
溶接欠陥の超音波斜角探傷による判定方法

Ultra Sonic Testing for Defects in Weldings

木村 勝美(Katsumi Kimura) 安部 敬(Takashi Abe) 森 達哉(Tatsuya Mori)
山口 脩(Osamu Yamaguchi) 森 裕(Hiroshi Mori)

要旨：

各種板厚の突合わせ溶接試験片に実在欠陥に近い人工欠陥（方向性，非方向性）を内在させ，これを各種条件で超音波探傷して，欠陥実長と超音波波形からの推定寸法の関係を求めた。欠陥存在探知についてはX線よりすぐれていることが立証され，また，欠陥長さについて，指示長，最大エコー高さ，ビーム路程などを用いた，かなり正確な推定式を求めることができた。

Synopsis：

Substituting for X-ray examination, the ultrasonic inspection has grown up to be a common and favourable method for the inspection of weld bead in recent few years, but in fact the method still contains some problems not clearly solved. In this study, these problems have been examined to find out optimum testing conditions and acceptance standards. A number of testpieces containing various kinds of defects, not of usual drill hole type but of natural type such as found in actual weld bead, have been prepared by butt welding techniques. By X-ray examination, ultrasonic testing and final macro-etched test of sliced pieces, the correlation of actual length of defect and estimated length presupposed from the echo in ultrasonic testing have been examined. It has been concluded that as far as the ability of detecting the existence of defect is concerned, the ultrasonic testing is superior to the X-ray examination, and that the actual length of defect can be estimated in high accuracy by using scanned length showing flaw echo.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

溶接欠陥の超音波斜角探傷による判定方法

Ultra Sonic Testing for Defects in Weldings

木 村 勝 美*

Katsumi Kimura

安 部 敬**

Takashi Abe

森 達 哉***

Tatsuya Mori

山 口 脩****

Osamu Yamaguchi

森 裕*****

Hiroshi Mori

Synopsis:

Substituting for X-ray examination, the ultrasonic inspection has grown up to be a common and favourable method for the inspection of weld bead in recent few years, but in fact the method still contains some problems not clearly solved.

In this study, these problems have been examined to find out optimum testing conditions and acceptance standards. A number of testpieces containing various kinds of defects, not of usual drill hole type but of natural type such as found in actual weld bead, have been prepared by butt welding techniques. By X-ray examination, ultrasonic testing and final macro-etched test of sliced pieces, the correlation of actual length of defect and estimated length presupposed from the echo in ultrasonic testing have been examined.

It has been concluded that as far as the ability of detecting the existence of defect is concerned, the ultrasonic testing is superior to the X-ray examination, and that the actual length of defect can be estimated in high accuracy by using scanned length showing flaw echo.

1. 緒 言

溶接部の検査は従来主としてX線透過試験によって行なわれてきたが、これは放射線の安全管理を要すること、重い装置を運搬しなければならないこと、現像に時間を要することなどのほか、裏側にフィルムを入れることができない箇所がふえ

たり、板厚が非常に厚くなって、実用できるX線装置がないなどの理由で、安全、迅速、実施容易な超音波探傷試験に移行しつつあるのが現状である。

そして、その試験方法、判定基準についても、ASME、米海軍規格などオーソライズされたものが制定され、日本でもようやく日本非破壊検査協会(NDI)の手でJNDIS-2404-70、鋼構造

* 金属材料技術研究所非破壊検査研究室長
*** 川崎重工業㈱神戸造船事業部造船検査課課長
***** 本社オーダーセンター鋼材技術部大阪鋼材技術室課長

** 川崎重工業㈱開発本部物流システム開発班班長
**** 川崎重工業㈱鉄橋事業部加古川工場検査課課長

物の超音波斜角探傷試験方法および等級分類」という基準が制定された。

もちろん、これら基準の制定のためには、それ相当の基礎実験、討論、実績の積み重ねがあったことは当然で、その妥当性は信頼しなければならないが、それでもなお、欠陥実寸と、超音波探傷試験結果による推定寸法の間には相当なバラツキがあることは否めない。

本実験研究は前記 NDIS 制定以前に、溶接部の超音波斜角探傷試験による欠陥判定方法の解明と判定基準研究のため開始したもので、造船、鉄構などに用いる各種厚さの厚鋼板の溶接接手に、実在欠陥に近い形状の種々の人工欠陥を内在させた供試材を作製し、X線透過試験および超音波探傷試験を行なった後、欠陥断面を切断検査して、実在欠陥の種類および形状寸法とX線フィルム上の欠陥像および超音波探傷結果との関係を解明しようとしたものである。

溶接接手としては、突合せ接手および裏当金付突合せ接手と、隅肉接手とについて実験を行なったが、本報では前二者のみを報告し、隅肉については後日続報として発表の予定である。

2. 実 験

2.1 供 試 材

表1に示すように、裏当金なしの突合せ溶接では板厚25~75mmの鋼材に人工欠陥を入れた供試材合計42個、厚さ9mmの裏当金付突合せ溶接では板厚25mmおよび35mmの鋼材に人工欠陥を入れた供試材合計14個を製作した。

欠陥は垂直方向、斜め30°方向、斜め45°方向および水平方向の方向性欠陥と、スラグ、ブローホール、ワレの非方向性欠陥の7種類となるよう

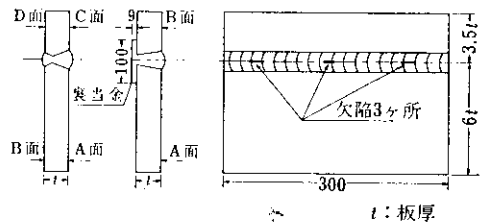


図1 供試材の寸法と欠陥位置

表1 供機材の種類と符号

欠陥記号	欠陥の種類	接手の種類 板厚(mm)	裏当金なし突合せ溶接						裏当金付突合せ溶接	
			25	35	45	55	65	75	25	35
1	垂直方向欠陥		1 A	1 B	1 C	1 D	1 E	1 F	1 G	1 H
2	斜方向欠陥(約30°)		2 A	2 B	2 C	2 D	2 E	2 F	2 G	2 H
3	斜方向欠陥(約45°)		3 A	3 B	3 C	3 D	3 E	3 F	3 G	3 H
4	水平方向欠陥		4 A	4 B	4 C	4 D	4 E	4 F	4 G	4 H
5	ス ラ グ		5 A	5 B	5 C	5 D	5 E	5 F	5 G	5 H
6	ブ ロ ー ホ ール		6 A	6 B	6 C	6 D	6 E	6 F	6 G	6 H
7	ワ レ		7 A	7 B	7 C	7 D	7 E	7 F	7 G	7 H
製 作 個 数			各符号1個ずつ、合計56個							
鋼 材			SM50A							
溶 接 棒			KS-86							

注 1) 符号の第1桁数字は欠陥の種類を、第2桁アルファベットは板厚を示す。

2) 斜め方向の欠陥の角度は探傷面に垂直な方向を0°とし、図1の左側の端面から見て時計の針進行方向に計測

に計画した。しかし実際にはかなり期待とは異なった欠陥ができ、この種人工欠陥作製のむずかしさが痛感された。供試材の寸法と欠陥位置を図1に示す。

2.2 実験方法

各供試材について、まずX線透過試験により欠陥の位置と大きさを確かめ、次に斜角超音波探傷を行ない、左右走査および前後走査のそれぞれについて探触子の走査距離を横軸、エコー高さを縦軸とする走査図形を記録した後、供試材を欠陥部分でスライス切断し、欠陥の断面形状を計測記録した。

各実験条件の詳細を以下に示す。

(1) X線透過試験

フィルム 板厚 25, 35, 45 mm 供試材

.....富士 #100

板厚 55, 65, 75 mm 供試材

.....富士 #400

増感紙 鉛箔または金属蛍光 SMP 308

濃度 1.8~2.0

(2) 超音波斜角探傷試験

探傷器 ブランソン社ソノレイ301型

増幅直線性の測定結果の一例を図2に示す。

約10%のリジェクションがかかっており、0レベルは80%を基準にして-20 dBである。

探触子

裏当金なしと裏当金付では実験の時期が異なったため、別個の探触子を使用した。

周波数 2.25 MHz

振動子寸法 $\frac{1}{2}$ " $\times$ 1"

屈折角

裏当金なしのとき 69°, 44°

裏当金付のとき 68°, 44°

探傷面 グライNDER仕上の状態

接触媒質 マシン油

探傷感度

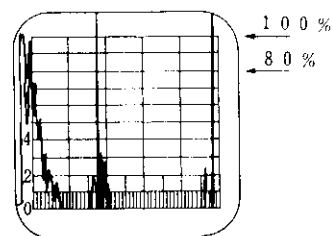
裏当金なしは NDIS 制定前に実験開始し、

一方、裏当金付きは NDIS 制定後の実験であるので、両者で感度設定法が異なる。

(a) 裏当金なしの場合

米海軍型 NAVSHIPS (1966) ドリル横穴付対比

日盛板と探傷図形



増幅直線性

屈折角69° 深さ35mmのドリル横穴のエコー高さを80%に調整、これを0 dBとした。(ビーム路程-98mm)

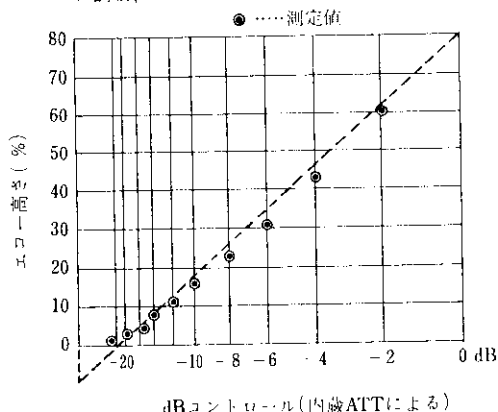


図2 ソノレイ301型探傷器の日盛板探傷図形および増幅直線図

試験片の1.2φドリル穴によって感度調整した。

直射法するとき……1tに相当する深さの1.2φドリル穴からの最大エコー高さを80%に設定(t = 供試材板厚)
1回反射のとき……2tに相当する深さの穴を用いて上に従う。

2回反射のとき……3tに相当する深さの穴を用いて上に従う。

ただし、板厚 55, 65, 75 mm 供試材については、欠陥エコーの最大高さが80~100%となるよう感度を増減し、上記基準探傷感度との差を記録した。対比標準によるこの感度設定と、裏当金付の場合のように NDIS-2404-70 で定められた NDI-STB-A2による感度との関係は図3に示した。

(b) 裏当金付の場合

NDIS-2404-70にしたがい、NDI-STB-A2の4φ×4mmの人工欠陥をブラウン管上50%の高さになるよう設定した。

時間軸の調整は、日盛板の横軸の最小日盛が板

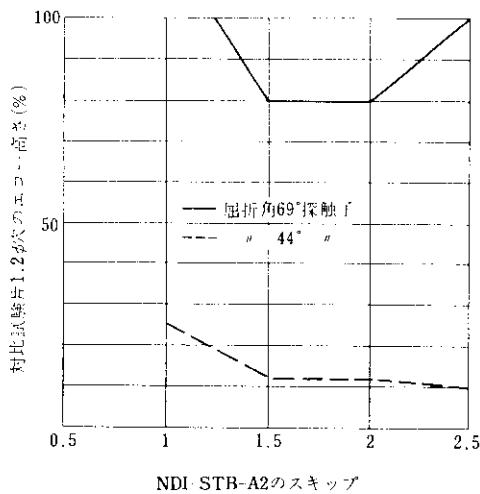


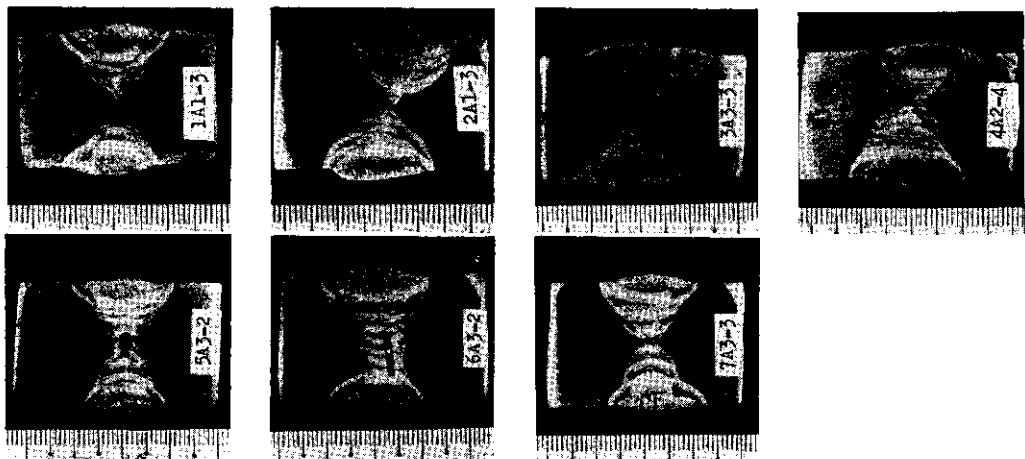
図3 NDI-STB-A2, $4\phi \times 4$ 穴のエコー高さを50%にしたときの対比試験片の1.2 ϕ 穴のエコー高さ(同一ビーム路程にて)

厚の1mmまたは2mmに相当するようにし、目盛板から欠陥の深さが直読できるように調整した。

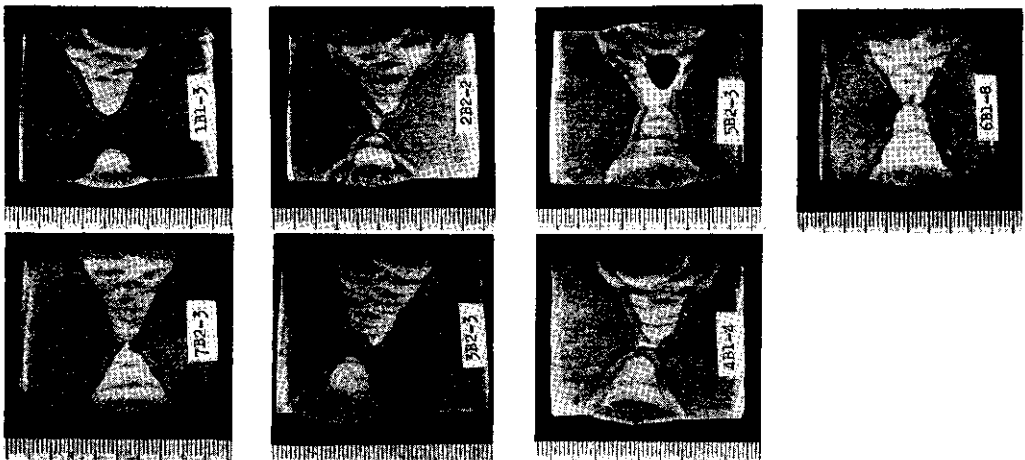
探傷法は各供試材につき、斜角一探触子法により、溶接ビードと端面の距離が長い側(6 t 長さの面)で直射法(DS)および1回反射法(1B)または特定の場合は2回反射法(2B)で最大エコーをもとめ、各々左右走査、前後走査を行なって欠陥エコー高さの変化をもとめ、走査図形を作成した。裏当金付きの場合は定波高法を用い、基準感度との差を記録する方法をとった。

(3) 断面検査

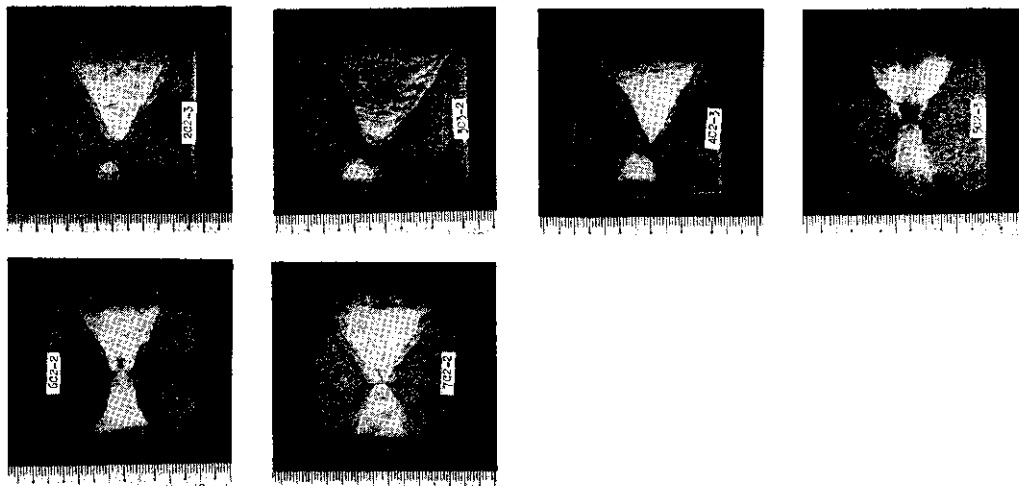
各供試材の各欠陥位置において溶接線に直角方向に3~5mmピッチでスライス切断して、X線透過写真を参考にして欠陥の実長を推定するとともに、欠陥の位置、寸法および形状を計測し写真記録した。代表的な欠陥断面を写真1, 2に示す。



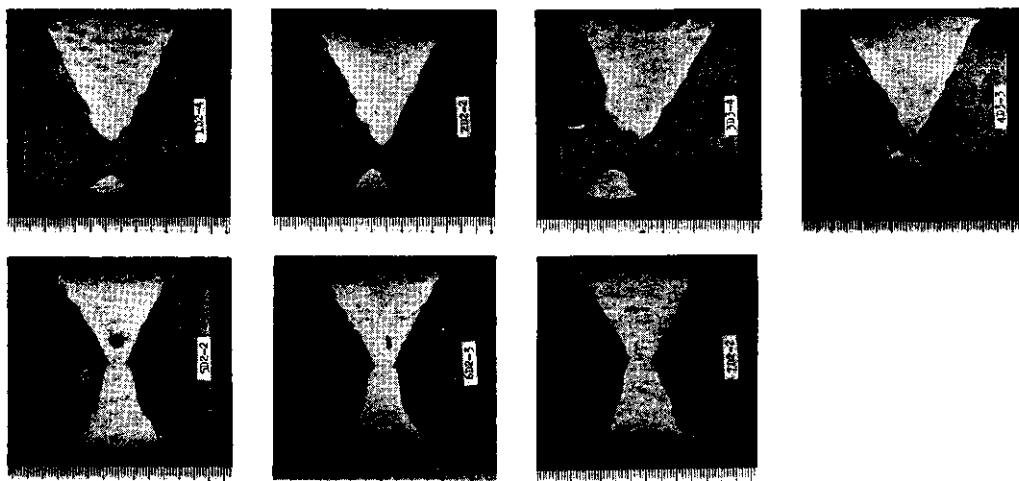
(a) 板厚 25 mm



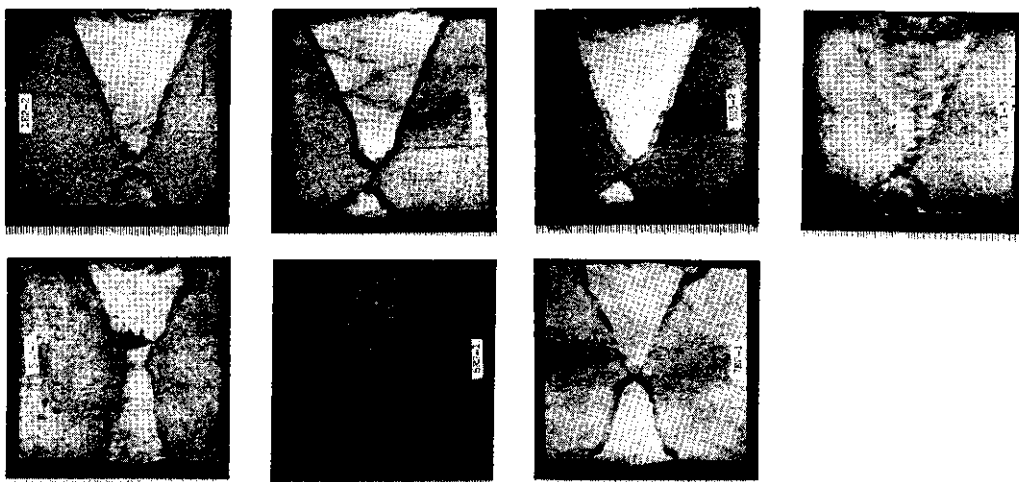
(b) 板厚 35 mm



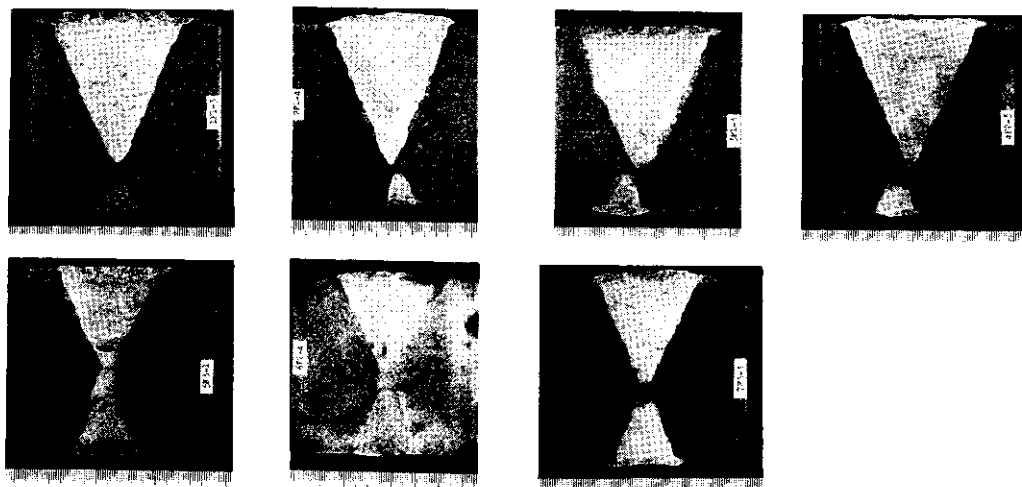
(c) 板厚 45 mm



(d) 板厚 55 mm

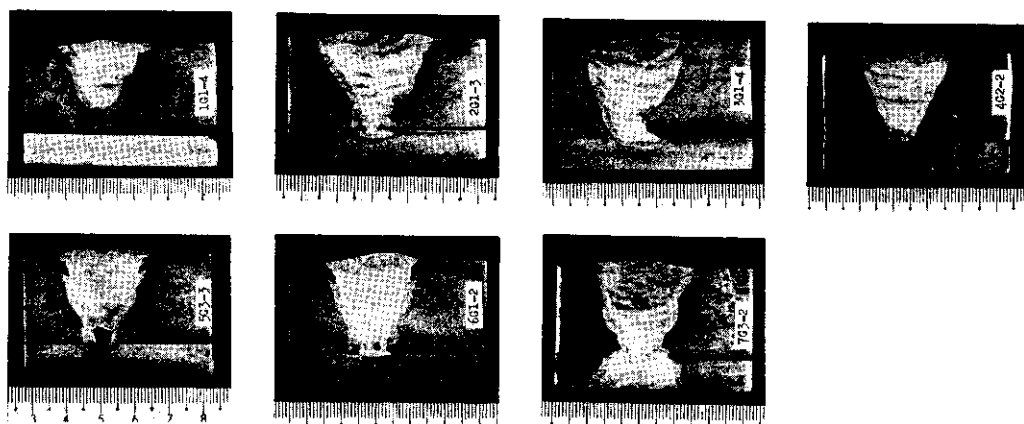


(e) 板厚 65 mm

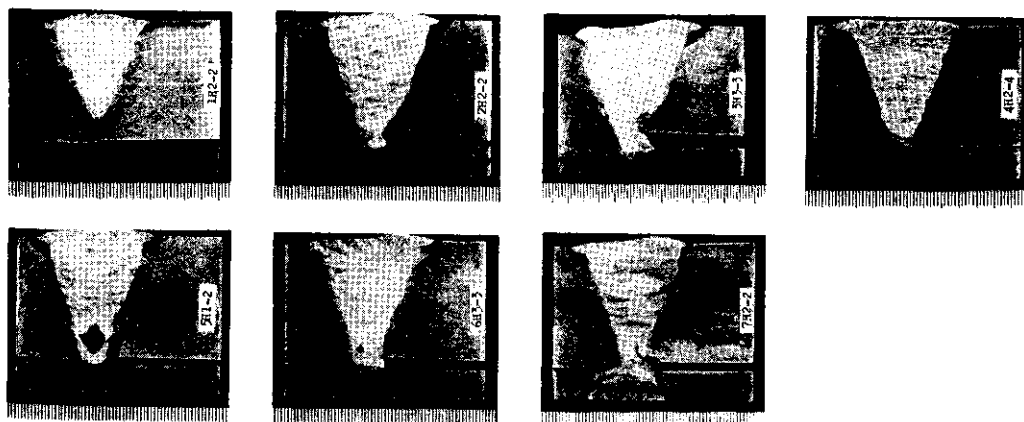


(f) 板厚 75 mm

写真 1 裏当金なし突合せ溶接継手供試材の代表的な断面



(a) 板厚 25 mm



(b) 板厚 35 mm

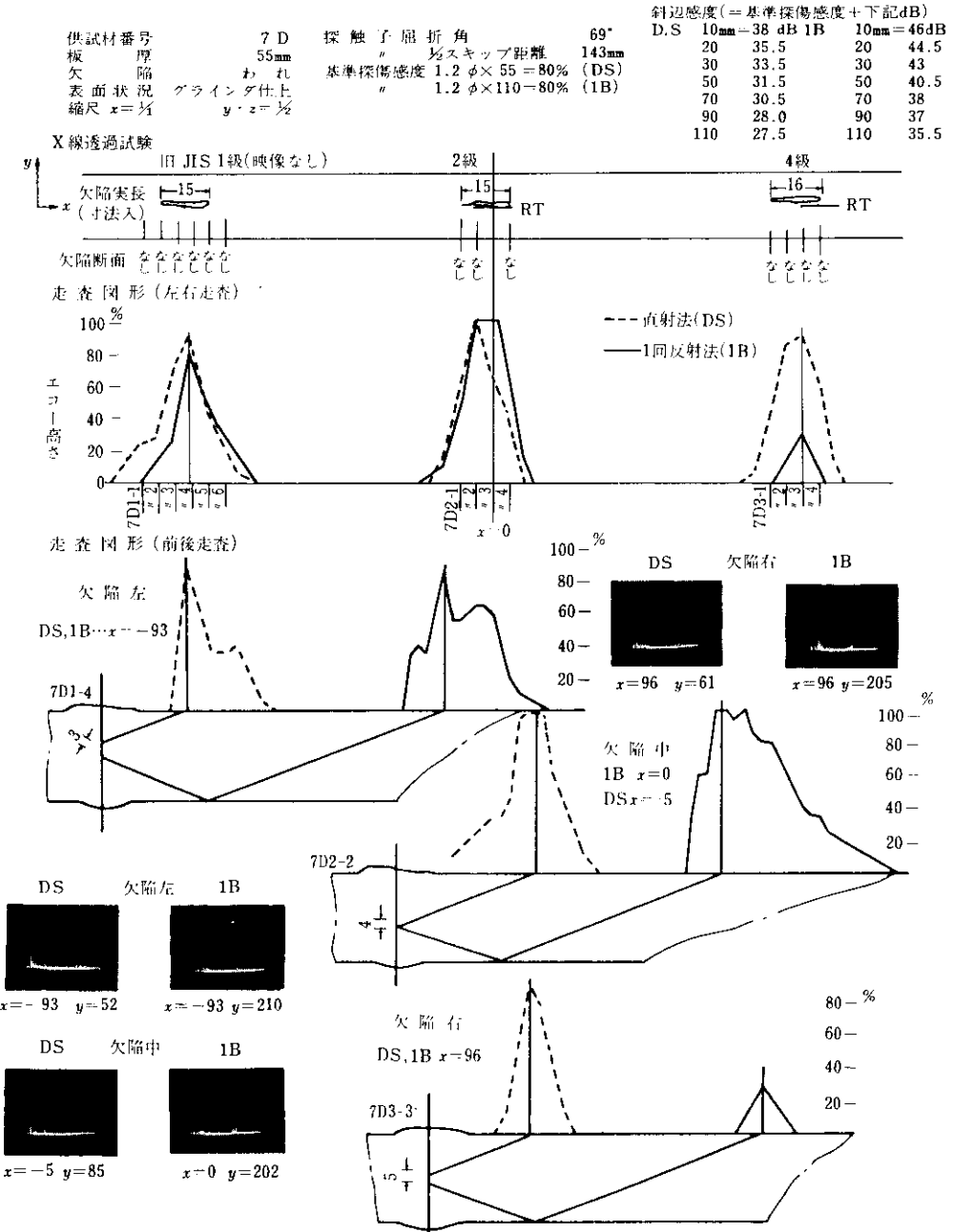
写真 2 裏当金付突合せ溶接継手供試材の代表的な断面

2.3 データの記録

各供試材のX線透過写真のスケッチ、超音波探傷試験結果および断面検査により得られた欠陥の位置、寸法および形状をそれぞれ1枚のデータシ

ートにまとめた。その一例を図4に示す。

走査図形において欠陥のエコー高さが100%をこえるものはすべて100%として表わした。供試材の超音波斜角探傷に先立ち、超音波斜角ビームに直角な斜辺を有するテストブロックを用いてこ



の斜辺の反射エコーの大きさを同一ビーム路程で求め、基準探傷感度よりの感度増加(dB)としてこの値をあわせて記録し、エコー高さの「傷の反射率」による評価の参考資料とした。

なお、X線透過写真の評価は JIS-Z-2341「放射線透過写真の等級分類方法」(旧 JIS)に よった。

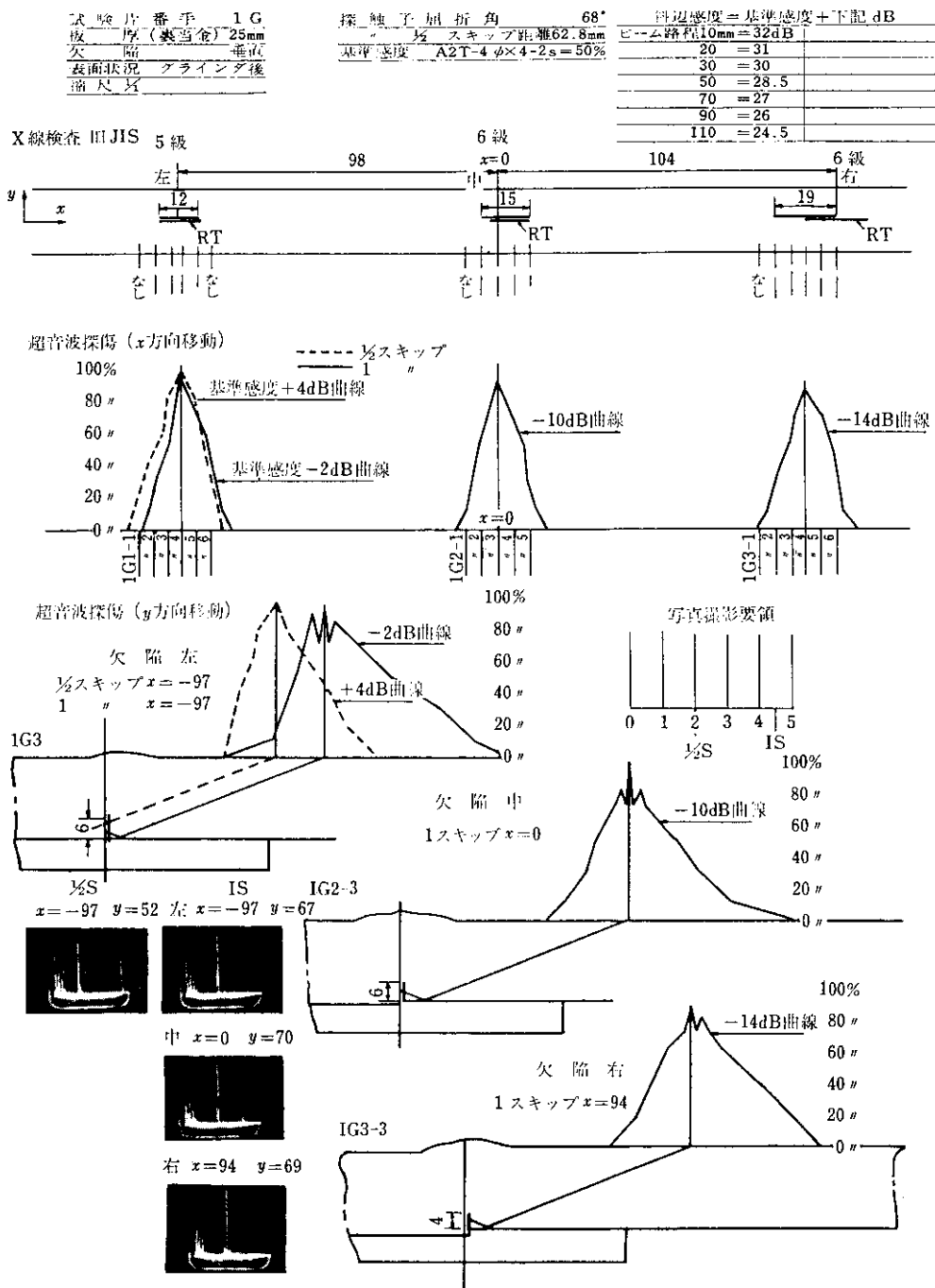


図 4-2 裏当金付突合溶接欠陥の斜角超音波探傷データシートの一例

3. 実験結果の解析と考察

最初にも述べたように、裏当金なしの実験と裏当金付の実験では時期的に差があり、最初行なった裏当金なしの実験でいろいろなことがわかったので、裏当金付の実験ではそれらの事実をもとに、探傷方法やデータのまとめ方を若干変えているので、ここでは別々に述べることにする。

3.1 裏当金なしの実験結果の解析と考察

3.1.1 溶接線方向の欠陥実長と X 線評価長との関係線

X線透過試験による溶接部の合否の判定は主と

してX線フィルム上の欠陥像の大きさをもとに行なわれているが、その精度を確認するため、溶接線方向の欠陥実長（断面検査の結果による）とフィルム上の欠陥像の長さとの差を求め、そのばらつきを表2に示した。この差の約70%が±2mm以内におさまっており、X線評価長はかなり欠陥実長に近似していることがわかる。

しかしながら欠陥によっては実長よりも著しく短くフィルムに写っている例があり、また欠陥が実在するのにフィルム上にあらわれなかった例が約10%もあった。すなわち、X線透過試験では欠陥実長よりも、平均的に短い評価長さで溶接部の合否を判定していること、およびしばしば欠陥検出ができずにいることが再確認された。

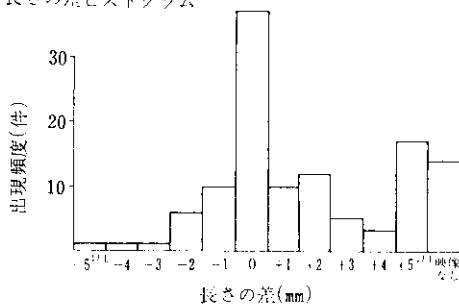
表 2 欠陥実長と X 線フィルム上の欠陥長の差の分布

欠陥の種類	長 さ の 差 (mm)											映 像 な し	計
	-5以上	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5以上		
垂直方向欠陥	—	—	—	2	1	7	—	4	—	—	1	—	15
斜方向欠陥 (約30°)	—	—	1	1	2	5	1	—	1	1	2	4	18
斜方向欠陥 (約45°)	1	—	—	—	—	3	3	2	3	—	3	2	17
水平方向欠陥	—	1	—	1	1	3	3	1	—	2	5	1	18
ス ラ グ	—	—	—	2	4	3	2	4	1	—	—	1	17
ブローホール	—	—	—	—	—	14	1	—	—	—	—	—	15
わ れ	—	—	—	—	2	2	—	1	—	—	6	6	17
合 計	1	1	1	6	10	37	10	12	5	3	17	14	117件

注 1) 長さの差 = (溶接線方向の欠陥実長) - (X線フィルム上の欠陥長)

2) 映像なし……欠陥が実在するのにフィルム上に欠陥像が無いもの

長さの差ヒストグラム



3.1.2 屈折角、ビーム入射方向と欠陥探知能力

定感度の場合に欠陥から得られた最大エコー高さ h_m が探知能力をあらわすと考えた場合に、欠陥の種類ごとに屈折角 69° と 44° の場合について能力順位をつけると表 3 のような結果になった。

表 3 斜角探傷の探知能力順位

供 試 材	探知能力順位		
	69° 直射法	69° 1 回 反射法	44° 1 回 反射法
垂 直 方 向 欠 陥	2	1	3
斜 方 向 欠 陥 (約 30°)	2	1	3
斜 方 向 欠 陥 (約 45°)	3	1	2
水 平 方 向 欠 陥	3	1	2
ス ラ グ	2	3	1
ブ ロ ー ホ ール	1	3	2
わ れ	1	3	2

44° 直射法 および 2 回反射法では欠陥を探知できない場合の方が多かった。表 3 からつぎのことがいえる。

(1) 屈折角 69° の直射法と 1 回反射法を併用すれば、屈折角 44° を用いなくても板厚 25~75 mm の欠陥探知には十分である。

(2) 垂直から時計針まわりに水平方向までの方向性欠陥に対しては 69° 1 スキップ探傷が、スラグ、ブローホール、ワレの非方向性欠陥に対しては 69° 直射法 (0.5 スキップ法) が効果的である。

(3) 屈折角 69° の場合に、直射法か 1 回反射法のいずれかで欠陥を 100% 捕えており、欠陥の存在探知という点では超音波探傷の方が X 線透過試験よりもすぐれている。

3.1.3 左右走査について

(1) 溶接線方向の欠陥実長と超音波指示長の関係

(i) 基本的な考え方

一般に斜角探触子を欠陥に平行に移動して探傷する場合、水平方向の超音波ビームはほぼ平行ビームと見なしうるので、超音波指示長と欠陥実長との関係は理論的に次式であらわすことができ

る。

$$X_0 = B_H + L_x \quad \text{.....(1)}$$

ここに

X_0 : 波高ゼロレベルでの超音波指示長

L_x : 欠陥実長

B_H : 探触子の水平ビーム幅 (= 振動子横幅)

図 5 にこの関係を示す。

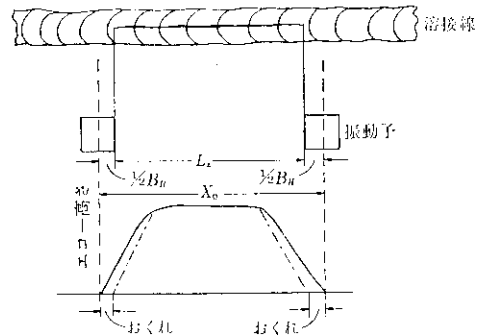


図 5 欠陥実長と左右走査図形

実際には欠陥の形状により、探触子を欠陥に近づけると、 $B_H/2$ にさしかかったところからエコーがあらわれはじめるのではなく、多少のおくれが生じるから、(1) 式は

$$X_0 = B_H' + L_x \quad \text{.....(2)}$$

と修正しなければならない。

(ii) 実験結果の解析

(1) 式によれば超音波指示長は X_0 。すなわちゼロレベルにおける値で考えなければならないはずであるが、従来、実際的には、超音波探傷で欠陥実長を推定するのにゼロレベル以外にいろいろなレベルの値が使われている。たとえば、NDIS-2404-70 などでは

最大エコー高さの $1/2$ における超音波指示長

$$\equiv \text{欠陥実長} \quad \text{.....(3)}$$

米海軍や防衛庁の基準では

最大エコー高さの 20% における超音波指示長

$$\equiv \text{欠陥実長} \quad \text{.....(4)}$$

というように X_{50} , X_{20} が用いられる。

これら X_0 , X_{20} , X_{50} と L_x の関係を実験結果からプロットしたのが、図 6, 図 7 である。

図 6 板厚 25~55 mm の供試材の欠陥実長—超

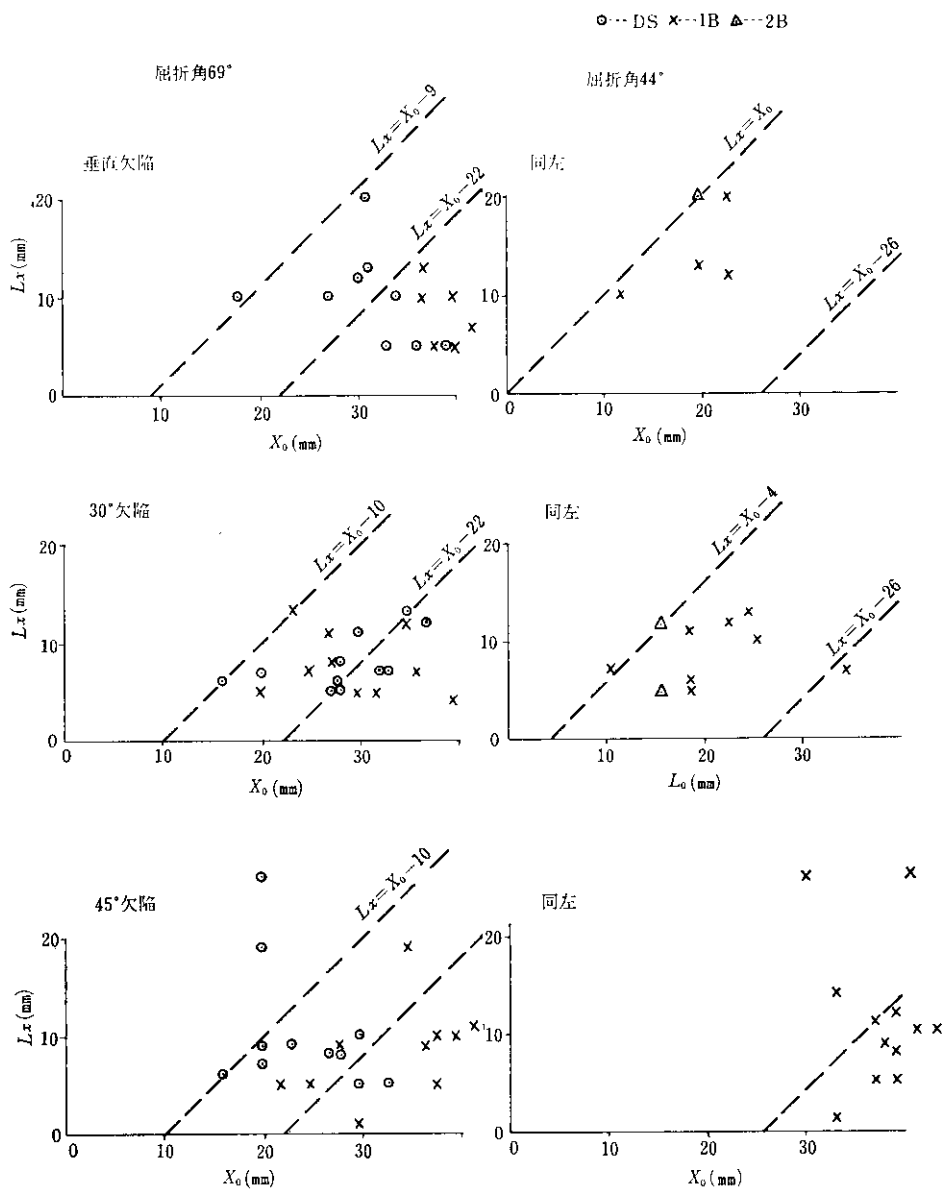


図 6-1 A～Dシリーズ超音波指示長—欠陥実長

 X_0波高ゼロレベル計測

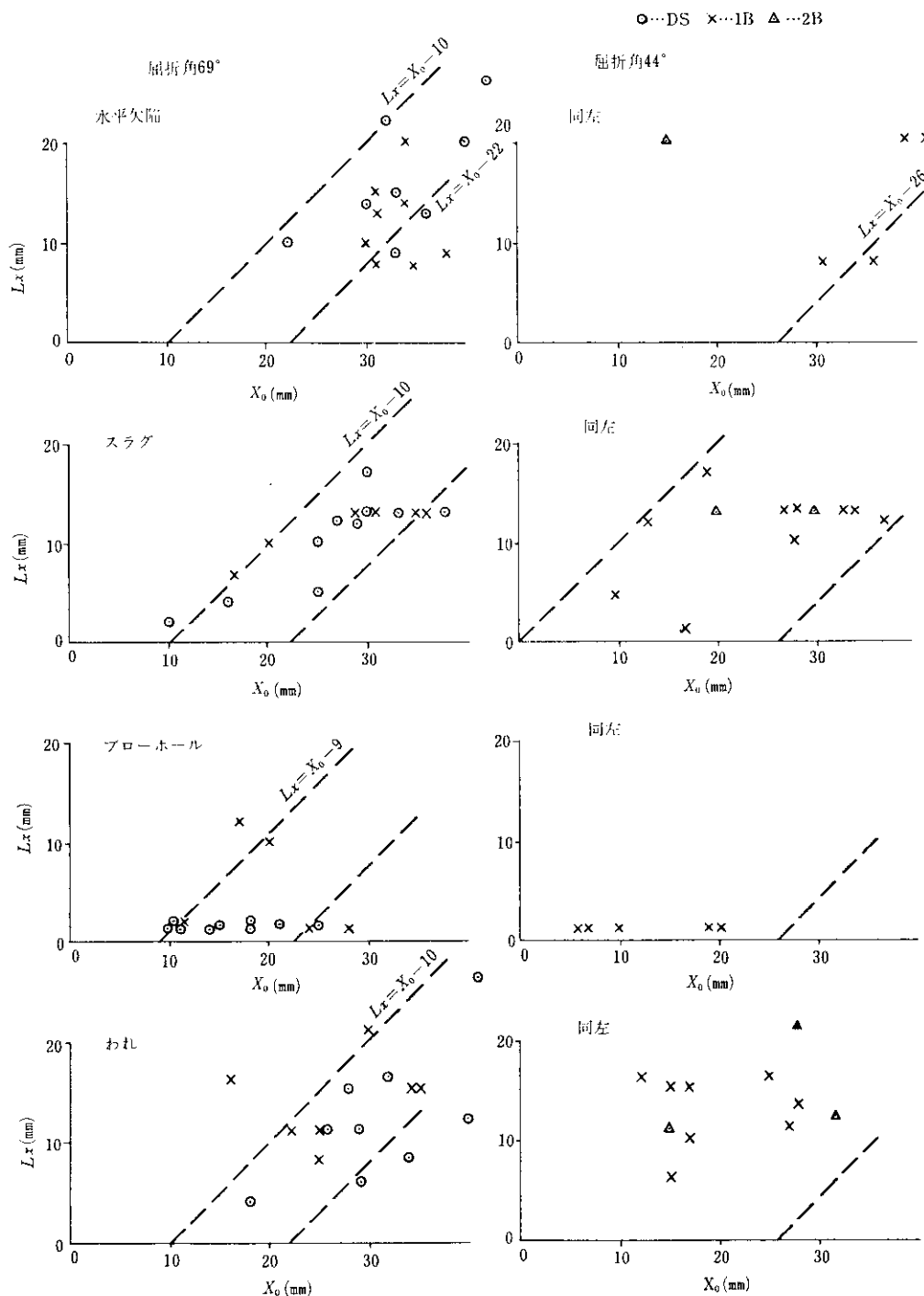


図 6-2 A～Dシリーズ超音波指示長—欠陥実長(続)

 X_0 ……波高ゼロレベルで計測

○...DS ×...1B △...2B

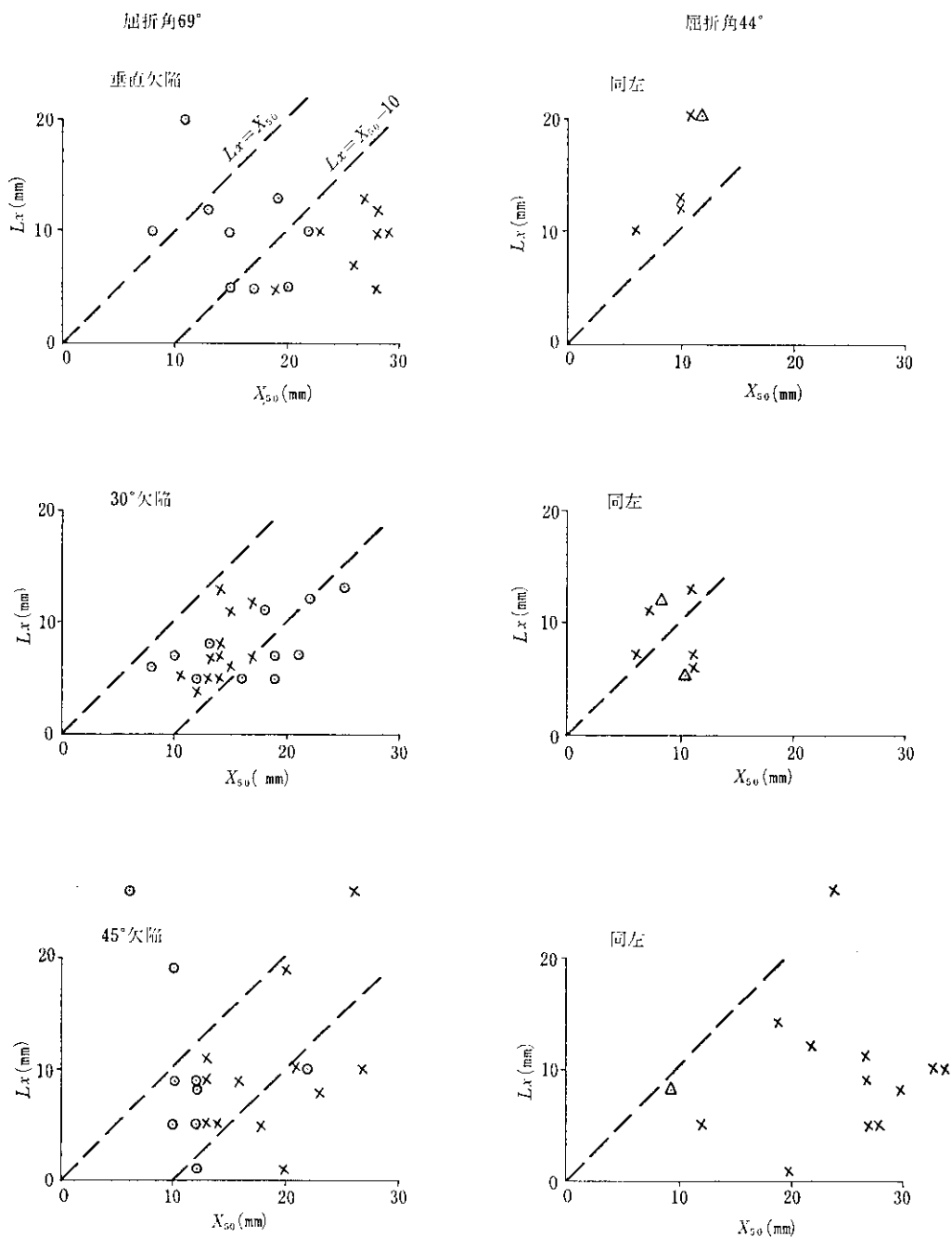
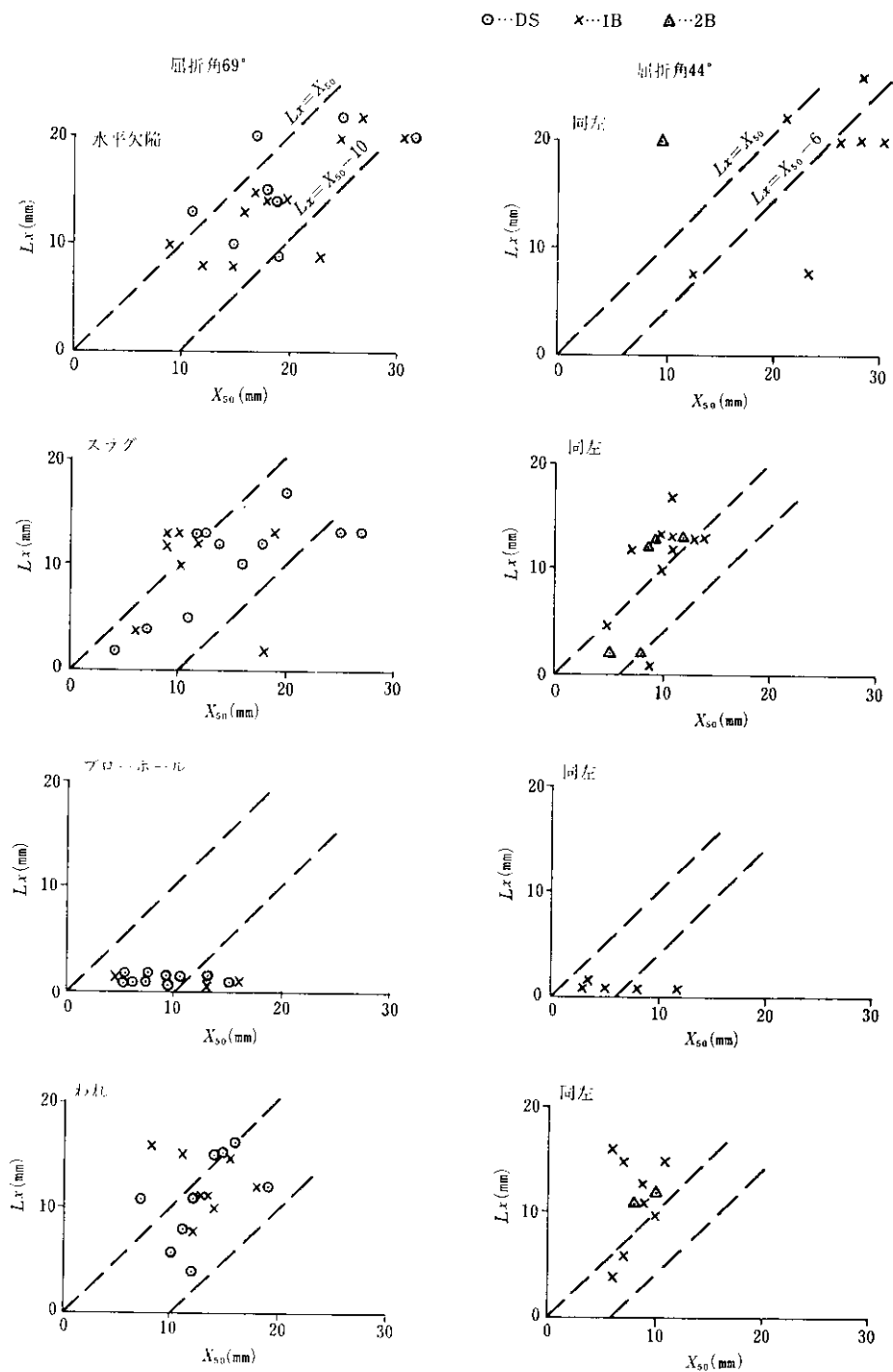


図 6-3 A~Dシリーズ超音波指示長・欠陥実長(続)

 $X_{50} \cdots \frac{1}{2} - h_m$ レベルで計測



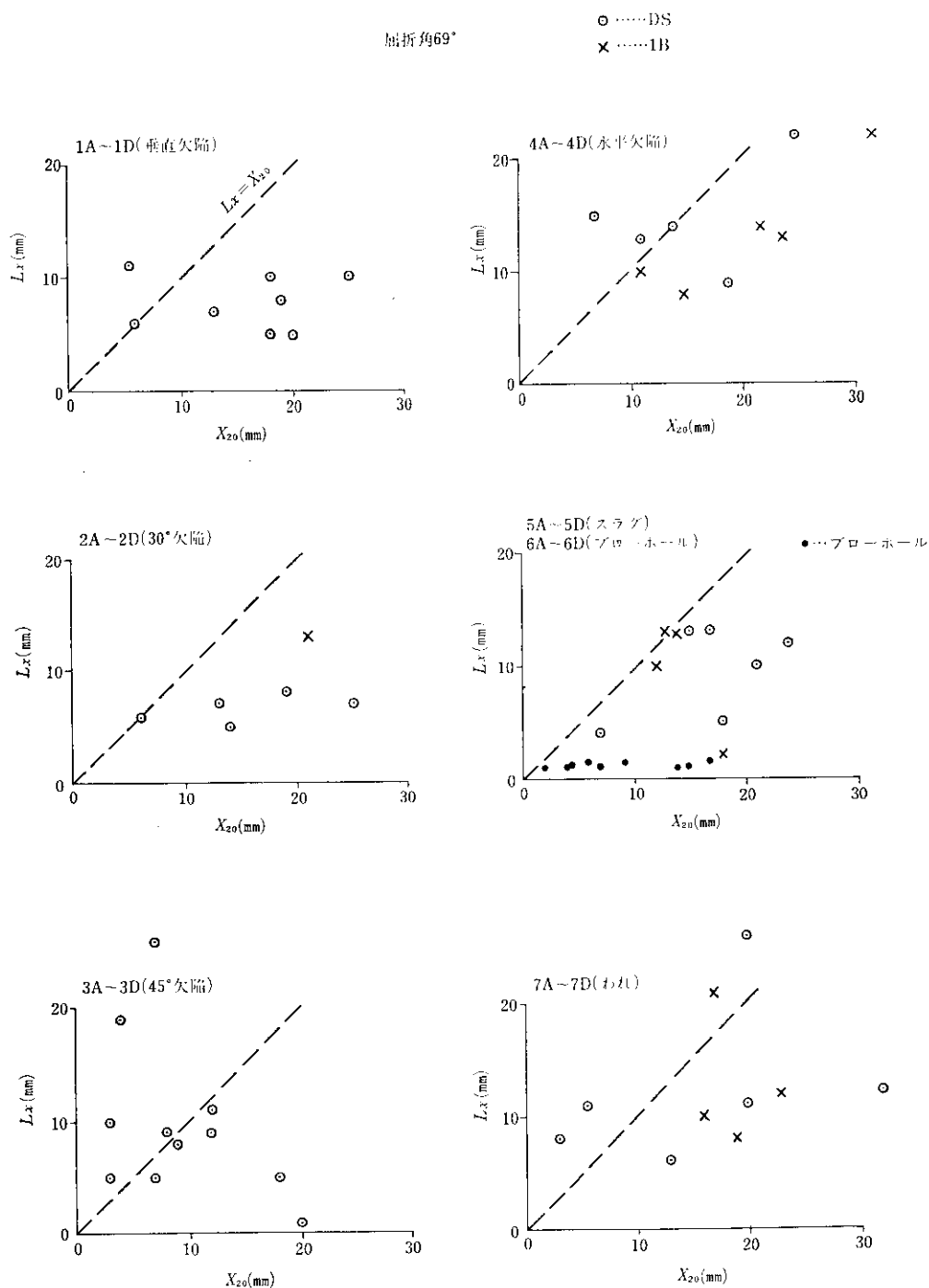


図 6-5 A~Dシリーズ超音波指示長(波高20%レベル)——欠陥実長
ただし最大エコー高き20~80%の欠陥について

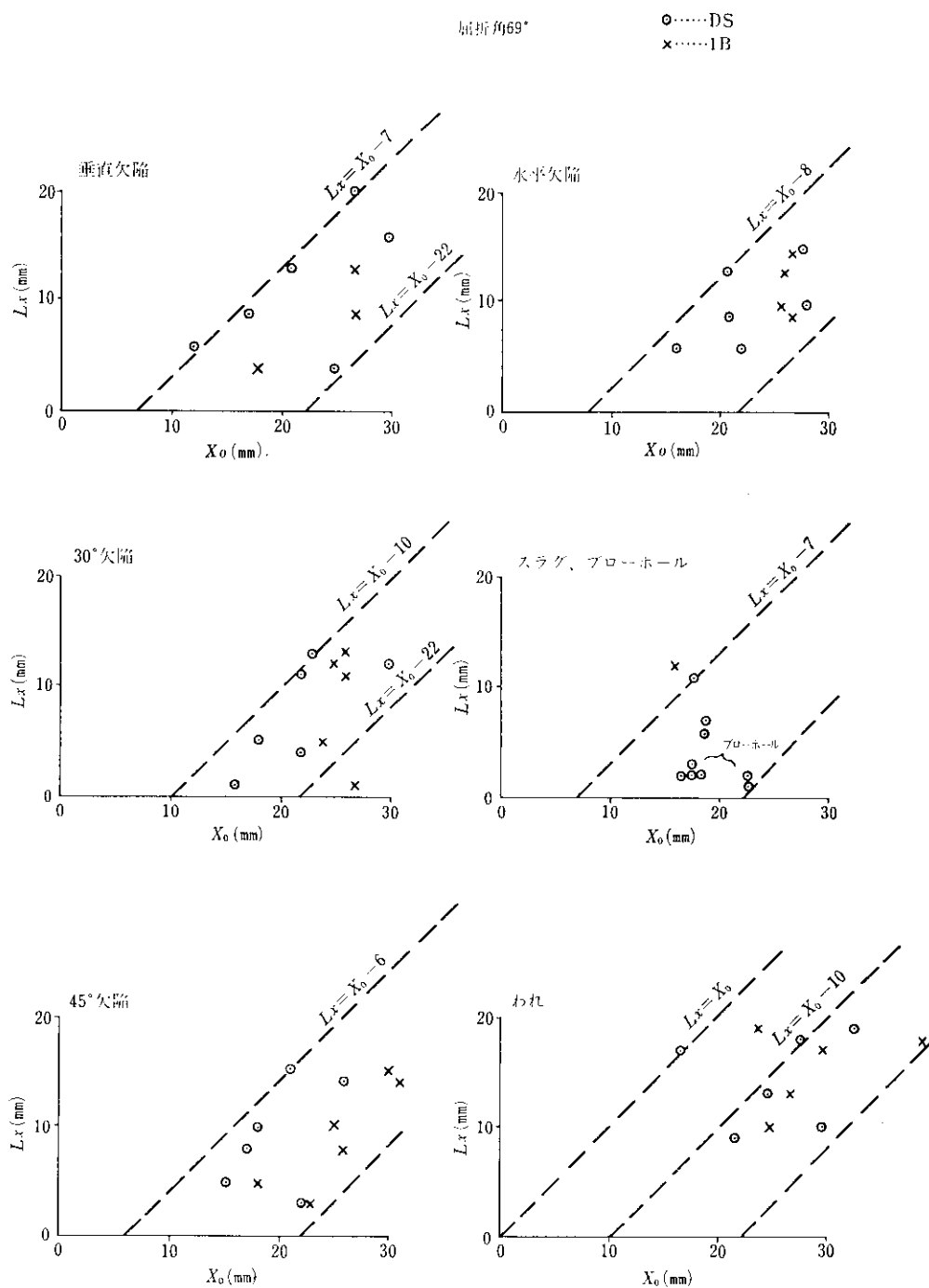


図 7-1 E, F シリーズ超音波指示長—欠陥実長

 X_0 ……波高ゼロレベルで計測

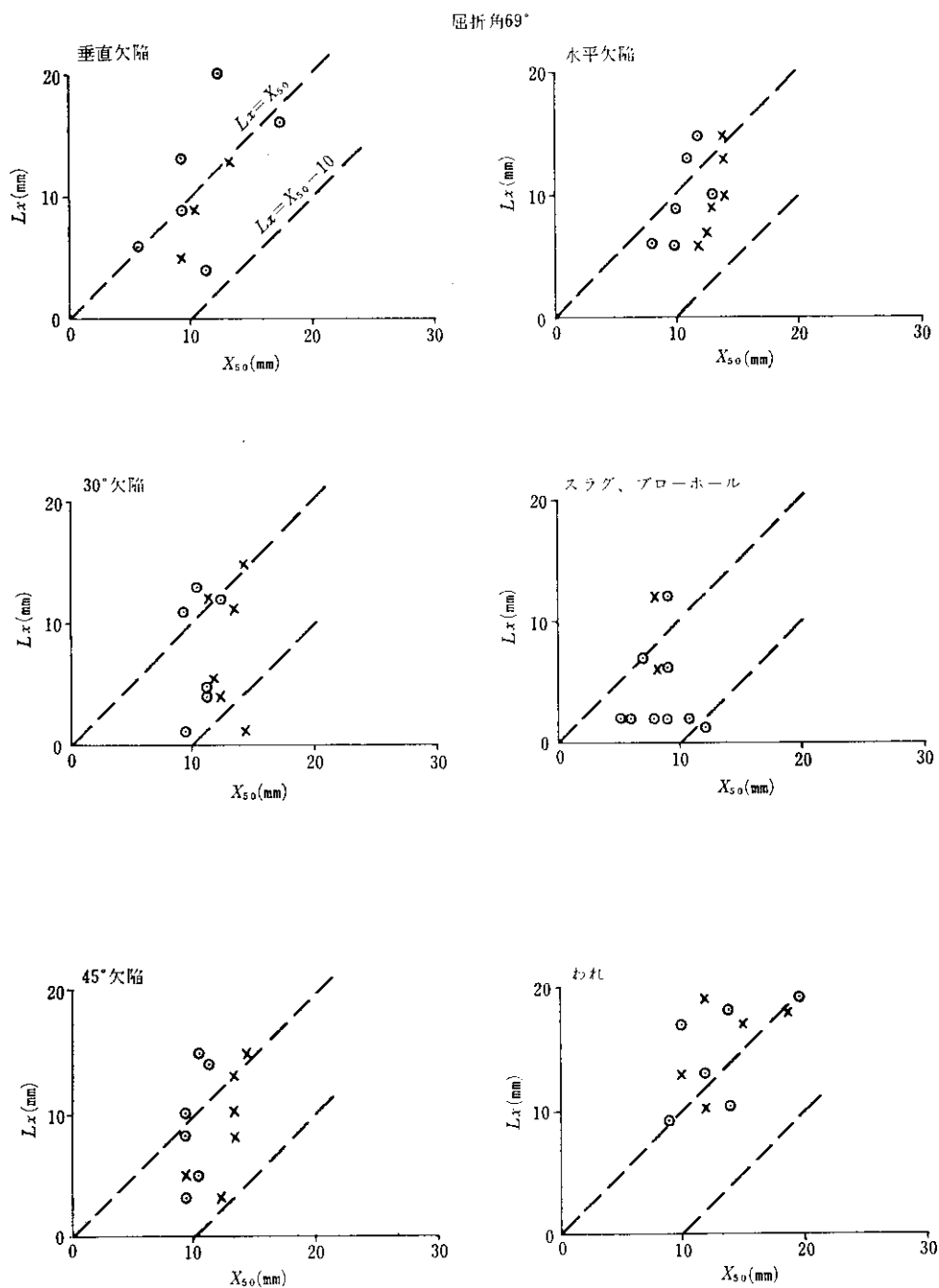
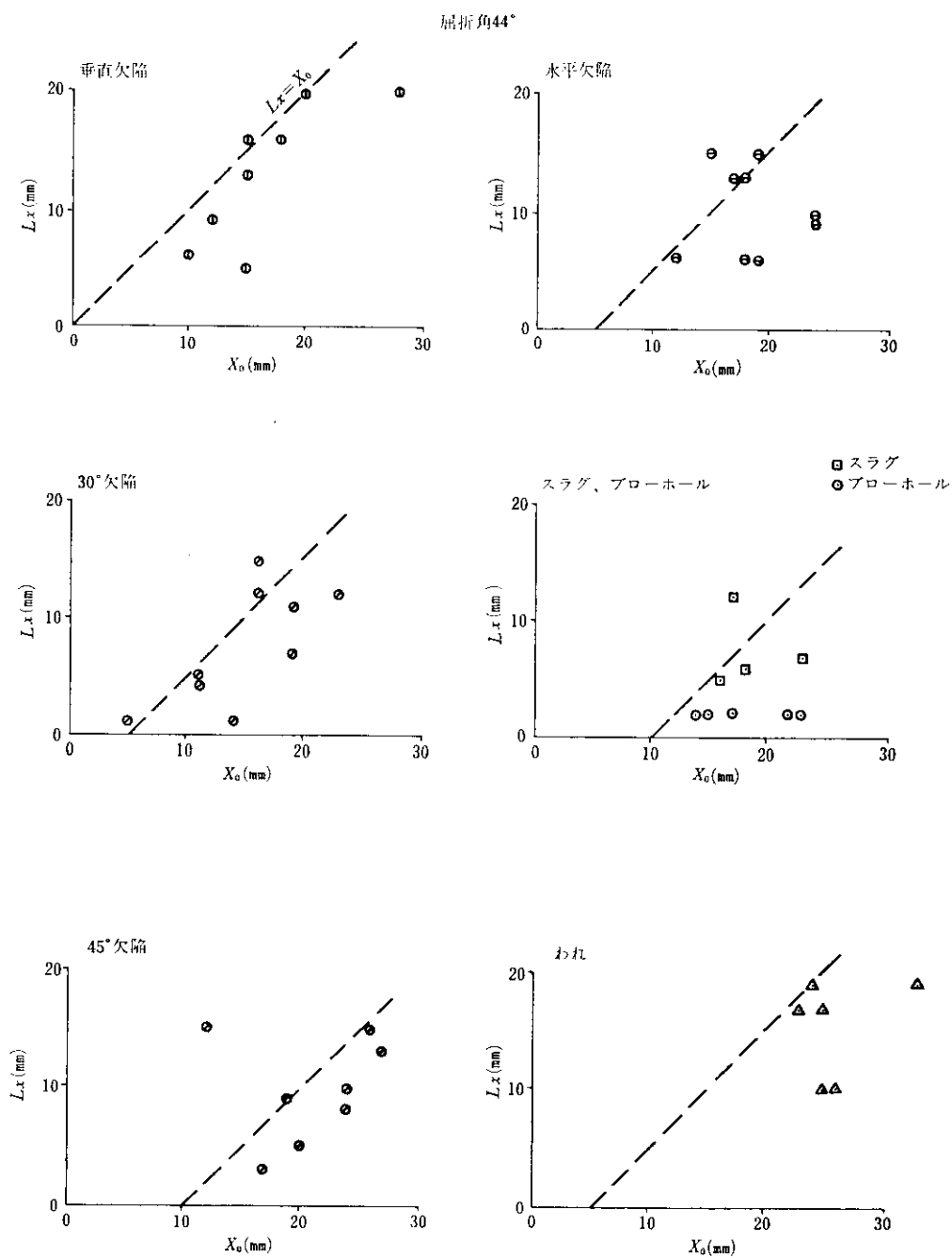


図 7-2 E, F シリーズ超音波指示長—欠陥実長

$$X_{so} \cdots \cdots \frac{1}{2} h_m \text{ で計測}$$



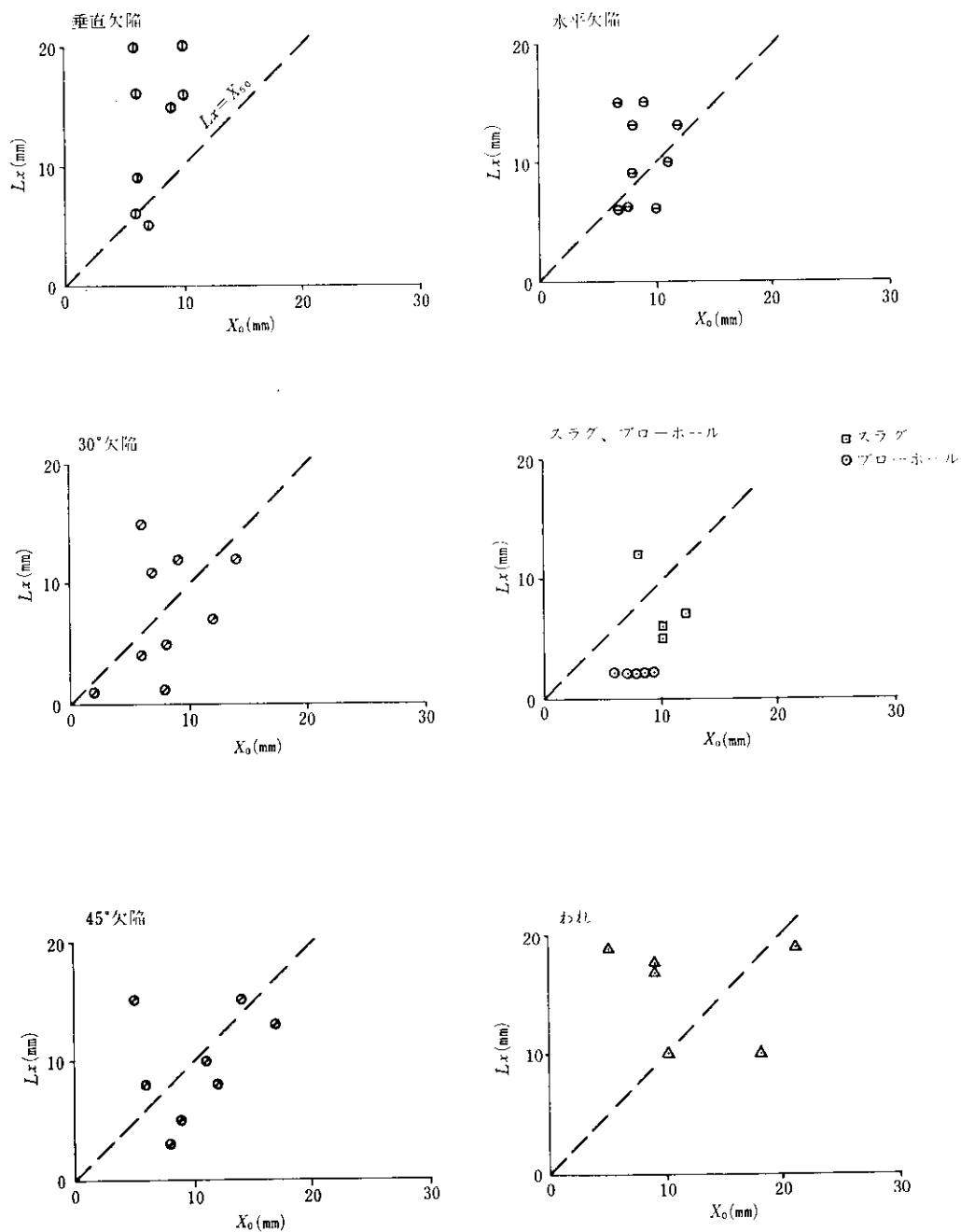
屈折角 44° 

図 7-4 E, F シリーズ超音波指示長—欠陥実長

$$X_{30} \cdots \cdots \frac{1}{2} h_m \text{ レベルで計測}$$

音波指示長と図7板厚 65, 75 mm の供試材の欠陥実長—超音波指示長と2つのグループにわけたのは、板厚 25~55 mm 供試材では基準感度方式で探傷し、板厚 65, 75 mm 供試材では欠陥からの最大エコー高さができるだけ80%程度になるように調整した定波高方式で探傷したからである。

図6, 図7から次のことがいえる。

板厚 25~55 mm 供試材の場合

(a) X_0 に対する L_x の値はかなりばらついているが、次式であらわされるようなある限界線が存在するようである。

$$X_0 = 10 + L_x \quad \dots\dots\dots (5)$$

この式は(2)式の $B_H' = 10$ とおいたものにはかならない。ばらつきの原因の一つに最大エコー高さの相異があると推定される。

(b) 欠陥によっては最大エコー高さが100%をはるかにこえ、飽和して超音波指示長が著しく長くなっている例が見受けられる。これは探傷感度が相当高過ぎて、ブローホールでも探知可能な反面、欠陥実長を過大評価するおそれがあることを示している。

(c) 超音波指示長を最大エコー高さの $\frac{1}{2}$ レベルで計測した場合は、ゼロレベルで計測した場合にくらべてプロットの点が左に寄るだけで、ばらつきそのものはゼロレベルの場合とあまり変わらない。しかし X_{50} と L_x の関係は屈折角 69° と 44° では少し異なっている。

屈折角 69° の場合は $X_{50} = L_x$ として安全側であるが、ワレやスラグでは L_x の方が逆に X_{50} より大きい例がわずかではあるが認められる。これに対し屈折角 44° では L_x が X_{50} より大きい場合がかなりある。すなわち、 69° によるワレ、スラグの探傷、 44° による探傷では(3)式の適用は欠陥実長を過小評価する危険がかなりあることを示している。

(d) 屈折角 69° 探傷において、図6-5の基準感度探傷で最大エコー高さが20~80%を示す欠陥のみについて波高20%レベルで計測した超音波指示長 X_{20} は、欠陥実長をはるかに上まわる場合が多い。

板厚 65, 75 mm の場合

この供試材グループでは基準感度方式ではな

く、欠陥からの最大エコーを約80%になるよう調整して実験を行なったが、 X に対する L_x のばらつきの範囲が板厚 25~55 mm 供試材(基準感度方式)グループの場合より狭くなったことがわかる。したがってこの一定波高感度方式を推奨したい。

(iii) 最大エコー高さ h_m の導入

図6からわかるように超音波指示長は欠陥からの最大エコーの高さによっても左右される。すなわち探触子の性能から考えても、エコー高さが大きければ走査図形の裾野も広くなり、小さければ逆に裾野がすぼまる。したがって、厳密には、

$$X_0 = f(L_x, h_m) \quad \dots\dots\dots (6)$$

であらわすべきと考えられる。ここに h_m は欠陥からの最大エコー高さ(%)である。

X_0 と h_m の関係を標準試験片のドリル穴について実験したところ

$$\left. \begin{array}{ll} 69^\circ \text{ 探触子の場合} & X_0 \propto h_m \\ 44^\circ \text{ 探触子の場合} & X_0 \propto h_m \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なる関係が確かめられた。

したがって、(2), (7)式から屈折角 69° の場合には、

$$X_0 = K_X \cdot (B_H' + L_x) \cdot h_m^{1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

が得られ、(5)式から $B_H' = 10$ として、 $(10 + L_x) \cdot h_m^{1/2}$ の値を屈折角 69° の実験結果について計算し、 $h_m^{1/2}$ の値を X_0 の函数として両軸対数目盛のグラフにプロットすると図8のようになった。

図8から次の近似式が得られた。

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{1}{3.1} \cdot (10 + L_x) \cdot h_m^{1/2} \quad \dots\dots\dots (9) \\ \therefore K_X &= \frac{1}{3.1} \end{aligned}$$

すなわち、超音波探傷により得られた X_0 と h_m を(9)式に代入すれば、屈折角 69° の場合の L_x の値が推定できる。

(2) 超音波指示長からの欠陥実長の確率的な推定

左右走査を行なって欠陥の走査図形を得たとき、その超音波指示長 X_0 と欠陥実長 L_x との関係を前項で数式的に求めたが、実際にはこのような計算は行わず、 X_0 , X_{20} , X_{50} など、ある適当な波高レベルでの指示長をもって推定欠陥実長

としている。どのレベルをとるかは、探傷器、探触子の特性、設定感度、欠陥の性質などによって異なるはずであり、それぞれ確立的に定められたものであるが、この点について今回の実験結果を解析してみる。

欠陥実長 L_x に等しい超音波指示長を与える波

高レベルを h_x とし、この h_x と最大エコー高さ h_m の比 h_x/h_m を横軸に、 h_x の発生頻度を累積頻度として縦軸にプロットしたのが図9である。

図9によれば、たとえばA～Dシリーズすなわち基準感度方式の屈折角 69° の結果では、欠陥実長と超音波指示長が等しくなるような波高比は約

屈折角 69°

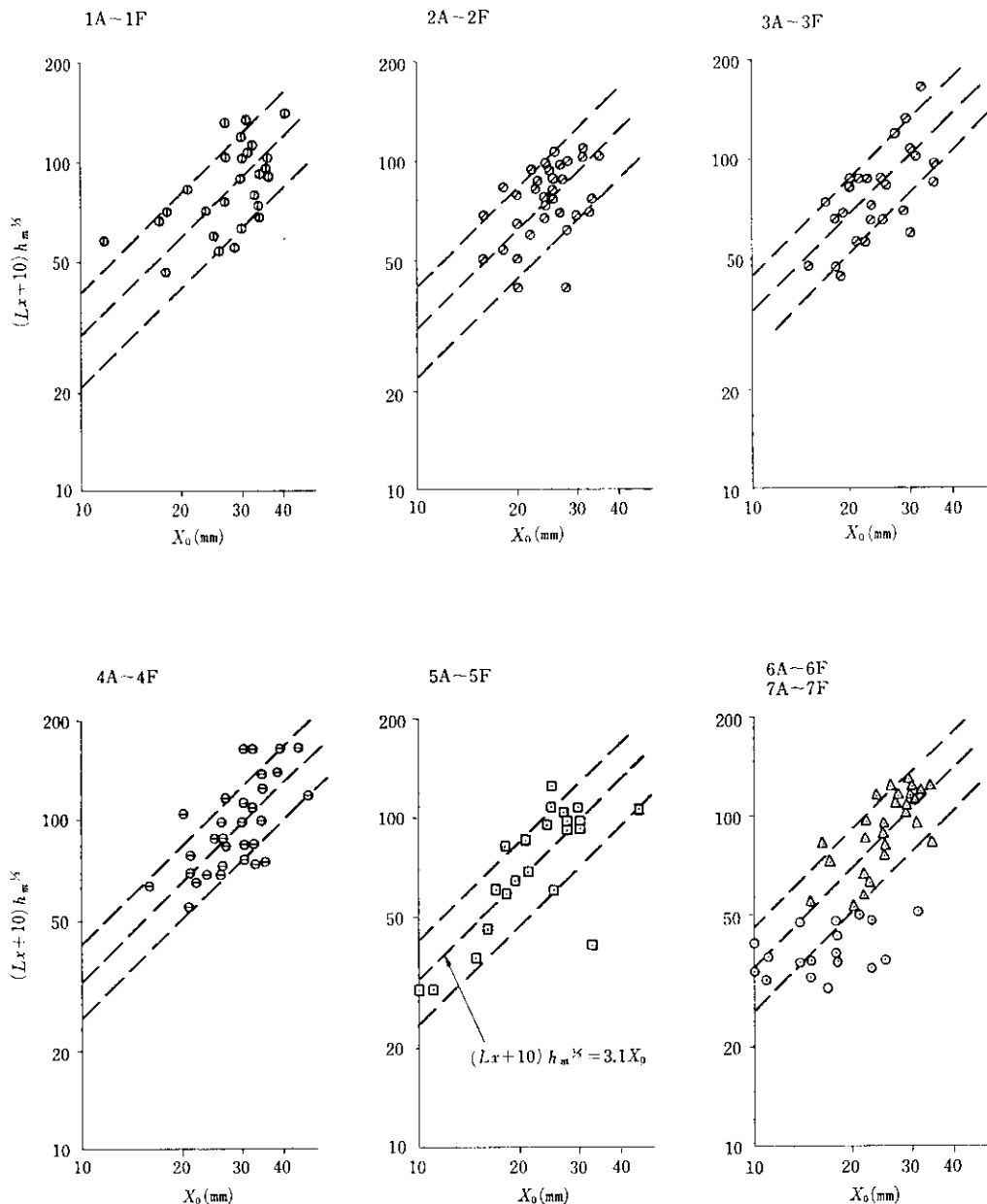


図8 左右走査における $(L_x + 10) h_m^{1/2} \sim X_0$

8割までが10/10～6/10の間に存在する。

また同一の累積頻度を与える波高比は、屈折角44°の方が屈折角69°の場合よりも低く、また定波高探傷のE、Fシリーズの方が基準感度方式のA～Dシリーズよりも低いことがわかる。

具体的には屈折角69°の場合、基準感度方式では波高7/10レベルで、定波高方式では5/10レベルで超音波指示長を計測すれば（すなわち前者は X_{70} を後者は X_{50} をそれぞれとれば）それが欠陥実長に等しいことが、7割の確率をもっていえる。

次に累積頻度70%、すなわち超音波指示長＝欠陥実長の確率7割になる波高比を欠陥の種類ごと

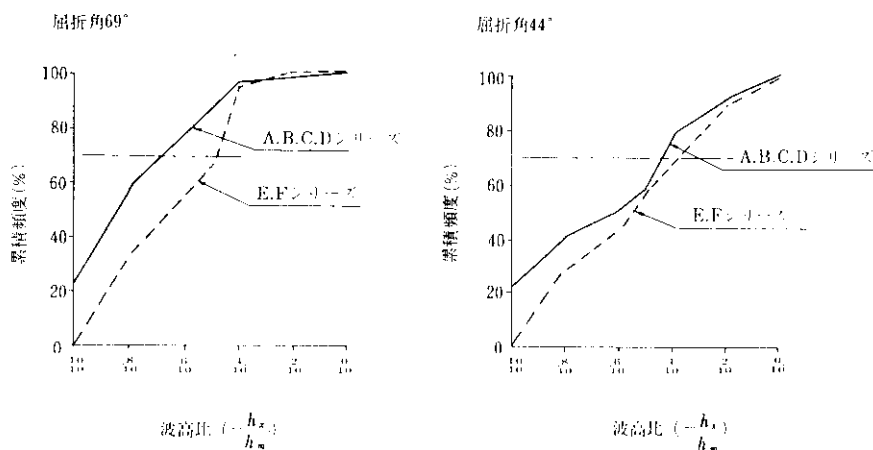
に求めると図10のようになる。

図10から次のことがわかる。

(a) 定波高感度法を用いた屈折角69°の場合には欠陥の種類に関係なく、波高比5/10の超音波指示長(X_{50})を計測すれば、それが欠陥実長に等しい確率は7割である。（ただしブローホールは除く）

(b) その他の場合には欠陥の種類によりばらつきが多い。

(c) ブローホールではいずれの探傷の場合でも、波高比8/10の超音波指示長(X_{80})が欠陥実長と一致する。



注：A・Dシリーズは基準片方式で感度設定E・Fシリーズは h_m 一定に感度調整

図9 欠陥実長に等しい超音波指示長の波高レベル発生の累積頻度

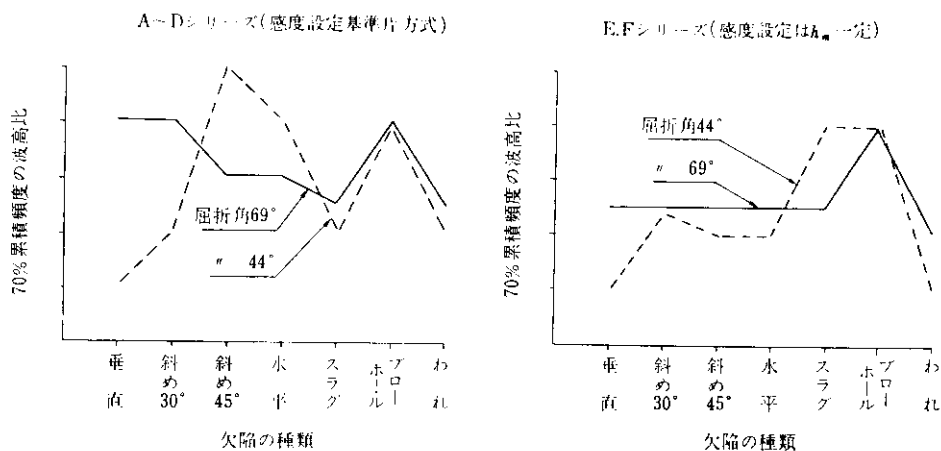


図10 累積頻度70%の場合の各欠陥の種類ごとの波高レベル

3.1.4 前後走査について

(1) 溶接断面の欠陥実長と前後走査による超音波指示長との関係

(i) 超音波指示長に影響を及ぼす因子

最大エコー高さを与える位置で前後走査を行なった場合の超音波指示長さは、ビーム路程によって左右される。左右走査の水平ビームの場合と異なり、垂直ビームの幅はある角度の広がりを持っているからである。このほか、最大エコー高さや

欠陥実長によっても影響を受けることは左右走査の場合と同じである。

以上のことを総合して

$$Y_0 = f(h_m \cdot \ell \cdot d) \dots \dots \dots (10)$$

とあらわすことができる。

ここに

Y_0 : 波高ゼロレベルにおける超音波指示長

h_m : 最大エコー高さ

ℓ : ビーム路程

d : 溶接断面における欠陥実長

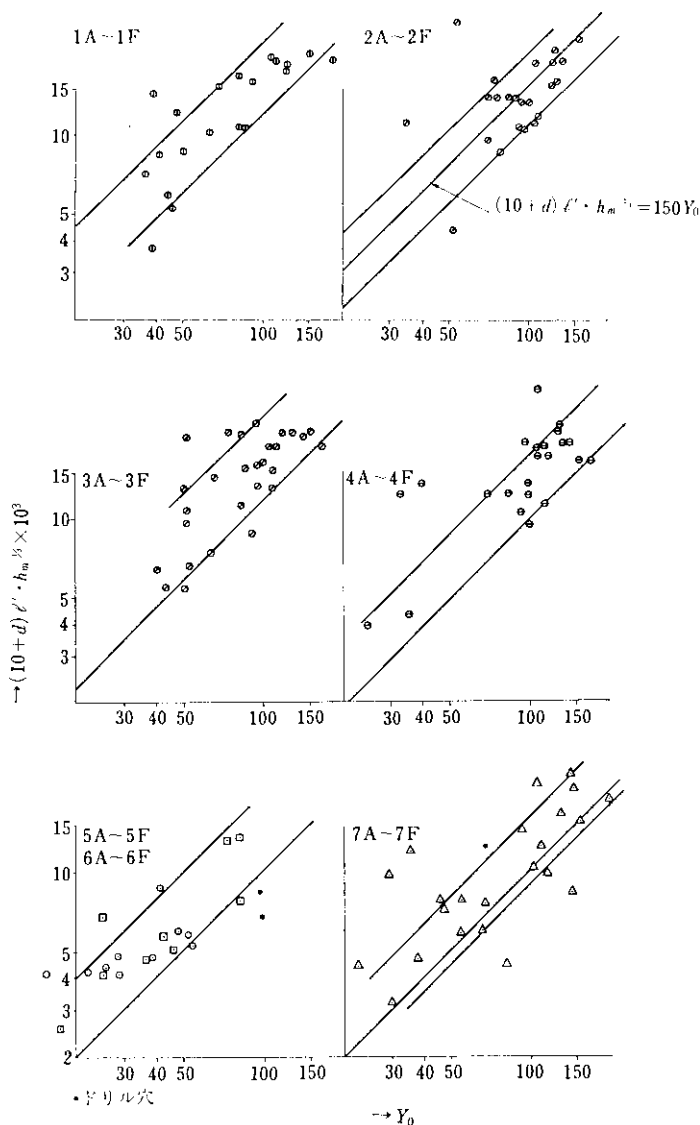


図 11 $(10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2}$ と Y_0 の関係 (屈折角 69°)

左右走査で(8)式を求めた時と同じ考え方から

$$\left. \begin{aligned} Y_0 &= K_Y \cdot (B_V' + d) \cdot \ell \cdot h_m^{1/2} (\text{斜角} 69^\circ) \\ Y_0 &= K_Y \cdot (B_V' + d) \cdot \ell \cdot h_m^{1/2} (\text{斜角} 44^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$B_V' = 10$ を代入して

$$\left. \begin{aligned} Y_0 &= K_Y \cdot (10 + d) \cdot \ell \cdot h_m^{1/2} (\text{斜角} 69^\circ) \\ Y_0 &= K_Y \cdot (10 + d) \cdot \ell \cdot h_m^{1/2} (\text{斜角} 44^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

が求められる。

(ii) 実験結果の解析

(12)式を用い、 ℓ (探傷面からのビーム路程)の代わりに ℓ' (ビーム原点からの路程)で、

屈折角 69° では $\ell' = \ell + 46$

屈折角 44° では $\ell' = \ell + 36$

を使って Y_0 と $(10 + d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2}$ の関係を両軸対数目盛にプロットしたものが、図11、図12である。

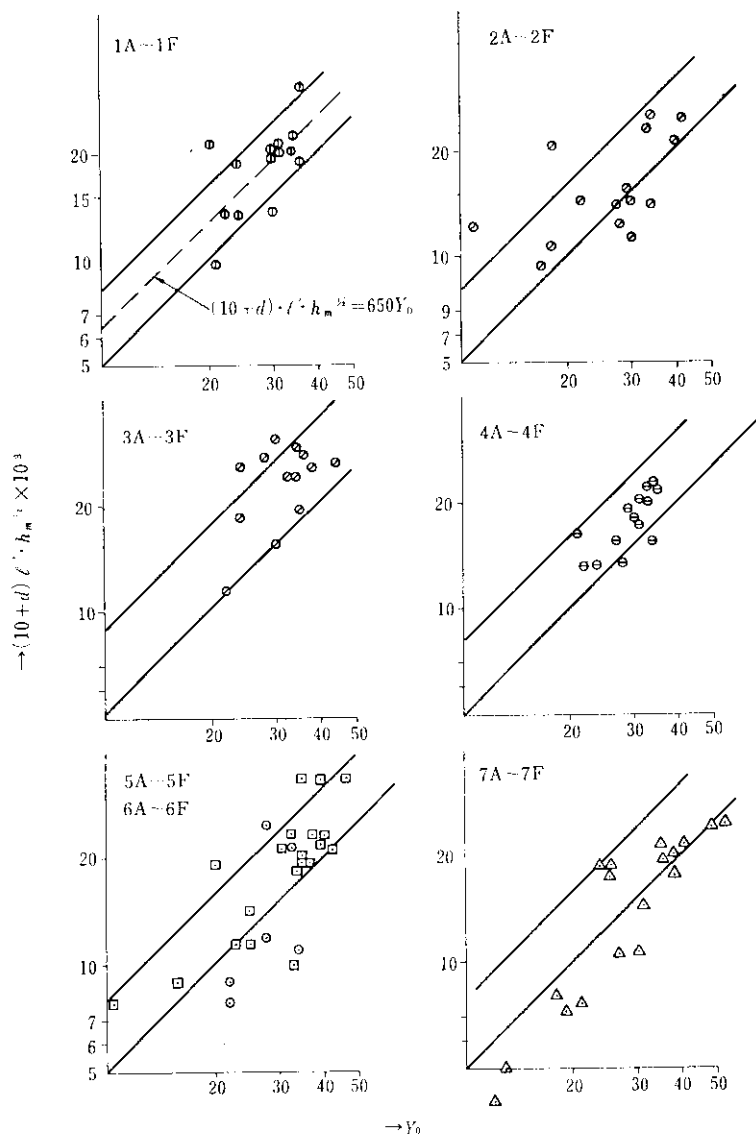


図 12 $(10 + d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2}$ と Y_0 の関係 (屈折角 44°)

両図から次の近似式が得られた。

$$\left. \begin{aligned} \text{屈折角}69^\circ \quad Y_0 &= \frac{1}{150} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/4} \\ \text{屈折角}44^\circ \quad Y_0 &= \frac{1}{650} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/4} \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

(2) 超音波指示長からの欠陥実長の確率的な推定

前後走査においては左右走査と異なり、超音波ビームの垂直幅がビーム路程とともに放射状に広がるので、断面欠陥実長に等しい超音波指示長が得られる波高レベル h_x は厳密な意味においてはビーム路程一定の場合について論じなければならないが、実用上の目安程度にする目的で、供試材各板厚ごとに h_x を求め、累積頻度として図13に示した。この図の見方は図9と同じで、たとえば、屈折角69° 1回反射法で探傷した板厚25mm 供試材 (Aシリーズ) において、超音波指示長が欠陥実長に等しい波高レベルは、波高比9/10以上で100%発生したことが示されている。

さらに、このような波高レベルが欠陥の種類によってどのように影響されるかをしらべたものを図14に示す。

図13, 図14から次のことがいえる。

(a) 断面欠陥実長に等しい超音波指示長を与える波高レベルは供試材板厚によって異なるが、明確な直線関係はない。

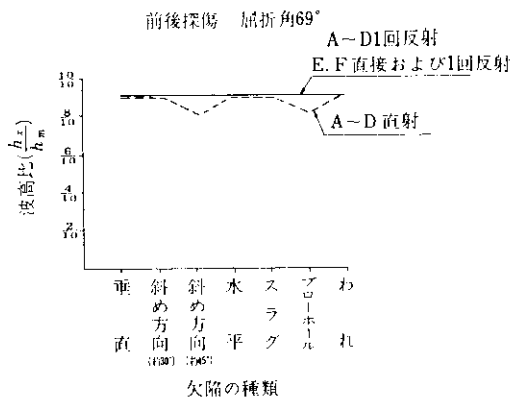


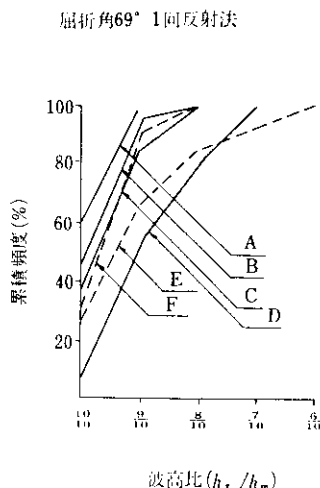
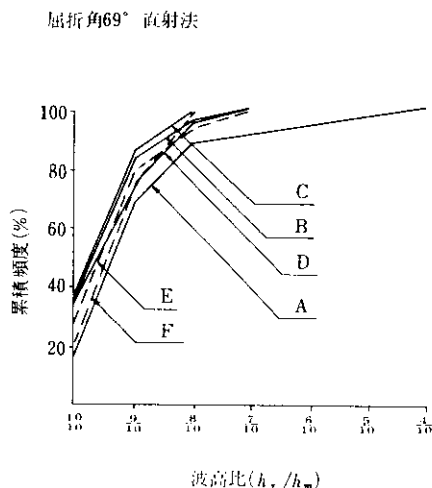
図14 累積頻度70%以上の場合の欠陥種類別の欠陥実長相当波高レベル h_x

(b) しかしながらこのような波高比はほとんど7/10で発生しているので、きわめて大きな安全率を見込むのであれば、7/10で計測した超音波指示長を計測してこれを欠陥実長とすれば、過小評価の危険はない。

(c) またこの波高比は、欠陥の種類によって著しく変動することはなく、ほとんど一定である。

(3) 斜角探傷のエコー消失角

溶接部断面における欠陥の位置や形状を推定するには、探触子を溶接線に直角方向に移動させて最大エコー高さが得られる探触子位置とビーム路



A: 板厚25mm供試材
B: " 35 "
C: " 45 "
D: " 55 "
E: " 65 "
F: " 75 "

図13 超音波指示長が欠陥実長に等しい波高レベル h_x

程から幾何学的に断面における位置を求め、これを中心として前後、左右、首振り、振子の各走査とエコーの形から欠陥形状を推定するのが従来の方法であるが、最近エコーが消失する点でのエコー消失角およびビーム路程を用いて欠陥寸法を推定する方法の研究が米国の文献に発表されているが、本実験でもこの消失角についての解析を行なった²⁾。その結果については NDI 第 2 分科会で発表を行なったので参照されたい。

3.2 裏当金付の実験結果の解析と考察

3.2.1 左右走査について

(1) 定波高探傷法

裏当金なしの実験で定波高探傷法が秀れていることがわかったので、裏当金付の場合は定波高法を主体とすることとし、欠陥波高がブラウン管上 80~100% になるよう調整した。

その結果得られた超音波指示長 X と断面検査による欠陥実長 L_x の関係を、 X_0 、 X_{20} 、 X_{50} の場合についてプロットしたものが、図 15 である。これによれば、波高ゼロレベルで計測した X_0 と L_x の関係が一番ばらつきが少ないようである。

(2) NDIS 法への換算

定波高法探傷を行なった際、NDIS-2404-70 に定められた基準感度との差を一一記録しておいたので、これをもとに NDIS の基準感度で探傷した場合の超音波図形を作図し、その図形から NDIS-2404-70 の規定に従った超音波指示長さを求めた。その指示長さ X と欠陥実長 L_x の関係を図 16 に示す。

図 16 の NDIS 法と図 15 の定波高法を比較すると、 $\pm 5 \text{ mm}$ Zone 内の欠陥存在確率は定波高法の方が高いことがわかる。

(3) NDIS 等級分類と X 線試験等級分類の関係

NDIS-2404-70 では超音波指示長さにより、表 4、表 5 に従って欠陥等級分類をすることを規定しているが、この等級分類と X 線透過試験による等級分類 (JIS-Z-2341) の関係を実験結果についてまとめると、表 6 のようになった。

表 6 をみると、NDIS 1~2 級はほぼ X 線旧

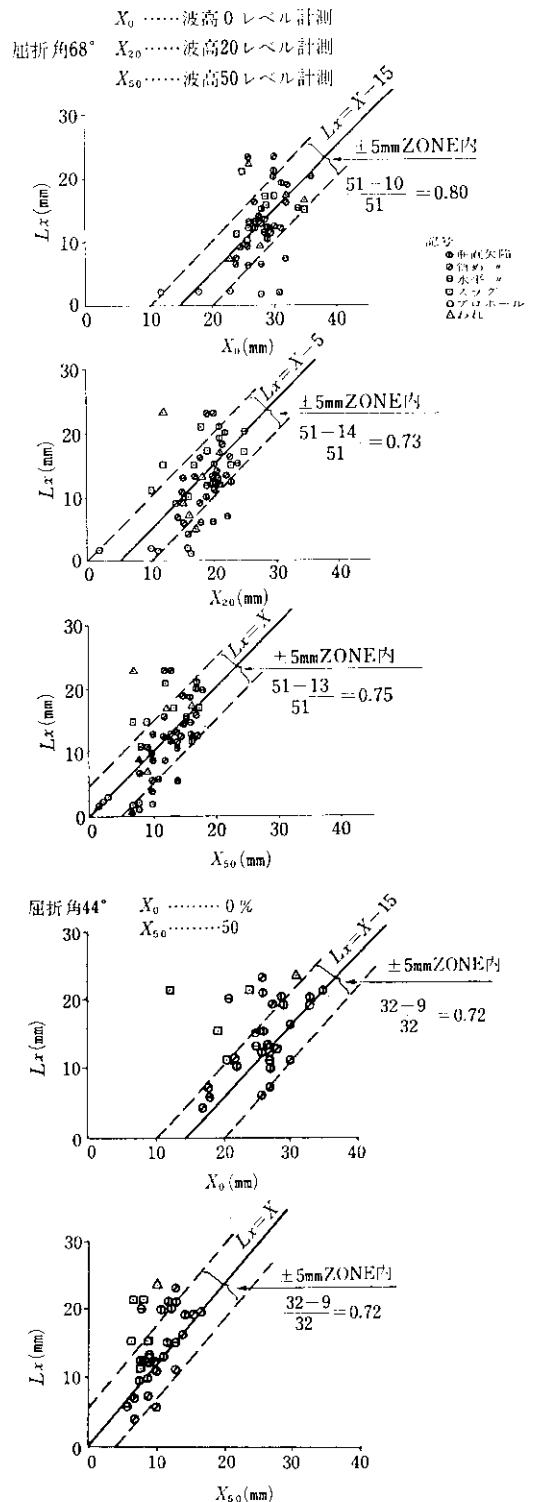


図 15 定波高法による欠陥実長と超音波指示長との関係

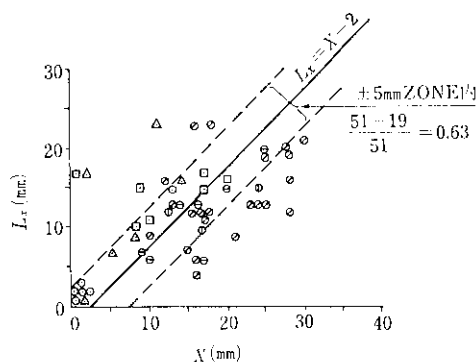


図 16 NDIS 2404-70による欠陥実長と超音波指示長との関係

表 4 欠陥指示長さの区分

欠陥長さによる区分の境界(mm)		S	M	L
母材の板厚(mm)*				
12以上	20以下	5	10	20
20こえ	48以下	t/4	t/2	t
48をこえるもの		12	24	48

* 突合せ溶接で突合せ母材の板厚が異なる場合は、薄い方の板厚

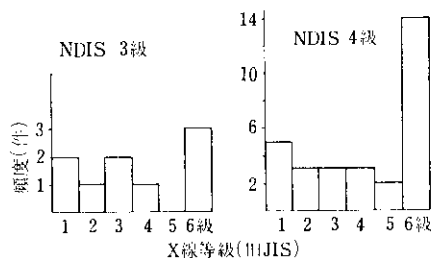
表 5 欠陥の等級分類

欠陥指示長さ		S以下	SをこえM以下	MをこえL以下	Lをこえるもの
最大エコー高さ					
領域 II		1級	2級	3級	4級
領域 III		2級	3級	4級	4級
領域 IV		3級	4級	4級	4級

表 6 欠陥の NDIS-2404-70 分類に対応する JIS-Z-2341 の等級分類

旧 JIS	NDIS					計
	0級*	1級	2級	3級	4級	
1 級	--	2	--	2	5	9件
2 級	2	--	2	1	3	8
3 級	1	1	2	2	3	9
4 級	--	--	--	1	3	4
5 級	--	--	1	--	2	3
6 級	1	--	--	3	14	18
計	4件	3	5	9	30	51

* NDIS の計測レベルでは指示長さがえられないもの



JIS 1～3級に対応しているが、NDIS 3級および4級はX線の1～6までの広い範囲にわたって対応している。これは NDIS の等級分類が不適当なのではなく、逆に実際には NDIS で4級と判定されるような欠陥があるのに、X線ではフィルム上に影像として現わしきれず、1級、2級と甘く判定していると考えられる。

なお、この超音波とX線の判定結果の関係については、富士らの論文³⁾があるので、図 17、表 7、表 8 に引用するが、今回の結果と同じ傾向を示している。

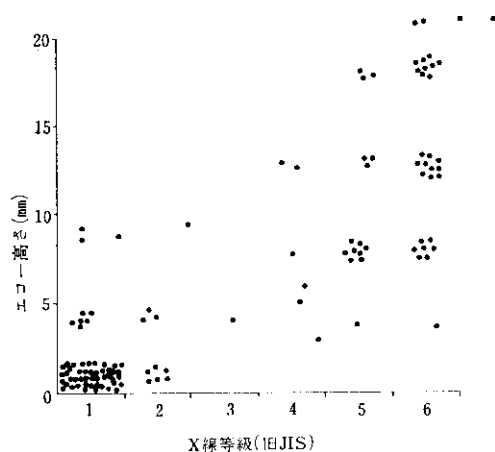


図 17 船体の自動溶接部のX線等級別超音波指示エコー高さの分布(富士ら³⁾)

表 7 等級分類(富士ら³⁾)

エコー高さ(%)	連続長さ(mm)			
	S以下	SをこえM以下	MをこえL以下	Lをこえるもの
20以下	A	A	B	C
20をこえ50以下	A	B	C	D
50をこえ80以下	B	C	D	D
80をこえるもの	D	D	D	D

表 8 欠陥種類別X線等級と
超音波等級の関係 (富士³⁾)

X線等級	超音波等級		A	B～C	D	計
	欠陥種別					
1	無欠陥 ブローホール スラグ捲込	151	188	1	5	7
		31		0	1	
		4		0	1	
2	ブローホール パイプ スラグ捲込	6	17	0	0	2
		6		0	1	
		2		0	1	
3	ブローホール スラグ捲込	2	1	0	0	2
		1		0	0	
		1		0	0	
4	パイプ溶込 スラグ捲込 溶込足レ	6	9	0	2	7
		1		0	0	
		1		0	2	
		1		0	3	
計			214	1	16	231

3.2.2 前後走査について

裏当金なしの実験の解析で述べたと同じ考え方から、波高ゼロレベルにおける超音波指示長と断面欠陥実長の関係は次式であらわすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \text{屈折角}68^\circ\text{探傷} \quad Y_0 &= K_Y \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2}, \\ &\quad \ell' = \ell + 46 \\ \text{屈折角}44^\circ\text{探傷} \quad Y_0 &= K_Y \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2}, \\ &\quad \ell' = \ell + 36 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここに

Y_0 : 波高ゼロレベルの超音波指示長さ (mm)

h_m : 最大エコー高さ (%)

ℓ : 探傷面からのビーム路程 (mm)

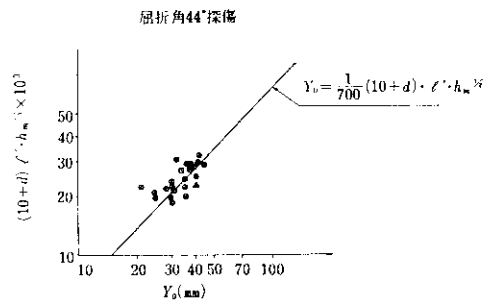
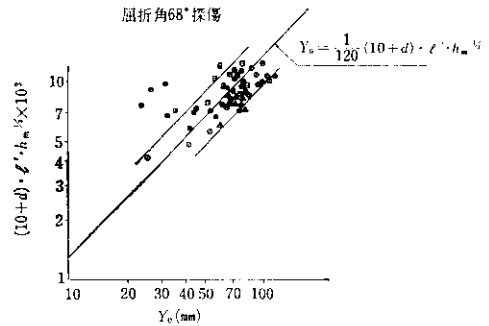
ℓ' : 探触子原点からのビーム路程 (mm)

d : 溶接断面における欠陥実長 (mm)

K_Y : 常数

屈折角 68° 探傷の実験結果について $(10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2}$, 屈折角 44° の実験結果について $(10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2}$ をそれぞれ、 Y_0 の函数として両軸対数目盛にプロットしたものを図18に示す。

図18から次の近似式が得られる。

図 18 超音波指示長 Y_0 と ℓ' , h_m , d の関係

$$\left. \begin{aligned} \text{屈折角}68^\circ\text{のとき} \quad Y_0 &= \frac{1}{120} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2} \\ \text{屈折角}44^\circ\text{のとき} \quad Y_0 &= \frac{1}{700} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

3.2.3 作図による断面欠陥実長の推定

裏当金なしの実験結果解析の項で述べたエコー消失角とビーム路程を使って幾何学的に欠陥長さを推定する方法を裏当金付の結果についても行ない、その結果

(a) 作図による欠陥長の方が一般に欠陥実長より大きい。

(b) 欠陥実長との誤差は俯角 (欠陥の傾斜とビーム中心線とのなす角度) が大きくなるにつれて小さくなり、欠陥がビームに直角に相対するとき誤差は最小となる。

などのことが明かとなったが、ここでは説明を省略する⁴⁾。

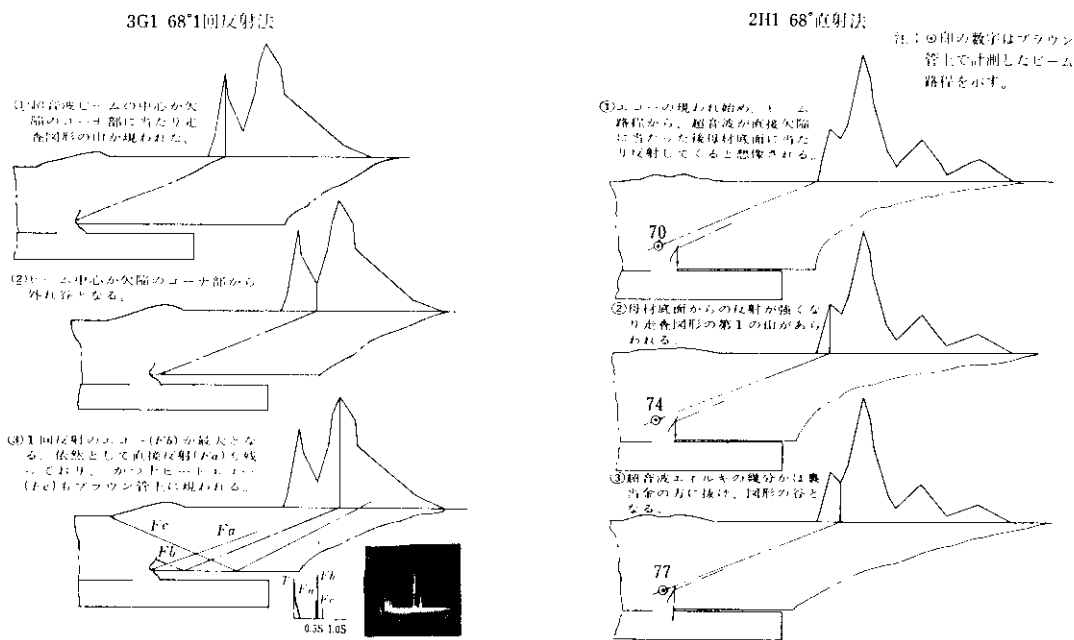


図 19 斜め方向欠陥の走査グラフの解析

3・2・4 裏当金の影響について

裏当金付の場合どうしてもまぎらわしいエコーがでやすく、その識別方法についてはいろいろの研究があるが⁵⁾、やはり断面形状を考え、探触子の移動によるエコーの変化と関連づけて判断さえすれば、欠陥エコーと妨害エコーの区別は十分できることが確認された。

図19にその解析のしかたの一例を示す。

4. 結 論

ブランソン社ソノレイ 301 型超音波探傷器と 2.25 MHz, $\frac{1}{2} \times 1$ " の振動子寸法の斜角探触子を用い、各種の人工傷を有する板厚 25~75mm の裏当金なしの溶接供試材および、25および 35mm 板厚の裏当金付突合せ溶接供試材の斜角探傷法について研究し、次の結論を得た。

(1) 溶接線方向の欠陥実長と X 線試験指示長の関係

一般に X 線試験欠陥指示長=欠陥実長としてもよいことが確認された。

しかしグレードの高い欠陥、たとえばワレについては X 線試験では映像として捕えることができない場合が多く(今回の実験では約 30% もあった)また映像として捕ええても、指示長さが欠陥実長と著しく異なる場合が多かった。これに反し、超音波検査では屈折角 70° 付近の斜角探傷の 0.5 スキップ、あるいは 1 スキップ探傷のいずれかで 100% 欠陥を探知しており、ワレに関しては超音波探傷の X 線試験に対する優位性が立証された。ただし屈折角 45° 付近の斜角探傷では探知できなかった例がいくつかあり、超音波探傷においても、条件を十分選定する必要がある。

(2) 左右走査における溶接線方向欠陥実長と超音波指示長の関係

基準片感度方式を用いた探傷の場合には、超音波指示長から欠陥実長を推定する場合に、最大エコー高さ h_m を要因として導入しなければならない、たとえば屈折角 69° の場合、超音波指示長 X_0 と欠陥実長 L_x の間には

$$X_0 = \frac{1}{3.1} \cdot (10 + L_x) \cdot h_m^{1/2}$$

なる近似式が成立した。屈折角 44° のときには

h_m の乗数は $\frac{1}{2}$ になった。

このような数式を用いず、基準片感度方式で探傷し、一定波高レベルでの超音波指示長を欠陥実長とみなす方式、たとえば NDIS -2404-70 における

$\frac{1}{2}$ 波高での超音波指示長 $\equiv$ 欠陥実長
という考え方では、屈折角 69° の場合は欠陥実長を過大に評価し屈折角 44° の場合は欠陥実長を過小に評価する傾向が示された。

また防衛庁や米海軍規格に見られるような最大エコー高さ $20 \sim 80\%$ の欠陥について波高レベル 20% で超音波指示長さを計測すると、欠陥実長を過大評価する結果となった。

基準片感度方式でなく、欠陥エコー高さを $80 \sim 100\%$ という一定高さになるよう感度を調整する方式で探傷した場合は（定波高感度法では）、上記のような計算式を用いなくても、

$\frac{1}{2}$ 波高での超音波指示長 $\equiv$ 欠陥実長
とすることができ、その誤差は NDIS 法よりも少いことが立証された。

(3) 前後走査における断面方向欠陥実長と超音波指示長の関係

前後走査における超音波指示長 Y_0 と断面方向の欠陥実長 d の間にも、最高エコー高さ h_m を導入して近似式が得られた。この式における h_m の乗数は左右走査の場合と同じく、屈折角 70° 付近では $\frac{1}{2}$ 乗、屈折角 45° 付近では $\frac{1}{2}$ 乗であった。

裏当金なしの実験では

$$\text{屈折角 } 69^\circ \text{ の場合 } Y_0 = \frac{1}{150} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{屈折角 } 44^\circ \text{ の場合 } Y_0 = \frac{1}{650} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{\frac{1}{2}}$$

が得られ、

裏当金付の場合の実験では

$$\text{屈折角 } 68^\circ \text{ の場合 } Y_0 = \frac{1}{120} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{屈折角 } 44^\circ \text{ の場合 } Y_0 = \frac{1}{700} \cdot (10+d) \cdot \ell' \cdot h_m^{\frac{1}{2}}$$

が得られた。

なお、屈折角としては 45° 付近より 70° 付近を用いる方がよく、方向性欠陥に対しては 1 回反射

法が、ブローホールについては直射法がそれぞれすぐれている結果が得られた。しかし裏当金付の場合は 1 回反射法ではまぎらわしいエコーが現われることが多く、直射法が望ましいと考えられる。

(4) 斜角探傷法による溶接部の合否判定

以上のごとく、超音波斜角探傷法により実欠陥の形状、寸法をかなりの精度で推定し得たとしても、その溶接部の合否を判定する基準としては、オーソライズされたものは少く、ASME、米海軍規格など、わずかに散見される程度である。ところが、一方 X 線透過試験に関しては、それが本当に正しい根拠が有る無しに関してはさておき、一応オーソライズされた判定基準が数多くあり、実際にそれが慣用されている。

したがって、超音波斜角探傷試験による合否判定基準を作成する場合、最も抵抗なく受け入れられるのは超音波探傷結果を X 線透過試験欠陥等級に換算し、X 線判定基準に従うことであり、その場合、この換算が概略的には間違いなく行なわれることは立証できた。

しかし、溶接部の欠陥として最も危険と考えられるワレについていえば、X 線透過試験より、超音波探傷試験の方が秀れていることは常識的にも考えられており、この実験でも確認されたので、この折角の利点を生かして、超音波探傷自体による判定基準が確立されるよう、斯界の努力が結集されることを願うものである。

なお、X 線透過試験を行ないえない T 型隅肉溶接については、もちろん超音波探傷試験に頼らざるを得ないのは当然で、これに関しても目下実験を進めているので、後日発表したいと考えている。

この研究の実施に種々の配慮をたまわった川崎重工神戸造船事業部山本副事業部長、溶接研究室寺井室長、栗岡部員および、欠陥入供試材作製にご尽力をいただいた杉岡係長に、そして最後にこの実験作業に献身的な努力をいただいた造船検査鍋井掛員、鉄構検査松本掛員に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) たとえば
磯野他:「斜角探傷法における欠陥大きさの評価とその実態について」, NDI 資料 2391
- 2) 木村他:「超音波探傷試験による溶接欠陥の判定方法の解明と判定基準に関する研究 第I報」, NDI 資料 2388
- 3) 富士他:「溶接部の斜角探傷における等級分類案」, NDI 資料 2321
- 4) 木村他:「超音波探傷試験による溶接欠陥の判定方法の解明と判定基準に関する研究 第II報」, NDI 資料 2431
- 5) たとえば
山本他:「裏当金付溶接継手の超音波斜角探傷について」, NDI 資料 2351

