

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深さの推定方法の検討—

藤 盛 紀 明

§ 1. 序

近年、鉄骨工事の増加に伴って現場溶接が急増する傾向にあり、鋼溶接部の非破壊試験方法の確立が急務となっている。鋼溶接部の内部欠陥の非破壊試験方法としては放射線透過試験、超音波探傷試験等があるが、鉄骨・橋梁の溶接接合部の非破壊試験方法としては超音波斜角探傷試験が最適である。非破壊試験を行なった場合、欠陥の寸法、種類、位置を知る必要があるが、超音波斜角探傷試験においては、これらを決定する方法は未だ完全には確立されていない。本論文ではルート部の溶け込み不足や表面に開口したわれ等が比較的長く続いている場合の深さの推定方法について報告する。

この目的のために板表面に直角でかつ板の幅方向に無限に長いと考えられる種々の深さを持つスリット状人工欠陥を作製し、前後走査を行なった。この走査から得られる種々の情報をもとに溶け込み不足等の自然欠陥の深さの推定を行ない、各情報の利用価値を検討した。

§ 2. 前後走査から得られる情報とスリット状傷の深さの推定方法

超音波斜角探傷試験によって欠陥の寸法を推定する方法については既にいくつかの報告¹⁾²⁾³⁾⁴⁾があり、規格化⁵⁾⁶⁾⁷⁾もなされている。それらの多くは左右走査や前後走査を行ない、最大エコー高さからある一定の音圧を引いたエコー高さ以上のエコー高さを示す探触子の移動距離から欠陥の寸法を推定しようとする方法である。しかし予備的実験では、この方法は本論文で対象としている表面に開口しているスリット状傷の深さの推定には利用出来なかった。左右走査や前後走査から得られる情報はこの他にもいくつかある。その物理的意味はあまり明確ではないが、前後走査から得られる情報の中でスリット状傷の深さを推定するのに役立つと思われるものには次

の関係があげられる。これらの関係は左右走査によって欠陥の長さを推定する場合にも適用することが出来る。

(図-1 参照)

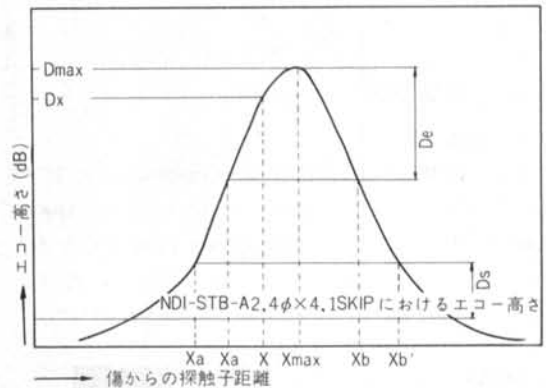


図-1 前後走査による傷深さの推定方法の説明(左右走査による傷の長さの推定方法もこれと同様に考えることができる)

a. エコー高さと傷の深さの関係

a-1: 最大エコー高さ D_{max} と傷の深さ L の関係 (この関係を利用した傷の深さの推定方法を D_{max} 法と仮称する)。

a-2: 傷からの一定の探触子距離 x におけるエコー高さ D_x と傷の深さ L の関係 (D_x 法と仮称する)

b. 一定レベル以上のエコー高さを示す探触子の移動距離と傷の深さの関係

b-1: |(最大エコー高さ D_{max}) - (一定の音圧 D_E)| 以上のエコー高さを示す探触子の移動距離 ($X_B - X_A$) と傷の深さ L の関係 (D_E 法と仮称する)

b-2: |(絶対的な音圧, 例えば NDI-STB-A2, 4φ×4, 1Skip で得られる音圧) ± (一定の音圧 D_S)| 以上のエコー高さを示す探触子の移動距離 ($X_{B'} - X_{A'}$) と傷の深さ L の関係 (D_S 法と仮称する)

c. 一定レベルのエコー高さを与え探触子距離と傷の深さの関係

c-1: 最大エコー高さ D_{max} を与える探触子距離 X_{max} と傷の深さ L の関係 (X_{max} 法と仮称する)

c-2: |(最大エコー高さ D_{max}) - (一定の音圧 D_E)| のエコー高さを与える探触子距離 X_A 、または X_B と傷の深さ L の関係 (X_B 法と仮称する)

c-3: |(絶対的な音圧, 例えば NDI-STB-A2, $4\phi \times 4$, 1 Skip で得られる音圧) \pm (一定の音圧 D_S) のエコー| 高さを与える探触子距離 X'_A 、または X'_B と傷の深さ L の関係 (D_S 法と仮称する)

その他スリット状傷の上端からの反射エコーを確認できれば傷の深さは容易に推定できるが、この方法はスリット先端の形状に左右されるので本論文では取り扱わない。

§ 3. 実験概要

3.1 装置

実験に使用した探傷器は西独 Krautkrämer 社製の USIP-10W である。探触子はチタン酸バリウム $20\text{mm} \times 22\text{mm}$ の矩形振動子を用いた底面積 $30\text{mm} \times 40\text{mm}$ のもので屈折角 45° 、周波数 4MHz である (2B20 \times 22A45 と呼称している)。接触媒質としてはマシン油 30# を使用した。



写真-1 超音波探傷器 USIP-10W

3.2 試験片

人工スリット傷を入れた試験片 (S型試験片) は表-1、図-2 に示す12種類である。材質は S S41、購入のまま熱処理はしていない。表面は両面ともセーパーで切削後 320# のエメリーペーパーで研磨してある。スリット加工は丸のご盤による。スリットは板に直角に入っているが、先端は写真-2 にその 1 例を示すように幾分

くずれている。スリットの幅は 1mm である。自然欠陥用試験片 (SW形試験片) は表-2、図-3 に示すように溶け込み不足が出来るように工夫してノンガス半自動溶接したもの 5 種類である。材質および表面状態は S 形試験片と同じである。SW5 は初層溶接後破断し、その上に溶接を行なった。写真-3 ~ 写真-7 に SW 形試験体の欠陥を示す。

試験体番号	スリットの深さ (L) (mm)
S 1	1.0
S 2	2.0
S 3	2.9
S 4	3.9
S 5	4.9
S 6	5.9
S 7	7.3
S 8	8.0
S 9	9.1
S10	9.8
S15	15.1
S20	20.0

S 2, S 5, S10, S20 の試験体は他の試験体と異なる板から採取した。しかし全ての試験体の材質 (S S41) は同じである。

表-1 S 形試験体概要

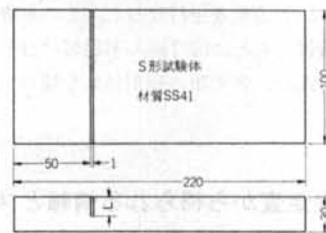


図-2 S 形試験体

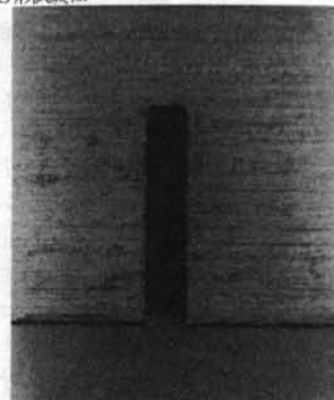


写真-2 S 形試験片のスリット

試験体番号	L(mm)	R(mm)	層	溶接電流(Amp)	溶接電圧(V)	ワイヤエクステンション(mm)	溶接速度(mm/s)
SW1	15	0	1 2以上	190 450	30 30	40 40	5 5
SW2	15	0	1 2以上	450 450	30 30	40 40	5 5
SW3	10	0	1 2以上	450 450	29 29	40 40	5 5
SW4	10	1	1 2以上	180 450	33 30	40 40	5 5
SW5	6	0	1 2以上	250 450	30 30	40 40	5 5

表-2 SW形試験体概要

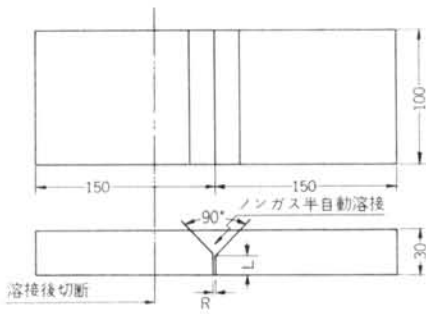


図-3 SW形試験体

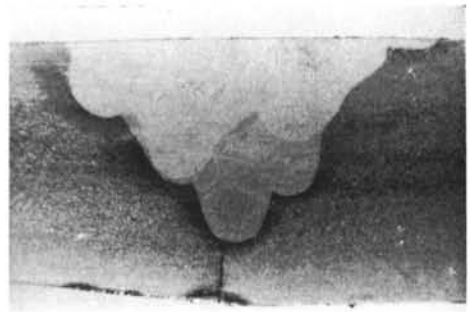


写真-5 SW-3

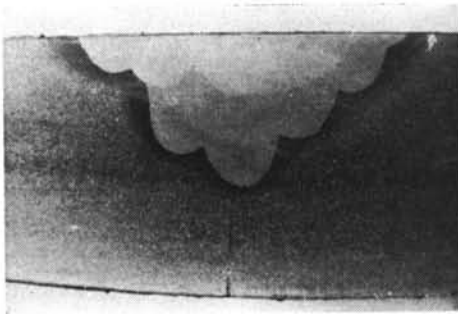


写真-3 SW-1

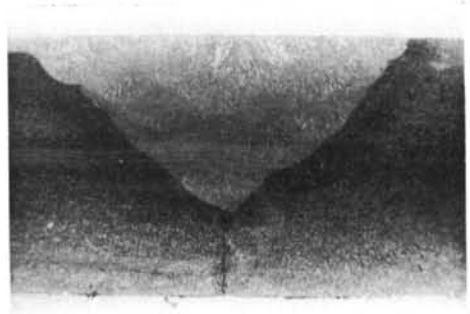


写真-6 SW-4

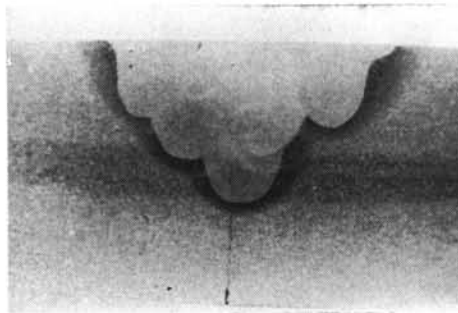


写真-4 SW-2

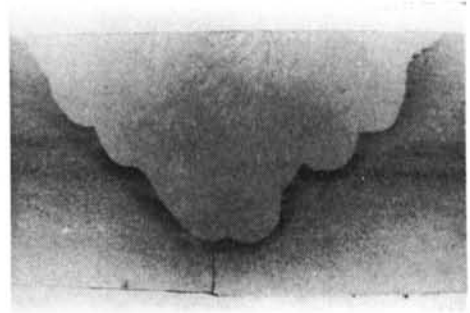


写真-7 SW-5

3.3 S形試験片の実験結果と各推定方法の検討

探傷試験は0.5Skipで行ない、試験時には探触子に常に1.5kgの力が加えられるようにした。

(1) D_{max} 法について

図-4に D_{max} と L の関係を示す。 L が増加すると D_{max} は増加するが、 L が10mm以上になると D_{max} は飽和する。したがって D_{max} 法によれば L が10mm以下であればその深さを推定することが出来るが、 L が10mm以上では傷の深さが10mm以上であるという判断しか出来ない

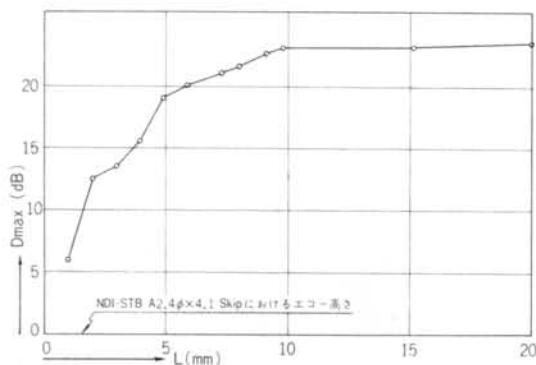


図-4 D_{max} と L の関係

(2) D_x 法について

図-5に D_x と L の関係の一部を示す。 D_x と L の関係は D_{max} と L の関係とほぼ同じ傾向である。 D_x 法は $X < X_{max}$ であれば D_{max} 法とほぼ同じ利用率を持っているが、 $X > X_{max}$ では誤差が大きくなる。

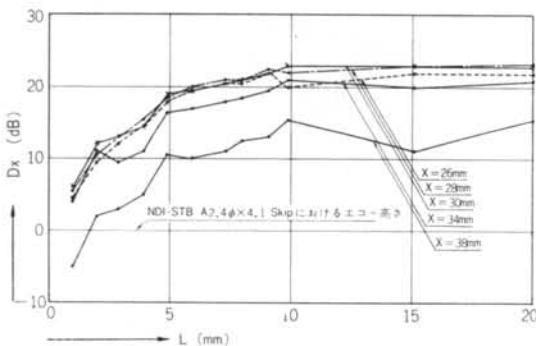


図-5 D_x と L の関係

(3) D_E 法について

図-6に $(X_B - X_A)$ と L の関係の一部を示す。図から分かるように D_E 法は本論文で対象としている表面に開口したスリット状の傷の深さの推定には利用することが出来ない。

(4) D_S 法について

図-7に $(X'_B - X'_A)$ と L の関係の一部を示す。

$(X'_B - X'_A)$ と L の関係は D_{max} と L の関係に類似しているが $L=15$ mmで $(X'_B - X'_A)$ が低下するので、推定できる深さの限度が D_{max} 法より低下する。

(5) X_{max} 法について

図-8に X_{max} と L の関係を示す。 X_{max} は L に無関係で、屈折角 45° の探触子を使用した場合の X_{max} 法はスリット状傷の深さの推定には利用できない。しかし屈折角が 45° 以外の場合、 X_{max} は L によって変化し、比較的深い傷の深さの推定にも利用出来る可能性がある。これは音の干渉によるものと思われる。 X_{max} 法については別に報告する予定である。この現象は文献(1)にも報告されている。

(6) X_E 法および X_S 法について

図-9に X'_A および X'_B と L の関係を、図-10に X_A および X_B と L の関係を示す。図から分かるように X_E 法および X_S 法は表面に開口したスリット状傷の深さの推定にはあまり有効ではない。 X'_A 、 X'_B 、 X_A および X_B と L の関係は X_{max} と L の関係に左右されると思われるので、屈折角が 45° 以外の場合はある程度利用出来るものと予想される。 X_E 法および X_S 法については別に報告する予定である。

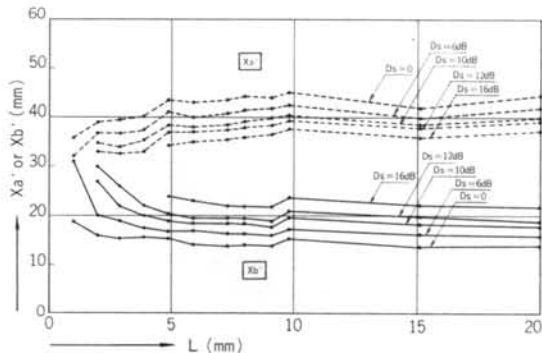


図-9 X'_A または X'_B と L の関係

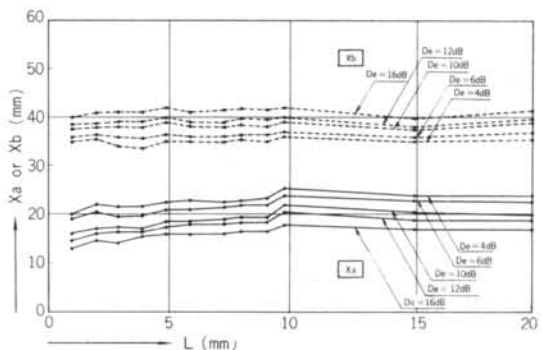


図-10 X_A または X_B と L の関係

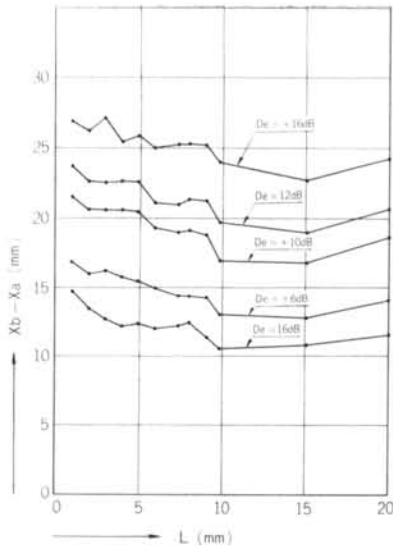


図-6 (Xb-Xa)とLの関係

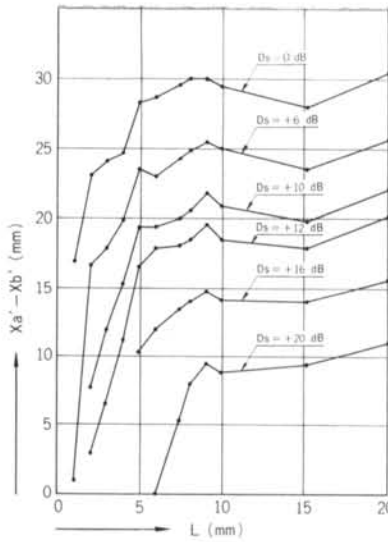


図-7 (Xb'-Xa')とLの関係

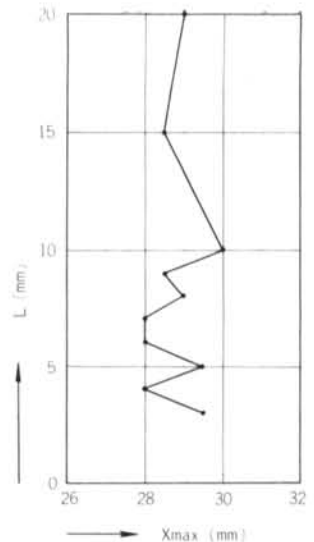


図-8 XimaxとLの関係

3.4 SW形試験片の傷の深さの推定結果

D_{max} 法, D_X 法, D_S 法によってSW形試験片の傷の深さを推定した結果を図-11に示す。 D_{max} 法と D_X 法は深さが10mm以下の傷に対しては比較的良好な近似値を与えている。 D_S 法では推定出来る傷の深さの上限値が低下している。

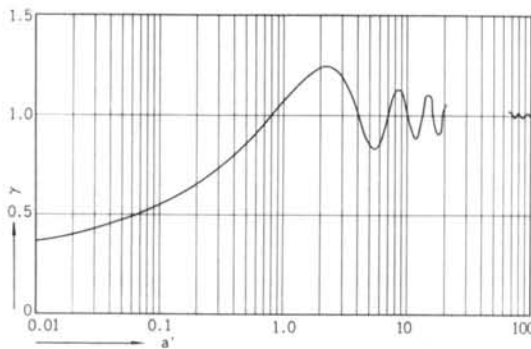


図-11 rとa'の関係

§ 4. D_{max} 法についての若干の考察

実吉博士は液体中にある $2a \times 2b$ の剛な平面矩形板からの反射音圧 $|\Phi|$ は、この矩形板の中心を通る垂線上に音源および受音器がある場合には(1)式で表わされるとしている⁸⁾。

$$|\Phi| = \frac{|A|}{4\pi x} \sqrt{[C(a')^2 + S(a')^2][C(b')^2 + S(b')^2]} \quad \dots\dots(1)$$

ここで A : 音源の強さ (体積速度)

x : 音源から矩形板までの距離

C, S : Fresnel の函数

$$a' = 2a/\sqrt{\lambda x} \quad b' = 2b/\sqrt{\lambda x}$$

λ : 波長

したがって長さ b が無限に長く、高さ a のみが有限な反射体からの反射音圧と無限に大きな反射体からの反射音圧との比 r は(2)式で表わされる。

$$r = \sqrt{2[C(a')^2 + S(a')^2]} \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{ただし} \quad \lim_{b' \rightarrow \infty} C(b') = \lim_{b' \rightarrow \infty} S(b') = \frac{1}{2}$$

λ を dB で表示すると(3)式となる。

$$r_{dB} = 20 \log_{10} \sqrt{2[C(a')^2 + S(a')^2]} \quad \dots\dots(3)$$

図-12に a' と r の関係を、図-13に a' と r_{dB} の関係を示す。Fresnel 函数の数値計算は文献(9)による。

本論文で取り扱っている反射体(傷)と実吉が取り扱っている反射体とは性質が異なっており(図-14参照) a と L の関係も明確でないが、 r_{dB} に最切のピーク値を与える $a' \approx 2.3$ は、今回の条件($\lambda = 1.6\text{mm}$, $x = 42\text{mm}$)では $a = 9.47\text{mm}$ となる。この値は D_{max} 法における推定可能な傷の深さの上限値と近似している。図-13中の点線は $a = L$ と仮定して $L = 20$ を $a \rightarrow \infty$ と一致させて実験結果を記入したものである。

振動子の寸法、屈折角、周波数、ビーム路程を変えて行なった実験によれば、図-13にみられるように r_{dB} は a' の増加に伴ってピークに達した後、波をうつ現象がみられ、推定出来る傷の深さの上限値が低下する。これ

については別に報告する予定である。

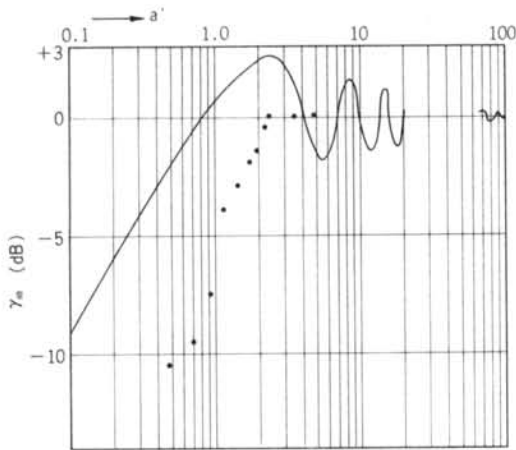


図-12 γ_{dB} と α' の関係

($D_s=0$: NDI-STB-A2 4φ×4, 1 Skip におけるエコー高さ)

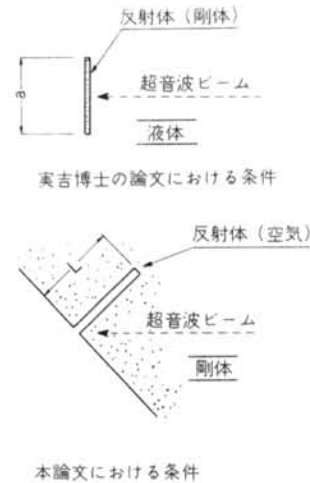


図-13 実吉博士の論文における条件と本論文における条件

試験体番号	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5		
実際の傷の深さ	12.7~13.0	11.6~14.2	6.9~7.3	9.7~10.2	5.6~5.9		
傷深さの推定方法	Dmax 法	10以上	10以上	6.7	8.6	4.6	
	Dx 法	X=26mm	8.9~14.3	8.4~12.5	7.3~11.3	9.1~15.1	4.9
		X=28mm	15.1	9.1~12.6	6.6	7.3~8.0	4.7
		X=30mm	10以上	9.1	5.9	7.3	4.7
		X=32mm	10以上	8.6	6.9	7.3	4.7
		X=34mm	10以上	9.1	7.3	5.9	4.5
	Ds 法	Ds=+6dB	6.7~15.8	7.3~17.3	7.0~16.8	8.2~18.4	6.6~15.5
		Ds=+10dB	8.2~16.8	8.5~18.2	8.2~16.8	8.8~19.2	6.5
Ds=+12dB		8.5~17.5	8.6~17.8	8.5~17.5	8.8~18.3	5.0	

表-3 SW形試験体の溶け込み不足の深さを Dmax 法, Dx 法, Ds 法で推定した結果 (単位mm)

§ 5. 結論

従来、欠陥寸法を推定するのに有効とされていた D_E 法は表面に開口したスリット状傷の深さの推定には利用出来ないことが判明した。ルート部に発生する長い溶け込み不足等は、構造的にみて非常に危険な欠陥であり、許容し得る傷の深さは霧またはごく微量と考えられる。したがって推定できる傷の深さに限度があっても十分な

効と考えられ、Dmax 法や Dx 法は実用的には充分利用出来る推定方法と考えられる。Dx 法は傷の位置が正確に分っておらなければ利用出来ないの、Dmax 法がより実用的である。Dmax と L の関係が振動子の寸法、屈折角、周波数、ビーム路程等によってどのように変わるかは別に報告する予定である。本論文では比較的長い傷を対象として報告したが、短い傷の場合の補正方法についても別に報告する予定である。

<参考文献>

- 1) Günter Buken, Hans Krächer; "Zur Frage der Fehlergrößenbestimmung in Schweißnähten nach dem Ultraschall-Reflexionsverfahren" Materialprüfung. 10 (1968) Nr. 10 Oktober
- 2) 加藤, 古沢, 磯野: "斜角探傷におけるモデル欠陥について" 昭和44年度日本非破壊検査協会春季大会講演概要
- 3) 那波, 山内, 三村: ND1 資料2343
- 4) R. T. Roehrs: "溶接部超音波探傷 ASME 規格の解析" 吉田訳, NDI 202小委員会資料, 202
- 5) BS 3923 Method for Ultrasonic Examination of Welds: Part 1: 1968: APPENDIX-B
- 6) AWS-D10-69, Code for Welding in Building Construction, Appendix C: Ultrasonic Testing of Groove Welds
- 7) 鋼溶接部の超音波斜角探傷試験方法および等級分: 日本非破壊検査協会202小委員会報告
- 8) 実吉純一: "音波及超音波の反射に就て" 日本音響学会誌, 昭和18年12月
- 9) 林, 森口: "高等函数表第2版" 岩波