



共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会

音響異方性を有する鋼溶接部の超音波斜角探傷法

委員長 伊 庭 敬 二*

Method of Ultrasonic Manual Testing for Anisotropic Ferritic Steel Weld
Sub-committee of Non-destructive Inspection

Keiji IBA

1. 緒 言

TMCP (Thermo Mechanical Controlled Process) 鋼材は圧延のままで優れた低温靱性を有し、また溶接性が良いことから、その特性を活かし船舶あるいは海洋構造物などに適用されている¹⁾。これら鋼溶接部の健全性を保証するための非破壊検査は、従来からのX線透過試験に加えて超音波斜角探傷（以下斜角探傷とする）が広く用いられるようになってきた。特にリグなどの海洋構造物では、その形状の関係から斜角探傷が最終的な品質保証手段となる場合が多い。

最近、TMCP 鋼材に対するこの斜角探傷において、ある特定の場合に探傷方向によつては著しく感度が低下し、探傷が困難になることが明らかとなり、鋼材の超音波伝播特性の特異性が改めて指摘された。

従来、鋼溶接部の斜角探傷は、被検査物の等方性にもとづく超音波の伝播を前提に規格化され、実施されてきた。鋼材は従来、約 900°C 以上で圧延を完了するのが普通であり、これら通常圧延の場合は、等方性を有するとみなされるからである。しかし、TMCP 鋼材のあるものには、異方性を呈するものもあり、その制御圧延法によつて程度も変化する。ここに、音響異方性がある限度を超えた鋼溶接部の斜角探傷における欠陥評価上の問題が生じ²⁾³⁾、異方性を有する鋼溶接部にも適用可能であり、かつ従前と同等の品質保証水準を確保すべく斜角探傷法の確立が急務となつた。

日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会は、この種課題を共通のものとして取り上げ、以下の鉄鋼 5 社メンバーから成る WG (TMCP 鋼材の超音

波斜角探傷法検討ワーキング・グループ) を発足させ、問題解決に当たつた。

新日本製鉄(株)：中山昌久，片山幹史，宇田川建志
日本鋼管(株)：森年弘，西藤勝元，久川博明
川崎製鉄(株)：丸山英雄，永倉義元，高田一
住友金属工業(株)：山口久雄，藤沢和夫，村山理一
(株)神戸製鋼所：岩崎全良，柳義親，中野英樹，近藤明男

音響異方性に起因する超音波の伝播特性については、これまでも報告されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。当 WG の活動は、これらをも包括する広範囲の鋼材の異方性に起因する現象と発生原因の解明及び探傷時への影響度調査に基づき、これら鋼材に対する探傷方法を提示するものである。

2. 鋼材に音響異方性を有する場合の現象

2-1 探傷方向による差異

斜角探傷の場合、等方性材料では探傷方向によつて屈折角あるいはエコー高さに差はないが、音響異方性を有する鋼材（以下異方性鋼材とする）では影響がでてくる。

Fig. 1 は極端な異方性を有する鋼材中の横穴 ($\phi 2.4$ mm) の反射特性の探傷方向依存性を公称屈折角 60° 及び 70° の斜角探触子について調査した例である。探傷方向により実屈折角が異なり、主圧延方向 (L 方向) では公称屈折角より大きくなり、主圧延方向に直角な方向 (C 方向) では小さくなっている。また公称屈折角 60° では L 方向と C 方向とではエコー高さはほとんど変わらないが、70° では L 方向でエコー高さが著しく低下しそのピークが不明確となつている。

多数の異方性鋼材を種々の公称屈折角の探触子を用い

昭和 61 年 11 月 7 日受付 (Received Nov. 7, 1986)

* 本会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会 委員長 川崎製鉄(株)薄板技術部部長 (Sheet and Strip Technology Dept., Kawasaki Steel Corp., 2-2-3 Uchisaiwai-cho Chiyoda-ku, Tokyo 100)

Key words: ultrasonic testing; ferritic steel; weld; manual testing; anisotropy; thermo mechanical controlled process; angle beam method; quality assurance; offshore structure; standard group study.

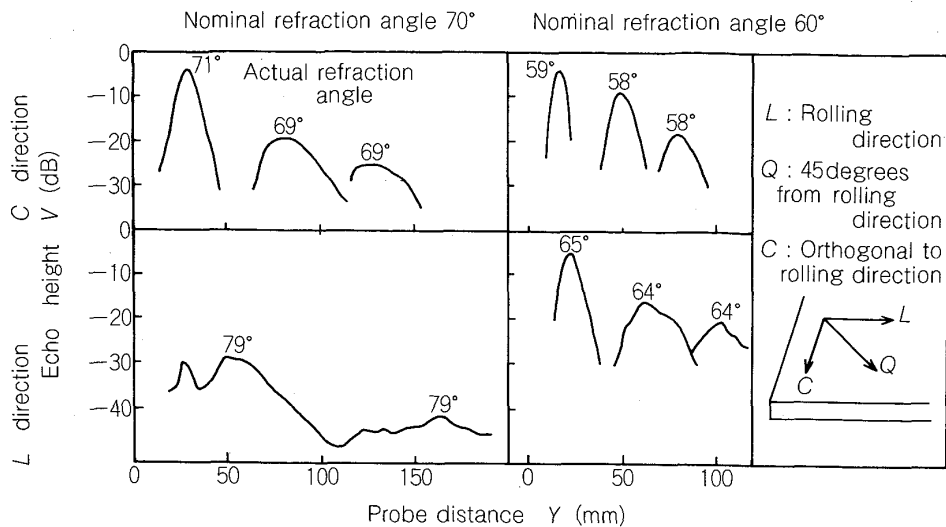


Fig. 1. An example of MA scope for anisotropic steel.

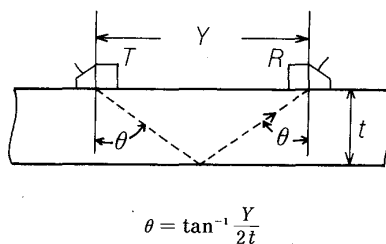


Fig. 2. Refraction angle measurement by V-path method.

Fig. 2 に示すV透過法によつて透過パルス強度及び屈折角の変化を調査した結果を Fig. 3, 4 に示す。Fig. 3 には各探傷方向ごとのV透過パルス強度の差 (ΔV) をC方向を基準に示す。屈折角 45° 60° ではほとんどの鋼材がいずれの方向でもC方向と大差ないが、屈折角 70° ではL方向に向かうに従つて ΔV が低下する鋼材が多くなっている。一方 Fig. 4 は等方性の鋼材で測定した屈折角 (標準屈折角) と異方性鋼材での屈折角 (探傷屈折角) との差を示す。屈折角 45° ではL方向に向かつて若干屈折角が小さくなる傾向があるが、屈折角 60° 以上ではC方向では小さくなり、L方向では大きくなる傾向がある。

Fig. 5 はV透過法による前後走査グラフの一例であり、上は試験周波数 5 MHz、下は 2 MHz の場合である。両図中の右下がりの直線は等方性鋼材中での距離0振幅特性を示す。2 MHz でもL方向の透過パルス強度の低下はほとんど改善されず、かえつてビームの拡がりが大きくなり、ピーク位置が検出しにくくなっている。

一般に透過パルス強度が低下する原因としては粒界による散乱減衰が考えられ、その場合は試験周波数を低くすることが推奨されている。しかし TMCP の主要な目的が結晶粒の微細化であり、粒界に起因する減衰は少な

いことが予想され、Fig. 5 の結果もそれを示唆している。

Fig. 6 は等方性鋼材及び異方性鋼材中の横穴の距離振幅特性の一例を示す。異方性鋼材のC方向探傷は等方性鋼材より若干エコー高さが高いが勾配は同一である。一方L方向の場合はエコー高さは低下しているがやはり勾配は同一である。このことからエコー高さの低下は、粒界の散乱による伝播減衰にもとづくものではなく入射時点での効率の低下によるものであることがわかる。

2.2 探傷時への影響

2.2.1 欠陥位置の推定精度

前述のように異方性鋼材では探傷方向により実質的な屈折角 (探傷屈折角) が異なるため、等方性鋼材 (JIS Z 2347, STB-A1) で求めた標準屈折角を使用すると欠陥の位置推定に誤差を生ずる。Fig. 7 はいくつかの異方性鋼材と等方性鋼材を用いてその影響を調べた結果である。なお探傷屈折角は Fig. 2 に示すV透過法により求めた。欠陥深さの推定精度 (Δd) は、標準屈折角を使用した場合、特にL方向では、悪くなるとともにそのばらつきも大きい。これは鋼材ごとに異方性の程度が異なり、屈折角の変化の程度が異なるためと思われる。一方鋼材ごとに探傷屈折角を測定して欠陥位置を推定した場合には等方性鋼材とほぼ同一の精度であることがわかる。

2.2.2 感度調整用試験片

異方性鋼材で感度調整用試験片 (RB) を作成する場合の方向性の影響を調べるため、等方性鋼材で作成したRB-4 と異方性鋼材の各方向で作成したRB-4 の感度比較を行つた。各RB-4 ($\phi 3.2$ mm 横穴) と JIS Z 2348, STB-A2 ($\phi 4 \times 4$ mm 縦穴) とのエコー高さの差は、

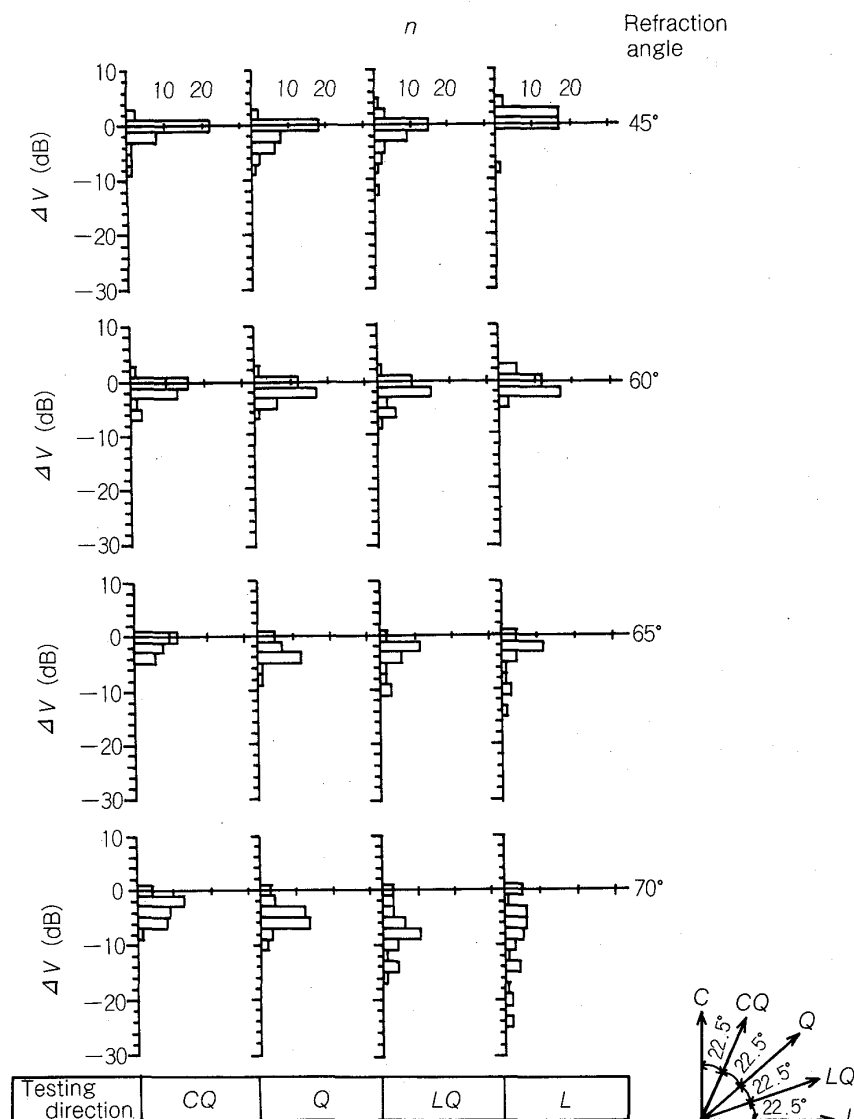


Fig. 3. Ratio of transmitted pulse amplitude in each direction to that in C direction on anisotropic steel (ΔV).

Table 1. Echo height difference between $\phi 3.2$ mm side drilled hole and STB-A2 ($\phi 4 \times 4$ mm) of each test specimen.

Nominal refraction angle	Test specimen	Isotropic steel	Anisotropic steel		
	Testing direction	Averaged value	Averaged value in L direction	Averaged value in Q direction	Averaged value in C direction
45°		+2 dB	+4 dB	+1 dB	+4 dB
60°		+11 dB	+11 dB	+9 dB	+14 dB
65°		+5 dB	+4 dB	+3 dB	+8 dB

Remark: Sensitivity is increased 6 dB at 45° in accordance with JIS Z 3060

おのこの公称屈折角において Table 1 に示す結果となつた。公称屈折角 45° においてはどの鋼材のどの方向から取つたものを使用してもほぼ同感度になることがわかる。公称屈折角 60° 及び 65° では、RB-4 として異方性鋼材の L, Q 方向を使用した場合と等方性鋼材を使用した場合とではほぼ同感度となるが、C 方向を使用

した場合等方性鋼材より 3~4 dB 感度が低下することがわかる。

従つて異方性鋼材の探傷時の対比試験片は等方性鋼材からでも、異方性鋼材のどの方向から取つたものでも良い。しかし C 方向から取つた場合には若干の感度補正を考慮する必要がある。

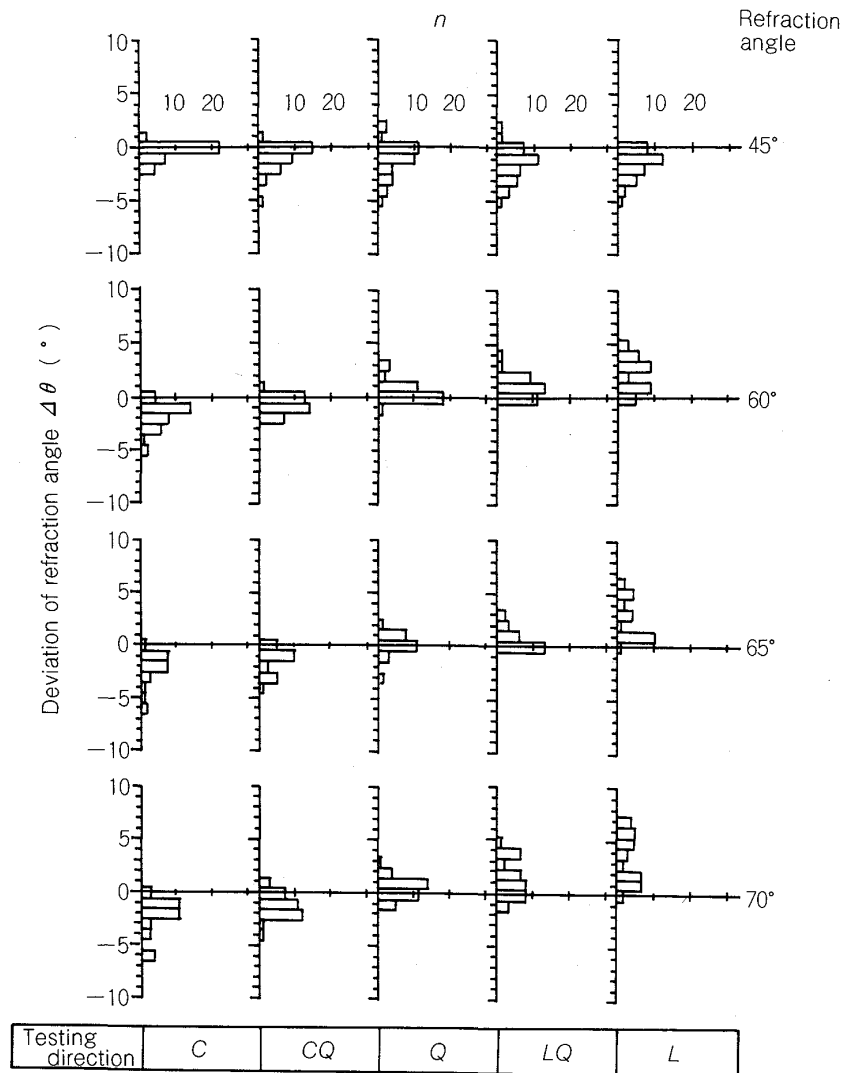


Fig. 4. Deviation between nominal and actual refraction angle of anisotropic steel (5 MHz).

Table 2. Echo height difference between side drilled hole or notch and STB-A2 ($\phi 4 \times 4$ mm) of each test specimen.

Flaw	Nominal refraction angle	Test specimen	Isotropic steel	Anisotropic steel			
		Testing direction	Averaged value in all direction	Averaged value in all direction	Averaged value in L direction	Averaged value in Q direction	Averaged value in C direction
$\phi 3.2$ mm side drilled hole	60°		+8 dB	+11 dB	+11 dB	+8 dB	+14 dB
	70°		0 dB	-2 dB	-8 dB	0 dB	5 dB
N10 notch	60°		+13 dB	+16 dB	+15 dB	+18 dB	+15 dB
	70°		+7 dB	+6 dB	-1 dB	+8 dB	+11 dB

2・2・3 人工欠陥の検出能

公称屈折角により人工欠陥からのエコー高さがどのように変化するかを、数種の異方性鋼材と等方性鋼材を用い調査した。実験には Fig. 8 に示すように各探傷方向ごとの試験片の溶接部に $\phi 3.2$ mm 横穴及び板厚の 10% の角溝を加工したものをを用いた。Table 2 は公称屈折角 60°, 70° を用い STB-A2 ($\phi 4 \times 4$ mm) により

感度調整し、それからの人工傷のエコー高さの差を示したものである。公称屈折角 60° では、異方性鋼材の場合むしろ過大評価になっている。Table 3 は公称屈折角 60°, 70° を用い RB-4 ($\phi 3.2$ mm 横穴) により感度調整し、それからの人工傷のエコー高さの差を示したものである。この場合に最も懸念されることは、角溝傷のような探傷面に垂直な面状欠陥に対して、屈折角 60° では

コーナー反射した時の音圧反射率が低下するからである。しかし試験結果を見ると、公称屈折角 60° で異方性鋼材を探傷した時は 70° で等方性鋼材を探傷した時

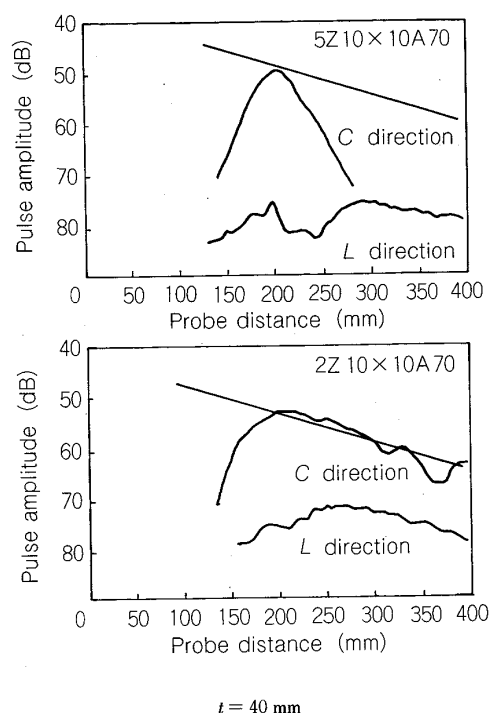


Fig. 5. Examination results in 5 MHz and 2 MHz (V-path method).

に比較して、探傷方向により最大 3 dB 程度のエコー高さの低下があるが、これは等方性鋼材においても認められるばつきの範囲内にある。両者はほぼ同等の検出能であるといえる。

このように公称屈折角 60° を使用し異方性鋼材の角溝傷を探傷した場合、等方性鋼材に比較してエコー高さの低下が小さいのは、異方性鋼材では探傷屈折角が公称屈折角からずれるためと推察される。

一方公称屈折角 70° で探傷した場合、Table 3 よりわかるように L 方向探傷では V 透過法の場合と同様大

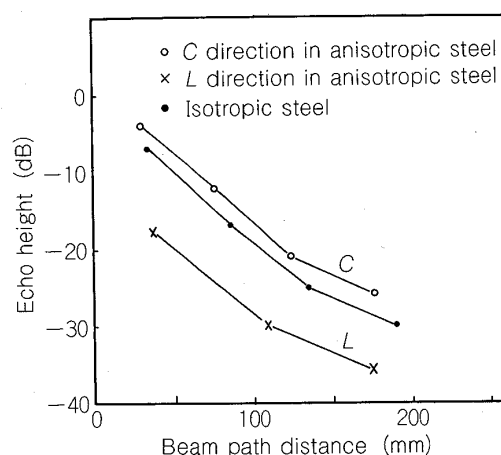
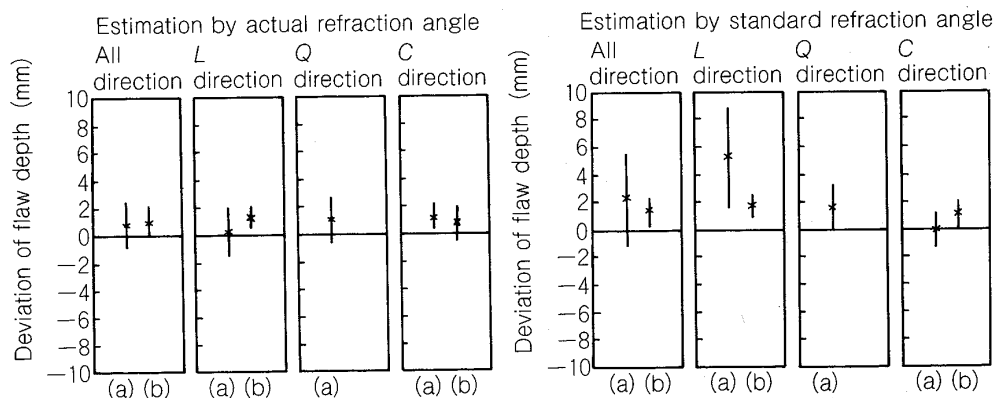


Fig. 6. Distance amplitude curves of anisotropic steel (L direction and C direction) and isotropic steel.



(a) Anisotropic steel (b) Isotropic steel
n: 200 Flaw: Side drilled hole t: 12~40 mm
Fig. 7. Accuracy of flaw location estimation.

Table 3. Echo height difference between side drilled hole or notch and RB-4 ($\phi 3.2$ mm) of each test specimen.

Flaw	Nominal refraction angle	Test specimen	Anisotropic steel			
		Isotropic steel	Averaged value of all direction	Averaged value of L direction	Averaged value of Q direction	Averaged value of C direction
$\phi 3.2$ mm side drilled hole	60° 70°	0 dB 0 dB	+1 dB -1 dB	+1 dB -8 dB	-1 dB 0 dB	+3 dB +5 dB
N10 notch	60° 70°	+2 dB +7 dB	+5 dB +6 dB	+4 dB -1 dB	+7 dB +8 dB	+4 dB +11 dB

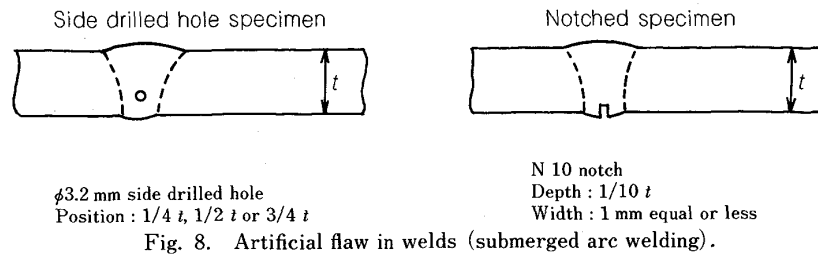


Fig. 8. Artificial flaw in welds (submerged arc welding).

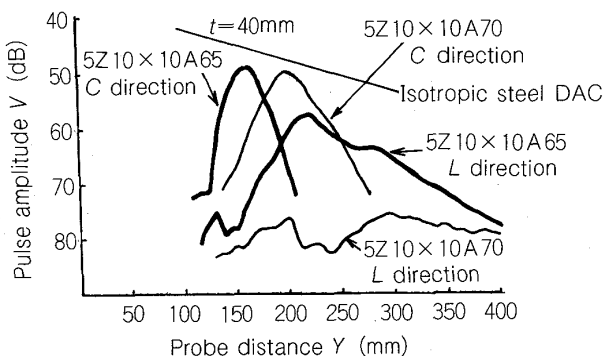


Fig. 9. An example of MA scope for anisotropic steel (V-path method).

くエコー高さが低下している。

今まで述べたことより、音響異方性の影響が顕著なのは公称屈折角 70° を使用し、 L 方向に探傷した場合である。その他の場合は屈折角の変化の影響を考慮すれば、等方性鋼材と本質的に等価な探傷が可能であることがわかった。

2.2.4 探傷不能域の低減

板厚が比較的薄い試験体の探傷においては屈折角の小さい探触子では、接近限界長さの影響により探傷不能域が拡大するため、可能な限り大きな屈折角を使用することが望まれる。従って異方性鋼材の L 方向探傷において探傷屈折角が 70° 程度となる公称屈折角 65° の探触子による探傷の可能性につき調査した。

Fig. 9 は公称屈折角 65° による V 透過法での前後走査グラフの一例であり、公称屈折角 70° の結果及び等方性鋼材での距離振幅特性も合わせて示している。 70° の L 方向探傷では透過パルス強度がかなり低下し、ピーク位置が不明確となるような鋼材であつても、 65° を使用すれば透過パルス強度の低下は小さく、ピークも明確となる。若干の感度補正を行えば十分に使用可能であり、板厚が薄い場合に探傷不能域を減少するのに有効である。

3. 原因の推定

集合組織モデルを用い上記現象の解析を行った。

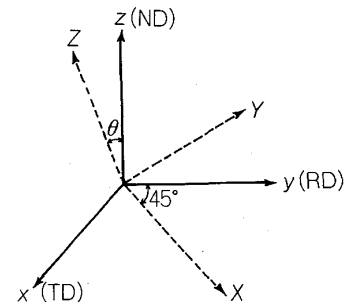


Fig. 10. Crystallite orientation used in analysis.

3.1 集合組織モデル

異方性鋼材の集合組織は、X 線回折によれば $\{ND\}$ $\langle RD \rangle$: $\{100\}$ $\langle 011 \rangle$, $\{211\}$ $\langle 011 \rangle$, $\{311\}$ $\langle 011 \rangle$ 等の $\langle RD \rangle // \langle 011 \rangle$ の回転を伴う集合組織が支配的である。そこで単結晶の $\langle 110 \rangle$ が RD (y) に一致し、 $\langle 001 \rangle$ が ND (z) から θ だけ傾いた Fig. 10 に示す離散的集合組織を考えた。ここで XYZ は単結晶に固定の、 xyz は圧延材に固定の座標軸である。この離散的集合組織が全体として確率 P で存在し、他にランダムな集合組織 (等方性) が $1-P$ の確率で存在して全体の集合組織を形成するモデルを考えた。

圧延集合組織の対象性を考慮すると Fig. 10 に示す離散的集合組織による材料軸 (x , y , z) に関するスチフネスは斜方晶系と同じものとなり、それぞれの要素は鉄の単結晶のスチフネス (C_{11} , C_{12} , C_{44}) を用いて計算できる。

さらに全体の集合組織に対する Voigt の平均 $\overline{C_{ij}}$ は離散的集合組織 (C_{ij}^k) とランダム集合組織 (C_{ij}^0) の平均として下式で表される。

$$\overline{C_{ij}} = \sum_k P_k C_{ij}^k + (1 - \sum_k P_k) C_{ij}^0 \dots \dots \dots (1)$$

同様の手順でコンプライアンスに対する Reuss の平均 $\overline{S_{ij}}$ を求め、本モデルの最終的コンプライアンスとしては $\overline{C_{ij}}$ と $\overline{S_{ij}}^{-1}$ の平均 (Hill の平均) $\overline{C_{ij}}'$ を使用した²⁾。

3.2 集合組織モデルによる解析

上述の集合組織モデルにおける材料軸に関する各方向のひずみ l_{ij} と応力 τ_{ij} の関係は上記 $\overline{C_{ij}}'$ を C_{ij} と書きかえ、さらに u , v , w を x , y , z 方向の変位とし (2) 式で示される平面波を仮定するとフックの法則及び運動方

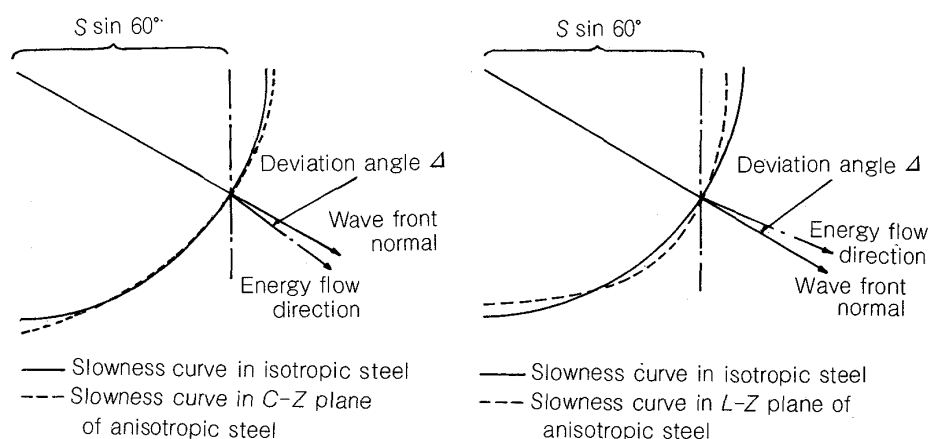


Fig. 11. Sound refraction in anisotropic steel (in the case of nominal refraction angle 60°).

程式より (3) (4) 式が得られる²⁾.

$$u, v, w = (A_x, A_y, A_z)$$

$$\exp\left\{\frac{2\pi}{\lambda} i(lx + my + nz - Vt)\right\} \dots \dots (2)$$

ここで (A_x, A_y, A_z) は方向余弦 (l, m, n) に伝播する平面波の変位ベクトル, V は位相速度, λ は波長である.

$$\begin{bmatrix} A_1 - \rho V^2 & \alpha_1 \alpha_2 & \alpha_1 \alpha_3 \\ \alpha_1 \alpha_2 & A_2 - \rho V^2 & \alpha_2 \alpha_3 \\ \alpha_1 \alpha_3 & \alpha_2 \alpha_3 & A_3 - \rho V^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = 0 \dots \dots (3)$$

ただし

$$\begin{aligned} A_1 &= C_{11} l^2 + C_{66} m^2 + C_{55} n^2 \\ A_2 &= C_{66} l^2 + C_{22} m^2 + C_{44} n^2 \\ A_3 &= C_{55} l^2 + C_{44} m^2 + C_{33} n^2 \\ \alpha_2 \alpha_3 &= (C_{23} + C_{44}) m n \\ \alpha_1 \alpha_3 &= (C_{13} + C_{55}) n l \\ \alpha_1 \alpha_2 &= (C_{12} + C_{66}) l m \end{aligned} \dots \dots (4)$$

ここで (3) 式の (A_x, A_y, A_z) が 0 でない条件より (3) 式左辺の行列式の固有値が求まり V^2 に対して三つの解が存在する. これらはおのの一つの縦波と二つの横波の音速に対応する.

ここで Z - L (x - y) 面内で Z 軸に対し角度 δ で伝播する場合を考えるとその方向余弦は $l = 0$, $m = \sin \delta$, $n = \cos \delta$ となり次の三つの解が得られる.

$$\rho V^2 = A_1 \dots \dots (5)$$

$$\rho V^2 = \frac{A_2 + A_3 \pm \sqrt{(A_2 - A_3)^2 + 4(\alpha_2 \alpha_3)^2}}{2} \dots \dots (6)$$

すなわち Z - L 面内では (5) 式で表される面直交振動成分をもつ横波と (6) 式で表される面内振動成分をもつ縦波 (音速大の方) 及び横波 (音速小の方) に分離する. 同様に Z - C 面内でも三つの波動の音速が計算できる.

ところで異方性材料では一般に弾性波のエネルギー束

の方向は波動の伝播方向 (l, m, n) とは一致しなくなり反速曲面 $S(1/V)$ が描く面) に対する法線方向と一致する²⁾. そして波動法線の方向とエネルギー束の方向のずれ Δ は下式で与えられる.

$$\tan \Delta = \frac{1}{S} \frac{dS}{d\delta} \dots \dots (7)$$

一方異方性材料での屈折は, Fig. 11 に示すように波動の伝播方向に対してスネルの法則が成立する. 従つて異方性材料中での斜角探傷時のエネルギー伝播方向は, それぞれの面内での面内振動横波に対し, まずスネルの法則により波動伝播方向を求め, さらに (7) 式より求めた Δ を加えた方向がエネルギーの伝播する方向となる.

3.3 計算結果

以上のようにして求めた一つの集合組織モデルに対する計算結果を Fig. 12, 13 に示す. Fig. 12 は Z - L 面内及び Z - C 面内での音速の角度依存性を示す. L 方向探傷及び C 方向探傷に相当する両断面では, 逆の音速特性を示し, 実際に異方性の大きい鋼材の音速特性ともよく一致することが確認できた.

Fig. 13 はこの音速特性にもとづく, 公称屈折角に対する探傷屈折角 (エネルギー伝播方向) を示す. L 方向に探傷した場合公称屈折角が大となるほど, 探傷屈折角は大きくなり, C 方向に探傷した場合は, 小さくなり実際の現象と一致している. また異方性鋼材では 70° 付近でビームの拡がり方が等方性鋼材より大となるため, 屈折時表面波成分が大となり有効に材料中に入射しないのが, 70° での見掛けの減衰が大きくなる理由と考えられる.

4. 異方性鋼材の探傷方法

前述の結果から, 異方性鋼材の溶接部斜角探傷試験は, 次の方法で行うことが望ましい.

(1) 公称屈折角 70° の探触子を使用せず, 60° (探傷

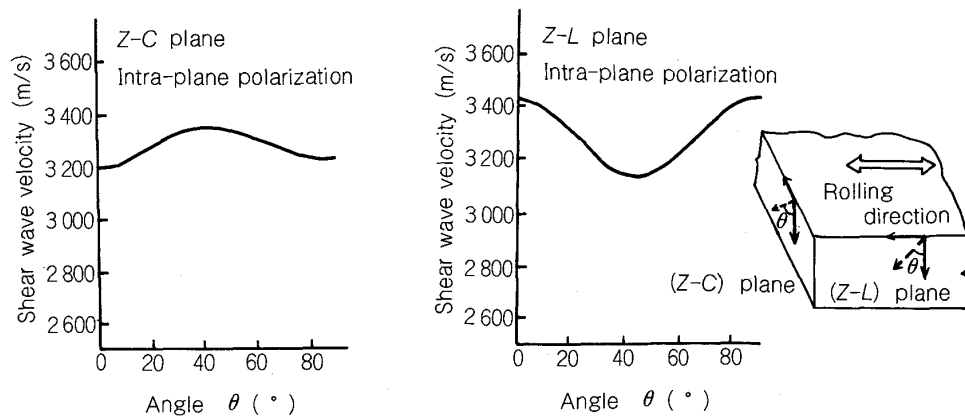


Fig. 12. Calculated results of sound velocity to refraction angle.

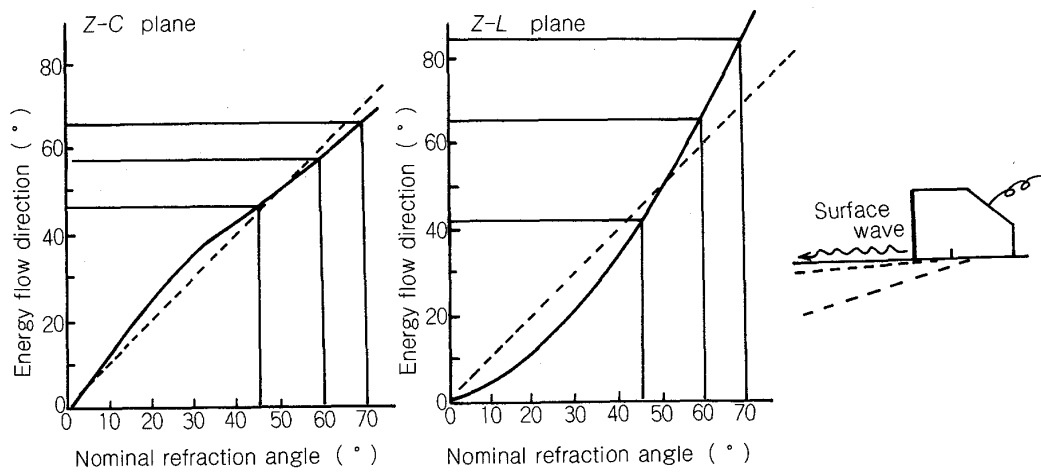
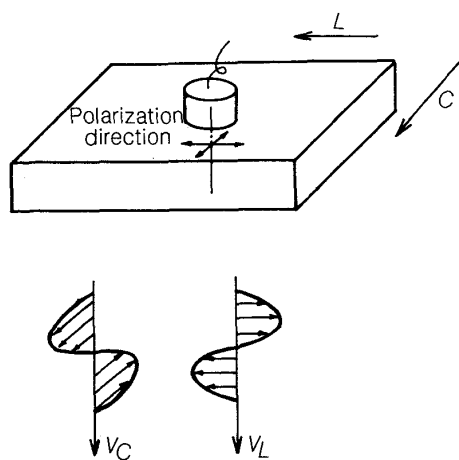
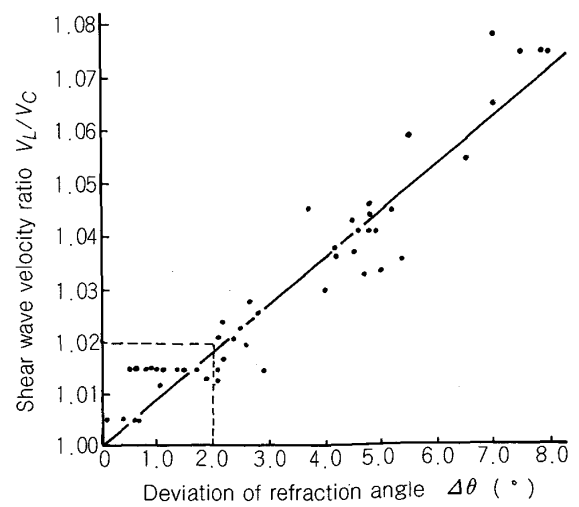


Fig. 13. Calculated results of energy flow direction to nominal refraction angle.



$$\text{Velocity ratio} = \frac{V_L}{V_C}$$

Fig. 14. Measurement of the ultrasonic wave velocity ratio by shear wave method.



Nominal angle : 60°

Fig. 15. Relation between wave velocity ratio and refraction angle deviation.

部位により 60° の使用が困難な場合は 65° まで) を使用する。

(2) 試験体または試験体と超音波特性の近似した鋼材で製作した対比試験片 (RB-4) を用いて探傷感度を調整する。

(3) V透過法で求めた探傷方向での探傷屈折角を用いて欠陥位置の推定を行う。

この場合、音響異方性の程度は Fig. 2 に示す V透過法による屈折角度差 (L 方向の探傷屈折角 θ_L と、 C 方向による探傷屈折角 θ_C との差 $\Delta\theta$) によるか Fig. 14 に示すように板厚方向に横波を伝播させた場合の音速比 (横波の振動方向を L 方向にしたときの音速 V_L と、 C 方向にしたときの音速 V_C の比、 ΔV) によって求められる。なお $\Delta\theta$ と ΔV の間には、Fig. 15 に示すような相関性が得られることを確認した。

5. 自然欠陥材での超音波探傷試験

ここでは溶接部に人為的に溶接欠陥を発生させた平板溶接試験体及び海洋構造物モデル試験体を製作して上記の方法による実構造物溶接部での欠陥検出能の確認を行った。

5.1 自然欠陥材での超音波探傷試験

異方性鋼材溶接部中の自然欠陥について公称屈折角を 60° 、 65° で探傷した場合と、それら自然欠陥を含む鋼溶接部を焼ならしし、音響異方性を軽減した後公称屈折角 70° で探傷した場合を比較した。Fig. 16~19 は欠陥エコー高さ及び欠陥指示長さについての比較結果である。欠陥エコー高さは両者間に多少の差が認められるが、欠陥に対する超音波の入射角度に両者間で差があることを考慮すると検出能はほぼ同等と言える。また欠陥指示

長さもよく一致している。

さらに Fig. 20 に示す方法で求めた推定欠陥位置と、切断観察によつて実測した欠陥位置のずれ (Δy , Δd) を Fig. 21~23 に示す。推定欠陥位置と実測欠陥位置とのずれは、いずれの方法でも同程度であることから等方性鋼材における場合と同程度の精度で欠陥位置の推定が可能なが確認された。なお Photo. 1 に溶接部の自然欠陥を切断し観察した一例を示す。

以上のように平板溶接試験体を用いた溶接部の斜角探

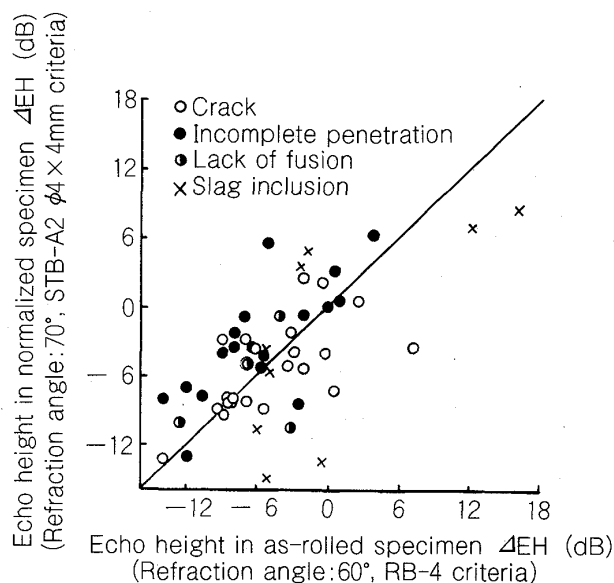


Fig. 17. Relation of the estimated flaw echo height between isotropic steel and anisotropic steel.

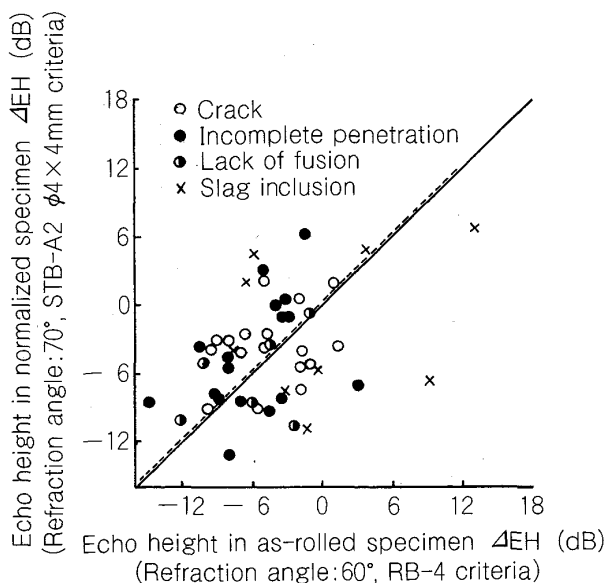


Fig. 16. Relation of the estimated flaw echo height between isotropic steel and anisotropic steel.

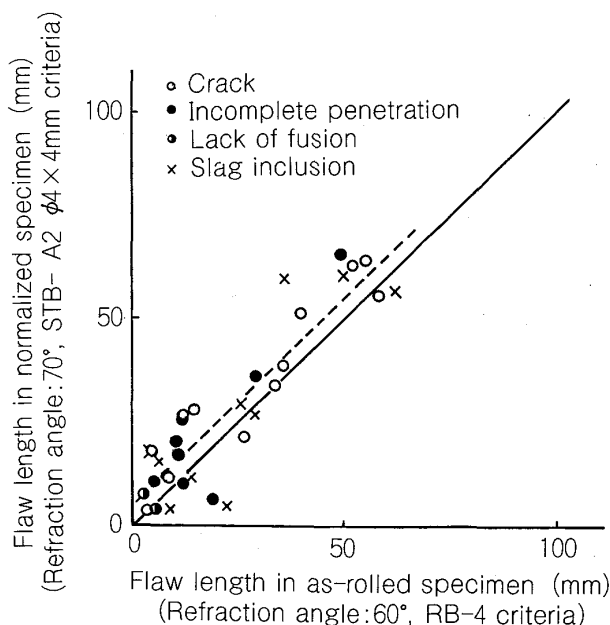


Fig. 18. Relation of flaw length between isotropic steel and anisotropic steel.

傷試験において、異方性鋼材も、4項で示した方法を用いることによって欠陥検出能及び欠陥位置推定精度ともに、従来の斜角探傷方法による等方性鋼材の探傷と同レベルの結果が得られることがわかった。

5.2 海洋構造物モデル試験体での超音波探傷試験

Fig. 24 に示す海洋構造物モデル試験体（以下モデル試験体とする）での欠陥検出特性を調査した。Table 4 に示すように、支管相当部材は板厚 19 mm, 異方性の

程度は軽, 中, 重の 3 鋼種, また主管相当部材は板厚 30 mm, 異方性は中程度の鋼材を使用し, いずれも管軸方向が L 方向となるようにした。

モデル試験体は 6 体, Fig. 24 に示す A, B, C 3 箇所 (Heel, Side, Toe 部) に人為的に自然欠陥 (ルート溶込み不良 (IP) 開先面融合不良 (LF)) を発生させた。

欠陥を評価するための準拠規格は, JIS Z 3060-83, 3061-83, API RP2X-80 及び ASME Sec. V Art. 5 と

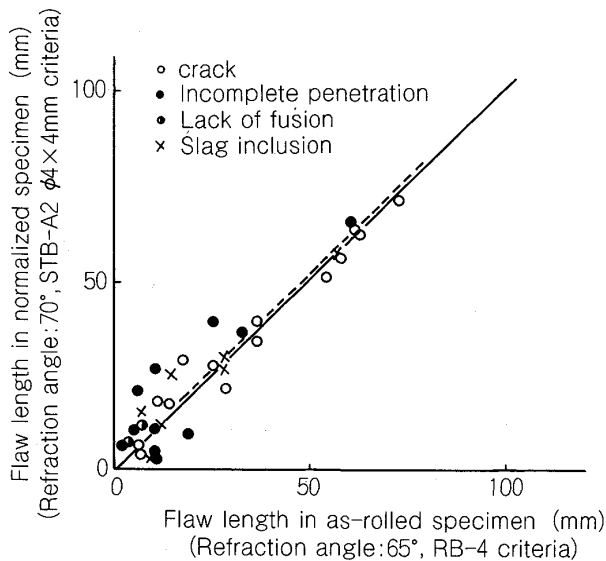
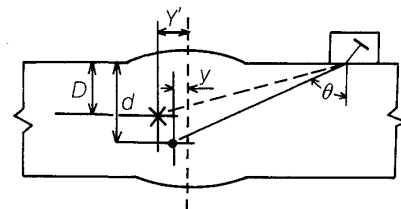


Fig. 19. Relation of flaw length between isotropic steel and anisotropic steel.

Table 4. Steel plate used for mock offshore structure.

Test sample notation	Degree of anisotropy	Wall thickness (mm)	Ultrasonic wave velocity ratio	Applicable part in offshore construction
SA	Heavy	19.0	1.081	Brace
SC	Light	19.0	1.008	Brace
SB	Medium	19.0	1.039	Brace
SD	Medium	30.0	1.048	Leg



× Estimated flaw location ● Actual flaw location
 $\Delta y = y - Y'$ $\Delta d = d - D$

Fig. 20. Evaluation of the deviation between estimated flaw location and actual flaw location.

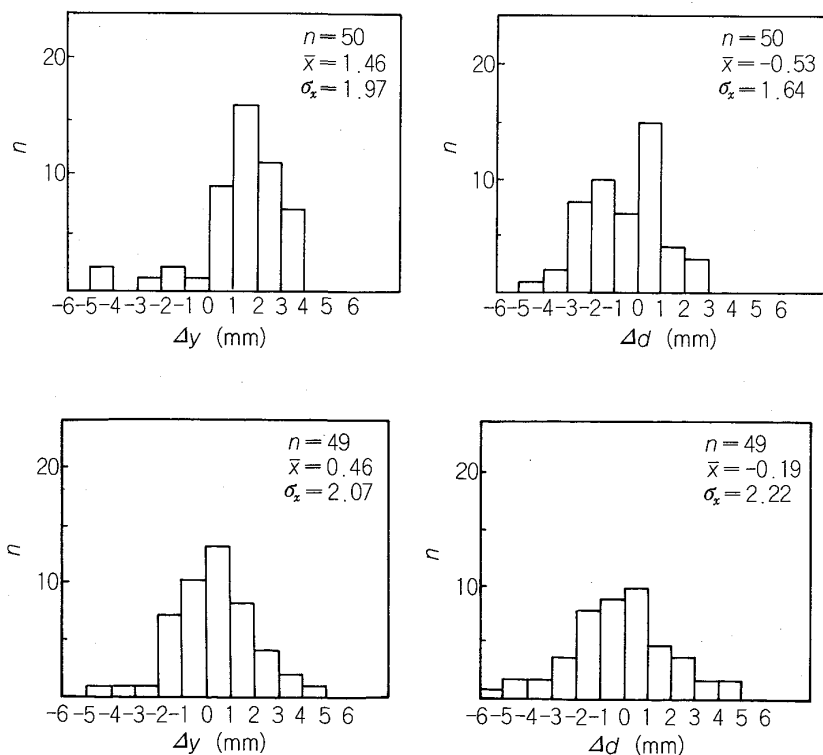


Fig. 21. Deviation between estimated flaw location and actual flaw location (60°).

Fig. 22. Deviation between estimated flaw location and actual flaw location (65°).

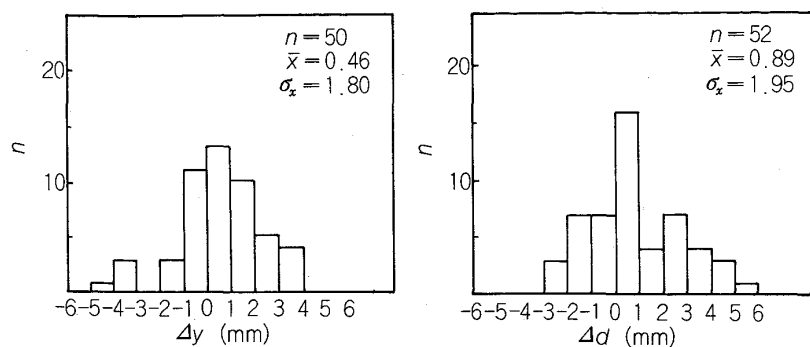


Fig. 23. Deviation between estimated flaw location and actual flaw location (70°).

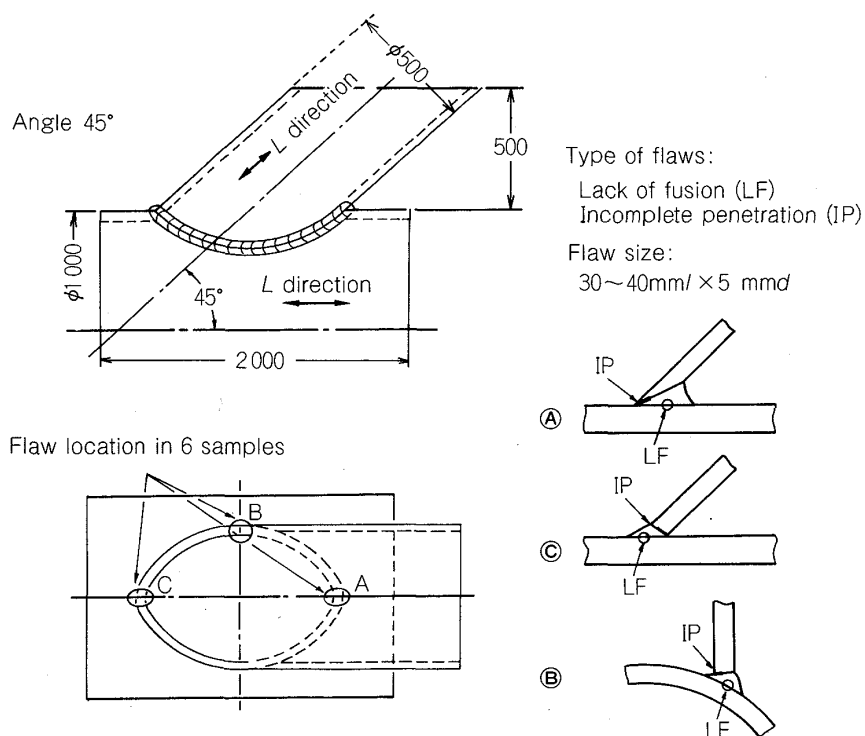


Fig. 24. Mock up sample of offshore structure.

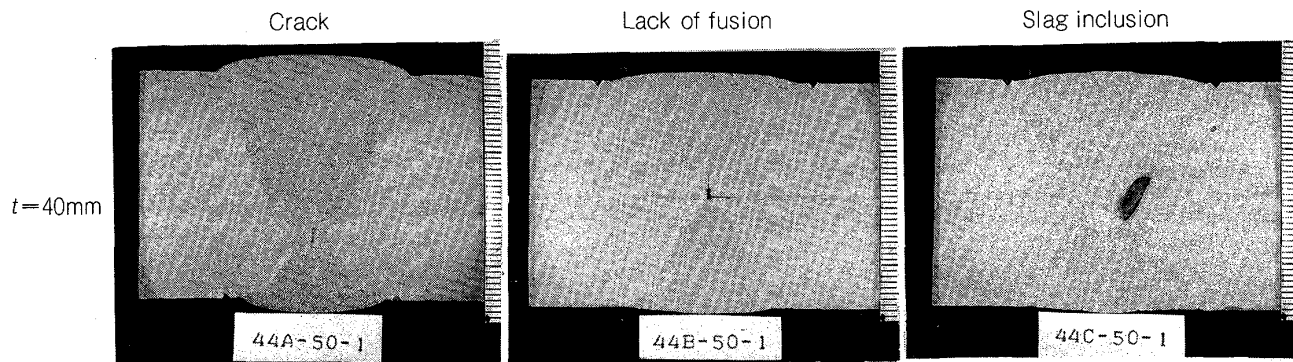


Photo. 1. Examples of cross section of natural flaw.

Table 5. Detectability of flaws.

Test sample Type & location of natural flaw Refrac- tion angle	SA			SB			SC			SA			SB			SC		
	LF			LF			LF			IP			IP			IP		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
45°	⊙	X	—	⊙	▲	⊙	X	X	⊙	—	—	—	—	▲	—	X	⊙	⊙
60°	X	○	⊙	⊙	○	⊙	⊙	⊙	⊙	○	⊙	⊙	X	⊙	⊙	△	⊙	⊙
65°	X	⊙	⊙	▲	⊙	○	⊙	⊙	⊙	⊙	○	○	X	⊙	○	⊙	⊙	⊙
70°	▲	▲	—	▲	▲	○	▲	○	○	—	—	—	○	▲	—	⊙	⊙	⊙
Examination from leg pipe	—	⊙	—	▲	⊙	—	—	—	—	—	—	—	⊙	—	—	—	—	—

Notations:

⊙; Tested by two groups, both detected

○; Tested by a group, detected

△; Tested by two groups, detected by only one

▲; Tested by a group, un-detected

X; Tested by two groups, un-detected neither

—; No test

Test frequency : 5 MHz Reference block : RB-4 Sensitivity : L cut method

Table 6. Accuracy of flaw length in accordance with applied specification.

Flaw length measuring technique	Mock up sample of offshore structure (Δl)	Butt-welded sample (Δl)
RB-4 (L cut method)	$\bar{x} = -5.6$ mm $\sigma = 11.8$	$\bar{x} = -10.4$ mm $\sigma = 15.8$
STB-A2 (L cut method)	$\bar{x} = +6.9$ mm $\sigma = 8.1$	$\bar{x} = +0.8$ mm $\sigma = 13.0$
API (6 dB drop method)	$\bar{x} = -15.7$ mm $\sigma = 12.4$	$\bar{x} = -5.1$ mm $\sigma = 10.9$

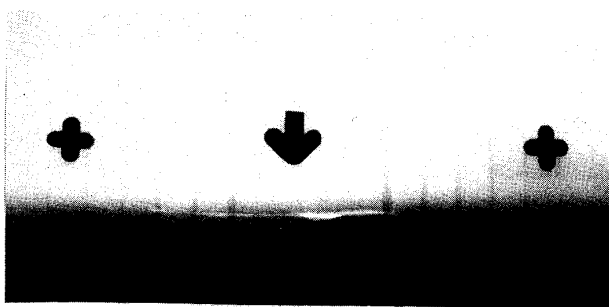
 Δl = Ultrasonic indication length - X-rays indication length

Photo. 2. Radiograph of incomplete penetration at location B in light anisotropy leg pipe.

した。

Table 5 に欠陥の検出結果を示す。異方性中度の支管 A 部にあるルート溶込み不良及び重度の支管 B 部にある開先面融合不良を除いて、モデル試験体中の自然欠陥は公称屈折角 45°、60° 及び 65° の斜角探触子を使用すれば、支管の異方性の程度にかかわらず明確に検出できた。特に、A 部の開先面融合不良に対しては公称屈折角 65° の斜角探触子の使用が有効であつた。同一欠陥について

Table 7. Accuracy of flaw location.

Position difference	Mock up sample of offshore structure	Butt-welded sample
Δy	$\bar{x} = -0.13$ mm $\sigma = 1.7$ mm	$\bar{x} = 1.1$ mm $\sigma = 1.3$ mm
Δd	$\bar{x} = -0.18$ mm $\sigma = 2.3$ mm	$\bar{x} = -0.7$ mm $\sigma = 1.5$ mm

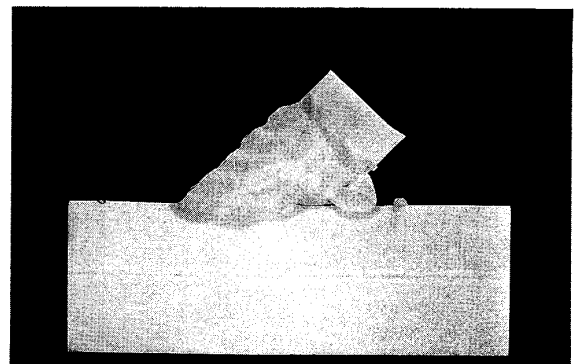
 Δy = Ultrasonic estimated distance - Actual distance Δd = Ultrasonic estimated depth - Actual depth

Photo. 3. Cross section of incomplete penetration at location A in medium anisotropy leg pipe.

の 2 社間のエコー高きの相違は最大 4dB であつた。

各準拠規格に従つて求めた欠陥指示長さ及び X 線透過試験で得られたそれとの関係を Table 6 に示す。Photo. 2 は X 線透過写真の代表例である。STB-A2 感度の L 線 Cut 法での欠陥指示長さは長目に、一方 RB-4 感度の L 線 Cut 法および API の 6 dB Down 法では短目に測定されていることがわかる。なお Table 6 には前項の異方性鋼材での平板突合せ溶接部の自然欠陥

に対する同様の欠陥指示長さの関係を併示したが、モデル試験体での長さ測定精度は、平板突合せ溶接試験体の場合と同様と言える。一方欠陥指示長さに関する 2 社間の相違は、探傷時の姿勢が窮屈な A,B 部 (Fig. 24 参照) でも 18 mm 以内であり、C 部 (Fig. 24 参照) では 8 mm 以内であった。

Table 7 は探傷試験での欠陥推定位置と欠陥部切断後に実測した位置との関係を、Photo. 3 に欠陥の横断面写真の 1 例を示す。この推定には、A 及び C 部欠陥には L 方向の探傷屈折角を、B 部欠陥には Q 方向の探傷屈折角を用いて行った。探傷屈折角の使用により欠陥位置を精度良く推定できることが分かる。2 社間の欠陥推定位置の相違は、深さ、水平方向ともに 2 mm 以内に納まるものであった。

6. 結 言

日本鉄鋼協会共同研究会品質管理部会非破壊検査小委員会は、TMCP 鋼材の一部に認められる音響異方性とこれら溶接部の超音波斜角探傷における問題点につき、共同実験等を通じて鋭意、その解決にあたつてきた。各製造所圧延条件を包含する膨大な材料特性の集約、異方性と超音波の伝播挙動に関する原因解明、現行斜角探傷法への影響度調査と代替すべき探傷法の立案、さらには実構造物への適用性についての実証試験等々、活動は多岐にわたり、その全容を把握するものであると言える。結果は以下である。

(1) 異方性鋼材では、圧延方向に対する探傷方向によつて、異方性の程度に応じて屈折角が変化する。また、公称屈折角 70° を使用し、主圧延方向に探傷した時、感度が異常に低下する場合がある (異方性鋼材での現象)。

(2) 異方性鋼材中での超音波の伝播特性は、斜方晶モデルによつて定性的に解明できた (現象の原因推定)。

(3) TMCP 鋼材であつても従前の探傷法が適用でき

るものがあり、その判定は主圧延方向とこれに垂直方向での屈折角度差あるいは音速比によつて測定する。すなわち、公称屈折角 60° の斜角探触子による屈折角度差が 2° あるいは音速比が 1.02 を超える場合には異方性を有すると判定する。当該鋼材には次に示す方法により探傷することを推奨する (異方性の検定)。

(4) 使用する公称屈折角を最大 65° までとすれば、本質的に等方性鋼材と同等な探傷が可能である。ただし、欠陥の位置推定には、その探傷方向での屈折角の変化を考慮し、探傷屈折角を用いる必要がある (探傷方法)。

(5) 異方性鋼材の平板突合せ溶接試験体及び海洋構造物モデル試験体での溶接部の自然欠陥に対し、提示した斜角探傷試験方法の適用結果は、欠陥検出能及び位置推定精度ともに、従来法による等方性鋼材の探傷と同等であることが確認できた (探傷方法の実証)。

これらの活動成果は、1986 年制定をみた (社) 日本非破壊検査協会規格、NDIS 2413 の主幹をなすものであり、また現在審議中の JIS Z 3060 改訂案に取り込まれている。なお、当活動は広範囲にわたる調査であつたとはいえ、必ずしもすべての構造物事例を踏査するものではない。この点本報告は、各方面での情報、ご意見を期待すること大であることを添えたい。

文 献

- 1) 森山 康: 新しい製造法による鋼材 (TMCP 鋼) の溶接構造物への適用に関するシンポジウム (日本造船学会編) (1984), p. 1
- 2) M. J. P. MUSGRAVE 著, 大森啓一訳: 結晶音響学 (1978) [内田老鶴圃新社]
- 3) D. E. BRAY and D. M. EGGLE: Metal Science, 15 (1981) Nov. -Dec.
- 4) 星本健一, 松本庄次郎, 木村勝美: 非破壊検査, 32 (1983), p. 736
- 5) 仙田富男, 広瀬貞雄, 裏垣 博: 非破壊検査協会関西支部研究発表会講演概要 (1977), p. 29
- 6) 富士 岳: 非破壊検査協会 第 2 分科会 資料 No. 2934 (1982)