◀ 資料 ▶

溶接部の非破壊検査

Nondestructive Inspections of Welds

溶接部放射線透過写真の等級分類*

仙 田 富 男**

Classification of Radiographs for Welds*

by Tomio Senda**

1. は し が き

溶接部の放射線透過写真を判定するための規格としてわが国では、JIS Z 2341（金属材料の放射線透過試験方法）が制定されていた。これは欠陥の大きさと分布状態から透過写真の等級を決定する具体的方法を示したものである。しかし規格に定められた方法にしたがって多数の人が同一の透過写真の等級分類を実際に行なってみると異なった等級になる場合が少なくない。図-1は同一

図-1 溶接部放射線透過写真等級分類結果の一例(50枚中の5枚を例として示した)

の透過写真の等級分類結果に個人差のあることを示しているが¹⁾、この原因としては欠陥の見落とし、規格の解釈の相違および観察方法の相違などがあげられよう。

まず欠陥の見落としについては熟練するにしたがって少なくなる面もあるが、撮影技術が低いために透過写真の像質が悪く、かなり熟練していても欠陥か欠陥でないか判断に苦しみ場合も少なくない。同一の溶接部について

像質の良い透過写真を撮影して観察すれば、この点が改善されることは明らかである。しかし、像質の良い透過写真では微細な欠陥まで明瞭に認められるため、これを数えると溶接部の等級が下るという不合理を生ずる場合も起こる。このため合理的な結果が得られるように規格を解釈する必要がある。

これに対して日本溶接協会 放射線検査委員会では、「溶接部放射線透過写真等級分類方法」を定めた²⁾。また軽金属溶接技術会 X線検査委員会ではさらに検討を加えた結果、LIS TW1（アルミニウムおよびその合金溶接部のX線透過試験方法通則）および LIS TW2（アルミニウムおよびその合金突合せ溶接部のX線透過試験方法）が制定され、さらに改正が行なわれた^{3,4)}。

いっぽう、等級分類基準についても JIS Z 2341 の規定では不じゅう分であるという立場で検討が進められ、LIS TW3（アルミニウムおよびその合金突合せ溶接部のX線透過写真による判定方法）が制定された⁵⁾。また鋼溶接部については日本非破壊検査協会 002 特別研究委員会の溶接グループ（略称 ASW 委）で欠陥と強度の関連を基礎として溶接欠陥の等級分類の作成に努力した結果、NDIS 1501（放射線試験による溶接部の強度を考慮した等級分類—低炭素鋼）が制定された⁶⁾。

以上のような撮影方法および等級分類方法に関する検討結果を背景として、日本溶接協会から鋼溶接部について、また軽金属協会からアルミニウム溶接部についてそれぞれの JIS 原案が昭和42年3月に提出された。これらの原案をもととして、溶接部会溶接部放射線検査専門委員会が審議を行ない、溶接部会の議決を経て、JIS Z

* 原稿受付 昭和43年7月2日

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University.

3104 (鋼溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法) が昭和43年6月1日制定され、また引続いて JIS Z 3105 (アルミニウム溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法) が昭和43年9月1日制定される。

これらの新 JIS は、じゅうらいの JIS Z 2341 では不明確あるいは不合理であった点を改めるため、多くの規定が加えられている。このため今回は鋼溶接部に関する JIS Z 3104 のおもな項目についてそれぞれ簡単に解説することとしたい。

2. 透過写真の撮影方法

2.1 母材の厚さおよび材厚

表一はパイプ溶接部についてのアンケートの結果であるが⁷⁾、二重壁で撮影した場合に試験部の最大厚さの

表一 パイプ溶接部の放射線検査における試験部の最大厚さに関するアンケートの集計結果
(二重壁撮影の場合)

	透過度計識別度を求める場合	等級分類を行なう場合
母材の板厚	7	17
溶接部の厚さ	9	11
母材の板厚の2倍	14	5
母材の板厚と溶接部の原さを加えた厚さ	15	8
その他		1
記入なし	4	7
事業所数合計	49	49

表二 各種溶接継手における試験部の最大厚さ
(放射線検査委員会)

継手の種類	母材の板厚	溶接方法	余盛	試験部の最大厚さ mm
突合せ継手	T	片面または両面	なし	T
"	T	片面	あり	T+2mm
"	T	両面	"	T+4mm
T 継手	T	ヘコミスミ	—	2.0×T
"	T ₁ <T ₂	"	—	2.0×T ₁
"	T ₁ >T ₂	"	—	(2.0×T ₂)+(1.4×T ₁)
"	T	トッスミ肉	—	(2.0×T)+1mm
"	T ₁ <T ₂	"	—	(2.0×T ₁)+1mm
"	T ₁ >T ₂	"	—	(0.6×T ₂)+(1.4×T ₁)+1mm

備考 母材の板厚は呼び厚さ (mm) とする。突合せ継手において継手母材の板厚が異なる場合は、薄い方の板厚 T₁ を T とする。
T 継手における T₁ および T₂ は次図のとおりとする。

解釈が非常に違っていることを示す一例といえよう。JIS Z 2341 ではこの解釈の違いが透過写真の合否ならびに等級分類結果に大きく影響するため解釈の統一が必要であった。このため放射線検査委員会では各種溶接継手における母材の板厚と試験部の最大厚さを表二のように定めた²⁾。また、パイプおよび裏あて金のある溶接部などを撮影する場合には、試験部の最大厚さにやむを得ず放射線が透過する部分の厚さを加えた値を透過度計識別度を求める場合の試験部の最大厚さの値とした。

JIS Z 3104 では同じ考え方からつぎのように規定している。なおここで材厚とは、溶接部の試験される部分の透過する厚さをいい、JIS Z 2341 における試験部の最大厚さと同じものをさしている。

[母材の厚さおよび材厚の値は、図一2に示す各寸法を測定するものとし、実さいの測定が困難な場合には、原則としてつぎの値を用いる。

ただし、T、T₁、T₂ は母材の厚さを示し、T_A は板厚を示す。

図一2 母材の厚さと材厚 (JIS Z 3104)

- (1) 母材の厚さとしては、使用された板の呼び厚さを用いる。
- (2) 材厚としては、各種溶接継手について表一3に示す値を用いる。]

ここで表一2と表一3とではT継手に対する考え方が違っている。表一2の場合は放射線と T₂ の厚さの板の

表一3 材厚 (JIS Z 3104)

継手の種類	母材の厚さ mm	溶接部の形状	材 厚 mm
突合せ継手	T	余盛なし	T
突合せ継手	T	片面余盛あり	T+2
突合せ継手	T	両面余盛あり	T+4
突合せ継手	T	片面余盛あり 裏あて金あり (厚さ T'/mm)	T+2+T'
突合せ継手 (二重壁撮影)	T	余盛なし	2.0×T
突合せ継手 (二重壁撮影)	T	片面余盛あり	2.0×T+2
突合せ継手 (二重壁撮影)	T	両面余盛あり	2.0×T+4
T 継手	T		2.2×T
T 継手	T ₁ ≠T ₂		1.1×(T ₁ +T ₂)

備考 母材の厚さは呼び厚さとする。突合せ継手において母材の厚さが異なる場合は、薄い方の厚さ T₁ を T とする。

表面とが45°になると考えているが、表-3の場合は30°と考えているためである。

2.2 透過度計と透過度計識別度

透過写真の像質をあらわす1つの尺度として透過度計識別度が利用されている。透過度計識別度はつぎの式によって求める。

$$\text{透過度計識別度} = \frac{\text{試験部において認められる透過度計の最小の線径 (mm)}}{\text{材厚 (mm)}} \times 100\%$$

JIS Z 2341 の規定では透過度計識別度が材厚 100 mm 以下は 2.0% 以下、100 mm をこえる場合は 3.0% 以下でなければならないことになっていた。しかし JIS Z 3104 では表-4 のように規定されている。

表-4 必要とする透過度計識別度 (JIS Z 3104)

像 質	材 厚 mm	透過度計識別度 %
普 通 級	—	2.0 以下
特 級	100 以下	1.5 以下
	100 をこえるもの	1.3 以下

ただし、普通級において材厚 5 mm 未満、特級において材厚 6.6 mm 未満では、直径 0.1 mm の線が認められればよい。

2.2.1 透過写真の像質

図-3は鋼の厚さと透過度計識別度との関係を求めた一例であるが⁹⁾、最近では放射線装置の改良および撮影技術の進歩により、厚いもののほうが透過度計識別度の値を小さくできるようになった。したがって材厚が 100 mm をこえる場合でも JIS Z 2341 のように 3.0% 以下にする必要はないと考えられる。このため JIS Z 3104 では、普通級は材厚に関係なく 2.0% 以下としている。

図-3 鉛箔増感紙を用いた場合の鋼板の厚さと透過度計識別度

また原子炉用压力容器など重要な構造物では、要求される透過度計識別度の値が小さくなる傾向にあるため、特級の像質に関する規定が入ってきた。

2.2.2 感光材料の選定

JIS Z 3104 では試験用具の性能として〔放射線装置、感光材料、撮影用具および観察用具は、溶接部の試験される部分（以下、試験部という。）の欠陥を明りようにあらわす透過写真を撮影し、これを観察できる性能を有するものでなければならない。〕と規定している。

表-5はX線フィルムと増感紙の組合せを変えた場合のわれの識別状況を比較した一例であるが⁹⁾、透過度計識別度に大きな差がないにもかかわらずわれの識別状況

表-5 X線フィルムと増感紙の組合せによるわれの検出状況の変化の一例 (鋼板 18.5 mm)

X線フィルム	増感紙	割 れ の 回 数				われ識別度* %	透過度計識別度 %	管電圧 kVp
		明瞭	普通	前明瞭	不能			
R	Pb	18	5	3	0	90.5	1.1	187
R	SMP 108	17	7	2	0	90.7	1.1	145
R	SMP 308	14	8	4	0	86.1	1.1	130
RR	Pb	17	5	4	0	88.5	1.1	154
RR	SMP 108	14	6	6	0	83.8	1.1	137
RR	SMP 308	13	4	8	1	76.9	1.1	125
S	SMP 108	4	9	7	6	56.6	1.4	115
S	SMP 308	4	6	10	6	53.1	1.4	103
S	KZ-SF	4	5	4	13	38.1	1.4	98

* 明瞭を100%、普通を80%、不明瞭を50%、不能を0%として平均しわれ識別度とした。

には大きな差があらわれている。したがって目的に応じて感光材料を選定する場合、欠陥の識別に考慮をほらう必要がある。透過写真の像質および材厚に対してX線フィルムと増感紙の組合せを規定することは、実際の撮影作業におよぼす影響が大きいため、現状では困難といえるが、推奨例として表-6が提案されている¹⁰⁾。

表-6 X線フィルムおよび増感紙の選択の一例

像 質	材 厚 (mm)	フ イ ル ム			増 感 紙
		性 能	該当する銘柄		
			富士 フィルム	さくら フィルム	
特 級	50以下	超 微 粒 子 高コントラスト	80	R	鉛 箔 0.02~0.2mm
	50.1以上	超 微 粒 子 高コントラスト	80	R	
	100以下	または 微 粒 子 高コントラスト	または 100	または RR	
	101以上	微 粒 子 高コントラスト	100	RR	
普通級	50以下	超 微 粒 子 高コントラスト または 微 粒 子 高コントラスト	80 または 100	R RR	鉛 箔 0.02~0.2mm 必要ならば背面 用はもつと厚く てもよい
	50.1以上	微 粒 子 高コントラスト	100	RR	
	材厚に拘わらず以下の 組合せが困 難な状況の とき	高 感 度	400	S	螢 光 または 金属螢光

2.2.3 像質の選定

JIS Z 3104 の解説にはつぎのように記されている。

〔透過写真の像質を普通級と特級にわけているが、この適用についてつぎの点を考慮されたい。

特級の像質を要求する溶接部は、原子炉用压力容器など、きわめて重要な構造物だけに限定したい。

重要な構造物では疲れ強さを考慮する 경우가多く、溶接部の余盛を削除するのが普通である。したがって、特級の像質を要求する溶接部は、余盛を削除したものに限定したい。

なお透過写真の具備すべき条件に規定された特級の像質を確保するためには、撮影作業の能率の低下を伴うのが普通である。したがって、なんとなく特級の像質を要求するのは、撮影に必要な経費が増大するため不経済である。]

さて厚さ T の板の上においた透過度計の線の直径 d に対応する透過写真のコントラスト ΔD はつぎの式で求められる^{11,12)}

$$\Delta D = -0.434 r \mu_p \sigma d / (1+n) \quad \dots\dots (1)$$

ここで

r : X線フィルムの特性曲線の濃度 D における切線の勾配

μ_p : X線フィルムの感度係数を考慮したX線の線質

σ : 線源寸法および撮影の幾何学的条件による補正係数

n : X線フィルムに一樣に到達する散乱線の線量率にその感度係数を乗じたものを、透過線の線量率にその感度係数を乗じたもので除した商

特級の像質を要求する場合は、できるだけ微細な欠陥まで識別しようとするので、X線フィルムとしては粒状性の良好なものを選び、撮影条件としては ΔD が大きくなるようにすることになる。 ΔD を大きくするには (1) 式で r , μ_p , σ を大きく、また n を小さくしなければならない。

図-4は、ノースクリーン用X線フィルム(低感度、超微粒子)の特性曲線の一例であり、図-4から濃度と r との関係とを求めると図-5となる。図-5から明らかなように、濃度の上昇にともなって r はほぼ直線的に増加する。つまり、 r を大きくするためには濃度を高くする必要がある、結果として露出時間が長くなる。

また μ_p を大きくするためにはX線装置の場合、低電圧にする必要がある、結果として露出時間が長くなる。

つぎに σ を大きくするためには、X線管の焦点または r 線源を小さくするか、線源とX線フィルムとの距離を大きくする必要がある、いずれの場合も放射線量率が小さくなる。これも露出時間を長くすることになる。

図-4 X線フィルム(ノースクリーン用)の特性曲線の一例(#80, 増感紙なし. レンドール 20°C 6分タンク, 線質 60 kVeff)

図-5 濃度と r との関係(図-4より求めたもの)

さらに n を小さくするためには、散乱線量を減少させる必要があり、絞りおよびマスクの使用などは作業能率の低下の原因となる。

2.2.4 透過度計の構造

透過度計の線径の変化は、じゅうらい図-6および表

図-6 1 F 透過度計の構造

表一 透過度計の種類，使用材厚範囲および構造

単位 mm

形の種類	使用材厚範囲		線 径 の 系 列								線間距離	線の長さ
	普通級	特 級									(d)	(l)
1F	20以下	30以下	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4		2～5	35
2F	10～50	15～70	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.7	0.8	0.9	40
3F	40～100	60～190	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0		4～7	45
4F	50～200	70～350	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0		5～8	50

表一 透過度計の種類，使用材厚範囲および構造

単位 mm

形の種類	使用材厚範囲		線 径 の 系 列								線の中心 間 距 離	線の長さ
	普通級	特 級									(D)	(L)
F02	20以下	30以下	0.10	0.125	0.16	0.20	0.25	0.32	0.40		3	40
F04	10～40	15～60	0.20	0.25	0.32	0.40	0.50	0.64	0.80		4	40
F08	20～80	30～130	0.40	0.50	0.64	0.80	1.00	1.25	1.60		6	60
F16	40～160	60～300	0.80	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.20		10	60
F32	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

図一 F02 透過度計の構造

一 7 に示すように等差数列になっていたが，IIW（国際溶接学会）の勧告もあり，線径が公比1.25の等比数列で変化する図一 7 および表一 8 に示す形式を採用している。ただし，じゅうらいの形式のものも使用してよい。

等比数列で変化する形式の方がよいのは，材厚の2.0%の値が透過度計の2本の線の直径の中間となる場合に細い方の線の存在が認められなければならないことになっているためである。すなわち，透過度計の2本の線のうち，太い方の直径を d_1 とし，細い方の直径を d_2 とすれば，極端な場合には $2(d_2/d_1)\%$ に近い透過度計識別度が要求されることになり，線径の変化が，等差数列のものより等比数列の方が合理的となる。たとえば，材厚9.9 mm に対しては2.0%の値が 0.198 mm となるため，2F の透過度計を使用した場合には，0.2 mm の線が認め

られるだけでは不十分であり，それより細い0.1 mm の線が認められる必要がある。したがって透過度計識別度は $(0.1/9.9) \times 100 = 1.01\%$ となり，これは $2(d_2/d_1) = 2(0.1/0.2) = 1\%$ に近いわけである。この場合，1F の透過度計を使用すれば 0.15 mm の線が認められればよいことになる。したがって，透過度計識別度は $(0.15/9.9) \times 100 = 1.51\%$ となる。このように等差数列の透過度計を使用する場合には，使用する形の種類によって必要とする透過度計識別度が変化するだけでなく，材厚の変化にともなって，必要とする透過度計識別度が変化するのが欠点である。

これに対し等比数列の透過度計を使用すれば，いかなる場合でも必要とする透過度計識別度の値は， $2(d_2/d_1) = 2(1/1.25) = 1.6\%$ 以下になることがないのが利点である。

2.3 階調計と濃度差

透過写真の像質を示す尺度として透過度計識別度が用いられている。透過写真の濃度および観察方法と透過度計の線の識別との関係を58人の観察者により求めた結果を整理したものが表一 9 であるが¹³⁾，これによれば同一の写真を同一の方法で観察しても識別できる本数が2～3本異なってくることを示している。識別できる本数が9本と7本を例にとれば，最小の線径は 0.2 mm と 0.4 mm との違いになり，0.2 mm の場合の透過度計識別度に対して 0.4 mm の場合は2倍の値となる。したがって，同一の写真が観察者によって合格となる場合もあれば不合格となる場合もあることになる。

以上のような不合理を除く目的で透過写真の像質を階調計の濃度差により示す方法が検討された。

表一 9 透過写真の濃度および観察方法と透過度計の線の識別

(表中の数字は58人の観察者のうち 2F の透過度計の線をその本数識別した人数を示す)

[厚さ 19 mm の鋼板の突合せ溶接試験片 (余盛も入れた厚さ約 23 mm) の中央においた透過度計について測定]

観察方法 フィルム マスクの状態				I										II										III										IV									
				KS-3 型										SF-54 型																													
				固定マスク 移動マスク併用					固定マスク のみ使用					固定マスク 移動マスク併用					マ ス ク な し																								
				5本	6本	7本	8本	9本	6本	7本	8本	9本	5本	6本	7本	8本	9本	0本	1本	2本	3本	4本	5本	6本	7本	8本	9本																
写真 組番号	管電圧 kVp	露出 時間sec	識別本数 濃度																																								
1	188	30	0.6		4	37	13	4		19	25	8	6		32	15	11										21	27	10														
2	178	120	1.2				7	50	1		2	54	2		1	8	44	5								7	49	2															
3	188	120	1.6			1	9	49	2		4	44	10			7	46	5								16	39	3															
4	195	120	2.0				4	50	4		2	47	9			8	48	2							1	1	19	36	1														
5	188	200	2.5			1	4	48	5		1	54	3		1	4	46	7							2	8	20	26	2														
6	215	120	3.0				3	49	6		3	52	3	2	1	22	31	2	1	1	2	8	10	14	9	7	6																

共通の撮影条件: X線フィルム #100, 鉛箔増感紙フロント・ベックとも厚さ 0.03 mm, 焦点-フィルム間距離 60cm, X線装置 マクロタンク H, 管電流 4mA, 現像 レンドール 20°C 6分 (タンク)

共通の観察条件: 通常の室内, 固定マスクはフィルム寸法 (3 1/4 × 12) に合せたものを使用, 移動マスクの窓は 16 × 19mm.

濃度の測定: 一定位置で測定し, 撮影条件の同じ透過写真 3 枚について平均した.

I 形

II 形

図一 8 階調計の構造 (JIS Z 3104)

階調計は図一 8 に示すように厚さが 1 mm づつ変化しているのので, 1 mm の厚さの差に対応する濃度差は (1) 式において $\sigma=1$, $d=0.1$ とおくことにより近似的に求められる。

$$\Delta D = -0.04347 \mu_p / (1+n) \quad \dots\dots (2)$$

したがって, 階調計の示す濃度差 ΔD は τ , μ_p および n によって変化する。すなわち, X線フィルムと増感紙の種類, 現像条件, 濃度, X線装置の種類, 管電圧および散乱線量の変化などによって ΔD の値が異なってくる。このため撮影条件を決定し, またその撮影条件が連続した作業中に大きく変化しないように管理するには, 階調計の濃度差に注目することが比較的簡便な方法といえよう。

JIS Z 3104 では階調計の使用についてつぎのように規定している。

[材厚 20 mm 以下の平板の突合せ溶接部について撮影条件を決定する場合には階調計を用い, 試験部と同時に撮影し, また同一条件で撮影する場合には, 原則として連続する10回以下の撮影を 1 群として 1 群に 1 回以上使用する。]

また透過写真の具備すべき条件としてつぎのように規定している。

[撮影条件を決定するため階調計を使用した透過写真においては, つぎに示すような階調計の測定箇所の濃度差が表一10に示す値以上でなければならない。

表一10 撮影条件を決定するために必要とする階調計の濃度差 (JIS Z 3104)

材厚 mm	3.0以下	3.0をこえ 6.0以下	6.0をこえ 10.0以下	10.0をこえ 15.0以下	15.0をこえ 20.0以下
普通級	0.45	0.30	0.20	0.13	0.10
特 級	0.60	0.40	0.25	0.17	0.13

(1) 材厚を表一 3 により求めた場合

(a) 余盛のない場合は, 階調計に近接した母材の部分の濃度と階調計 I 形の 1.0 mm の部分の中央の濃度を測定し, その濃度差を求める。

(b) 片面に余盛のある場合は, 階調計 I 形の 2.0mm および 3.0 mm の各部分の中央の濃度を測定し, その濃度差を求める。

(c) 両面に余盛のある場合は, 階調計 II 形の 4.0mm および 5.0 mm の各部分の中央の濃度を測定し, その濃度差を求める。

(2) 材厚を測定した場合

材厚から母材の厚さを差引いた厚さ (mm) の小数点以下を切捨てた値に対応する階調計の部分の中央の濃度とそれより 1 mm 厚い部分の中央の濃度を測定し, その

濃度差を求める。このさい階調計のⅡ形でも厚さが不足する場合は1mmの整数倍の厚さの板を階調計の下に加えて撮影する。]

〔連続する撮影において、撮影条件に変化のないことを確認するために階調計を使用した透過写真においては、階調計の示す濃度差が表-10に示す値の80%以上でなければならない。〕

なお階調計の濃度差が同一であったとしても透過度計の線の示す濃度差には線源寸法および撮影の幾何学的条件による補正係数 σ を考慮する必要がある。また識別できる最小の濃度差 $\Delta D_{\min}$ は透過写真の濃度により変化し、さらに透過像の大きさおよび濃度分布によっても変化する。このため透過度計識別度と階調計の濃度差との間に一定の関係があるとはいえないが、 $\Delta D_{\min}$ が大きく変化しない撮影条件および観察条件の下ではかなり密接な関係があるということはある。

2.4 撮影配置

JIS Z 3104では撮影配置についてつぎのように規定している。

〔突合せ溶接部を撮影する場合の放射線源、透過度計、階調計およびフィルムの関係位置は、原則としてつぎによる、すなわち、図-9に示すように2個の透過度計

図-9 撮影配置

を試験部の線源側の面上に溶接部をまたいで、両側になるべく遠いところにおく。このさい、細線が外側になるようにする。また階調計を使用する場合には、試験部の線源側の中央附近からあまり離れない母材の面上に階調計の厚さの変化する方向が試験部と平行になるようにおく、ここで、線源と透過度計間の距離 L_1 は、原則として

透過度計とフィルム間の距離 L_2 の m 倍以上、試験部の有効長さ L_3 の n 倍以上とする。線源寸法 f mmの場合、係数 m は普通級で $2.5f$ 、特級で $5f$ とする。また係数 n は普通級では2、特級では3とする。

なお、透過度計の線は、放射線の方角と直角になるように注意する必要がある。一例を図-10に示す。]

図-10 T継手撮影の一例

また、これに関して解説にはつぎのように記されている。

〔線源と透過度計間の距離 L_1 を透過度計とフィルム間の距離 L_2 の m 倍以上としたのは、線源寸法による幾何学的なぼけが大きくなるようにするためである。この場合の線源寸法としては、線源とフィルムの中心とを結ぶ方向における公称寸法をとることとする。ただしX線管の焦点寸法を実際に測定した場合は公称寸法でなく測定値を用いる。〕

つぎに線源と透過度計間の距離 L_1 を試験部の有効長さ L_3 の n 倍以上としたのは、フィルム上で放射線の強さの変化が大きくなるようにするためと、われのような欠陥の検出の程度が試験部の中央と端とで大きく変化しないようにするためである。

なお、突合せ溶接部の場合に通常の撮影配置では透過度計の線は放射線の方角と直角になっていると考えてしまつてかえないが、図-10に示すように、放射線を吸収する割合が同じようなくさびを使用してすみ肉溶接部を撮影する場合は、透過度計の線が放射線の方角と直角になるように注意する必要がある。たとえば45度になった場合は、放射線を吸収する厚さが約1.4倍になり、透過度計識別度が異なってくるためである。]

2.5 透過写真の観察

観察方法としてはフィルム観察器（シヤークステン）の明るさおよび観察する室内の明るさ、フィルム寸法に合わせた固定マスクおよび小さい窓を有する移動マスクの使用などが欠陥の識別または透過度計の線の識別に影響するものと考えられる。

いっぽう、濃度はつぎのように定義される。

$$D = \log(I_0/I) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで

I_0 : 透過写真への入射光の強さ

I : 透過写真からの透過光の強さ

したがって、一定の明るさのフィルム観察器を用いた場合は、透過写真の濃度の上昇にともなって I が小さくなる。

図-11は I が小さくなると識別できる最小の濃度差 $\Delta D_{\min}$ が大きくなることを示しているから¹⁴⁾、 $\Delta D_{\min}$ を大きくしないためには、濃度が上昇しても I が小さくならないように I_0 を大きくしなければならない。つまりフィルム観察器の明るい方が高濃度の透過写真の観察には有利となる。

図-11 濃度と識別できる最小の濃度差との関係
フィルム観察器 (15 W 白色蛍光灯 2 本)

(a) マスクを使用しない場合

(b) 直径 10 mmφ の円でマスクした場合

つぎに、観察する室内が明るい場合には、眼に入ってくる光は透過写真からの透過光の強さ I のほかに I_{s1} が加わってくる。(3) 式の関係から $D_1 > D_2$ の場合の濃度差 ΔD を求めるとつぎようになる。

$$\begin{aligned} \Delta D &= D_1 - D_2 = \log(I_0/I_1) - \log(I_0/I_2) \\ &= \log(I_2/I_1) \quad \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

I_1 と I_2 にそれぞれ I_{s1} が加わった場合

$$\log\{(I_2 + I_{s1}) / (I_1 + I_{s1})\} < \log(I_2/I_1)$$

となるから、 I_{s1} が加わった場合には濃度差が見掛け上小さくなる。つまり観察する室内が明るければ、 $\Delta D_{\min}$ が大きくなるわけである。

またフィルム寸法に合わせた固定マスクを使用しない場合には、透過写真のまわりからの光の影響で I_{s2} が加わることになって $\Delta D_{\min}$ を大きくすることになる。

小さい窓を有する移動マスクを使用する方法は (4)

式の関係に近づくため、ほかの条件が同じ場合はもっとも良い観察方法といえる。しかし視野が狭くなるため一般的に実施することは困難である。

2.6 透過写真の濃度

ノースクリーン用 X 線フィルム（低感度、超微粒子）の場合は図-5のように濃度の上昇にともなって r はほぼ直線的に増加する。(1) 式は r の増加とともに ΔD が増加することを示しているから、濃度が上昇すれば ΔD は増加する。

いっぽう、図-11によれば、低濃度範囲では識別できる最小の濃度差 $\Delta D_{\min}$ はほぼ一定であるが、高濃度範囲では濃度の上昇とともに $\Delta D_{\min}$ が増加する。

以上の関係をあわせ考えると、低濃度範囲では濃度の上昇にともなう ΔD の増加が識別度の向上に寄与するが、高濃度範囲での識別度に対しては濃度の上昇にともなう ΔD の増加と $\Delta D_{\min}$ の増加の両者を考慮する必要がある。

透過写真の濃度と透過度計識別度との関係を求めた一例が図-12であり⁹⁾、濃度範囲で 1.0~3.5 程度が良好といえよう。ただし、材厚が増加すると散乱線量が増加するため識別度が良好な濃度範囲がせまくなる。

なお、スクリーン用 X 線フィルムと蛍光増感紙を組合わせた場合の特性曲線の一例が図-13であるが、図-13

図-12 濃度と透過度計識別度 (鋼板 20 mm)
(KS-3 型、固定マスク使用、室内)

図-13 X 線フィルム (スクリーン用) の特性曲線の一例 (#400, KZ-S, レンドール 20°C, 5 分皿, タイムスケール)

図-14 濃度と γ との関係 (図13より求めたもの) 図-15 濃度と透過度計識別度 (鋼板 20 mm)
(KS-3 型, 固定マスク使用, 室内)

から濃度と γ との関係を求めると図-14となる。図-14は高濃度範囲で濃度の上昇にともなって γ が減少する。したがって、図-11とあわせ考えると高濃度範囲では濃度の上昇にともなって識別度が急激に低下することになる。透過写真の濃度と透過度計識別度との関係を求めた一例が図-15であり⁸⁾、濃度範囲が1.0~2.0または1.0~2.5程度とせまくなっているため注意を要する。

3. 透過写真の等級分類方法

3.1 欠陥の分類

構造物の強さにおよぼす影響は、欠陥の種類によって異なる。このため欠陥を表-11に示すように3種類にわけ、おのおの別の規定に従って等級分類する。

表-11 欠 陥 の 分 類

	欠 陥 の 種 類
第1種	ブローホールおよびこれに類する丸味を帯びた欠陥
第2種	細長いスラグ巻込みおよびこれに類する欠陥
第3種	われおよびこれに類する欠陥

第1種の欠陥は、ブローホール、スラグ巻込みなど、丸味を帯びた欠陥で、主として欠陥による断面積の減少が強さに影響すると考えられるものである。

第2種の欠陥は、細長いスラグ巻込み、パイプ、融合不足および溶込み不足などで、主として欠陥部の応力集中が強さに影響すると考えられるものである。

第3種の欠陥は、各種のわれおよびわれに近い溶込み不足で、応力集中が非常に大きく、強さを著しく低下させると考えられるものである。

なお、アンダカットなどの表面欠陥は強さの低下に大きく影響するため、検査の対象としては当然入ってくる。しかし、その判定は透過写真だけでなく、外観試験、磁粉探傷試験など他の試験方法も併用する必要がある。この等級分類には含めないことにしている。

3.2 第1種の欠陥の等級分類

3.2.1 欠陥点数と等級

透過写真上に第1種の欠陥が存在する場合は、試験部の全面積のうちで欠陥点数が最も大きくなる部分の試験視野内を対象として欠陥点数を求める。ここで試験視野の大きさは表-12に示すように母材の厚さにより異なる。

表-12 試験視野の大きさ (JIS Z 3104) 単位mm

母 材 の 厚 さ	25以下	25をこえ100以下	100をこえるもの
試験視野の大きさ	10×10	10×20	10×30

表-13 欠陥点数 (JIS Z 3104)

欠陥の長径 mm	1.0以下	1.0をこえ2.0以下	2.0をこえ3.0以下	3.0をこえ4.0以下	4.0をこえ6.0以下	6.0をこえ8.0以下	8.0をこえるもの
点 数	1	2	3	6	10	15	25

表-14 かぞえない欠陥の最大の大きさ (JIS Z 3104)
単位 mm

母 材 の 厚 さ	欠 陥 の 長 径
25以下	0.5
25をこえ50以下	0.7
50をこえるもの	母材の厚さの1.4%

表-15 第1種の欠陥の等級分類

試験視野 mm 母材の厚さ mm	10×10		10×20		10×30
	10以下	10をこえ25以下	25をこえ50以下	50をこえ100以下	100をこえるもの
1 級	1	2	4	5	6
2 級	3	6	12	15	18
3 級	6	12	24	30	36
4 級	欠陥点数が3級より多いもの				

- 備考 1) 表中の数字は欠陥点数の許容限度を示す。
2) 欠陥が試験視野の境界線上にかかる場合は、視野外の部分も含めて測定する。
3) 欠陥の長径が母材の厚さの半をこえるときは4級とする。
4) 1級については欠陥の長径の寸法が表-14に示す値以下のものでも試験視野内に10個以上あってはならない。

欠陥が1個の場合の欠陥点数は、欠陥の長径に応じて表-13の値を用いる。ただし、欠陥の長径が表-14に示す値以下のものは欠陥点数として算定しない。

欠陥が2個以上の場合の欠陥点数は、試験視野内に存在する欠陥の欠陥点数の総和とする。欠陥が試験視野の境界線上にかかる場合は、視野外の部分も含めて測定する。

このようにして1枚の透過写真について第1種の欠陥

の欠陥点数が求められれば、その透過写真の等級は、表—15により求めることができる。

3.2.2 第1種の欠陥による疲れ強さの低下

図—16は溶接欠陥の面積と疲れ強さとの関係を求めた実験結果を集めて整理したものである¹⁰⁾。図—16において、応力に直交する断面での欠陥面積の割合が1%，3%および6%に対応する欠陥材の無欠陥材に対する疲れ

図—16 溶接欠陥の面積と疲れ強さの関係 $N=2 \times 10^6$

強さの比を求めると、75%，55%および45%といった程度の値が得られると考えてさしつかえないようである。ただし、この値は余盛を削除した継手に対するものである。なお、JIS Z 3104における1，2および3級は、欠陥面積の割合としてそれぞれ1%以下，3%以下および6%以下に大体対応するように定めている。

3.2.3 欠陥点数に算定しない欠陥

良好な写真ほど欠陥が多くなって等級が下がるという不合理な結果になることを避けるには、写真が良いために識別された欠陥で、透過度計識別度が2%であれば識別できなかったかもしれないものはかぞえないことにする必要がある。これに関して日本非破壊検査協会では板厚の3%以下の大きさの欠陥はかぞえないという解釈をとっていた。これによれば板厚のわずかな変化に対してかぞえない欠陥の大きさもわずかわづつ変化するため、実際にはかなり面倒な場合も生じてくる。このため放射線検査委員会では板厚範囲とかぞえない欠陥の大きさを表—16のように対応させることによって実際の作業が容易に行なえるようにしていた。ただし、著しく明瞭な欠陥であればかぞえることにしているが、ここで著しく明瞭な欠陥といっているのは球状欠陥が明瞭に識別された場合をさすのではなく方向性のある欠陥がたまたま小さ

表—16 かぞえない欠陥の大きさ
(放射線検査委員会)

母材の板厚 (mm)	10.0以下	10.0~20.0	20.1~50.0	50.1以上
かぞえない欠陥の 大きさ (mm)	0.2以下	0.4以下	0.7以下	1.0以下

な欠陥として撮影された場合をさしている。

いっぽう、微小欠陥が存在しても、その欠陥による強さの低下は無視できると考えられるため、JIS Z 3104では欠陥点数算定の容易さも考慮して表—14のように定めている。

3.3 第2種の欠陥の等級分類

3.3.1 欠陥長さとの等級

透過写真上に第2種の欠陥が存在する場合は、欠陥の種類により表—17に示す係数を乗じて欠陥長さを求める。欠陥と欠陥の間隔が表—18に示す値をこえる場合は、それぞれ独立の欠陥とみなすが、表—18に示す値以下の場合は、それぞれの欠陥長さの総和を求めて、その欠陥群の欠陥長さとする。

このようにして求めた欠陥長さの最大の値がその透過

表—17 欠陥長さを求める場合の欠陥の種類による係数

欠 陥 の 種 類	係 数
ス ラ グ 巻 込 み	1
溶 込 み 不 足, 融 合 不 足	2

表—18 欠陥群とみなす最大の間隔

欠 陥 の 種 類	欠 陥 と 欠 陥 の 間 隔
ス ラ グ 巻 込 み	大きい方の欠陥の寸法
溶 込 み 不 足, 融 合 不 足	大きい方の欠陥の寸法の2倍

表—19 第2種の欠陥の等級分類 単位 mm

母材の厚さ	12以下	12をこえ48未満	48以上
等 級			
1 級	3 以下	母材の厚さの $\frac{1}{4}$ 以下	12以下
2 級	4 以下	母材の厚さの $\frac{1}{2}$ 以下	16以下
3 級	6 以下	母材の厚さの $\frac{1}{2}$ 以下	24以下

4 級 欠陥長さが3級より長いもの

備考 1) 表中の数字は欠陥長さの許容限度を示す。

2) 1 級については溶込み不足あるいは融合不足があってはならない。

図—17 溶接欠陥の長さと疲れ強さの関係 $N=2 \times 10^6$

写真における第2種の欠陥長さとなり、その透過写真の等級は表—19により求めることができる。

3.3.2 第2種の欠陥による疲れ強さの低下

図—17は溶接欠陥の長さと疲れ強さとの関係を求めた実験結果を集めて整理したものである¹⁰⁾。図—17において、欠陥材の無欠陥材に対する疲れ強さの比が75%、55%および45%に対応する欠陥の長さを求めると、1.5 mm、10 mm および 25 mm 程度と考えてさしつかえないようである。ただし、この値は余盛を削除した継手に対するものである。

3.4 第3種の欠陥の等級分類

透過写真上に第3種の欠陥が存在する場合は、すべて4級とする

3.5 第1種および第2種の欠陥が混在する場合の等級分類

第1種および第2種の欠陥が混在する場合とは、1枚の透過写真に第1種の欠陥と第2種の欠陥が離れて存在するのではなく、第1種の欠陥の欠陥点数を求める試験視野内に第2種の欠陥の全部または一部が入っていることをさす。

この場合は、欠陥の種類別に、それぞれ等級分類し、そのうち下位の方を等級とする。ともに同じ等級であれば、一つ下位の等級とする。すなわち、第1種の欠陥および第2種の欠陥がいずれも2級であれば、混在する欠陥として3級となるが、いずれも1級の場合には第1種の欠陥の許容欠陥点数の $\frac{1}{2}$ および第2種の欠陥の許容欠陥長さの $\frac{1}{2}$ をそれぞれこえた場合にのみ混在する欠陥として2級にする。

3.6 第1種の欠陥か第2種の欠陥が分類しにくい場合の等級分類

この場合は、すべてを第1種の欠陥または第2種の欠陥とみなして、それぞれ等級分類し、そのうち下位の方を等級とする。

3.7 等級とその適用

JIS Z 3104 の解説にはつぎのように記されている。

〔欠陥による強さの低下の割合は、荷重の種類によって大いに異なる。実験結果では、低応力破壊を生ずるような特殊な場合を除き静的荷重による強さの低下は、衝撃や疲れのような動的荷重による強さの低下よりはるかに小さい。〕

ここでは溶接部の等級分類に対して欠陥による疲れ強さの低下のみを考えた。ただし、実験結果のほとんどが軟鋼板の突合せ継手の試験片に内部欠陥が存在する場合であるため、特殊鋼への準用の場合とか、すみ肉溶接部とか、表面欠陥の場合には、強さとの関連が明らかではない。しかし、相対的に良否を判断する意味では利用で

きよう。

等級分類は等級数を増しても煩雑であり、実さいには使用されないことも起こり得るので、4等級に分類した。

この規格には、溶接部の合否についての規定は含まれないが、合否基準を定める場合、いたずらに上級とすることは避けたい。たとえば余盛を削除しないような溶接線は、余盛が存在することにより、疲れ強さがかなり低下するため1級を合格と定める必要はない。ここで、各等級に対応する構造物としてつぎのように考えた。

- 1級 繰返し荷重を受けて疲れ強さをとくに考慮しなければならないもの、または破壊によって重大な災害が起こるもので、余盛を削除するようなもの。
- 2級 余盛は削除しないが、繰返し荷重を受けるか、あるいは強さが重要と考えられるもの。
- 3級 疲れ強さを考慮しなくてもよいようなもの。〕

4. む す び

以上 JIS Z 3104 のおもな項目についてそれぞれ簡単に解説したが、JIS Z 2341 と比較すれば、いずれの項目も明確さの点で一步前進したとはいえ、まだ問題点を残している現状である。関係各位の積極的な努力によって多くの資料が蓄積され、規格の不備な点が改正できることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) NDI 103 小委員会：“溶接部 X 線写真判定の調査” 非破壊検査 Vol. 8 (1959) No. 2, 96
- 2) 仙田：“溶接部放射線透過写真の等級分類方法について” 非破壊検査 Vol. 14 (1965) No. 11, 476
- 3) X線検査委員会：“アルミニウムおよびその合金溶接部のX線透過試験方法通則” 軽金属溶接 No. 52 (1967, 4), 186
- 4) X線検査委員会：“アルミニウムおよびその合金突合せ溶接部のX線透過試験方法” 軽金属溶接 No. 52 (1967, 4), 188
- 5) X線検査委員会：“アルミニウムおよびその合金突合せ溶接部のX線透過写真による判定方法” 軽金属溶接 No. 52 (1967, 4), 190
- 6) “放射線試験による溶接部の強度を考慮した等級分類（低炭素鋼）NDIS 1501-67 非破壊検査 Vol. 16 (1967) No. 4, 170
- 7) “パイプ溶接部の放射線検査に関するアンケートの集計結果について” NDI 資料 1212 (1961)
- 8) “原子炉構造用鋼溶接部検査技術に関する試験研究” 日本溶接協会原子力研究委員会 (1964)
- 9) 仙田、本間：“X線透過写真の撮影条件によるキレツの識別について（第1報）X線フィルムおよび増感紙の組合せについて” 非破壊検査 Vol. 13 (1964) No. 1, 58
- 10) “溶接部の放射線検査等級分類基準（鋼）（案）” NDI 資料 1398 (1967)
- 11) 仙田：“X線透過写真のコントラストに関する研究” 東京大学生産研究所報告 Vol. 11, No. 6 (1962)
- 12) 仙田：“X線透過撮影による欠陥の識別” 理学電機ジャーナル Vol. 4 (1962) No. 3, 382
- 13) 仙田、松山：“X線透過写真の欠陥識別に及ぼす撮影条件ならびに観察方法の影響について” 非破壊検査 Vol. 14 (1965) No. 2, 59
- 14) 田島、勝亦：“X線用感光材料の写真的性質（Ⅰ）直接照射による現像画像の特性” 日本写真学会誌 Vol. 23 (1960) No. 2, 63