

## 鋼溶接部の超音波斜角探傷試験に関する研究（その3）

—プロホールの応答特性—

藤 盛 紀 明

## § 1. まえがき

“その2”までにおいては<sup>1),2)</sup>理論および模形欠陥を用いた実験によって、欠陥寸法の推定方法などについて検討した。その結果超音波探傷試験方法を確立するためには、自然欠陥に関するデータの蓄積とその分析が必要であることが痛感された。そのためまず第一に最も一般的な溶接欠陥であるプロホールについてデータを集め分析した。プロホールのエコー高さ、左右走査・振子走査・前後走査時のエコー高さの変化、距離振幅特性を解析し、プロホールの長さの推定方法、距離振幅校正の問題点、振子走査による欠陥種別判定の可能性を検討した。

本報告に使用した記号の意味を以下に示す。

$D$ (db) : エコー高さ。  $D_0$ (db) : NDI-STB-A2 の  $4\phi \times 4$  のドリルホールのエコー高さ。  $D_{max}$ (db) : 最大エコー高さ。  $D_0$  を基準とする。  $L_R$ (mm) : 欠陥の溶接線方向の実測の長さ。  $L_V$ (mm) : 超音波探傷試験で推定した欠陥の溶接線方向の長さ。  $L_X$ (mm) : X線フィルムで推定した欠陥の溶接線方向の長さ。  $R$ (mm) : ビーム路程。  $\lambda$ (mm) : 波長。  $D_e$  法 : 左右走査および前後走査を行なって、エコー高さが  $(D_{max} - D_e)$  以上となる範囲の探触子の移動距離によって欠陥寸法を推定する方法。  $D_S$  法 : 左右走査または前後走査を行なって、エコー高さが  $(D_0 + D_S)$  以上となる範囲の探触子の移動距離によって欠陥寸法を推定する方法。  $\gamma_{dB}$ (db) :  $D_e$  法において採用すべき  $-D_e$  値。

## § 2. 試験体

## 2.1 プロホールの作製方法

プロホールの作製方法を11方法考案し、予備実験によってその可能性を検討した。結果の概略を、以下に述べる。

(1) 空気吹付法 : 溶接の後方からアークが  $45^\circ$  程傾斜するまで空気を吹付ける方法。径  $0.1\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$  の微小な密集したプロホールがかなりの確率で発生する。

(2) 裸溶接棒法 : 被覆溶接棒の被覆を剥がした棒で溶接したり、ガスシールド溶接のガスを供給せずに溶接したりする方法。種々の径のプロホールが密集して確実に発生するが、できすぎて海綿状になる可能性が大きい。

(3) 湿潤溶接棒法 : 水に浸して水分を多量に含ませた被覆溶接棒で溶接する方法。微小なプロホールが密集して発生するが、発生率が低く割れを併発する恐れがある。

(4) 高電圧法 : 溶接電圧を極度に高くする方法。溶接線方向に連続したビット状のプロホールが発生するが、発生率は低い。

(5) ショートエクステンション法 : ノンガス半自動溶接においてワイヤーの突き出し長さを  $10\text{mm}$  程度にして溶接する方法。単独のプロホールが発生するが、発生率は低い。

(6) 錆法 : 錆の固まりを投入して溶接する方法。スラグ巻込みが発生するが、プロホールの発生する確率は極めて低い。

(7) 油塗布法 : 溶接部にマシン油を塗布して溶接する方法。プロホール発生率は極めて低い。

(8) ペイント塗布法 : ピニールペイントを  $0.5\text{mm}$  厚程度塗布して溶接する方法。径  $3\text{mm} \sim 4\text{mm}$  のプロホールが密集して確実に発生するが、ウオームホールになる場合がある。

(9) 水練りフラックス法 : 水練りしたフラックスを塗布して溶接する方法。径  $3\text{mm} \sim 4\text{mm}$  の密集したプロホールが確実に発生するが、割れを併発する可能性がある。

(10) 磚子法 : 砕いた磚子を混入して溶接する方法。種々の径のプロホールが密集して確実に発生するが、海綿状になる可能性が大きい。

(11) 異種金属法 : 銅粉などを混入して溶接する方法。密集したプロホールがかなりの確率で発生するが、割れなどの他の欠陥を併発する恐れがある。

本実験では各種のプロホールを発生させるために、空気吹付法、ペイント塗布法、水練りフラックス法を採用

した。

## 2.2 試験体形状および番号

試験体形状を図-1に番号を表-1に示す。母材の板厚は28mm、材質はSS41、溶接はノンガス半自動溶接による。探傷を容易にするために板の表裏面をセーバーで仕上げビードを削除した。仕上げ後の板厚は25mmである。

試験体30体中10体は密集したプロホールまたは単独のプロホールが幾つかの群にわかれて発生したが、残りの20体は溶接線方向に連続したプロホールが発生した。前者と後者の2回に分けて実験を行なったが、その間に探触子が破損したため、屈折角70°の探触子は第1回目では4B8×9A70を、第2回目では5Z10×10A70を使用した。

前者の10体は探傷終了後溶接部を溶接線方向に1mm厚ごとに切断し、欠陥の実寸法 $L_R$ を測定した。密集した一群のプロホールの長さはその群の両端の距離とした。 $L_R$ とX線フィルム上の $L_x$ とは大差なかった。そのため後者は $L_x$ によってデータを整理した。切断面の例を写真-1に示す。

## § 3. 測定項目および測定方法

測定項目は最大エコー高さ、左右走査・前後走査・振子走査時のエコー高さの変化である。

実験に使用した探傷装置を表-2に示す。振子走査用治具を写真-2に示す。接触媒質の膜厚の変化によるエコー高さの変化を防止するために、探触子に0.6kgのおもりをのせて一定の圧力がかかるようにした。

エコー高さの変化は、探傷器に内蔵されている減衰器の読みによって測定した。測定は2スキップまで行なった。

## § 4. 実験結果および考察

### 4.1 プロホールの与えるエコー高さ

図-2に $D_{max}$ と $L_R$ および $L_x$ の関係を示す。ノンガス半自動溶接部内における音波の減衰は比較的大きい場合もあるが、本実験においては溶接部内のビーム路程が短いので、その影響を無視した。

4B8×9A70の探触子で探傷した密集したプロホールの場合、ブラウン管上に異なったビーム路程の位置に幾つものエコーが立上がる。前後走査や左右走査を行なえば幾つものエコーが複雑に立上がる。それらの数多くの

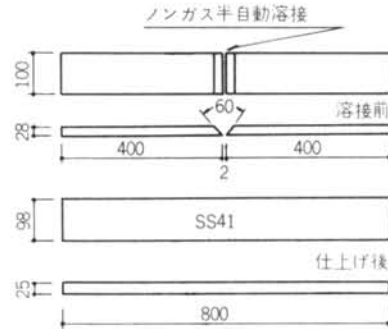


図-1 試験体形状

試験番号	欠陥作製方法
P-A-1~5	空気吹付法
P-P-1~10	ペイント塗布法
P-F-1~15	水練フラックス法

表-1 試験番号および欠陥作製方法

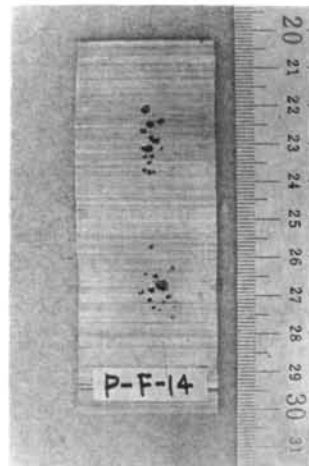


写真-1 切断面の例

探傷器	USIP-10W (KRAUTKRÄMER)
探触子	4B8×9A70, 4B8×9A45, 4B8×9A60, 5Z10×10A70
接触媒質	GLYCERIN 100%

表-2 試験装置および接触媒質

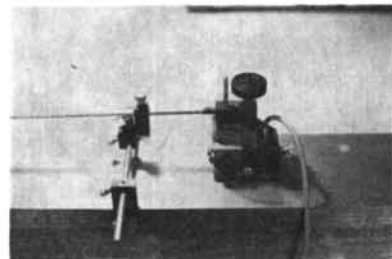


写真-2 振子走査治具

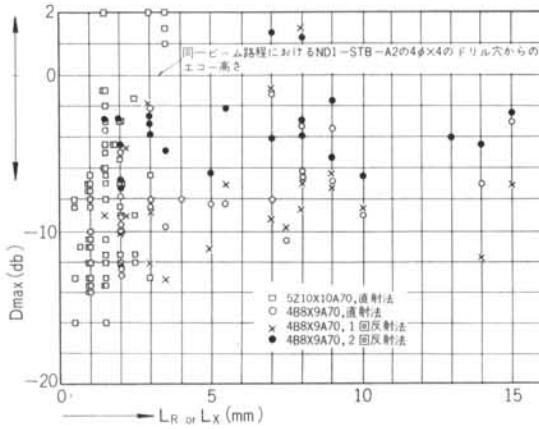


図-2 プロホールの与える最大エコー高さ ( $D_{max}$ )

エコーが密集したプロホール中のどれに対応するかを識別することは不可能である。個々のエコーも単独のプロホールのエコー高さではなく、近接した他のプロホールのエコーの影響を受けているものと推定される。そのため密集したプロホールの  $D_{max}$  は数多くのエコーの中で最も高いものとし、その長さはその群の両端の距離とした。

5Z10×10A70 の探触子で探傷した連続したプロホールの場合は、個々のエコーと個々のプロホールとの対応が見つかるので、それらの  $D_{max}$  と  $L_x$  を対応させて示した。この  $D_{max}$  も近接したプロホールの影響を受けているものと予想されるが無視した。

$D_{max}$  と  $L_R$  または  $L_x$  の間には明確な相関関係は認められず、 $D_{max}$  によってプロホールの長さを推定することはできない。

図-2 は屈折角70°の探触子を使用した場合であるが、この場合  $D_{max} \geq 0$  db のプロホールは全プロホールの6%弱、 $0 \text{ db} \geq D_{max} \geq -6$  db のプロホールは全プロホールの29%、 $-6 \text{ db} > D_{max} \geq -12$ db のプロホールは全プロホールの53%、 $-12 \text{ db} > D_{max}$  のプロホールは全プロホールの12%弱である。

すなわち現在の建築の溶接部に利用されている  $D_{max} \geq -6$  db のものを欠陥として検出する方法<sup>3)</sup>ではプロホールの35%しか検出しない。

造船や圧力容器などでは放射線透過試験で検出するプロホールを超音波探傷試験でも検出するために、NDI-STB-A2 の2φ×2、1スキップ、50%または80%という感度を使用する場合がある。これらの感度は4B8×9A70の探触子の場合4φ×4、1スキップ、50%の感度よりもおのおの約12dbまたは16db高い感度であり、このような感度で行なえばプロホールのほとんどを検出で

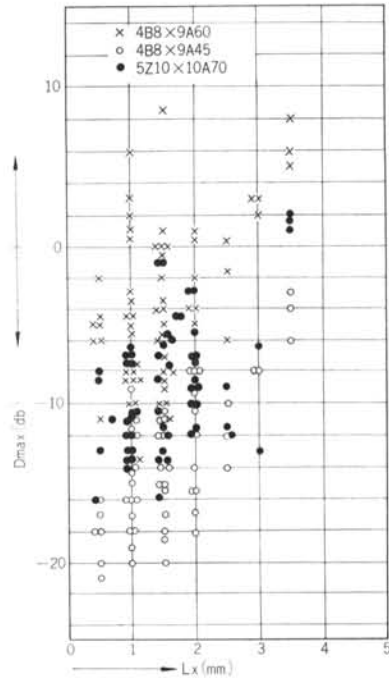


図-3 屈折角の相異によるプロホールの最大エコー高さの見掛上の相異

きることは、本実験の示すところである。

図-3 は屈折角を変えて測定した場合の  $D_{max}$  と  $L_x$  の関係である。45°よりも70°の方が、70°よりも60°の方が見掛上高いエコー高さを与える。

音波が角に入射した場合には入射角が45°近傍および0°、90°以外の場合には音波の一部が横波から縦波へ変換し、この現象は60°および30°近傍で特に著しい。本実験の感度標準に使用したNDI-STB-A2のドリルホールを探傷した場合には、この角への入射となる。したがってNDI-STB-A2のドリルホールからのエコーをブラウン管のある一定の高さにするためには屈折角45°で探傷した場合よりも70°で探傷した方が、70°よりも60°の方が受信波をより増幅しなければならず、高い感度設定となる。このような状態で鋼材内部にあるプロホールのような反射時に縦波変換のない欠陥を探傷すれば、同じプロホールを探傷したにもかかわらず図-3のように屈折角によって異なる  $D_{max}$  が得られるのは当然である。NDI-STB-A2 を使用して感度設定する場合にはこの点を考慮する必要である。

球状欠陥のエコー高さを理論的に考察すれば次のようになる。

比較的大きい球状欠陥(半径  $a$  mm)、すなわち  $2\pi a/\lambda \geq$

0.7の場合の反射率  $\gamma_0$  は式(1)で与えられる。

$$\gamma_0 \approx a/R \quad \dots(1)^{3)}$$

太くて(半径  $b$  mm)で長い( $l$  mm)円柱欠陥, すなわち  $2\sqrt{b(b+R)}/\lambda R \geq 4$ ,  $2l/\sqrt{\lambda R} \geq 4$  の場合の反射率  $\gamma_l$  は式(2)で与えられる。  $\gamma_l = \sqrt{b/(b+R)}$   $\dots(2)^{3)}$

いま,  $R=110$ mm,  $2a=4$ mm,  $2b=8.0$ mmとすれば,  $\gamma_0$  は  $\gamma_l$  より約 20db 低い。4B8×9A70の探触子を使用した場合,  $R=110$ mmにおいて径8.0mmの長い横穴からのエコー高さは, 実験によれば NDI-STB-A2 の  $4\phi \times 4$  のドリルホールのエコー高さより 12db 高い。したがって  $R=110$ mmにおいて径4mmの球状欠陥のエコー高さは, NDI-STB-A2 の  $4\phi \times 4$  のドリルホールのエコー高さより 8db 低い。すなわち  $D_{max} = -8$ db である。単独に存在するプロホールのエコー高さはこの程度のものである。

#### 4.2 $D_e$ 法によるプロホールの長さの推定

図-4にプロホールの場合の  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  と  $\gamma_{dB}$  の関係を示す。矩形欠陥の場合は図中の実線が示すように  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  が大きくなれば  $\gamma_{dB}$  は  $-6$ db に収れんするが, プロホールの場合は  $\gamma_{dB}$  は  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  が大きくなるほど小さくなる。すなわち  $D_e$  法によってプロホールの長さを推定する場合には, 欠陥の長さ  $L_R$  とビーム路程  $R$  によって  $D_e$  値を変えねばならない。

図-5に  $\gamma_{dB}$  と  $R$  の関係を示す。  $\gamma_{dB}$  の値は大きくばらついているが平均的にみれば  $R$  が小さい時は  $-6$ db,  $R$  が大きい時は  $-2$ db である。

図-6~図-8に  $D_e$  法によってプロホールの長さを推定した場合の,  $L_U/L_R$  と  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  の関係の一部を示す。  $R$  が大きくなれば誤差が大きくなる。

表-3は色々な  $D_e$  値を採用して  $D_e$  法によってプロホールの長さを推定した場合の誤差の平均  $\bar{\delta}$  と誤差の標準偏差  $\sigma$  を示したものである。

ビーム路程  $R$  が短い範囲では,  $D_e = 6$ db として  $D_e$  法によって長さを推定すれば, 比較的小さな誤差範囲でプロホールの長さを推定することができる。この場合の  $L_U$  の  $L_R$  関係を図-8に示す。  $D_e = 6$ db として  $D_e$  法によってプロホールの長さを推定した場合の誤差  $\delta$  とビーム路程  $R$  の関係を図-10に示す。

図-9中にプロホールの長さを著しく過小評価しているものがある。これは  $D_e$  法を杓子定規に適用したためである。密集したプロホールは色々な寸法のプロホールが色々な分布状態で集合したものであり, 一群の欠陥とみなされるものでも部分によって音波の反射率や欠陥までのビーム路程が異なっている。このような欠陥に対し

て左右走査を行えば色々なビーム路程で色々な高さのエコーが立上がる。微小なプロホールの部分ではその群の最大エコー高さに比してかなり低いエコー高さしか与えず, 最大エコー高さのほうらく線は複雑な形状とな

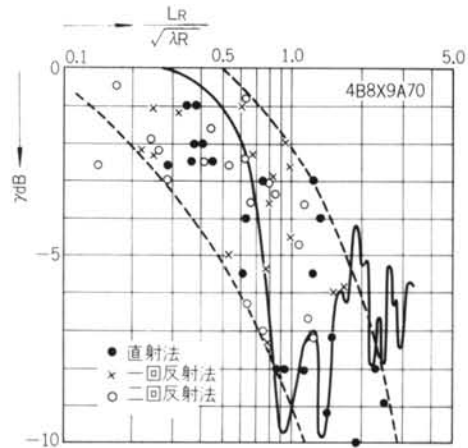


図-4 プロホールの場合の  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  と  $\gamma_{dB}$  の関係

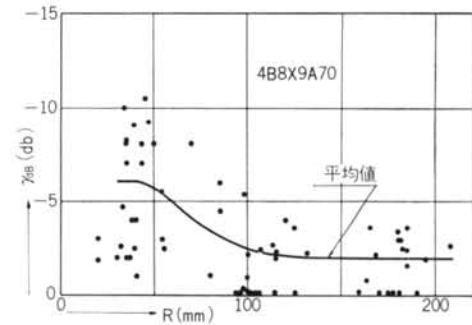


図-5 プロホールの場合の  $\gamma_{dB}$  と  $R$  の関係

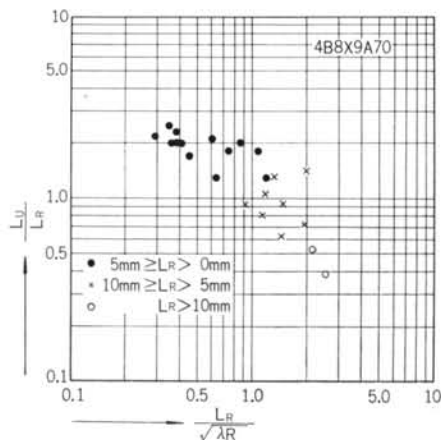


図-6  $D_e = 6$ dB とした  $D_e$  法による場合の  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  と  $L_U/L_R$  の関係(直射法)

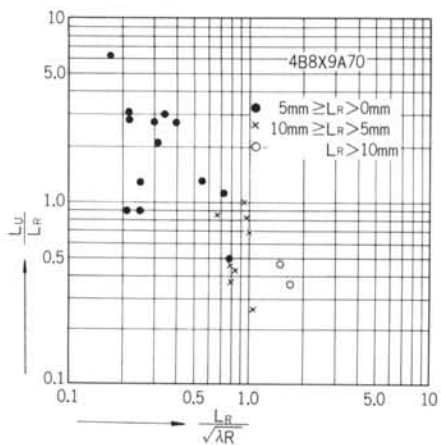


図-7  $D_e=2\text{dB}$  とした  $D_e$  法によった場合の  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  と  $L_U/L_R$  の関係 (1回反射法)

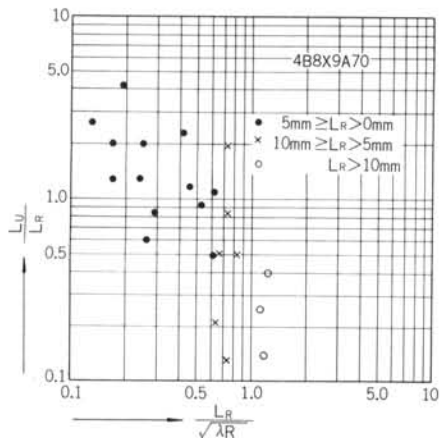


図-8  $D_e=2\text{dB}$  とした  $D_e$  法によった場合の  $L_R/\sqrt{\lambda R}$  と  $L_U/L_R$  の関係 (2回反射法)

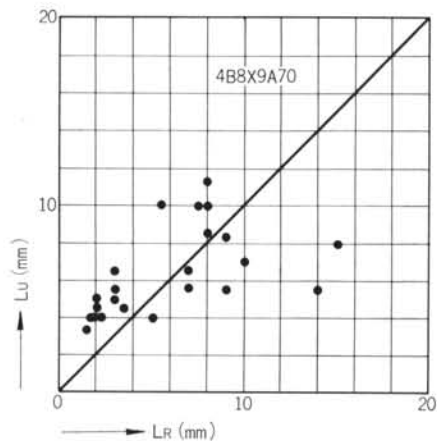


図-9  $D_e=6\text{dB}$  とした  $D_e$  法の場合の  $L_U$  と  $L_R$  の関係 (直射法)

欠陥寸法 推定方法	$D_e$ 値お よび $D_S$ 値(db)	直 射 法			1 回 反 射 法			2 回 反 射 法		
		$\bar{\delta}$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$r$	$\bar{\delta}$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$r$	$\bar{\delta}$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$r$
$D_e$ 法	$D_e=2$	-3.1	3.7	0.27	0	5.0	-0.08	-0.2	6.7	0.16
	$D_e=4$	-0.9	3.1	0.57	2.9	5.4	-0.06	3.9	5.4	0.21
	$D_e=6$	0.4	3.2	0.53	7.4	5.4	0.13	6.4	6.2	0.11
	$D_e=8$	2.2	2.7	0.71	7.6	4.5	-0.01	8.7	4.2	0.31
	$D_e=10$	4.1	2.1	0.81	—	—	—	—	—	—
$D_S$ 法	$D_S=-11$	-0.3	5.0	0.02	-0.5	6.5	0.22	6.0	6.0	0.29
	$D_S=-12$	0.8	3.8	0.56	1.4	6.3	0.06	6.9	4.4	0.61

表-3 誤差の平均 ( $\bar{\delta}$ ), 誤差の標準偏差 ( $\sigma$ ) および  $L_R$  と  $L_U$  の相関係数 ( $r$ )

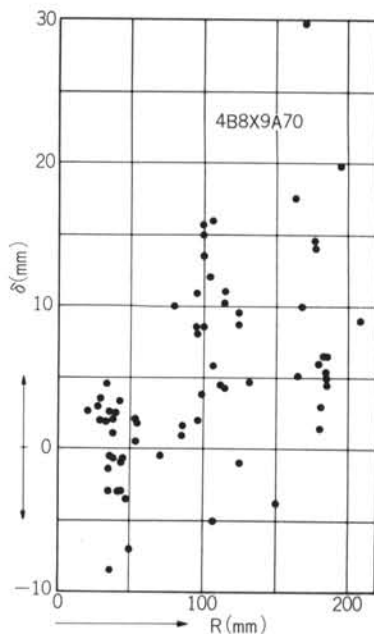


図-10 プロホールの場合に  $D_e=6\text{dB}$  とした  $D_e$  法によつて長さを推定した時の誤差

り、それを1つの欠陥とみなして杓子定規に  $D_e$  法を適用すれば、その群の長さは過小評価されることになる。このような場合にはエコーの総てのピークごとに  $D_e$  法を適用して長さを推定し、隣り合う欠陥の間隔がある程度以下の場合には連続した欠陥とみなすなどの処置を採ればよいが、これを正確に行なうことは実験室的にも煩雑であり実用的でない。ある程度かんと経験によって補うのが良いと思われる。

#### 4.3 $D_S$ 法によるプロホールの長さの推定

$D_S$  法によってプロホールの長さを推定するのに適し

た  $D_S$  値を  $-2\text{ dB}$  から  $-16\text{ dB}$  まで検討した。ビーム路程のいかんにかかわらず最も妥当と思われるのは  $-12\text{ dB}$  である。ただしビーム路程が長くなると誤差が大きくなる。 $D_S = -12\text{ dB}$  としてプロホルの長さを推定した場合の  $L_U$  と  $L_R$  の関係を図-11に示す。

表-3に併記してあるように  $D_e$  法の場合よりも誤差が大きくなる。

#### 4.4 距離振幅特性

超音波探傷試験では欠陥の等級分類または合格判定に  $D_{\text{max}}$  の値を利用しているが、 $D_{\text{max}}$  はビーム路程  $R$  によって変化するため補正を行なっている。この補正を距離振幅校正という。日本では NDI-STB-A2 の  $4\phi \times 4$  のドリルホール距離振幅特性曲線を利用して校正している。

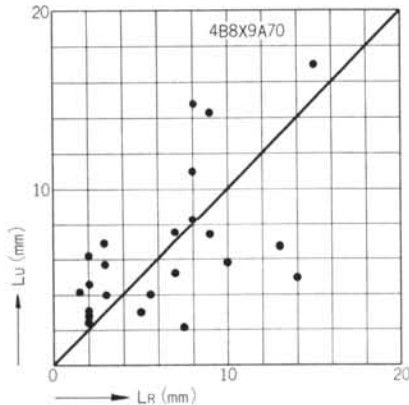


図-11  $D_S = -12\text{ dB}$  とした  $D_e$  法によった場合の  $L_U$  と  $L_R$  の関係

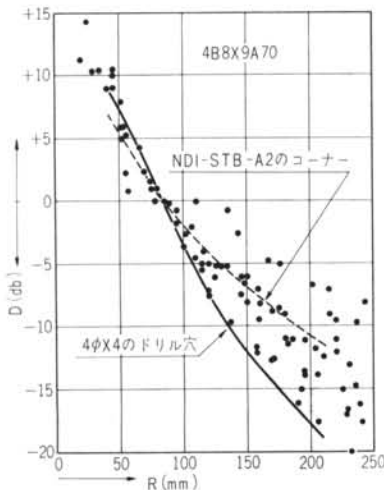


図-12 プロホルの距離振幅特性

図-12は  $4B8 \times 9A70$  の探触子を使用した場合のプロホルの距離振幅特性である。 $R \approx 87\text{ mm}$  で得られたエコー高さを  $0\text{ dB}$  に合わせている。図中の実線は NDI-STB-A2 の  $4\phi \times 4$  のドリルホールの距離振幅特性、点線は同じ NDI-STB-A2 の端面の距離振幅特性である。

$4\phi \times 4$  のドリルホールの特性はプロホルの下限值を示しており、 $R \geq 87\text{ mm}$  の範囲ではプロホルの特性曲線は  $4\phi \times 4$  のドリルホールのそれよりもゆるやかになる。NDI-STB-A2 の端面の特性は1, 2の例外を除けばプロホルの上限値を示しているということもできる。

距離振幅特性は、探触子の指向角と欠陥の寸法、形状、方向に左右され、指向角が広いほど、欠陥の寸法が大きほど特性曲線はゆるやかになる。小さなプロホル、単独のプロホルなどの距離振幅特性は  $4\phi \times 4$  のドリルホールの特性と近似するが、密集したプロホルは大きな欠陥の距離振幅特性に近似するというのが本実験の結果である。

#### 4.5 振子走査時の減衰特性

欠陥を中心にして探触子を振子のように移動させる走査を振子走査と呼んでいる。振子走査時のエコー高さの変化は球状欠陥と平面状欠陥とは明らかに異なるはずである。完全な球の場合には振子走査を行なってもエコー高さは変化しないはずであるが、一般に球状と思われ

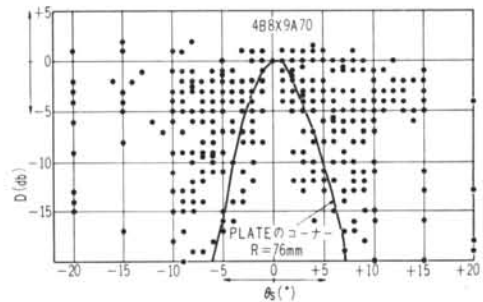


図-13 プロホルの振子走査時の減衰特性

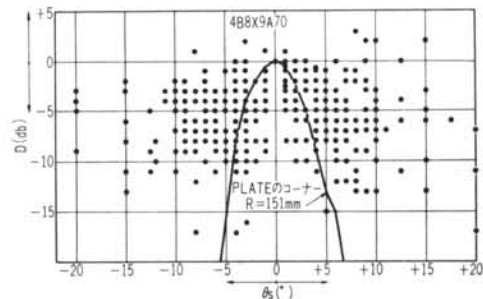


図-14 プロホルの振子走査時の減衰特性

ているプロホールでも自然欠陥の場合には図—13, 図—14に示すようになり減衰する。しかし振り角度  $\theta_s$  がある程度以上の場合の減衰量は図中の実線で示した板の端面(平面状欠陥)と明らかに異なっている。

振子走査によって欠陥種別の判定ができるか否かは他の欠陥のデータと合わせて検討する予定である。

## § 5. あとがき

プロホールの与えるエコー高さは比較的低く、現在建築の溶接部に適用している検出感度ではプロホールはわずかしか検出できないことが判明した。しかしながら静的荷重に対してはプロホールは余り影響しないので<sup>5)</sup>、一般には現行の検出感度で良いと考える。

NDI-STB-A2 で感度設定する場合には屈折角の影響を考慮する必要がある。

本実験ではプロホールの長さを推定する場合には、ビーム路程を出来るだけ短くして、 $D_e=6\text{db}$  とする  $D_e$  法によって推定するのが良いと言う結論に達したが、すでに文献2において推測し、他の報告<sup>6)</sup> が示しているように、大きな自然欠陥の長さを  $D_e$  法によって推定する場合には  $D_e$  値を  $6\text{db}$  以上とする必要がある。

$D_e$  値を  $6\text{db}$  以上とする  $D_e$  法によって欠陥の長さを推定する場合には、微小欠陥の過大評価を欠陥の等級分類や合否判定において考慮する必要がある。

表—3に示しているように、標準偏差  $\sigma$  はビーム路程

が短い場合、 $D_e=10\text{db}$  とする  $D_e$  法によって長さを推定した場合が最も小さい。すなわち  $L_R=L_U-\beta_1\cdots(3)$  の関係式で欠陥の長さを推定できることを示している。

また  $L_R$  と  $L_U$  の相関係数  $r$  も  $D_e=6\text{db}$  とするよりも  $D_e=10\text{db}$  とする方が高い値を示している。すなわち  $L_R=\alpha L_U-\beta_2\cdots(4)$  の関係式で欠陥の長さを推定できることを示している。これらは  $D_e$  値を大きくすれば長さの過小評価を防ぐことができ、 $D_e$  値を大きくしたために生ずる長さの過大評価を係数  $\beta$  で補正すれば良いということを示している。

$D_e$  法は欠陥の各部分の音波の反射率が一定の場合に適用できるが、4.2で述べたように長い自然欠陥は一般に部分によって音波の反射率が異なる場合が多い。このような場合には  $D_e$  法においては  $D_e$  値を大きくとり、 $D_s$  法の場合には  $D_s$  値を小さくとり長さを推定し、過大評価を係数  $\beta$  で補正するのが良いと考える。

B S3923 Part 1<sup>7)</sup> に解説されている effective beam width の考え方はこのような概念と推察される。

$4\phi\times 4$  のドリルホールによる距離振幅校正は自然欠陥の中の最小のものを対称としていることとなり、自然欠陥のエコー高さの過大評価につながる。どのような標準欠陥によって距離振幅校正曲線を描くべきかはさらに検討する必要がある。

$D_{\max}$  によって欠陥の寸法を推定する方法、例えば AVG DIAGRAMM<sup>8)</sup> の手法はプロホールに適用することはできない。

## <参考文献>

- 1) “藤盛紀明：鋼溶接部の超音波斜角探傷試験に関する研究(その1 表面に開口した長いスリット状傷の深さの推定方法の検討)”，建築学会論文報告集第173号 昭和45年7月
- 2) 藤盛紀明：“鋼溶接部の超音波斜角探傷試験に関する研究(その2  $D_e$  法による欠陥長さの推定に関する考察)”，建築学会論文報告集第177号 昭和45年11月
- 3) 日本学術振興会，製鋼第19委員会編：“超音波探傷法” 日刊工業新聞
- 4) NDIS 2404-70：“鋼構造物溶接部の超音波斜角探傷試験方法および等級分類” 日本非破壊検査協会
- 5) J. D. Harrison：“The Basis for a Proposed Acceptance Standard for Weld Defects, Part 1: Porosity”，IIW-V 480-71/OE
- 6) 加藤勉他：“溶接部の欠陥および強度と非破壊検査像の対応性に関する研究(I) 超音波探傷による溶接欠陥の寸法評価” 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 昭和45年9月<構造系> pp. 963~964
- 7) “BS 3923: Method for Ultrasonic Examination of Welds, Part 1, 1968, Appendix B”
- 8) 例えば “NDI 超音波検査技術講習会(1971年度) 講義テキスト” 日本非破壊検査協会 pp. 61~68