(株) 千葉工場 相村英行

### 概 要

蛍光探傷法は、浸透探傷試験及び磁粉探傷試験において微小なきずの検出方法として広く用いられている。

しかし、暗室で紫外線を照射して観察する方法では、紫外線を直接目や肌に浴びる危険性があり、また暗所作業であるため作業面での安全性を低下させる要因にもなっている。

そこで新しい探傷方法として、平成11年6月に東京工科大学 土門教授らにより青色光による蛍光探傷法が開発・提案された。この方法では青色光（波長約 470nm）を照射してきず部に浸透または吸着させた探傷剤を励起し、630nm付近の赤色蛍光を発光させ、これを適した光学フィルタを通して観察し、きずを検出する。

この新方式の探傷方法は平成12年5月の NDTフォーラムにて試作品が展示され、注目を浴びたが、ここでは適用例をあげて簡単に紹介する。

### 1. はじめに

浸透探傷試験法及び磁粉探傷試験法は表面なきずの探傷方法として、簡便でありながらも目視にて容易にきずが検出できることから、非常に多く用いられている。

特に蛍光探傷試験法は微細なきずの検出が可能であり、鉄鋼素材、圧力容器、船舶、自動車部品、航空機、タービン、溶接構造物等の表面なきずの探傷方法として多用されている。

しかし、この方法には幾つかの問題点もある。

- (1)紫外線（波長 365nm付近）を照射して探傷するため、皮膚、目等に直接紫外線を浴びる危険性がある。
- (2)暗所作業であるため作業面での安全性を低下させる要因になりやすい。
- (3)暗室内の明るさは指示模様の検出に大きく影響を与える。

これらの問題点を解決するため、東京工科大学 土門教授らにより新しい蛍光探傷法が開発された。

この探傷方法には、次の特長があげられる。

- (1)青色光を使用し、光学フィルタを通して観察することで、紫外線を浴びる危険が少なくなる。

(2)青色光下という比較的明るい場所での観察するため、作業効率の改善が行なえ、転倒等の危険も少なくなる。

(3)照射灯としてLEDを使用する場合、小型で小電力にすることができ、電池での運用も不可能ではなく、携帯性がよくなり、また長寿命になる可能性が高い。

弊社においてこの新方式による探傷剤及び照射装置を試作したので、これらを用いた試験の一例について紹介する。

## 2. 従来の蛍光探傷試験法と新方式との比較

図2. 1は水洗性蛍光浸透探傷試験における従来法と新方式の比較であるが、作業手順・作業内容こそ異なるが基本的には他の蛍光浸透探傷試験法も、また蛍光磁粉探傷試験法も同一に考えてよい。

従来の方式では、紫外線で蛍光材料（蛍光染料、蛍光顔料）を励起して黄緑色光を発光させていたが、新方式では青色光で励起して赤色光を発光させている。これらをスペクトルで整理したものが図2. 2であり、波長約600nm付近より長い波長の光を透過させる光学フィルタを通してきず指示模様を観察する。

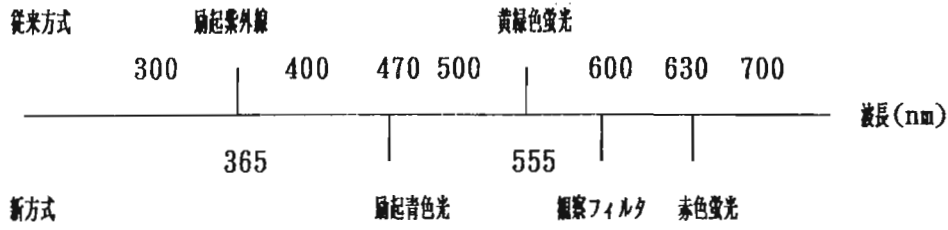
試験体の表面状態や周囲の明るさによっては、赤色より橙色がコントラストよく観察される場合もある。条件によっては、橙色光を発光するような従来の探傷剤に近い蛍光色をもった探傷剤の使用も可能と思われる。

図2.1 従来方式と新方式の比較の一例

	従来方式	新方式
前処理	固形物除去、脱脂	従来と同一
↓		
浸透	水洗性蛍光浸透液	専用の水洗性蛍光浸透液
↓		
	洗浄状態の確認（予備照射）	
洗浄処理	紫外線照射	青色光照射
↓	→蛍光の確認	→蛍光の確認
↓		
現像処理	乾式、速乾式、 湿式、無現像法	従来と同一
↓		
観察	暗室内にて紫外線照射、 きずの黄緑色蛍光観察 （暗室作業）	青色光を照射、きずの 赤色をフィルタで観察 （比較的明るい場所でも可）
↓		
後処理	現像剤除去、後洗浄	従来と同一



図2.2 従来方式と新方式のスペクトル比較



### 3. 青色励起用光源

新方式では、新たに開発された高輝度青色LEDを光源として使用している。

図3.1がこのLEDの発光スペクトルであり、470nm付近に鋭いピークを持っている。一例として試作した照射装置ではこの青色LEDを約100個使用して励起光源としているが、この場合、試験体から約300mmの距離から照射して約1300lxの照度が得られ、約150mm×150mmの範囲が観察可能であった。これに必要な電力は約10Wであり、商用電源でも、乾電池でも使用可能であると考えられた。新方式では、従来のブラックライトと比較して、発熱量の少ない長寿命の観察装置となり得ると考えられる。

また、青色LEDだけでなく470nm付近に発光スペクトルを持つ照射装置であれば、特有の線スペクトルを持つ金属イオンを封入したようなメタルハライドランプの使用も可能となり、LED照明よりも高い照度を有する照明装置の製作も可能となろう。

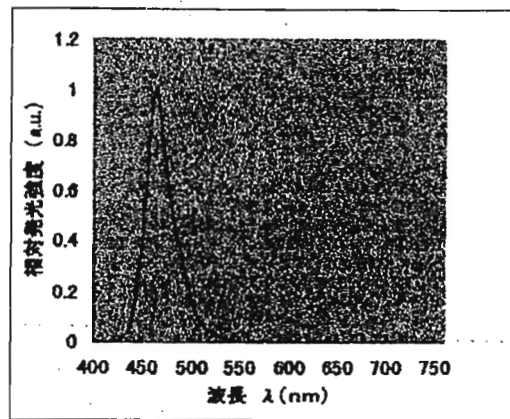


図3.1 青色LEDの発光スペクトル

#### 4. きずの検出法の一例

##### ① 蛍光浸透探傷法における探傷の比較

水洗性蛍光浸透探傷試験を実施した場合の検出例について紹介する。

試験片としてJIS-A型対比試験片を用い、探傷剤は従来法では、高感度水洗性蛍光浸透液F-4A-C/1 (Type 1, Level 3, Method A)を使用し、新方式では同じくレベル3相当の感度を持つ試作浸透液を使用して探傷した。浸透時間経過後、加温加圧水洗装置により水洗し、熱風循環式乾燥炉内にて乾燥後に乾式現像法により現像し、現像時間経過後取り出し、それぞれの励起光の下で観察し検出状態を比較した。

試験方法：水洗性蛍光浸透探傷試験－乾式現像法 (F A - D)

探傷条件：浸透時間	5分	乾燥温度	65℃
水洗圧力	0.3 Pa	現像時間	10分
水洗温度	25℃	乾式現像剤	F-5D/1

観察条件：従来法	紫外線強度	1000 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$
	白色光照度	0 Lux
新方式	青色光照度	1000 Lux
	白色光照度	0 Lux

試験結果：別紙写真参照 (図4. 1)

新方式においても、小さなきずまで十分に観察されている。

##### ② 観察時の白色光の影響

上記①で探傷したA型対比試験片の観察時に周囲環境が明るい場合の、観察への影響について比較する。

観察条件：従来法	紫外線強度	1000 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$
	白色光照度	100 Lux
新方式	青色光照度	1000 Lux
	白色光照度	100 Lux

試験結果：別紙写真参照 (図4. 2)

従来法では、観察時に周囲が明るい場合には、その影響を受け小さなきずの観察がやや困難になるが、新方式では従来法よりもその影響は小さいように感じられた。

① 蛍光浸透探傷試験における探傷の比較

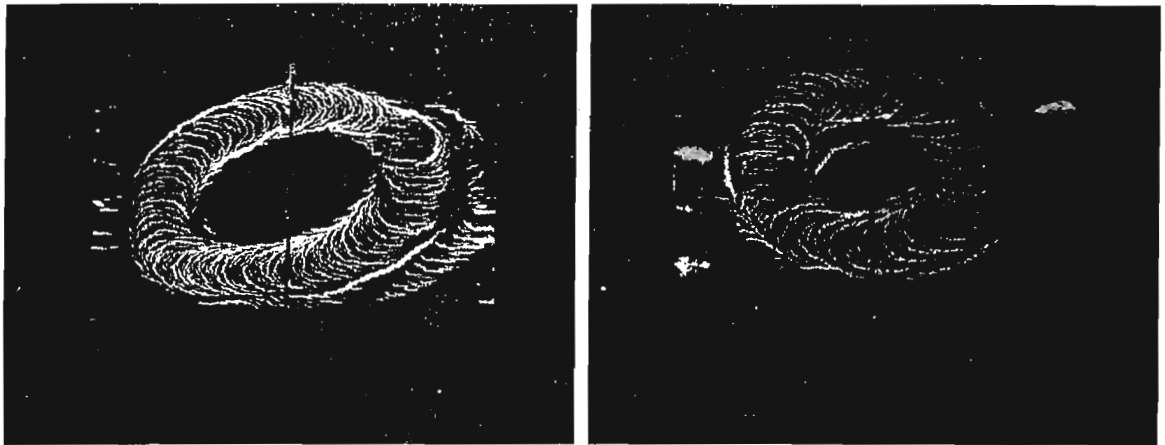


図 4.1 (a)従来法 (紫外線方式)  
紫外線  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

(b)新方式 (青色光)  
青色光  $1000 \text{lx}$

② 照度と白色光の影響

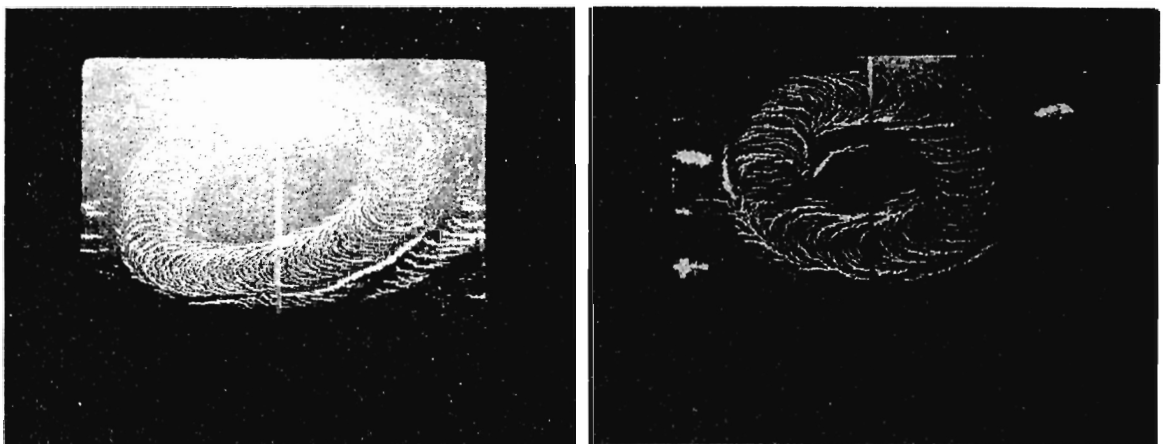


図 4.2 (a)従来法 (紫外線方式)  
紫外線  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$   
白色光  $100 \text{lx}$

(b)新方式 (青色光)  
青色光  $1000 \text{lx}$   
白色光  $100 \text{lx}$

## 5. まとめと展望

- 新方式により紫外線を使用しないため、紫外線の照射を直接人体に受けず、また青色照明下という比較的明るい場所での観察が可能なので、作業効率の改善が行なえ、非破壊検査技術者にとって安全な作業が実現される。
- LEDを使用する場合、照射灯を小型で小電力にすることができ、電池での運用も不可能ではなく、携帯性がよくなり、また長寿命になる可能性が高くなる。

今後、弊社と致しましても、この新方式探傷法をユーザーの皆様がより使いやすく、かつ安全性・信頼性の高い探傷システムとして確立させるべく、検討して行きたいと考えております。なお、本稿をまとめるにあたり NDI資料 30145を参考とさせて頂きました。

# 超音波自動探傷装置の開発

千葉県機械金属試験場 立川 克美  
東京理科大学基礎工学部 羽田野 甫  
(株)ジャスト研究所 ○名取 孝夫  
湘菱電子(株) 岡本 実  
駒井鉄工(株) 横山 幸夫

## 1. はじめに

近年の構造物巨大化に伴い、適用される各種非破壊検査のなかでも超音波探傷試験の使用される比率は高まっている。その一方で、超音波探傷試験は技術者により試験結果に差違が生じること、記録性に乏しいことが弱点とされている。これをカバーする方法として超音波探傷の自動化がある。

製造工程での鋼板や鉄道レールの超音波自動探傷は約35年前から適用され、溶接部の自動探傷も製造工程では約30年前から適用されている。これに対し現場や加工工場での溶接部への超音波自動探傷の適用は27年ほど前から試みられたが、実際に普及始めたのは20年ほど前からである。これまでの溶接部の超音波自動探傷の位置付けは低く、超音波自動探傷でエコーが検出された部分を手探傷で再度探傷し、手探傷の結果で溶接部の評価を行うというものであった。本来、手探傷の弱点をカバーするはずの超音波自動探傷は、その信頼性が低く、手探傷の主に対して従としての立場に甘んじていた。

ここ約10年の電子技術の急速な進歩と普及、特にパソコンとその周辺技術の進歩と廉価化は、溶接部の超音波自動探傷にそれ以前のものとは比べようもない進歩をもたらした。そうした新しい超音波自動探傷は、従から主の立場に転じようとしている。JIS Z 3070-1998「鋼溶接部の超音波自動探傷方法」は、こうした状況を反映して超音波自動探傷が各分野で取り入れやすい状況を作り出すために制定されたものである。本報告は、筆者ら産学官5者により研究開発した新しい超音波自動探傷装置についての説明と紹介を行う。

## 2. 超音波自動探傷装置の必要性

従来より手動探傷による超音波探傷試験の短所に、①記録性に乏しいこと、②技術者による試験結果の差違があることが言われる。

超音波探傷試験に①の記録性を持たせるには、自動探傷で収録されたデータから平面及び断面画像を表示及び探傷条件のデータ記録で、放射線透過試験のフィルムと同等な記録性を持つことができる。また、超音波自動探傷では探触子の自動走査、カップリングチェック機能、自動判定機能などにより②の探傷技術者の技量差の排除ができ、信頼性向上を図ることができる。

## 3. 建築鉄骨溶接部で求められる超音波自動探傷装置

本装置は、突合せ継手、T継手、角継手を対象として開発し、また開先形状は、JUを除くほとんど全てを対象としている。従って本装置は、全ての分野の溶接継手に使用可能



であるが、装置を構成する超音波探傷器の部分をデジタル探傷器とすること及び小型軽量とすることから、探傷器を1チャンネルとしているため、片面片側探傷のケースが多い建築鉄骨溶接部を特に意識して開発している。また建築鉄骨溶接部の探傷環境は、次の特徴があり他の分野に比較して、より多くの解決すべき課題がある。これらの課題が解決できればすべての分野で使い勝手のよい超音波自動探傷装置が得られるとの判断から建築鉄骨溶接部の特徴を考慮した開発を行うとした。

【建築鉄骨溶接部の特徴＝探傷の自動化で解決すべき課題】

- ①鉄骨溶接部は比較的短い溶接線である。
- ②探傷は高所作業もあり、探傷姿勢も異なる。
- ③構造はH形鋼，角形鋼管，箱形断面，遠心力鋳鋼管など多品種である。
- ④裏当て金付きT継手溶接部が多い。
- ⑤初層の裏当て金付近からたれ込みの妨害エコーが発生する。

特に⑤の課題は、建築鉄骨溶接部の探傷現場で常に付きまとうトラブルである。建築鉄骨の裏当て金付き溶接部の初層に発生する溶込不良とこれに類似の妨害エコー（通称、たれ込みエコーと言う）は、表示器上では類似のエコーで、この判別は技術的に困難な問題を含んでいる。

筆者らは、202指針と呼ばれていた「裏当て金付完全溶込みT継手ルート部からのエコー判別に関する指針」<sup>1)</sup>の改正作業を（社）日本非破壊検査協会超音波分科会の溶接部の超音波探傷研究委員会で行い、図1に示す判別のフローチャートを作成した。このフローチャートは超音波探傷の日本建築学会規準<sup>2)</sup>にも盛り込まれているものである。

鉄骨工場の社内検査では疑わしきエコーが検出されると、たとえそれが探傷技術者の経験的な見地からたれ込みと判別していても受け入れ検査時のトラブルを避けるため、念のため事前に手直しをしておくのが社内検査では通例となっている。自動探傷装置により取得したデータをNDI指針に基づき定量的に欠陥エコーと妨害エコーとを自動判別することで、鉄骨製作現場でのトラブルを解消し、生産効率と超音波探傷試験の信頼性を高めることができる。

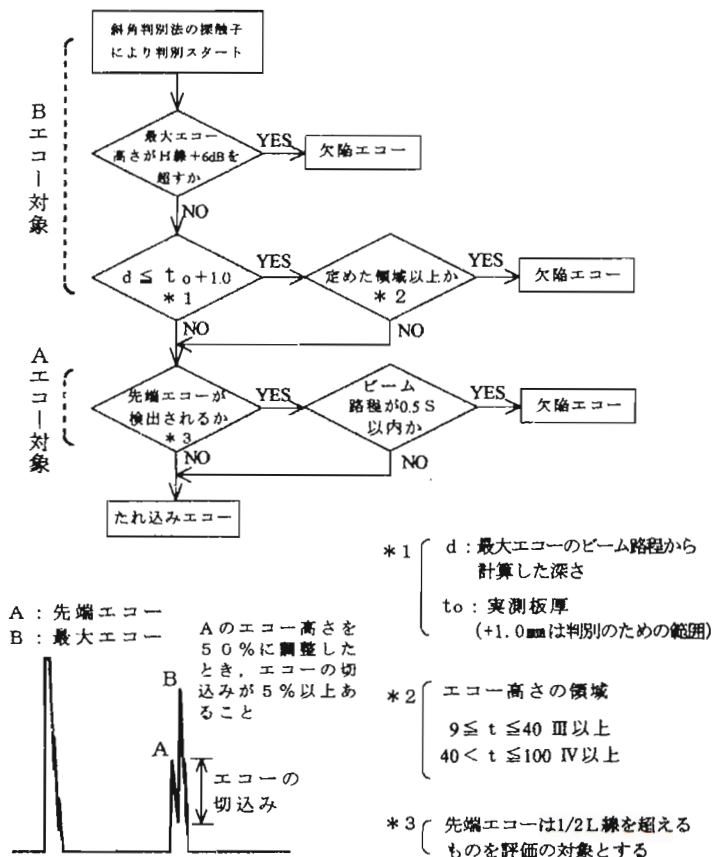


図1 指針による斜角判別法のフローチャート

#### 4. 超音波自動探傷装置の方式

現在、超音波自動探傷装置は、旧来からの方式をとるものと、最新の電子技術を駆使した新しい方式のものが混在している。表1にその方式の相違を示す。

表1 旧来方式と新方式の相違

機能項目	旧来からの方式のもの	新しい方式のもの
ゲート方式	アナログ方式のゲート機能	A/D変換器を使用したゲートレス
収録データ	ゲート出力 (hとW)	Aスコープ (全波形)
ゲインミックス	リアンプ使用, -26dB	ログアンプ使用, -60dB
画像表示	ゲート出力による画像	Aスコープによる画像
カップリングチェック	CCデータを収録しない	CCデータを収録, 保存する
CC結果の表示	CC結果を表示しない	CC結果を画像表示する
収録条件	限られた探傷条件の保存	すべての探傷条件を保存閲覧可能

こうした新旧両方式が混在する状況には、以下の問題点が存在する。

- ① 使用者が機種を選択する際に、どちらの方式に属するものか分かり難い。
- ② 1ゲート1エコー方式の機器では、妨害エコーが存在する溶接部に使用できない。
- ③ Aスコープを保存しない方式は、レ形裏当て金付溶接部に使用した場合、JSNDI指針によるルート部の妨害エコーの判別ができない。
- ④ カップリングデータを収録しない方式は、探傷結果の正当性が確認できない。

#### 5. 開発した自動超音波探傷装置の構成

今回開発した超音波自動探傷装置は、機動性を重視することから本体とスキャナの2点構成とした。図1に構成ブロック図を、写真1に装置外観を示す。スキャナは、探触子と探触子を保持するホルダーを有し、これを走査させるY軸走査機構を備える。また、このスキャナ全体を溶接線方向に走査させる機構とケーブルを接続するコネクタを有する。スキャナと本体は、探触子ケーブルと制御ケーブルで接続される。特に制御ケーブルは、専用に製作したもので1m当たり170gの軽量で柔軟な線材を使用している。本体は、市販のデジタル探傷器と走査制御部とからなり、この二つを改造することなく背面で一体化している。

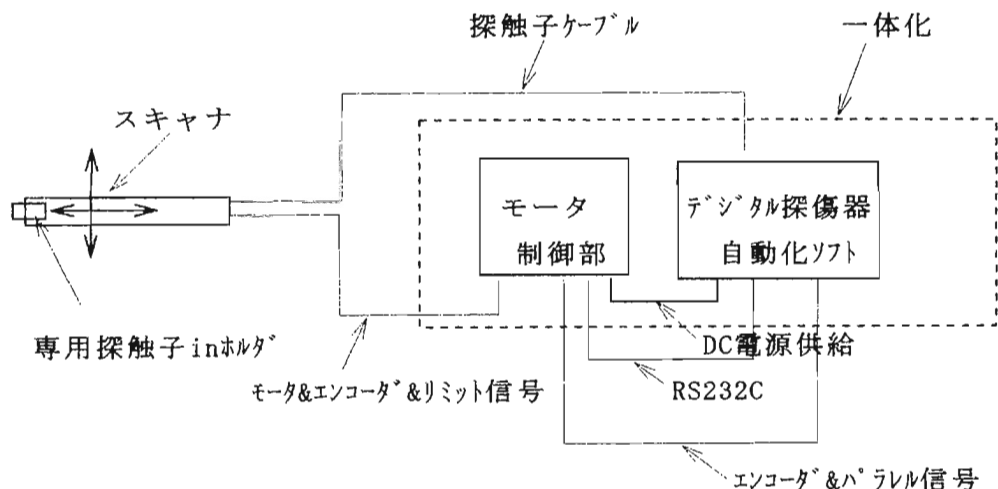


図1 構成ブロック図

## 6. システムの特徴

システムの開発には、先進的な技術を有する関係者の支援を求め、(株)ジャスト研究所、湘菱電子(株)、駒井鉄工(株)、東京理科大学基礎工学部羽田野研究室及び千葉県機械金属試験場の産学官5者による共同研究体制で実施し、その成果を元に商品化開発を行った。本システムは、現在市場にある大型AUT装置と同等の必要十分な機能を有しており、これらの特徴を次に示す。

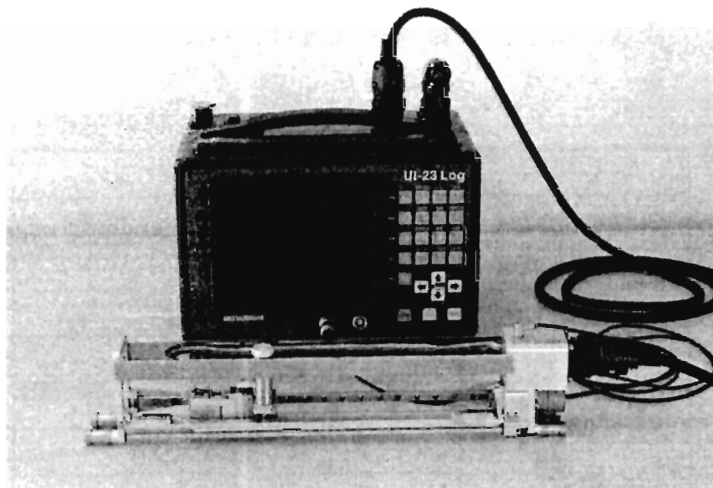


写真1 装置外観

### 1) 超音波探傷器及び制御部

本システムでは低価格の商品化を実現するため、市販のデジタル型探傷器をログアンプ化した。スキャナーのコントローラは最新のモータ制御素子を使用し、新たに設計開発をすることにより、コンパクトな制御部とした。さらにデジタル探傷器とコントローラとを背面で接合し、一体構造としたため重量は約5.5Kgとなった。

### 2) スキャナーの新規設計試作

スキャナーの小型軽量化、容易なスキャナーのセット、溶接線直角方向のスキャン範囲を250mm確保すること、さらに溶接線方向の走査のデッドゾーンの極小化を図るため、構造を基本から見直した。これによりレールレスとするマグネットローラーを採用し、探触子の安定走行を確保するため、特殊な探触子保持構造によるギャップ法を採用した結果、800gの超軽量スキャナーを開発した。なお、本構造はコラム柱やパイプ構造などのR部(半径40mm以下)にも対応する。

### 3) 探触子走査速度

デジタル探傷器は画面更新が60Hz固定であるため、手探傷で使用するのであれば、内部での波形データ書き換えはこれより速ければ問題ない。本システムでは、デジタル探傷器のCPUや波形処理に関係するハード及びソフトの最大処理性能を引き出した結果、1秒間に100mmの探触子走査速度が可能となった。なお、データ収録ピッチを厳密に考慮しない予備探傷的使用では、180mm/秒で走査可能である。

### 4) データ記憶個所数

板厚25mm探傷長300mmの場合、波形データ量は約7MBとなる。搭載する記憶媒体の記憶容量により異なるが現時点で入手可能な最大容量の192MBコンパクトフラッシュディスクの場合、22個所の記憶が可能であった。今後の高性能化の可能性から近い将来に100個所程度の記憶も実現すると思われる。

### 5) 探傷条件設定と常時操作機能の簡略化

探傷ソフトで表示される画面は、全体で六十数画面で構成されている。図2～図6に探傷条件設定画面の一部を紹介するが、すべての探傷条件を任意に設定可能な従来の使用が可能なほか、類似の継手種類、開先形状を連続して探傷する場合に、設定変更項目を最小限度に限定して使用可能な簡略化機能を付加した。

6) 妨害エコーの判別

本システムで採用した妨害エコーの除去方法は、レ形裏当て金付き溶接部とその他の継手形状で異なる手法を用いた。前者を可能としたのは全波形収録方式を採用したことによる。その結果、NDI 指針によるフローチャートに基づいた判別が可能となった。

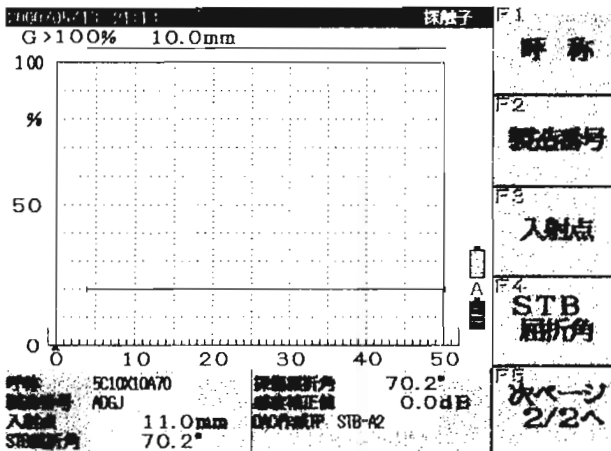


図 2 探触子の設定

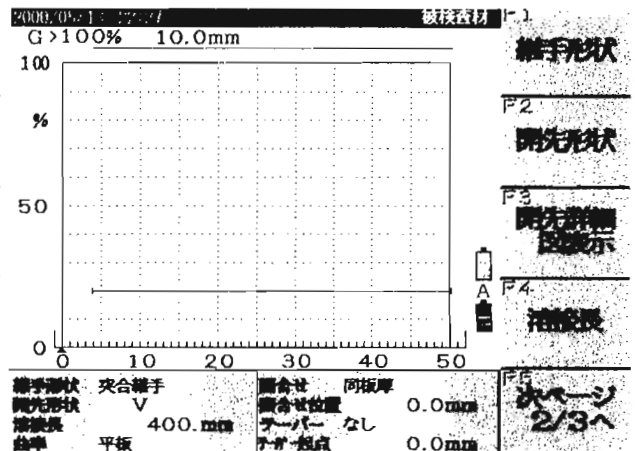


図 3 試験材の設定

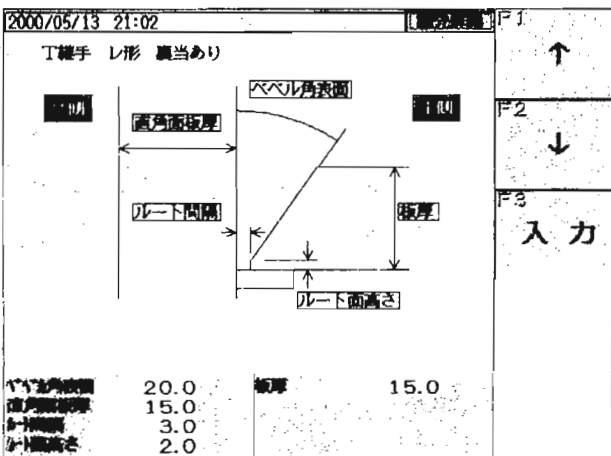


図 4 開先条件設定



図 5 データ処理画面

7) 欠陥画像の表示

本システムで採用したデジタル探傷器のディスプレイの表示画素数は、横640縦480のVG A表示と呼ばれる一般的DOS/V機の表示密度である。この表示密度は、これまでのデジタル探傷器の約4倍に当たり、欠陥画像を広い範囲で精密に表示することが可能となった。探傷画像は探傷結果の項で紹介する。

8) カップリングチェック機能

本システムで採用した全波形収録とログアンプによりJIS Z 3070「鋼溶接部の超音波自動探傷方法」で規定される林状エコーの監視によるカップリングチェックが可能となった。

9) 探傷記録表の自動作成

本探傷システムでの適用範囲を日本建築学会規準に基づく自動的評価・合否判定までとし、図7に示す探傷記録表を表示することができる。報告書の自動作成については別置きのパソコンにデータを転送・保存する。別置きのパソコンでは、手探傷での報告書作成に



も使用可能とし、建築学会規準に基づいて自動的に合否判定と検査報告書作成ができる。なお、パソコン上では欠陥画像に対応するAスコープ波形の表示により探傷作業を再現することもできる。

2000/03/31 16:25					2000/03/31 16:26					探傷記録				

図7 探傷記録表

7. 探傷結果

7.1 自動探傷装置による探傷結果

裏当て金付きT継手溶接部、板厚14mm、19mm及び28mmの試験体に溶込不良とたれ込みを含む試験体を作製した。これらの継手に対して自動探傷装置の有効性を実験したところ、3者とも同様の結果が得られた。今回は紙面の都合上板厚14mmについて報告する。

開発システムにより得られた探傷結果の基本画像のうち、試験体左端55mmから185mmまで

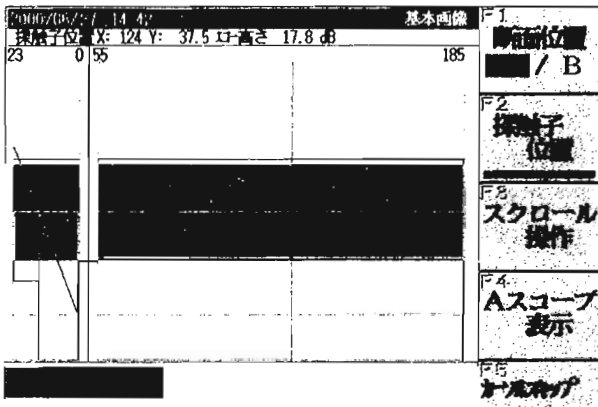


図8 BCスコープ基本画像

を図8に示す。探傷長が長い場合はスクロールにて順次表示する。図9は検出されたエコーを各々一つの欠陥としてグループ別に表示し、それぞれ欠陥番号を付記する。

建築学会規準では溶込不良とたれ込みの判別について、NDI指針のフローチャートを採用している一方で、幾何学的手法（板厚内かつ溶接部内から検出されたエコーを欠陥とする方法で「板厚法」とも呼ばれている）も用いられており、何れの手法を採用するかは関係者間で協議し、工事に先立って作成される超音波検査要領書に明記することが望ましいとされている。本システムによる両手法の妨害エコー除去のフローを図10に示す。

板厚14mm試験体の探傷データを幾何学的手法により判別した結果の画像表示を図11に示す。これに対して、図12は同探傷データをNDI指針により判別したものである。この結果、幾何学的手法では開先面の融合不良は検出されたものの、柱フランジ側の溶込不良はごく一部が検出されたにすぎない。



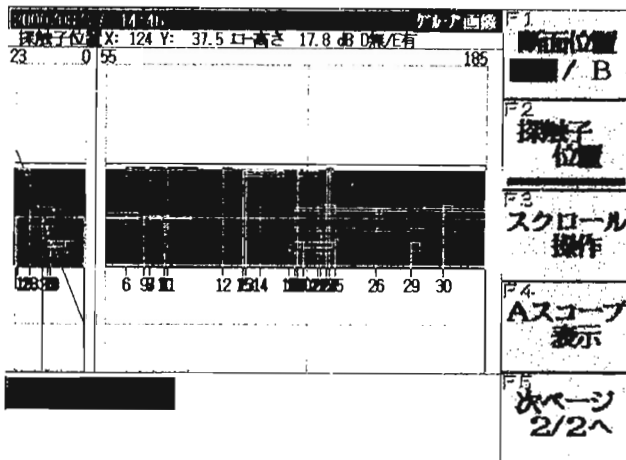
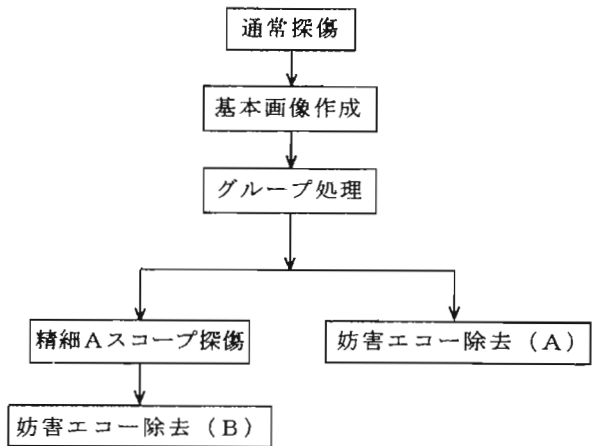


図9 グループ別表示



(A) 幾何学的手法による妨害エコーの除去  
 (B) NDI 指針による妨害エコーの除去

図10 妨害エコー除去のフロー

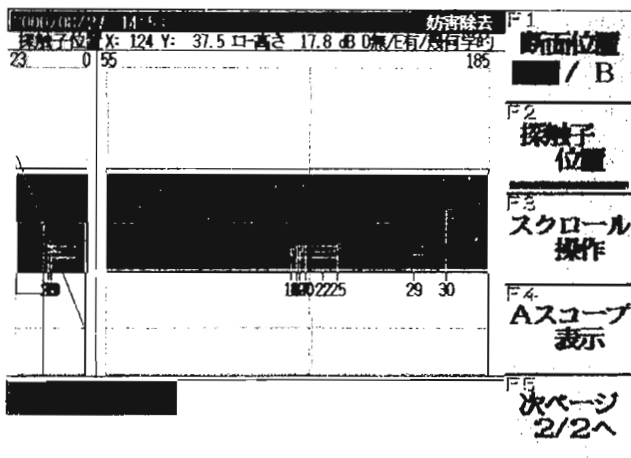


図11 幾何学的手法により判別した結果

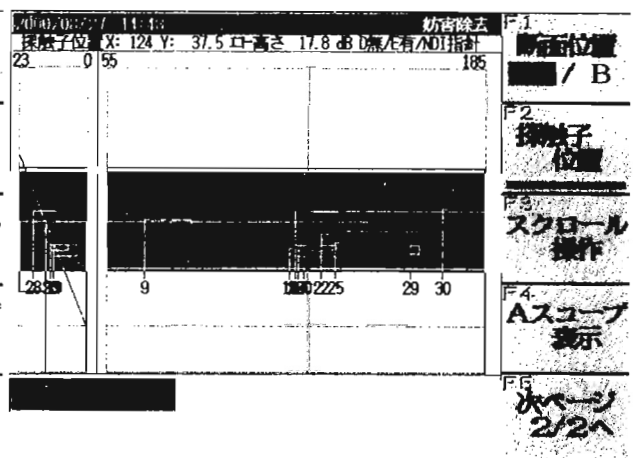


図12 NDI 指針により判別した結果

NDI 指針法による結果は、 $X = 120\text{mm}$ から試験体右端まで連続的に溶込不良が検出された。また、 $X = 68\text{mm}$ から $84\text{mm}$ の位置にも溶込不良が検出された。両手法の判別に差異が生じた原因として次の項目が考えられる。

(1)幾何学的手法は、エコーのビーム路程から計算された反射源位置が実測板厚よりも深いときは、全て妨害エコーとして判断される。

(2)NDI 指針では、図1に示したフローチャートのBエコー位置が、実測板厚プラス1mmまでを判断対象とし、これにエコー高さや先端エコーの情報を加味して最終的な判断を行うものである。

これらは、NDI 指針作成時に数百ヶ所の溶込不良及びたれ込み部の探傷とマクロ試験結果から、溶込不良の最大エコーを示す反射源位置は、板厚よりも若干深い裏当て金の溶融境界部付近にあるという結果に基づいている。

## 7.2 マクロ試験結果との整合性

板厚14mm試験体の断面マクロ試験結果を次に示す。

写真2は左端より60mmの位置で、NDI指針法ではたれ込みによる妨害エコーと判別されたもので、マクロ写真結果からも板厚よりも0.7mm程度深い位置にたれ込み部が確認された。なお、この部分のエコー高さは領域Ⅱであった。また、幾何学的手法では妨害エコーと判断された。

写真3はX=80mmの位置で欠陥高さ1.5mmが確認された、NDI指針法では溶込不良と判別されたが、幾何学的手法では妨害エコーと判別された。

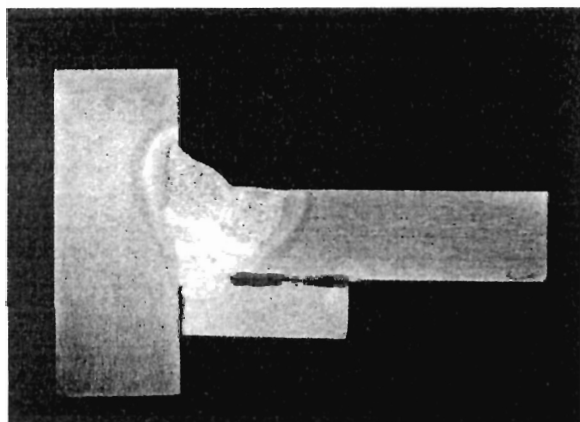


写真2 左端より60mmの位置のマクロ結果  
(板厚より0.7mm程度深い位置にたれ込みが確認)

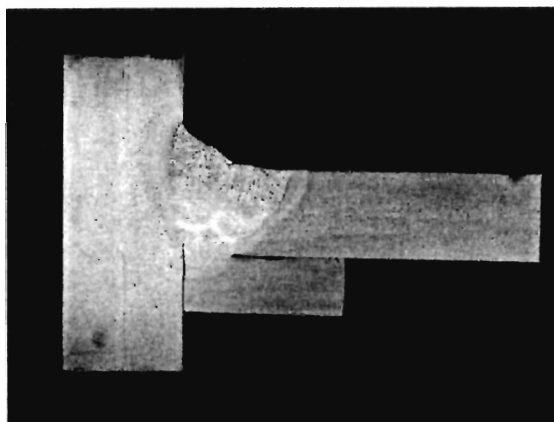


写真3 左端より80mmの位置のマクロ結果  
(欠陥高さ1.5mmが確認)

写真4はX=130mmの位置で溶込不良の高さ2mmと開先面に近い位置での融合不良が確認された。NDI指針法では溶込不良、融合不良を直射及び一回反射で検出した。一方、幾何学的手法では融合不良のみを直射及び一回反射で検出しただけである。なお、直射法による融合不良の検出は探触子の接近限界によりごく一部しか検出されていない。

写真5はX=170mmの位置で、溶込不良の欠陥高さは5.5mmが確認された。欠陥高さが3mmを超えると、指針フローチャートに示したAエコーの先端エコー(端部エコーの一種)が検出され、溶込不良と判別された。幾何学的手法では、反射源位置が板厚を超えたためこの連続した溶込不良は妨害エコーと判別され、ごく一部の融合不良のみが検出された。

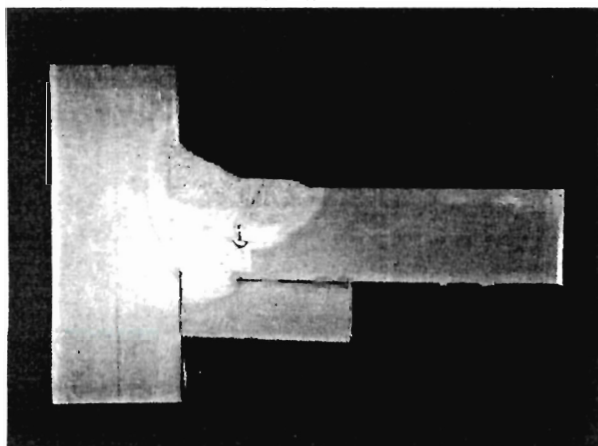


写真4 左端より130mmの位置のマクロ結果  
(欠陥高さ2mmと開先面近くの融合不良が確認)

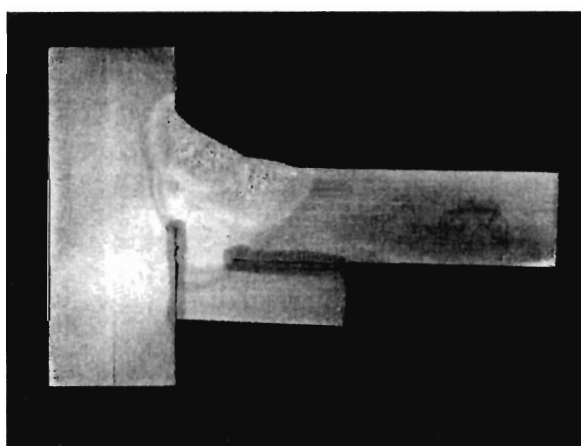


写真5 左端より170mmの位置のマクロ結果  
(欠陥高さ5.5mmが確認)

## 8. まとめ

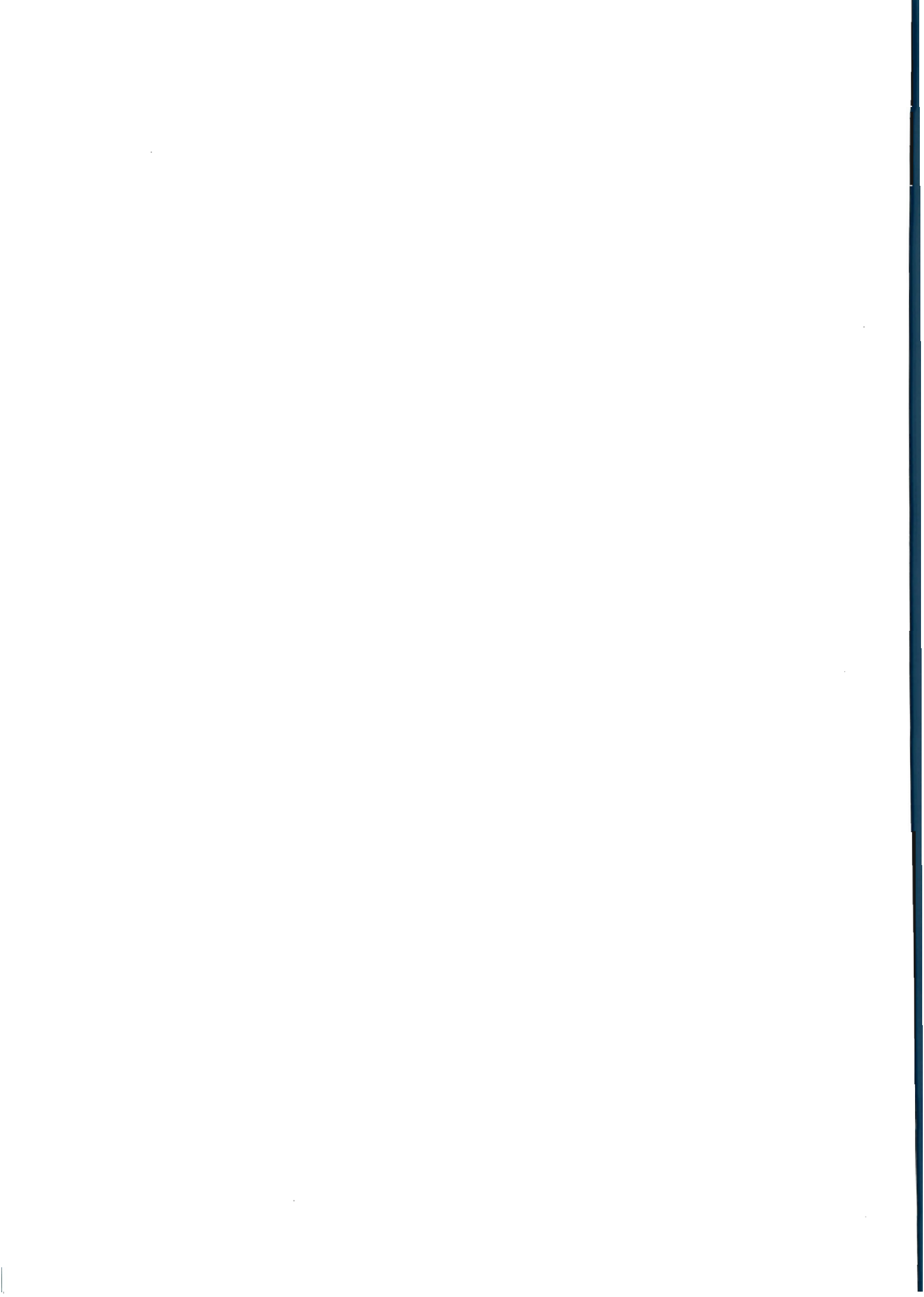
産学官5者による鉄骨溶接部の超音波自動探傷システムの開発を行い画像表示機能、データ処理機能及び欠陥と妨害エコー判別の実証実験を行ったところ、次の結果が得られた。

- 1) 建築鉄骨溶接部に適用可能な小型軽量で操作性の良い自動探傷装置を開発した。
- 2) 市販のデジタル探傷器をログアンプ化し、超小型スキャナーとの組み合わせで、従来型自動探傷装置の3分の1程度の価格が可能となった。
- 3) 溶込不良とたれ込みの判別は、NDI指針法と幾何学的手法の両手法を選択することができる。NDI手法では欠陥と妨害エコーの判別が的確に行えると共に、欠陥の見落としを防ぐことができる。
- 4) 探触子の走査速度は100mm/秒であるが、建築学会規準による自動合否判定及び報告書作成システムにより、作業トータルの時間は大幅に短縮される。

以上の結果から開発した鉄骨溶接部超音波自動探傷システムの有効性が確認された。本システムの持つ数々の機能は、マニュアルで探傷作業を行っている超音波探傷技術者にとって、日常抱えている技術的な夢を実現できる装置であると確信している。なお、本システムは平成13年1月に(株)ジャスト研究所と湘菱電子(株)とから市販された。

### 参考文献

- 1) 溶接部の超音波探傷研究委員会：裏当て金付完全溶T継ルート部からのエコー判別に関する指針(1995改正版)、非破壊検査、44(12)、p946-950、(1995)
- 2) 日本建築学会編：「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説」1996



## フリーディスカッション

題目：NDI 認証・認定問題を考える



