

### 3 放射線透過試験と超音波探傷試験方法の特徴

#### (1) 放射線透過試験 (RT)

放射線透過試験は図3-1aに示すように、板継ぎ溶接継手の板厚方向にX線を照射するため、照射方向に奥行のある欠陥はX線エネルギーの吸収によりフィルム上の欠陥像の濃度差が大きくなり鮮明な像を得ることができる。従ってブローホール (BH) および板厚断面方向の溶込み不良 (IP)、高温割れ (LP) は比較的鮮明な欠陥像が得られ、その平面投影像の欠陥識別も容易に判別できる。一方、板表面に平行な欠陥および板厚方向に傾斜した面状欠陥 (面状のスラグ巻込みおよび融合不良) はその厚さおよび角度によって異なるが、一般に吸収エネルギーが小さくなりフィルム上の濃度差が小さくなるため欠陥像の判別が難しくなる。

放射線透過試験における欠陥像はフィルム上の欠陥像の濃度差 $\Delta D$ と識別限界濃度差 $\Delta D_{min}$ の関係が $|\Delta D| \geq |\Delta D_{min}|$ を満足する場合に識別される。

従ってRTの場合透過フィルムの濃度 (D) と最小欠陥 ( $W\phi$ ) の濃度差 $\Delta D$ 、および $W\phi$ の欠陥の識別限界濃度差 $\Delta D_{min}$ の関係によって欠陥検出度が決定される。

図3-2 にRTフィルム像の幅 ( $W\phi$ ) と識別限界濃度差 ( $\Delta D_{min}$ ) の関係を示した。

JIS Z 3104では図3-3 に示す透過度計を試験体の上に置き、撮影することが義務づけられている。普通級の透過フィルムは継手の材厚 (板厚+ $\beta$ - $t$ 余盛高さ) の2%より細い針金の像が識別できること、透過フィルムの濃度Dが $1 < D < 3.5$  (材厚50mm以下) となることおよび余盛を考慮した階調計の濃度差が規定値を満足すること (材厚20mm以下) が透過フィルムの具備すべき条件となっている。即ち、RTでは記録となる透過フィルム1枚毎に階調計と透過度計を置き、材厚に応じた像質が得られているかどうかを確認されており、透過フィルム毎の検出レベルの同一性と信頼性を保証している。

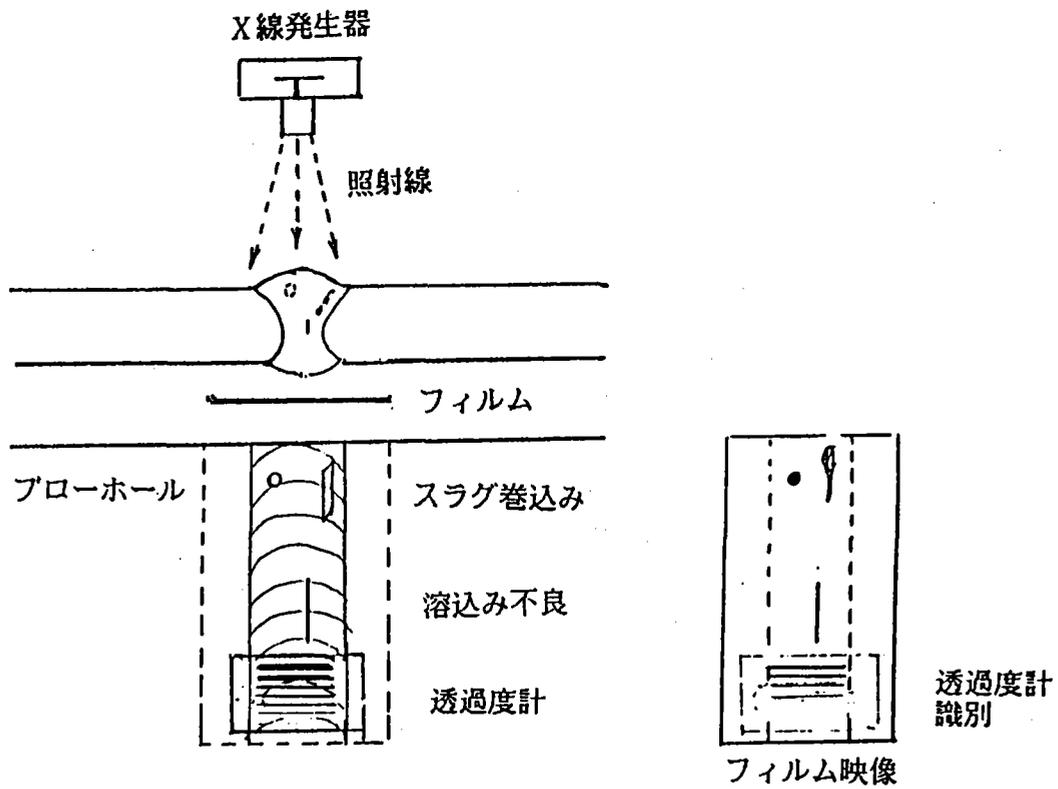
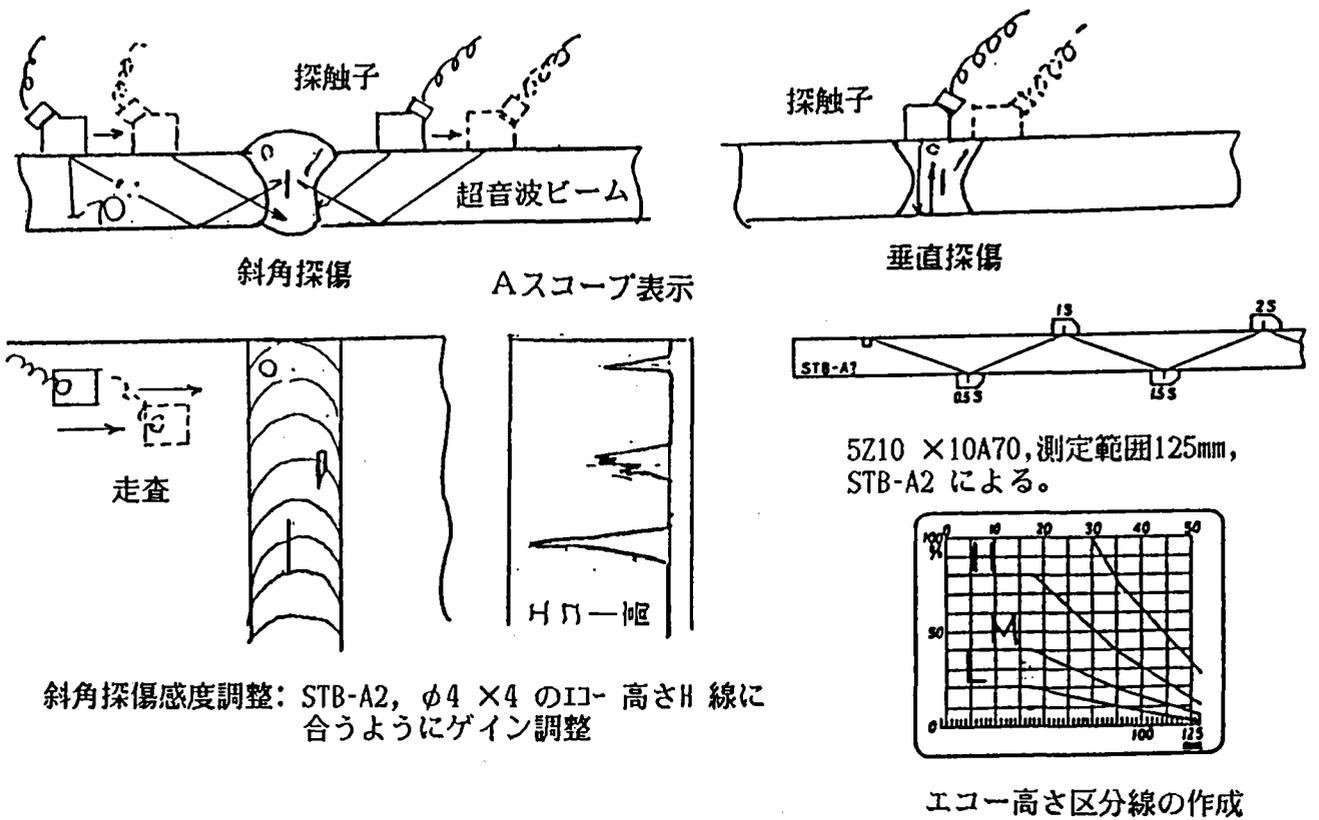


図3-1a 放射線透過試験(JIS Z 3104)の概要



斜角探傷感度調整: STB-A2,  $\phi 4 \times 4$  のII- 高さH 線に合うようにゲイン調整

図3-1b 超音波探傷試験(JIS Z 3060)の概要

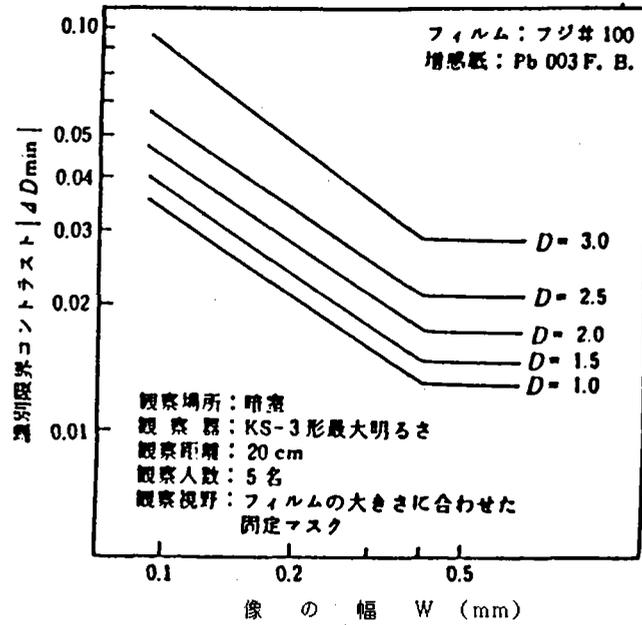


図3-2 RTフィルム像の幅と識別限界濃度差の関係

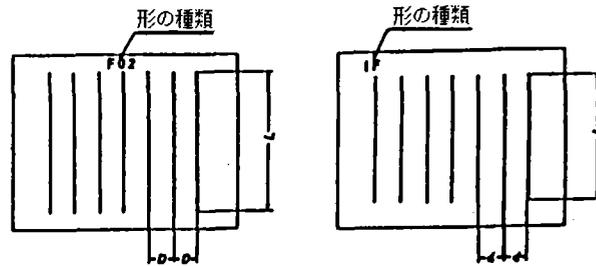


表 2

単位 mm

形の種類	使用材厚範囲		線径の系列	線の間隔 (D)	線 の 長さ (L)
	普通級	特級			
F 02	20 以下	30 以下	0.10 0.125 0.16 0.20 0.25 0.32 0.40	3	40
F 04	10~40	15~60	0.20 0.25 0.32 0.40 0.50 0.64 0.80	4	40
F 08	20~80	30~130	0.40 0.50 0.64 0.80 1.00 1.25 1.60	6	60
F 16	40~160	60~300	0.80 1.00 1.25 1.60 2.00 2.50 3.20	10	60
F 32	80~320	130~500	1.60 2.00 2.50 3.20 4.00 5.00 6.40	15	60
寸法の許容差			JIS G 3522 に定められた値または±5%のいずれか小さい方の値	±15%	±1

表 3

単位 mm

形の種類	使用材厚範囲		線径の系列	線の間隔 (D)	線 の 長さ (L)
	普通級	特級			
1 F	20 以下	30 以下	0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4	2~5	35
2 F	10~50	15~70	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0	3~6	40
3 F	40~100	60~190	0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0	5~7	45
4 F	80~200	70~350	1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0	5~8	50

図3-3 透過度計

## (2) 超音波探傷試験 (UT)

超音波探傷試験は超音波パルスの反射および透過に関する情報をAスコープ表示探傷器を用いて欠陥を検出する試験であり、放射線を用いていないので人体に対する障害の恐れのない試験法である。

通常の超音波パルス反射式Aスコープ表示探傷器から得られる欠陥に対する情報は

- ① Aスコープ上で得られる欠陥等からのエコー信号 (波高値)  $H$
- ② Aスコープ上で得られる欠陥等からの信号の時間差 (ビーム路程)  $W$
- ③ Aスコープ上で得られる欠陥からのエコー立ち上りから信号の消滅等までの超音波探傷子の移動距離  $d$

等があり、これらの情報を組合せて、欠陥の大きさ、位置および形状等を推定している。

超音波探傷試験では超音波パルスを板表面から垂直に入射する垂直探傷法と板厚方向に $45, 60, 70^\circ$ 等の角度を持って入射する斜角探傷法がある。

図3-1bに板継ぎ溶接部の垂直および斜角超音波探傷試験の一般的な要領を示した。垂直探傷法はRTと同じ板厚方向に入射するので、欠陥の見方はRTの平面透過像と同じとなる。一方、斜角探傷法は超音波パルスが鋼板の側面から入射されるため、欠陥を側面から見ることになり、RTおよびUT垂直探傷の平面欠陥像とは異なる形状を示すことになると思われる。

図3-4に板厚直角方向に傾きを持ったルートフェイス面の溶込み不良欠陥 (面状欠陥) の平面透過像 (RTと垂直UT) と側面透過像 (斜角UT) のイメージを示した。

一般に継手のビード直角方向の静的引張強度は欠陥による側面透過像の欠損率によって影響を受け、応力方向に平行な平面透過像の幅は直接的には強度に関係しないと考えられる。放射線透過試験 (RT) においては、溶込み不良等の細長面状欠陥の等級分類は欠陥の種類および長さによって決まるが、平面透過像では板厚方向の欠陥の高さ (図3-4の $t$ ) は考慮されていない。

一方、超音波探傷試験 (UT) では超音波パルスのエコー高さが欠陥の幅または高さ (同図の $t$ ) と欠陥の板厚方向の傾き (同図の $\theta$ ) によって変化し、間接的に等級分類に影響する。

超音波探傷試験では極厚溶接継手において溶接の高能率化、省力化を図るためI開先またはJ開先の狭開先溶接法を採用した場合の発生し易い欠陥である板面に直角な融合不良または溶込み不良等の細長面状欠陥に対してJIS Z 3060(1983)付属書3のタンデム斜角探

傷試験が有効であると言われている。タンデム斜角探傷法では欠陥の高さが比較的正確に評価できるので、同付属書では継手の合否判定は各欠陥断面積（欠陥高と長さの積）総和に基づいて検討することが望ましいとしている。

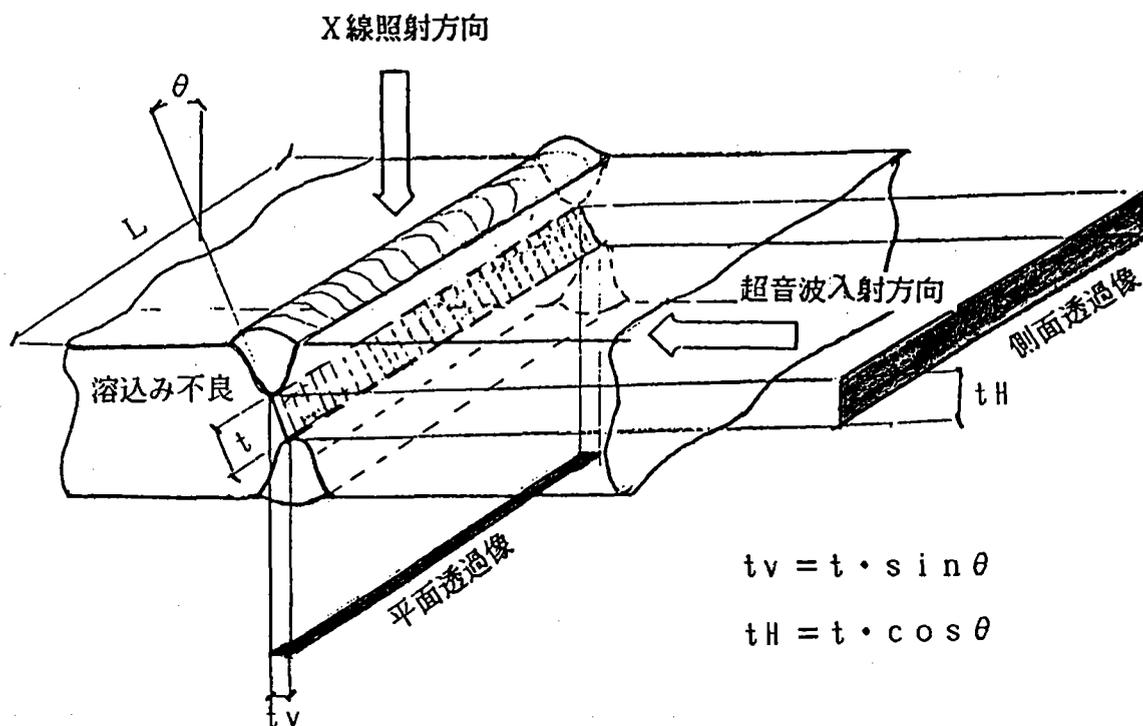


図3-4 RTとUTの探傷方向と欠陥の透過像

板継ぎ溶接継手の超音波探傷試験方法として垂直探傷法か、斜角探傷かまたはタンデム斜角探傷法かについては議論のあるところである。垂直探傷法は従来RTと同様平面像として欠陥を捕らえるので、非常に分かり易くまた自動探傷も簡便になるが溶接ビードの余盛仕上げが必要となる。板継ぎ溶接工程（開先切断から溶接、非破壊検査、角変形機械矯正までの広い意味での工程）に関するアンケート調査によると余盛仕上げが必要な場合でも非破壊検査後に余盛仕上げを行うと答えた工場が13工場中9工場であった。

一般には仕上げが必要でない継手が大半であり、超音波探傷試験のために余盛仕上げ作業を負荷することは、逆に板継ぎ工程の効率化を著しく阻害することになり、不可能であろう。

サブマージアーク溶接板継ぎ継手を余盛状態で垂直探傷する方法として、図3-5 に示す局部水浸法が考えられ、簡易ゴム膜水槽自動走査映像方式で試験探傷を行ったが、余盛の影響で表面不感帯が8mm 以上になりかつノイズ虚像が多く全く信頼性が得られなかった。

また、タンデム斜角探傷法は探傷板面に直角な面状欠陥には非常に有効であるが欠陥が探傷板面の直角面から5° 傾くだけでエコー高さは-6dbとなり、溶接金属内の欠陥または5° 以上傾いた開先面の融合不良に対して有効ではなくなるだけでなく、図3-6 に示すように母材表面近傍では余盛と探触子の接近限界長さにより、また母材裏面近傍では送受信探触子有限の入射点間距離により探傷不能領域が発生し、屈折角45° 探触子では板厚40mm 程度で探傷断面の約1/2 が探傷不能となる。〔JIS Z 3060(1983)付属書3〕

これらの観点から板継ぎ溶接継手の超音波探傷試験は斜角探傷法を基準とし、必要に応じて複数探触子を用いた自動超音波探傷試験システムが妥当であろう。

自動超音波探傷試験システムは焦点型探触子を用いた場合を除いて、一般的にはJIS Z 3060の斜角探傷試験（手動走査）による自動走査とし、走査制御と連動してAスコープエコー高さデータをコンピュータで解析して記録として出力するものであり、欠陥の検出能力は基本的にJIS Z 3060の斜角探傷と同等である。従って、自動超音波探傷試験は自動探傷だからといって、優秀なUT技術者が細心の注意を持って行った探傷結果を超えるものではなく、個人的技量の差を排除し、継続的に一定レベルの信頼性が確保でき、直接的に記録が残せるようにしたものである。JIS Z 3060の解説に記載された基礎データが、自動超音波斜角探傷試験の基本となる。

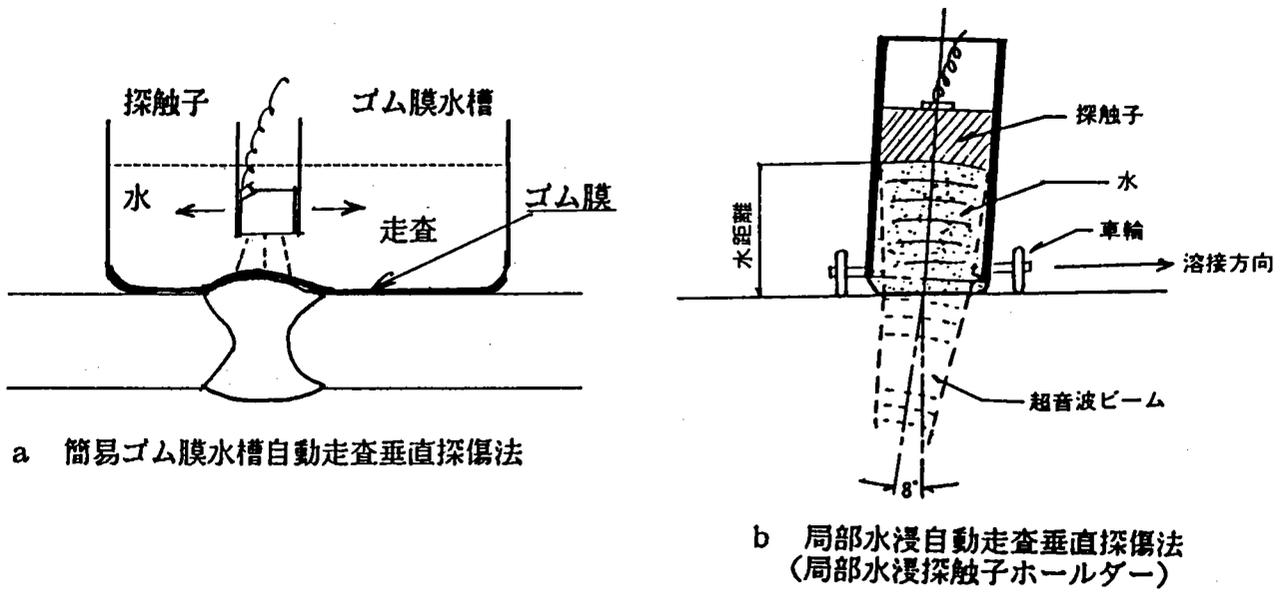


図3-5 局部水浸探触方法

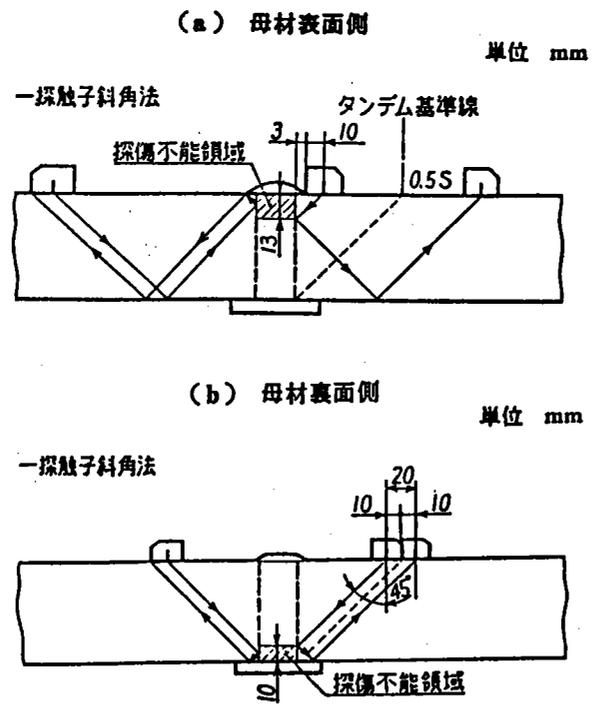


図3-6 タンデム探傷法における探傷不能領域 (JIS Z 3060(1983) 解説図付3.4)

図3-7 に同解説に示された斜角探傷における自然欠陥とエコー高さの関係を示した。屈折角70°の探触子を用いた斜角探傷ではL検出レベルにおいて小さなブローホールおよび小さなスラグ巻込みを除いた自然溶接欠陥の全てが検出されることになる。図3-8 に同解説に記載されているブローホール等の短い欠陥の実長と指示長さの関係を示した。これらのデータは実欠陥の長さが2～16mm程度であり、図3-7と図3-8から推定すると小さいブローホール等とは2～4mm程度のことを指すと思われる。

仮にこの欠陥を放射線透過試験における第1種欠陥3～4mmとすると、図3-7の試験板厚を25mmとしても放射線透過試験等級分類の2級となる。また、超音波探傷試験では4mm以下のブローホール等の短い欠陥は検出できない場合があるが、これらの欠陥が放射線透過試験の第1種または第2種のスラグ巻込みであるとしても板厚12mm以上では単独欠陥の場合、少なくとも2級以上の品質を持った継手と推定され、4mm以下の短い欠陥が超音波探傷試験で検出されないことは、継手品質の立場から致命的なことではないと思われる。

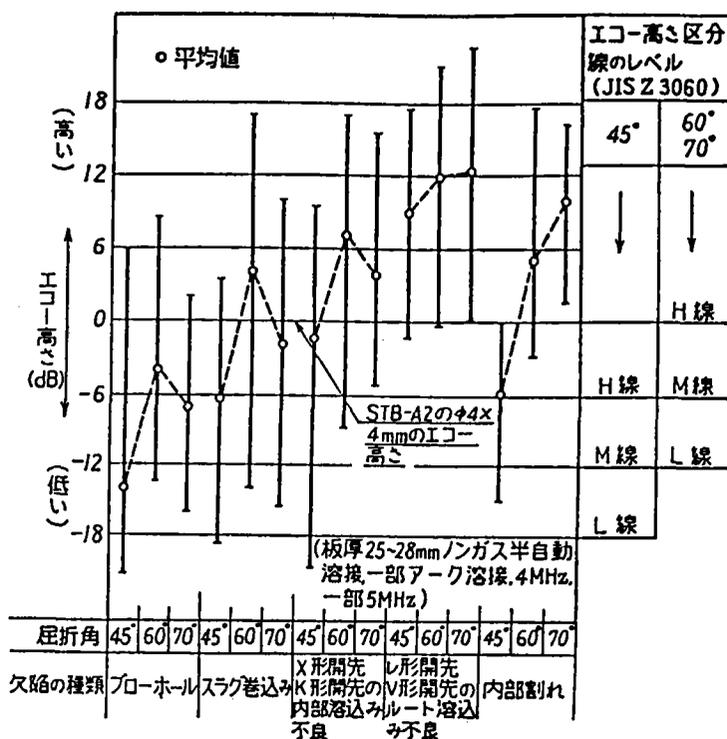


図3-7 溶接自然欠陥とエコー高さ (JIS Z 3060(1988) 解説図17)

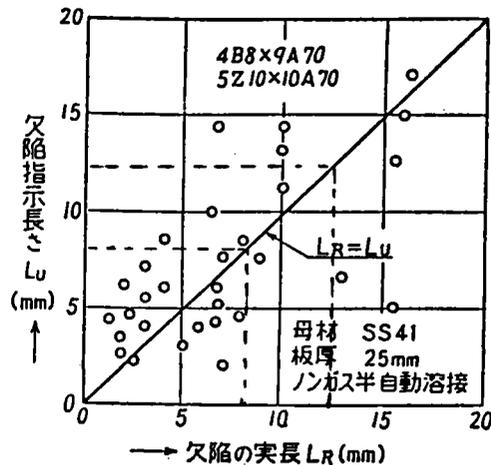


図3-8 ブローホール等（短い欠陥）の欠陥実長と欠陥指示長さの関係  
 (JIS Z 3060(1988)解説図27)

図3-9 および図3-10に内部溶込み不良（長い欠陥）およびルート溶込み不良の欠陥の実長と欠陥指示長さの関係を示した。内部溶込み不良等の比較的長い欠陥例えば融合不良、大きなスラグ巻込み等は探傷板面に対して複雑な傾きを持っているが、直接法、1回反射法および溶接ビード両側からの探傷等を行えばその長さは比較的欠陥実長と良く一致している。これらの欠陥の検出限界もブローホール等と同様に4～5 mm程度となろう。しかしながらこれらの欠陥は欠陥の開き（間隙）と欠陥の傾きによって、RT、UTのいずれの場合も比較的長いものでも、識別されない場合があることに留意すべきであろう。一方、ルートフェイスの溶込み不良およびサブマージアーク溶接特有の高温割れ等探傷板面に垂直な面状欠陥は図3-10で明らかのように比較的短い欠陥も検出しているが、欠陥指示長さは欠陥実長に比べて1.5～2倍程度に過大評価される。

UTの欠陥検出はRTと同様、欠陥の形状、欠陥の傾きおよび欠陥の幅、奥行（間隙）等と探触子の屈折角および超音波ビームの入射方向等により影響される。

従って板継ぎ溶接欠陥の発生し易い欠陥と継手強度等に及ぼす影響等を考慮し、重大欠陥を見逃さない探傷方法および探傷条件を確立することが必要となる。

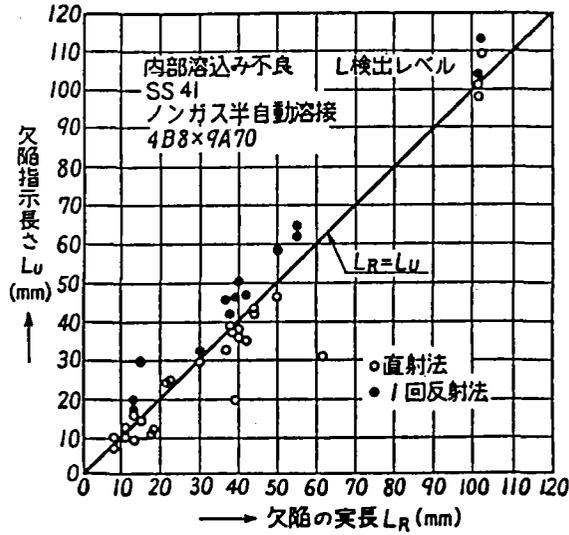


図3-9 内部溶込み不良（長い欠陥）の欠陥実長と欠陥指示長さの関係  
(JIS Z 3060(1988) 解説図26)

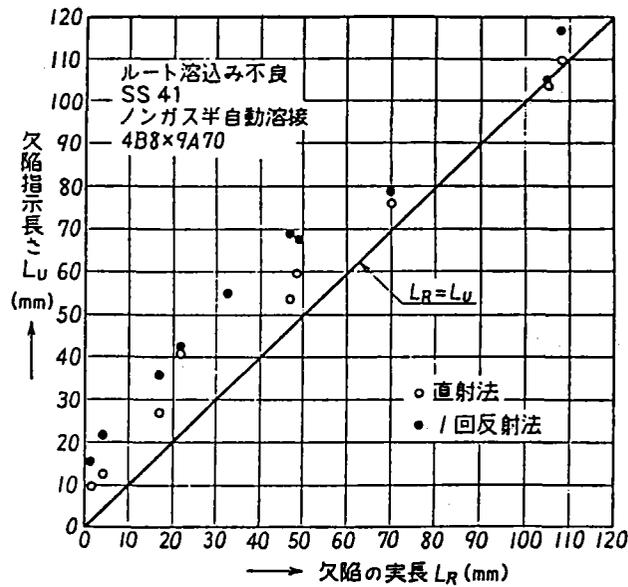


図3-10 ルート溶込み不良の欠陥実長と欠陥指示長さの関係  
(JIS Z 3060(1988) 解説図28)

(3) 放射線透過試験および超音波探傷試験の等級分類と継手引張強さの対応

JIS Z 3060(1983)付属書3のタンデム斜角探傷試験の参考表による等級分類は欠陥断面積を基準に行われており、板厚49mmの継手において、等級分類1級は欠陥断面率(0.9/49=1.8%)以下、同2級(1.8/49=3.6%)以下、同3級(3.6/49=5.4%)以下、同4級は5.4%以上とし、継手引張強さの対応を考慮して等級分類されている。

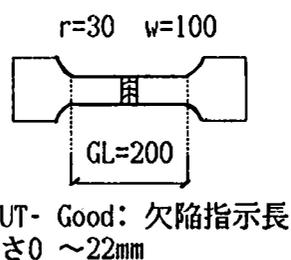
RTとUTの等級分類と継手引張強さの関係についての定量的実験はあまり見受けられないが、内田ら(\*)はSS41~SM50(t=16,25)鋼板を被覆アーク溶接および炭酸ガスアーク溶接した継手引張試験体(20体)の引張破断位置とRTの等級分類(JIS Z 3104)およびUTの合否との対応を表3-1に整理した。

この結果によると、母材で破断した継手が12継手、溶接部で破断した継手が8継手であったが(このうち11継手がSS41母材に対して50kg級ワイヤを用いたオーバーマッチング継手である)、RT4級不合格欠陥継手でも半数以上が母材破断となっているが、UTの不合格欠陥継手ではほとんどが溶接部破断であった。

これらの結果から、内田らは溶接継手の非破壊検査と引張試験結果の対応の面からRTよりUTの方が、より良い対応を示していると結論している。

表3-1 RTの等級およびUTの合否と引張破断位置の対応

Location of Fracture	RT(JIS Z 3104)		UT(建築学会)	
	Grade 3	Grade 4	Good	NG
Base Metal	2	10	10	2
Weld Metal	0	8	2	6



溶接継手の非破壊検査において、従来から行われている放射線透過試験を超音波探傷試験に変更する場合、常に議論の対象となるのが欠陥の検出度とその評価である。欠陥の検出度比較は後述するが、欠陥の評価方法として、平面像が良いか、側面像が良いかは、継手強さの対応という立場からは超音波探傷試験の側面像の方が、より対応し易いものと考えられる。