

7. 欠陥の有害性の把握

溶接構造において、各種の溶接欠陥が許容しうるものかどうか判断するための合理的基準は、安全性と経済性のバランスのよい溶接構造物を製作する上で重要である。しかしながら現状では、溶接欠陥の判定基準を定める一般的なものとして、

JIS Z 3104「鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」

JIS Z 3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法」

があるに過ぎず、これらの等級分類は構造物の使用条件との関連において、安全性とどのように結びつくかは不明瞭である。

(1) 溶接欠陥およびその分類

溶接欠陥が生ずる原因は多岐にわたり、それに対応して種々の溶接欠陥がある。溶接部に生ずる欠陥を外見上、および内面的なものに分けて列記すると表7-1のようになる¹⁾。これらの溶接欠陥を溶接部の強度という観点から分類すると、

- a. 幾何学的因子（欠陥の形状・寸法）
- b. 材質的因子（欠陥の生成過程に伴って起こりうる欠陥まわりの局部的材質変化）

の2つを挙げることができる。特に破壊強度という力学的な様相には、幾何学的因子が直接的な関係を持ち、実際には、これと溶接部の応力やひずみの性状、さらに材質的因子が重なって強度低下を起こすと考えられる。表7-2にはJIS Z 3104における溶接欠陥の分類を示すが、これは幾何学的側面からみた欠陥の「きびしさ」による分類である。さらに、溶接欠陥の幾何学的側面からは次の3種類に別けて考えると便利である。

- ① 平面的欠陥—割れ・溶け込み不良・融合不良などの近似的に2次元の欠陥
- ② 立体的欠陥—スラグ巻込み・ブローホールの3次元的な広がりを持ち、丸みをおびた欠陥
- ③ その他—上記のどちらとも明瞭でないタイプの欠陥。例えば、アンダーカット

はその横断面の形状と力学的条件により、その取扱いは平面的にも立体的ともなりうる。さらに、突合せ継手部の溶接角変形は、変形による曲げ応力とルート部の応力集中との重畳が強度低下を

表7-1 各種の溶接欠陥¹⁾

外見上の欠陥
ビードの不揃い、ふん状ビード、アンダーカット、オーバラップ、ピット、スパッタ、ビード表裏面の变色、余盛りおよび裏波の異形、ビード継目のアンダーカット、融合不良、各種割れ、変形など
内面的な欠陥
ブローホール、スラグ巻込み、各種割れ、残留応力、溶接金属の偏析、溶接金属およびHAZの軟化および粗粒化組織、各種の析出ぜい化、HAZの軟化など
熱処理および使用中におこる欠陥
溶接金属およびHAZのPWHTぜい化および割れ、熱疲労あるいは熱応力に原因するぜい化または割れ、析出ぜい化、時効ぜい化、粒間腐食、応力腐食割れ、溶接部の軟化、異材継手のボンドぜい化、同じくボンド剥離現象、溶接部の酸化、原子力機器における中性子損傷など

表7-2 JIS Z 3140 による溶接欠陥

	欠 陥 の 種 類
第1種	ブローホールおよびこれに類する丸みを帯びた欠陥
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	割れおよびこれに類する欠陥

もたらずことがあり、欠陥のイメージが明確でない。

これらのうち、有害な欠陥であるかどうか判断する上では、平面的欠陥が最も重要であるが、欠陥の強度に対する影響は単に、その形状寸法だけではなく、それが存在する部位の作用応力が欠陥を拡大して破壊に導くようなものでなければ問題は無い。一方、従来余り問題にされていない小さな立体的欠陥であっても、疲労や腐食などで拡大して平面上のものとなれば、単なる平面的欠陥よりも有害な欠陥と考えられる。溶接構造部にみられる溶接欠陥が疲労強度上有利であるかどうかは、対象とする溶接継手の品質（ルート部・止端部の応力集中の程度）との相対的な関係で決まってくる。すなわち国鉄の継手の等級分類を例にすると、疲労強度はD等級のような継手では、溶接欠陥の存在に依存せず、継手本来の品質で決まるものと考えられる。逆にA等級のような継手では溶接欠陥の存在が疲労強度に影響を及ぼし、亀裂発生の原因となることが予想される。

(2) 溶接欠陥と疲労強度

溶接欠陥と溶接継手の疲労強度の関係については非常に多くの研究が行われ、破壊力学を用いてかなりの程度の解析ができるようになってきている^{2)~6)}。疲労強度を検討するにはまず、荷重条件を確定することが必要である。疲労強度の値は引張強さや降伏点のような材料や継手でひとつの数字で示されるものではなく、平均応力、変動応力、繰返し数の3つの関係で示される。

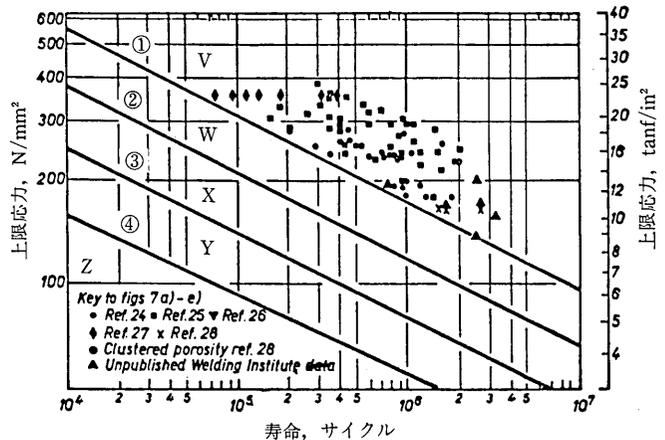


図7-1 3%までの欠陥率の気孔をもつ溶接継手の疲労試験結果⁷⁾

図7-1は、気孔含有率3%(X線フィルム上での気孔の投影面積率)の突合せ溶接継手の疲労試験結果である⁷⁾。試験結果は図中の①より上方にプロットされており、設計条件が直接①より上方の領域にある場合には3%の気孔は許容されない。同様な考え方で気孔含有率の異なる継手の疲労試験結果を解析すると、図7-1に示すような便宜的に引かれた直線①~④によって分けられる5つの領域V~Zにおいて許容される欠陥率は

品質	V	W	X	Y	Z
気孔の許容体積百分率	0	3	8	20	20

となる。3%の気孔含有率とは実際に起こるものよりも非常に欠陥の多いものであり、疲労の観点からは問題とならないと考えられる。

図7-2は、気孔およびスラグ巻込みを含有する余盛なし突合せ溶接継手の片振り最下限疲労強度線図である⁸⁾。この図では破壊後の破面上で欠陥が占める面積と破面の全面積との比 a_s を欠陥含有率としている。この a_s は非破壊試験で求められる欠陥率とは異なるが、ある仮定のもとでの推定された結果によると JIS Z 3104 での欠陥等級分類と関係はおおよそ次のとおりである。

$$a_s = 0.5 \sim 1\% \quad \text{JIS 2} \sim 3 \text{級}$$

$\alpha_s = 1.5 \sim 2\%$ JIS 3級

$\alpha_s = 3 \sim 5\%$ JIS 4級

図7-3は、溶込み不足欠陥が疲労強度に及ぼす影響をまとめたものである⁸⁾。溶込み不足についても欠陥含有率 α_s で整理してあるが、気孔などの立体的な欠陥に比べて、疲労強度への影響は大きい。図7-4は同様に、溶接割れについて整理したものである。割れの場合、図7-2、7-3の気孔、スラグ巻込み、溶込み不足に比べて疲労強度低下の度合が著しい。表7-2に示したように、割れおよびこれに類する欠陥が第3種として分類されており、これらの欠陥は寸法に無関係に4級とされ、溶接継手に許容されないことが一般である。図7-4からわかるように、割れは疲労強度を大きく低下させやすいが、小さな欠陥であっても4級として許容しないことには疲労強度の見地からは問題があり、この場合、欠陥面積率的な考え方で等級分類することも一つの方法である。

一方、アンダーカットはJISの等級分類から外

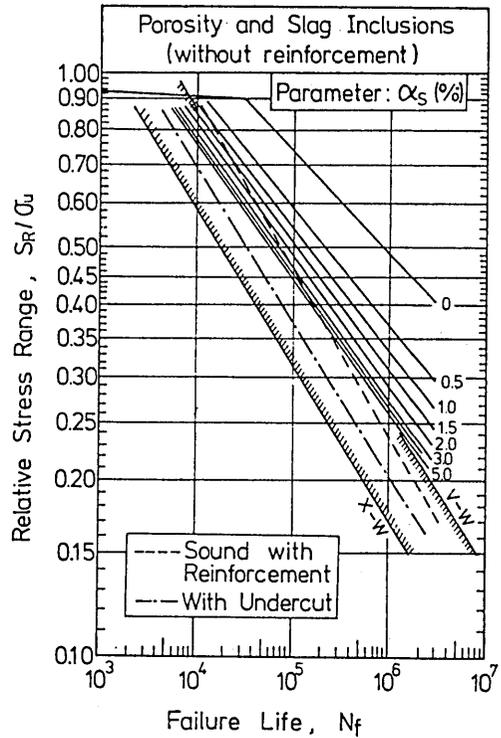


図7-2 気孔スラグ巻込みの影響⁸⁾

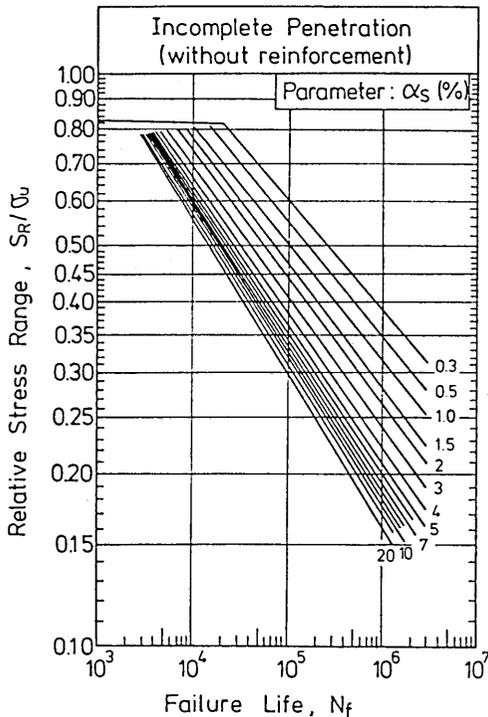


図7-3 溶け込み不足の影響⁸⁾

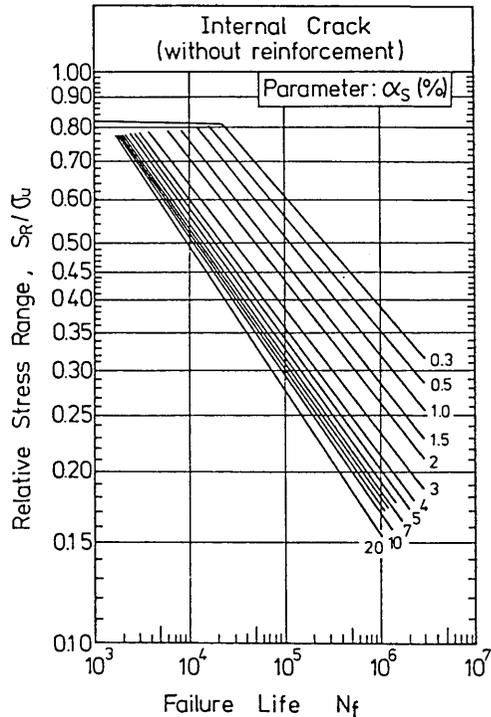


図7-4 溶接割れの影響⁸⁾

れているが、疲労強度に大きな影響を及ぼす。とくに、曲げ成分がある場合には最重要因子である。片振りの軸力成分のみの場合には図7-2の一点鎖線で示したように、深さが1 mm以上2 mmまでの範囲の疲労強度は非常に低い。実際の構造物において、アンダーカットを測定して、そのまま残すかドレッシングして除去するか判断することは困難である。したがって、アンダーカットについては除去した方が疲労強度上ははるかに有利である。

なお、アンダーカットの評価について、Hobbacherは突合せ溶接、横方向すみ肉溶接に分けて、板厚(t)とアンダーカットの深さ(u)の比によってそれぞれ疲労寿命を設定している⁹⁾。図7-5はIIWで推奨している疲労寿命の等級であり、表7-3、7-4にそれぞれの評価を示す。

さらに、疲労強度に関しては余盛りの影響も大きい。図7-2中に余盛り付き継手の疲労強度を示したが、その疲労強度は、高サイクル側では $\alpha_s = 5\%$ の余盛り削除継手の疲労強度より

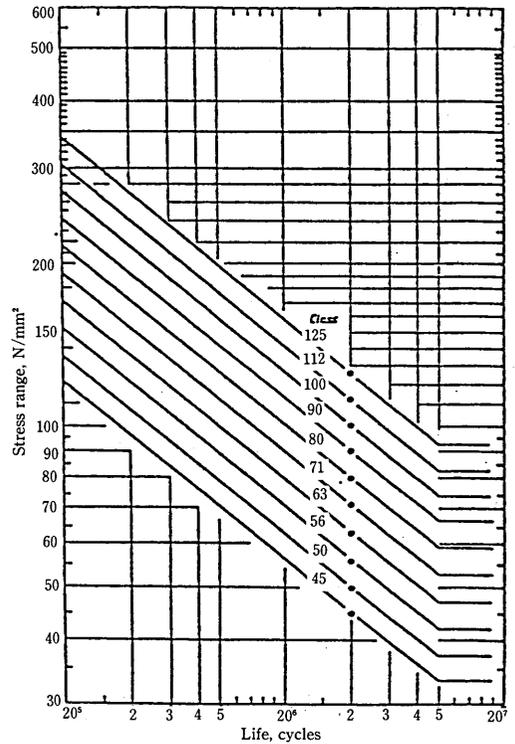


図7-5 疲労寿命の等級⁹⁾

表7-3 突合せ溶接におけるアンダーカットの評価⁹⁾

ratio u/t	Class(N/mm ²)
0.000 — 0.025	100
0.025 — 0.050	90
0.050 — 0.075	80
0.075 — 0.100	71

表7-4 横方向すみ肉溶接におけるアンダーカットの評価⁹⁾

ratio u/t	Class(N/mm ²)
0.000 — 0.050	80
0.050 — 0.075	71
0.075 — 0.100	63

も低い。したがって、余盛りを残した溶接継手では、たとえ内部に溶接欠陥が存在しても余盛り止端の応力集中部から疲労亀裂が発生する場合には、この溶接欠陥が疲労強度に及ぼす影響は比較的小さいと考えることができる。

図7-6はサブマージアーク溶接片面裏波溶接継手の疲労試験結果である¹⁰⁾。図7-7に試験片形状および溶接条件を示すが、ビード形状が良好でない位置から試験片を採取したにもかかわらず、200万回疲労強度は16.7 kg/mm²であり、同一鋼種の両面溶接継手(ビード付き)のこれまで報告されてきている値12~16 kg/mm²に比べて遜色ない値である。また、この種の裏波溶接止端部に発生するアンダーカットは深さが1.5 mm程度までは疲労にあまり関与せず、むしろ、裏ビードのかたよりの方が大きく影響するとしている。さらに、サブマージアーク溶接片面裏波溶接において、放射線透過試験では検出されない微小な中間割れが発生することがあり、このような割れが疲労強度にどのように影

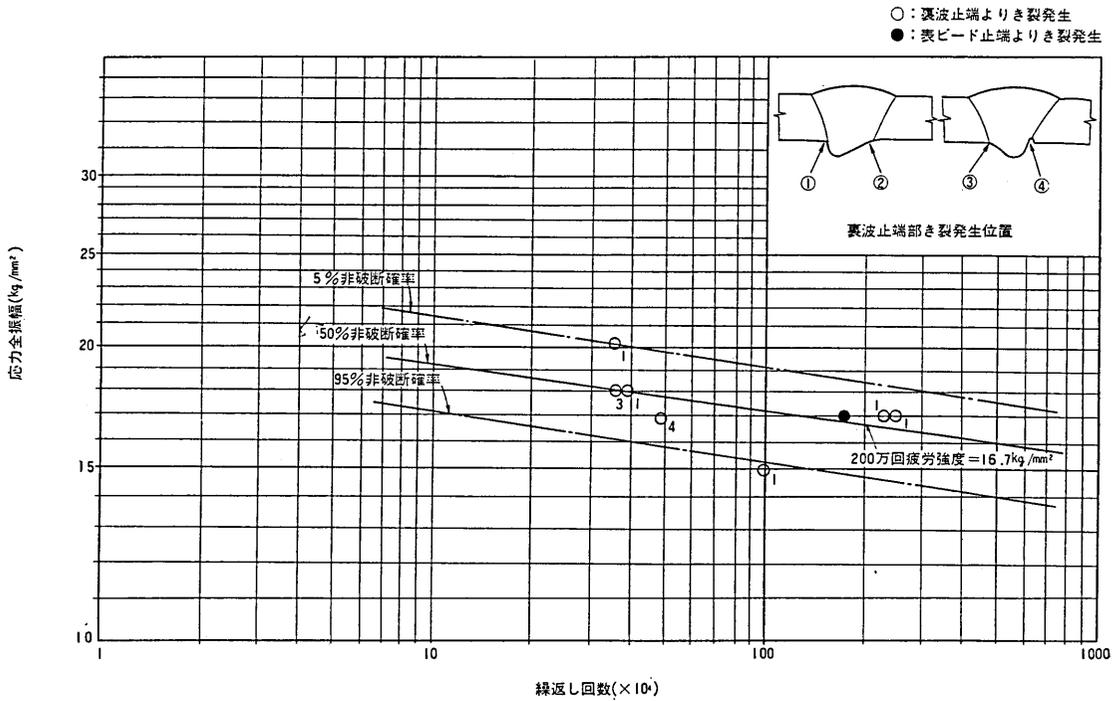


図7-6 S-N線図¹⁰⁾

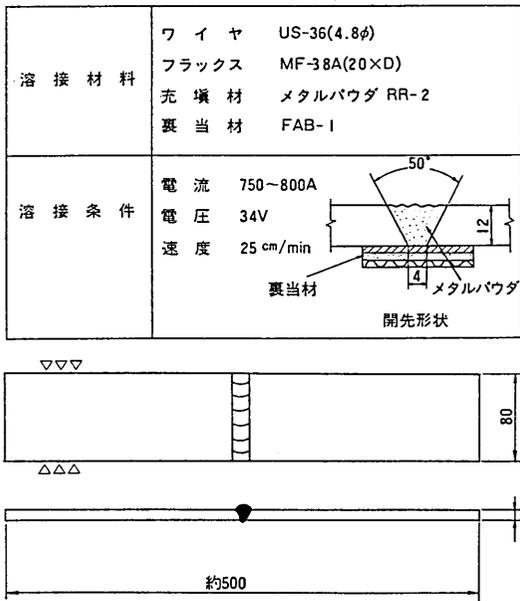


図7-7 溶接条件および試験片寸法¹⁰⁾

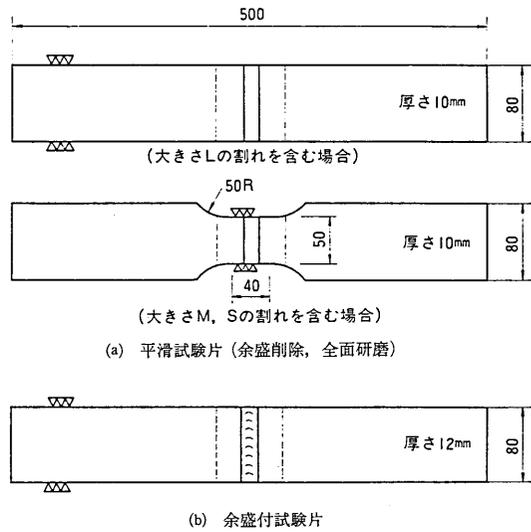


図7-8 疲労試験片¹¹⁾

響するか検討した例もある¹¹⁾。図7-8に試験片形状を、表7-5に割れの大きさ区分を示す。試験結果を図7-9、10に示すが、無欠陥の余盛り付き継手に比べて、大きさS、Mの割れを含む平滑継手の強度はかなり高い。したがって、余盛り付きのまま用いられる継手に対しては、放射線透過試験で検出されない程度の微小な割れが含まれても疲労強度の低下にはつながらないとしている。

このように、溶接欠陥の有害度は破壊形式、継手形式によって異なる。余盛、アンダーカットは静的強度にほとんど影響を及ぼさないが、疲労強度には大きな影響を与える。したがって、想定される破壊形式に無関係に欠陥の等級分類されるべきでなく、非破壊検査、強度、さらには対象とする構造物の安全性・経済性との関連から総合的に検討されなければならない。

参考までに、図7-11にIIW第V委員会が提案している溶接部品質水準の模式図を示す。ここでは品質水準を品質管理に用いられる水準 Q_A と構造物の使用目的にかなった品質水準 Q_B の2つに分けている。水準 Q_B は継手の要求性能を保障するものである。さらに、表7-6にはIIWが提案している水準 Q_A としての許容欠陥寸法を示す。ここで、水準 Q_A に達しない溶接欠陥は必ずしも最終的に許容できないものではなく、また、補修が必要であるということはない。しかしながら、関連する諸条件を加味し、前に述べた方法などにより詳細な評価を行い、許容されるかどうか判定しなければならない。

表7-5 疲労試験片における割れの大きさの区分¹¹⁾

区分	エコー高さ, dB	放射線検査での識別	試験片	
			平滑	余盛り付き
L	+4以下, -6以上	可	○	○
M	-6未満, -20以上	不可	○	—
S	-20未満, -24以上	不可	○	—
N(無欠陥)	—	—	—	○

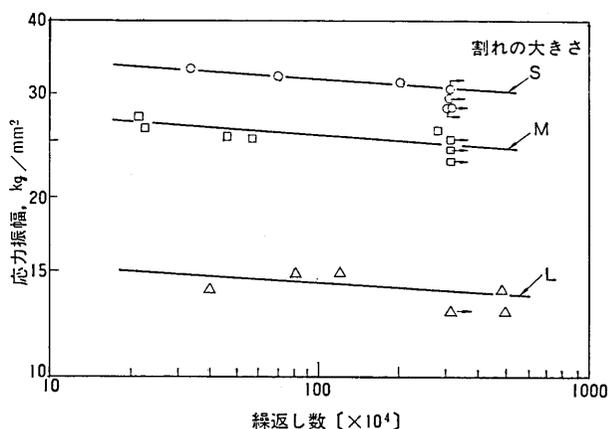


図7-9 割れを含む継手のS-N線図(平滑試験片)¹¹⁾

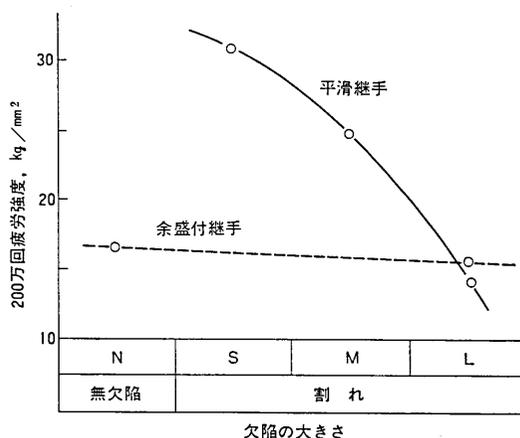


図7-10 内在する割れの大きさと疲労強度¹¹⁾

表 7-6 品質管理の目的の許容欠陥寸法⁷⁾

略号 e = 母材の板厚, 板厚が異なる場合には e は薄い方の板厚に適用。
 w = 幅
 l = 長さ
 h = 深さ
 ϕ = 直径
 欠陥の寸法。

欠陥の形式	許容される最大値
平面欠陥	
亀裂および割裂離	許容せず
ルートの融合不良 側壁の融合不良 層間の融合不良	許容せず
ルートの溶込み不良	許容せず
空洞	
a) 孤立した気孔 (または群のうち) (の個々の気孔)	$\phi > e/4$ および $\phi 1.5\text{mm}$: e が 25mm 以下の場合 $\phi 3.0\text{mm}$: e が 25mm を超え, 50mm 以下の場合 $\phi 4.5\text{mm}$: e が 50mm を超え, 75mm 以下の場合 $\phi 6.0\text{mm}$: e が 75mm を超える場合
b) 一線に分散した局所的な多孔性	1% (放射線写真で見ても) $e > 25\text{mm}$ の場合それ以上の板厚に対しては比例させる。
c) 線状多孔性	溶接線の軸に平行な線状多孔性では, 許容されない融合不良または溶込み不足を示しているかもしれない。
d) 孤立した虫孔	$l > 6\text{mm}$, $w > 1.5\text{mm}$
e) 一線に列んでいる虫孔	線状多孔性と同じ
f) クレーターバンプ	孤立した虫穴と同じ
固体介在物	
スラグ巻込み	a) 個々の溶接軸に平行なもの $e > 18\text{mm}$ $75 \geq e > 18\text{mm}$ $e > 75\text{mm}$ $l > e/2 > 6\text{mm}$ $l > e/3$ $l > 25\text{mm}$ $w > 1.5\text{mm}$ $w > 1.5\text{mm}$ $w > 1.5\text{mm}$ b) 線状群* (注 1 参照) 長さの合計は群の長さの 8% をこえてはならず, 群の長さは $12e$ をこえてはならない。 c) 個々のそして方向がランダムなもの (溶接の軸と平行でない) あらゆる方向について最大寸法は 6mm
タンク介在物	a) 孤立したもの 孤立した気孔と同じ b) 群をなすもの 一様に分布した, または局所的な多孔性と同じ
銅介在物	許容せず
外形の欠陥	
アンダーカット	わずかな断続的なアンダーカットは, 鋭い切欠を形成しなければ許容されるが, 深さは 0.4mm をこえてはならない。
収縮によるグループおよびルートの凹入	アンダーカットについては, 深さは 1.2mm をこえてはならない。
溶込み過多	$h > 3\text{mm}$ たまに局所的に少し過多になるのは許容
余盛形状	余盛は母材にスムーズに融合していなければならない。そして, 形状が, 規定されたNDT技術に支障をきたさないかぎりドレッシングは普通要求されない。
オーバーラップ	許容されない。
線状目違い	$h > e/10$, 最大 3mm

表 1 の注

- 群の中の個々の介在物は上の a) に示す寸法をこえてはならない。
 線状の群とは, 溶接の軸に平行に一線にならんだ多数の介在物であり, 相隣る端部間の距離は $6l$ をこえないものと定義する。ここで l はその群の中の最長の介在物の長さである。平行な群にあっては集中しているものとして全ての介在物を計算に入れる。
- 二種類以上の形式のおおの許容される欠陥は一定の溶接長の中に同時に存在することが許容され, 各形式ごとに個々に評価される。

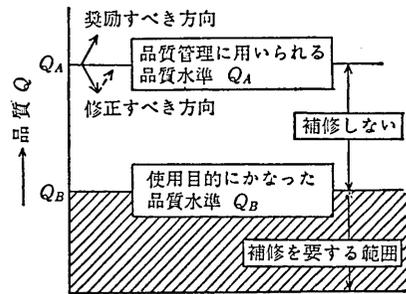


図 7-11 溶接品質水準の模式図⁵⁾

参考文献

- 1) 新成夫: 溶接欠陥の要因とその対策, 溶接技術, 1974.1.
- 2) 益本功: アレックス・ノイマン: 機械工学大系 42-溶接構造論, コロナ社.
- 3) 成田四郎: 欠陥と強度の関係, 溶接技術, 1977.6.
- 4) 応和俊夫: 溶接構造物の脆性破壊, 溶接技術, 1974.7.
- 5) 佐藤邦彦・向井喜彦・豊田政男: 溶接工学, 理工学社.
- 6) 日本溶接協会規格・WES 2805-1980: 溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法.
- 7) J.D. Harrison: British Work on the Significance of Weld Defect, 溶接欠陥の評価と継手強度に関するシンポジウム, 1972.11 (井上馨訳, 非破壊検査, Vol.22, No.11, 1973).
- 8) 飯田国広: 溶接欠陥が疲労強度に及ぼす影響, 非破壊検査, Vol.22, No.11, 1973.
- 9) A.Hobbacher: Recommendations for Assessment of Weld Imperfections in Respect to Fatigue, IIW-1266-88.
- 10) 松本: サブマージーク片面裏波溶接継手の疲労試験, 横河橋梁技報, No. 7, 1977.
- 11) 夏目: 片面サブマージーク溶接の中間割れの研究, 横河橋梁技報, No.8, 1978.