第5章　検査と品質管理

《検査》

37　非破壊試験と破壊試験を対比すると？

Q-37　非破壊試験とはどう言うことですか．破壊試験と対比して教えて下さい．

A-37　完成した製品の性能を調査するために，製品を切断して断面を観察したり，引張試験片を採取して強度を調査することなどを破壊試験と言います．当然のことですが，破壊試験を行えば，目的とする評価項目についての詳細な調査が可能であり製品の性能を正しく評価することは出来ますが，製品の価値が損なわれますので売り物にはなりません．従って破壊試験は，抜き取りで行われるのが普通です．しかも製品が高価な場合，また製作個数が少ない場合には，経済的にも破壊試験は行えません．

これに対して非破壊試験とは，対象物の価値を損なわずに，材料素材，製品，構造物などについて，その性質，状態，内部構造及び内部欠陥の有無などを知るために行う試験のことを言います．製品の価値を損ないませんので，全数検査が可能です．

非破壊試験の種類としては，目視による外観試験（VT）を始めとして，放射線透過試験（RT），超音波探傷試験（UT），磁気探傷試験（MT），渦流探傷試験（ET），浸透探傷試験（PT）などがあります．なお，磁気探傷試験は対象物が強磁性体に限定されますので，アルミニウム合金には適用出来ません．溶接部の欠陥に対して非破壊試験を適用する場合，対象とする欠陥の種類によっては，適しているもの，不適当なもの，注意して適用しないといけないものがあります．アルミニウム合金溶接部の欠陥別に各種非破壊試験法の適用の可否を整理した結果を **Table 20** に示します．

検出しようとする欠陥について，不適当な試験方法を用いたり，試験条件が正しくなかった場合には，その試験結果の信頼性は低くなります．検出しようとする欠陥の性質に適した試験方法，試験条件を選択することが必要です．そのためには，検出しようとする欠陥を予測すること，即ち，試験体の材質，加工の種類，加工履歴，使用履歴などを検討して，どのような種類の欠陥が，どの部分に，どのような形状をして，どの方向に存在している可能性があるのか想定することが重要です．その想定欠陥に対して最適な非破壊試験方法を選択し，その試験方法が最大の能力を発揮出来るような試験条件を選ばねばなりません．非破壊試験の難しさはこの点にあります．

Table 20　溶接欠陥の種類と試験方法

欠陥＼試験方法	VT	RT	UT	PT
変形	○	×	×	×
溶接寸法	○	×	×	×
溶接形状	○	×	×	×
ブローホール（気孔）（表面）	○	×	×	○
ブローホール（気孔）（内部）	×	○	△	×
酸化物の巻込み	×	○	△	×
タングステンの巻込み	×	○	×	×
銅の巻込み	×	○	△	×
融合不良	×	△	○	×
溶込不良	×	△	○	×
割れ（表面）	○	×	×	○
割れ（内部）	×	△	○	×
アンダカット	○	×	×	×
オーバラップ	○	×	×	×

VT：目視による外観試験
RT：放射線透過試験
UT：超音波探傷試験
PT：浸透探傷試験
○　：適用できる
△　：検出できない場合もある
×　：適用しない

非破壊試験の結果から，試験体の品質や製品の寿命を評価する場合には，1種類の非破壊試験結果だけでなく，相互に短所を補い合うために，複数の非破壊試験を併用して数多くの情報を収集し，過去に実施した破壊試験結果や調査結果も参考にして総合的な判断を下す必要があります．

非破壊試験の評価には，試験方法の選択，試験条件の設定，製造技術や破壊事故の調査事例に関する幅広い知識などが必要ですので，非破壊試験の技術認定制度が実施されており，技量認定試験に合格した技術者が試験を担当することになります．この技量認定制度は，㈳日本非破壊検査協会（NDI）が昭和43年から実施しており，その内容は NDIS 0601-88『非破壊検査技術者技量認定規程』に定められています．

参 考 文 献

1) アルミニウム合金構造物の溶接施工管理—Ⅶ：アルミニウム合金の溶接部の非破壊試験，㈳軽金属溶接構造協会，P. 1～4.

38 アルミニウム溶接部の放射線透過試験に軟X線が使われる理由は？

Q-38 アルミニウム合金溶接部の放射線透過試験には，軟X線装置が適していると言うことですが，その理由を教えて下さい．

A-38 放射線透過試験に用いられるX線管は，**Fig. 61** に示すような陰陽2つの電極をもつ真空管です．陰極のタングステンフィラメントに電流を流して白熱状態にすると，熱電子が真空中に放出され，陰極と陽極との間に高い電圧(管電圧)を与えると，熱電子は陰極から陽極に向かって加速されて陽極の金属に衝突し，X線が発生します．熱電子の流れる量を管電流と言い，管電流を変えるには陰極フィラメントの加熱電流を変化させて，熱電子の放出量を制御します．

X線管で発生するX線は，**Fig. 62** に示すように，連続スペクトルを示す白色X線です．管電流を一定にして管電圧を変化させると，管電圧が高くなるにつれて曲線は波長の短い側に移動し，透過能力の強いX線になります．

X線装置には，軽金属用と鉄鋼用の2種類があり，軽金属用には軟X線装置が用いられ，鉄鋼用のX線装置を使用すると所定の透過度計の針金の識別が得られない場合があります．

Fig. 63 は，軟X線装置と鉄鋼用に使用されているX線装置による吸収曲線を対比して示したものです．実線が軟X線装置，破線が通常のX線装置の吸収曲線です．横軸はアルミニウムの厚さ（mm）であり，縦軸は透過線量率（mR/min）を示しています．

管電圧を高くしますと，透過線量率は大きくなりますが，曲線の傾きが小さくなりますので，透過写真のコントラストが低下します．アルミニウム溶接部では，X線が透過する厚さ（材厚）が8 mm程度以下であれば，軟X線の吸収が少ないベリリウム窓のX線管を使用した軟X線装置を使用すると，コントラストが鮮明な透

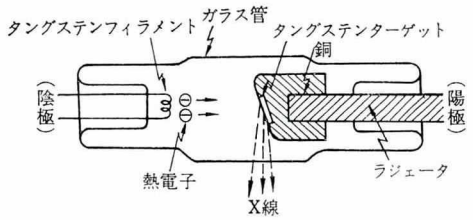

Fig. 61 X線管の構造

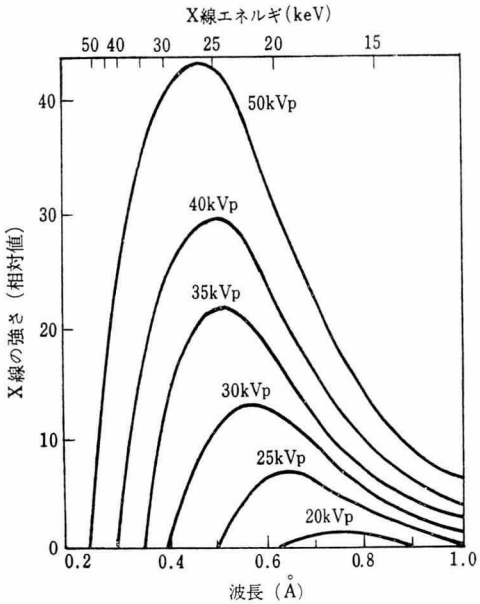

Fig. 62 白色X線のスペクトル

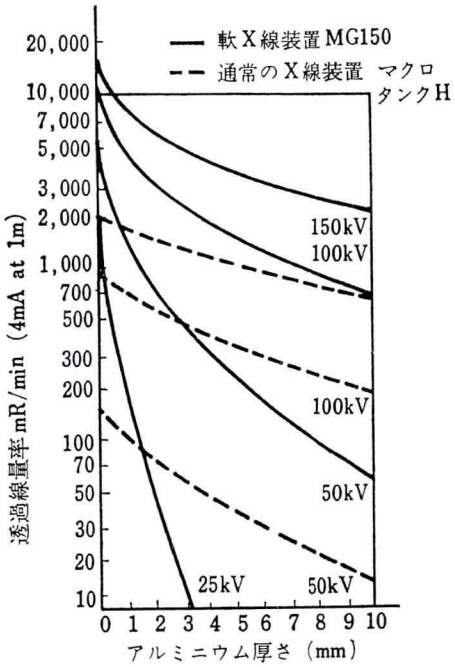

Fig. 63 2種類のX線装置による吸収曲線の比較

Table 21　軟X線装置の仕様（カタログによる）

仕様 軟X線装置	型式	管電圧 (kVp max)	管電流 (mA max)	焦点寸法 (mm)	電源 (V)	X線発生器 重量 (kg)	X線発生器 寸法 (mm)	制御器 重量 (kg)	制御器 寸法 (mm)
MG 150	据置式	150	3/12	0.7/2.5					
EXS-50-2	〃	50	5	0.5	100				
ウエルテス60-2	携帯式	60	4	2.5	100, 200	19	261×292×368	14	380×310×200
SOFTEX K-2	〃	60	5		100, 200	11.5	150×250×230	9	200×300×230
ラジオフレックス100GS	〃	100	5	1	200	27	569×323×205	18	350×335×197
MN-S-10PA	〃	100	5	1	180-250	26	180×300×500	30	410×470×240

Table 22　工業用X線フィルムの分類

種類	性能	該当する銘柄 富士
けい光増感紙用 （スクリーンタイプ）	高感度	#400
金属はく増感紙用 （ノースクリーンタイプ）	中感度 （微粒子）	#150 #100
	低感度 （超微粒子）	# 80 # 50 # 25

過写真が得られるわけです．

透過線量率の減少を補うためには，長時間の露出が必要となり，作業能率の低下を招きます．一方，強いX線装置を用いますと，短時間の露出で撮影が出来ますが，吸収曲線の傾きが小さくなるために透過写真のコントラストが低下して，透過写真の必要条件を満足させられないことになります．アルミニウム溶接部でも厚物になれば，露出時間の関係から，鉄鋼用のX線装置が使用されます．**Table 21** には，軟X線装置の仕様を参考までに示します．

透過写真の像質には，使用するX線フィルムと増感紙が影響します．**Table 22** には，工業用X線フィルムの分類を示します．アルミニウム溶接部に対しては低感度（超微粒子）のフィルムを使用するのが一般的です．材厚が厚い場合には，露出時間の短縮を目的に中感度（微粒子）のフィルムが採用されますが，低感度フィルムよりもきず識別度が低下しますので，注意が必要です．

増感紙は，フィルム感度を増加させたり，散乱線の除去を行う役割があります．高感度フィルムには $CaWO_4$ 等のけい光作用を利用したけい光増感紙が用いられ，低感度フィルムの場合には，鉛箔を使った金属増感紙が用いられます．しかし，アルミニウム溶接部の撮影では管電圧が80 kVp 以下では使用しません．透過写真像を構成している個々の銀粒子は微細なもので，これが集合して像を形づくっています．一般に，高感度のフィルムほど粒子が大きくなるため，微細なきずの検出には適さなくなります．

参考文献

1）『アルミニウム合金構造物の溶接施工管理—Ⅶ：アルミニウム合金の溶接部の非破壊試験』，P. 5～8，㈳軽金属溶接構造協会．

39　放射線透過写真によるきずの像の分類は？

Q-39　アルミニウム合金溶接部の放射線透過写真のきずの像の分類について教えて下さい．

A-39　JIS Z 3105 に『アルミニウム平板突合せ溶接部の放射線透過試験方法』が規定されており，その附属書に『透過写真によるきずの像の分類方法』が記載されています．

分類方法の手順は，まず透過写真が具備すべき条件を満足しているか否かを確認することから始まります．確認項目として以下の3項目が定められています．

①透過度計の識別最小線径

②試験部の写真濃度

③階調計の（濃度差/濃度）の最小値

透過度計の識別最小線径は，透過度計の形の種類が試験部の材厚に対して適正であるか，透過度計の置き方が適正であるか，透過度計の識別本数から要求されている像質を満足しているかを確認します．**Table 23** に材厚と識別最小線径の関係を示します．なお透過写真の像質は，A級及びB級に区分され，A級は，一般的な撮影技術によって得られます．B級は，きずの検出の程度が特に高くなるような撮影技術によって得られます．

試験部の欠陥以外の部分の写真濃度は，像質に応じて2段階に規定されており，**Table 24** に像質区分と濃度範

Table 23　透過度計の識別最小線径

（単位：mm）

母材の厚さ ＼ 像質区分	A 級	B 級
6.3未満	0.125	0.10
6.3以上　8.0未満	0.16	0.125
8.0以上　10.0未満	0.20	0.16
10.0以上　12.5未満	0.20	0.16
12.5以上　16.0未満	0.25	0.20
16.0以上　20.0未満	0.32	0.25
20.0以上　25.0未満	0.32	0.25
25.0以上　32.0未満	0.40	0.32
32.0以上　40.0未満	0.50	0.40
40.0以上　50.0未満	0.50	0.40
50.0以上　63.0未満	0.63	0.50
63.0以上　80.0未満	0.80	0.63
80.0以上100　未満	0.80	0.63
100　以上125　未満	1.00	0.80
125　以上160　未満	1.25	1.00
160　以上200　未満	1.60	1.25

Table 24　透過写真の濃度範囲

像質区分	濃度範囲
A 級	1.3以上3.5以下
B 級	1.8以上3.5以下

囲の関係を示します．

階調計は，透過写真のコントラストを調べる目的で使用され，撮影条件や現像処理が適正か否かを判断するために重要なものです．階調計の濃度差は，母材の厚さと材厚の値を考えて階調計の形が適正か，階調計のどの部分の濃度を測定して濃度差/濃度を求めるか，得られた濃度差/濃度の値がその材厚において規定値を満足しているかを確認します．**Table 25** には，材厚と濃度差/濃度の最小値を示しており，階調計の濃度差を測定して，その値が階調計の厚さが薄い方の部分の濃度で除した値が，**Table 25** に示す規定値以上でなければなりません．

次に欠陥の種類を区別します．透過写真上で判別出来るアルミニウム溶接部の欠陥としては，ブローホール，タングステンの巻込み及びこれに類似する欠陥，酸化物の巻込み，溶込み不良，融合不良，銅の巻込み，割れ及びアンダーカットがあります．表面欠陥であるアンダーカットは，強度低下に大きく影響する重大な欠陥ですが，外観試験など他の方法で検査が出来るため，この等級分類からは除外されています．また酸化物の巻込みは，その寸法が2.0 mm 以下の場合は，ブローホールなどと同じ取扱いを行い，2.0 mm を越える長さの場合は，欠陥長さを求めて等級分類を行います．

分類は，上位から 1 類，2 類，3 類，4 類に分類されます．割れについては，ブローホールなどの比較的丸みを持った欠陥に比べて応力集中が大きく，強度に及ぼす影響が大きいため，存在すれば最下級の 4 類となります．銅の巻込みが存在する場合も 4 類となります．ブローホール，タングステン巻込み及び2.0 mm 以下の酸化物の巻込みについては，欠陥が最も密に存在する部分に試験視野を適用して欠陥点数を求め，その結果により 1 類から 4 類に分類します．**Table 26** に母材の厚さと試験視野の大きさを示します．なお，長さが2.0 mm を越える酸化物の巻込み，溶込み不良および融合不良については，**Table 27** の欠陥の大きさと点数に従って欠陥点数を求め，その結果により分類します．なお，タングステンの巻込みは，強度に及ぼす影響がブローホールの場合よりも小さいため，欠陥点数はブローホールの場合の 1/2 に算定します．また **Table 28** に示す大きさの欠陥

Table 25　階調計の（濃度差/濃度）の最小値

母材の厚さ mm		6.3未満	6.3以上 8.0未満	8.0以上 10.0未満	10.0以上 12.5未満	12.5以上 16.0未満	16.0以上 20.0未満
階調計の種類		D 形			E 形		
濃度差/濃度	A 級	0.09	0.07	0.05	0.11	0.09	0.07
	B 級	0.11	0.09	0.07	0.13	0.11	0.09

母材の厚さ mm		20.0以上 25.0未満	25.0以上 32.0未満	32.0以上 40.0未満	40.0以上 50.0未満	50.0以上 63.0未満	63.0以上 80.0未満
階調計の種類		F0 形			G0 形		
濃度差/濃度	A 級	0.08	0.07	0.06	0.09	0.08	0.07
	B 級	0.09	0.08	0.07	0.10	0.09	0.08

Table 26　試験視野の寸法

（単位：mm）

母材の厚さ	20.0未満	20.0以上80.0未満	80.0以上
試験視野の寸法	10×10	10×20	10×30

は，欠陥点数に算定しません．

欠陥点数が算定出来れば，**Table 29** に示す母材の厚さと欠陥点数の関係から，きずの分類を行います．但し，きずの像の寸法が母材の厚さの 1/3 を越える時には 1 類にはしません．また，母材の厚さの 2/3 または10.0 mm のいずれか小さい方の値を越えるきずの像がある場合は 4 類となります．3 類のきず点数が連続して試験視野の 3 倍を越えて存在する場合も 4 類となります．また，溶込み不良，融合不良及び2.0 mm を越える酸化物の巻込みの分類は，**Table 30** によって行います．

Table 27　きずの点数

きずの像の寸法（mm）	きずの点数
1.0以下	1
1.0を超え，2.0以下	2
2.0を超え，4.0以下	4
4.0を超え，8.0以下	8
8.0を超え，10.0以下	16

Table 28　算定しないきずの像の寸法

（単位：mm）

母材の厚さ	像の寸法
20.0未満	0.4
20.0以上40.0未満	0.6
40.0以上	母材の厚さの1.5%

Table 29　きず点数による分類

試験視野 mm	10×10				10×20		10×30
母材の厚さ mm / 分類	3.0未満	3.0以上 5.0未満	5.0以上 10.0未満	10.0以上 20.0未満	20.0以上 40.0未満	40.0以上 80.0未満	80.0以上
1 類	1	2	3	4	6	7	8
2 類	3	7	10	14	21	24	28
3 類	6	14	21	28	42	49	56
4 類	きず点数が 3 類より多いもの						

Table 30　きず長さによる分類

（単位：mm）

母材の厚さ / 分類	12以下	12を超え48未満	48以上
1 類	3 以下	母材の厚さの1/4以下	12以下
2 類	4 以下	母材の厚さの1/3以下	16以下
3 類	6 以下	母材の厚さの1/2以下	24以下
4 類	きず長さが 3 類より長いもの		

参　考　文　献

1）「アルミニウム合金構造物の溶接施工管理―Ⅶ：アルミニウム合金の溶接部の非破壊試験」，P. 5～23.
㈳軽金属溶接構造協会

2）JIS Z 3105「アルミニウム平板突合せ溶接部の放射線透過試験方法」.

40　ブローホールの合否判定と機械的性質との関係は？

Q-40　アルミニウム合金の溶接部にはブローホールが発生しやすいとされています．X 線検査では合否判定基準が定められていますが，ブローホールの大きさ，数，密集度と機械的性質（引張強さ，耐力，伸び）との定量的な関係について教えて下さい．

A-40　アルミニウム溶接部のブローホール（気孔又はポロシティ）と機械的性質の関係については数多くの文献があり，中でも Lawience 等[1)]は詳細な実験解析により定量的な評価を行っています．すなわち **Table 31** は結果の一例で，母材5083（板厚25.4 mm）を溶加材5183でミグ溶接した継手の破断面から求めた気孔面積率と X 線判定（ASME Sec. VIII div. 1, Acceptance Porosity Chart）及び強度の関係を示したものであります．気孔はシールドガス中に水素又は水蒸気を添加させることにより発生させており，気孔径が0.25 mm 以上をマクロポロシティ，0.025～0.25 mm までをミクロポロシティと分類して，マクロポロシティが破面での

Table 31　X 線透過試験による合否の判定と気孔面積率の比較[1)]

材　料 5083/5183	板厚 (in)	余盛	引張強さ (KSI)	気孔量の分類	気孔面積率(%) P_{micro}	P_{macro}	P_{total}	X 線判定① (ASME Sec. VIII)	備　　考
M−0	1	ナシ	44.8	無欠陥	0.0	0.0	0.0	A	X 線フィルム 1 分間の注視
		アリ	48.0		—	—	—	A	明確
M−1	1	ナシ	44.4	小	4.6	0.0	4.6	A	1 分間の注視
		アリ	48.1		—	—	—	A	分散した微細気孔
M−2	1	ナシ	41.2	中	10.0	9.7	19.7	U	線状気孔
		アリ	48.4		—	—	—	A	分散した微細気孔
M−3	1	ナシ	40.1	大	16.6	0.2	16.8	A	集中した線状気孔（ルート面）
		アリ	—		—	—	—	—	—
R−0	1	ナシ	45.0	無欠陥	0.6	0.4	1.0	A	明確
		アリ	47.0		—	—	—	A	明確
R−1	1	ナシ	34.1	小	8.9	1.4	10.3	U	ルート部の溶け込み不良
		アリ	46.6		—	—	—	A	明確
R−2	1	ナシ	40.6	中	24.2	0.0	24.2	A	明確
		アリ	40.0		25.6	1.0	26.6	BU	微細気孔多数
R−3	1	ナシ	37.9	大	32.0	0.0	32.0	A	気孔 2 個
		アリ	41.7		32.4	0.5	32.9	U	微細及び中気孔多数

注　① A：合格，U：不合格，BU：合否の限界

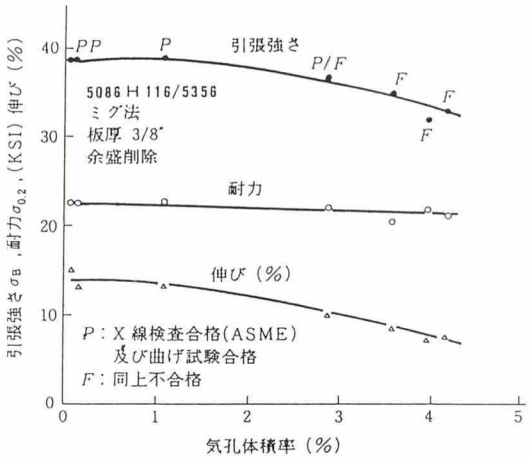

Fig. 64　静的引張性質及び曲げに及ぼす気孔の影響[2)]

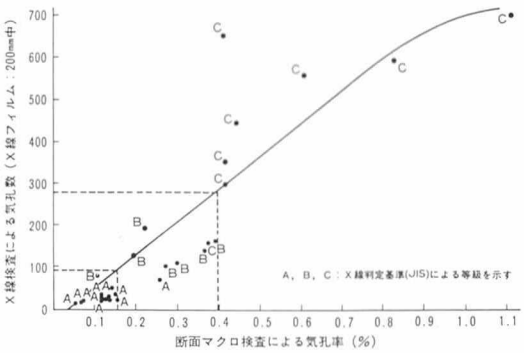

Fig. 65　アルミニウム合金溶接部の測定における断面検査法と X 線検査法の相関[3),4)]（5083/5183，ミグ横向，板厚10 mm）

気孔面積率で 1%程度が ASME Code による合否のボーダーラインであり，ミクロポロシティの強度に及ぼす影響は小さく，ミクロ及びマクロポロシティの和を総ポロシティとして断面積に占める気孔率を算出し，機械的性質との関係を求めています．ここでは余盛の有無に関わらず総気孔面積率が 5%程度以下の場合，耐力の変化は無く引張強さも，ばらつきの範囲内で殆ど減少せず何れも規格強度を満足しています．ただし伸びの値は気孔面積率の増加と共に明らかに減少しています．結論として，前述の ASME Code の標準ポロシティチャートは X 線写真から測定した気孔面積を検査面積（溶接長 152.4 mm）の 1%以下を判定の合格基準としたものであります．

Ashton 等[2)]は気孔量を気孔体積率で評価し機械的性質との関係を調べている．**Fig. 64** に結果の一例を示します．余盛削除の気孔体積率が4.3%以下の場合，機械的性質の内気孔量の影響を受けるのは引張強さと伸びで，

Table 32　ASME（Sec. V111 div. 1）とJIS Z 3105の比較[5]

規格 / 板厚 in（mm）	ASME（溶接長 6in 当たりの放射線写真における最高許容気孔指示）			JIS Z 3105 試験視野（10×15）mm 内における欠陥点数				
	気孔の分類	気孔径気（mm）	孔数（個）	試験視野（10×15）内の気孔径（mm）	気孔数（個）	気孔の係数	欠陥点数	判　定（JIS 等級）
1/2(12.7)	大気孔群	2.54	4	2.54	2	4	8	B
	中気孔群	0.78	40	0.78	7	1	7	B
	小気孔群	0.49	101	0.49	12	1	12	B
	混合気孔群	2.54	1	2.54	1	4	4	B
		0.78	15	0.78	4	1	4	
		0.49	35	0.49	4	1	4	
							12	
3/4(19.5)	大気孔群	3.17	4	3.17	3	4	12	B
	中気孔群	0.86	50	0.86	8	1	8	B
	小気孔群	0.61	99	0.61	14	1	14	B
	混合気孔群	3.17	1	3.17	0	—	—	B
		0.86	19	0.86	4	1	4	
		0.61	35	0.61	10	1	10	
							14	
1(25.4)	大気孔群	3.17	5	3.17	3	4	12	B
	中気孔群	0.99	50	0.99	10	1	10	B
	小気孔群	0.69	101	0.69	16	1	16	B
	混合気孔群	3.17	1	3.17	0	—	—	B
		0.99	21	0.99	3	1	3	
		0.69	38	0.69	11	1	11	
							14	
2(50.8)	大気孔群	3.17	10	3.17	4	4	16	B
	中気孔群	1.39	51	1.39	5	2	10	B
	小気孔群	0.99	100	0.99	10	1	10	B
	混合気孔群	3.17	2	3.17	1	4	4	B
		1.39	21	1.39	1	2	2	
		0.99	38	0.99	3	1	3	
							9	
4(101.6)	大気孔群	3.17	20	3.17	4	4	16	B
	中気孔群	1.98	50	1.98	8	2	16	B
	小気孔群	1.39	101	1.39	15	2	30	C
	混合気孔群	3.17	4	3.17	3	4	12	B
		1.98	21	1.98	1	2	2	
		1.39	40	1.39	0	—	—	
							14	

注）JIS 等級 B は概ね第 1 回改定 JIS 2 級（現 JIS 2 類）に相当する．

耐力は殆ど影響を受けないとし，気孔体積率が 1%までは引張強さも無欠陥材と同等の値を持つとしています．図中の記号 P は曲げ試験で合格，F は不合格を示すが，曲げ試験の合否の限界気孔量は体積率で2.9%でありこの限界量は余盛有りで X 線の合格許容値（前記 ASME Code）とも一致しています．

簑田，永岡等[3),4)]は断面マクロ試験による気孔率と X 線等級の関係を調べ，解析した結果の一例を **Fig. 65** に示します．X 線判定は JIS Z 3105 を適用，A, B, C は JIS 制定初期の等級分類によるもので，B 級は第一回改定 JIS のほぼ 2 級に相当します（現行 JIS では 2 類であるが，グレードを判り易くするために，以降 2 級と表現する）．ここで JIS 2 級（B 級）の気孔限界量は気孔率 0.4%であることが判ります．

前述の ASME Code によるポロシティチャートを JIS Z 3105 に従って判定した結果を **Table 32**[5)]に示します．ASME Code による合格基準は何れの条件においても JIS 基準 2 級（B 級）に相当しています．

まとめ：

(1) アルミニウムの場合，常温では水素の固溶がほとんど無いので，鋼と異なり水素脆性などによる割れ発生の問題が無い．溶接部の気孔は単純に断面積の減少率で判断するのが一般的である．気孔面積率が5%程度以下の場合静的強度への影響は小さい(気孔面積率が大きい場合，伸び及び曲げ延性に影響する)

(2) アルミニウム溶接において通常管理状態にある標準的溶接ではJIS Z 3105の2級（2類）及びASME Codeの合格基準における気孔面積率は1%程度以下であり，機械的性質（引張強度，耐力，伸び，曲げ）への影響は殆ど無い．叉溶接部余盛の有無に関わらず疲労強度への影響も殆ど無い．

(3) アルミニウムの溶接ではJIS Z 3105の2級(2類)以上であれば，その品質は管理状態にあると判断してよい．

(4) 気孔面積率から判断して3級（3類）の上位に属する欠点数も許容してよいと考えられるが，3級上位のものが連続して多く存在する溶接部は必ずしも充分管理された溶接とはいえない場合が多い，従って重要構造物では2級以上を合格とするのが品質管理上好ましいといえる．

(5) 現在我が国における各種アルミニウム溶接構造物における規則（標準）例えば，電気事業法，ガス事業法，高圧ガス基準，LNG船アルミニウムタンク（Type Bによる疲労及び破壊解析を実施）品質保証基準等において溶接部のX線判定基準は2類以上を合格と定めている．

参 考 文 献

1) F. V. Jawience, Jr. and W. H. Munse: WRC Bulletin No. 181, 1973/2.
2) R. F. Ashton, R. P. Wesley and C. R. Dixon: Welding Research Suppliment, 1975/3.
3) 栗山，簑田，永岡，石川：石川島播磨技報，第15巻，第1号，昭和50年.
4) 永岡英之：Al-Mg合金5083-O厚板の溶接に関する研究，学位論文，昭和57年11月.
5) 簑田，入沢：軽金属溶接，Vol. 14, No. 4. 1976/4.

《品質管理》

41 スマット（黒粉）の溶接部性質への影響は？

Q-41 アルミニウム合金のビードに付着するスマット（黒粉）は，溶接部の性質に影響がありますか？

A-41 アルミニウム合金のミグ溶接において，溶接ビードの近傍に黒い付着物が生成することが多くあります．この付着物は，スマットと呼ばれているもので，その典型例を**Fig. 66**に示します．

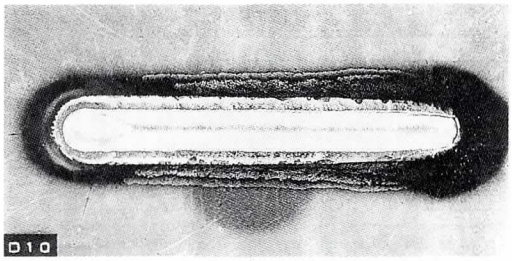

Fig. 66 スマットの典型例

㈳軽金属溶接構造協会の施工法委員会では、このスマットに関する共同試験を平成7年4月から平成9年3月にかけて実施し，『アルミニウム合金のMIG溶接時に発生するスマットの研究』として取り纏められて本誌に掲載されております．

この共同試験では，スマットについて幅広い角度から調査検討が加えられており，「スマットの影響」も報告されております．ここでは，その概要を紹介します．

1. 溶込み形状への影響

A1005P-Oの厚板材を供試材とし，種々の溶接ワイヤを用いてミグ溶接が行われ，その溶接試験片のビード中央部における横断面のマクロ組織が調査されております．ビード表面にはスマットが発生しておりますが，溶込み形状は健全なものが得られており，スマットが発生しても溶込み形状には影響がないことが確認されております．

2. 内部品質への影響

上述の試験片について放射線透過試験が行われ，内部品質が調査されております．いずれの試験片においても内部欠陥は認められず，健全な溶接継手が得られていることが確認されております．

3. 溶接継手強度への影響

板厚8 mm×板幅100 mm×板長さ200 mmのA5083P-O材を供試材とし，A5183-WY（径1.6 mm）の溶接ワイヤを用いて，片面から2パスのミグ溶接を行っております．1パス目の溶接で発生したスマットをそのまま残して2パス目の溶接を行った場合と，1パス目に発生したスマットをワイヤブラシで除去してから2パス目の溶接を行った場合について，その継手引張試験と断面マクロ組織ならびにミクロ組織の比較が行われました．

継手引張試験の結果では，1パス目のスマットの残存有無による継手強度の差異は認められておりません．また，スマットを残したまま2パス目の溶接を行っても，

健全な溶込みが得られており，1パス目のスマット残存による悪影響は認められておりません．更に，2パス目のビード中央部のミクロ組織が比較調査されておりますが，スマット除去の有無による差異は認められておりません．

4. 耐食性への影響

スマット部の詳細な調査結果によれば，スマット部にはMgが多く含まれております．これは，表面層に限られることではありますが，スマットを残存させた状態での耐食性に及ぼす影響が調査されております．

試験材はA5083P-O材を用い，A5183-WYの溶接ワイヤを用いてミグ溶接を行い，スマットを発生させております．この試験片について，溶接ままの状態，スマットを布拭きした状態，スマットをワイヤブラッシングした状態の3条件について，JIS Z 2371に規定されている塩水噴霧試験が行われました．なお，噴霧時間は400時間，600時間，1,000時間の3水準で実施されております．

腐食試験の結果は，いずれの試験片においても，試験片表面の光沢は失われていますが，全面腐食の様相を呈しており，試験片断面の顕微鏡観察を行っても，孔食の発生は認められておりません．この調査結果から，一般的な腐食環境下では問題は起こらないと考えられます．なお，重金属が共存する場合や，イオンとして接触する場合などは，スマットの有無に関わらず，腐食に対する注意が肝要と言えます．

5. まとめ

スマットの影響として，溶接ビードの溶込み形状，内部品質，継手部の強度，ミクロ組織，ならびに耐食性について調査されておりますが，いずれの項目に対してもスマットは大きな影響を及ぼさないようです．

参 考 文 献

1) 「アルミニウム合金のMIG溶接時に発生するスマットの研究」，軽金属溶接，Vol. 36 (1998) No. 9, P. 22～30, Vol. 36 (1998) No. 10, P. 11～18, Vol. 37 (1999) No. 3, P. 10～14, ㈳軽金属溶接構造協会．

42 加工硬化材と熱処理材に対する溶接入熱管理の留意点は？

Q-42 加工硬化材，熱処理材の溶接入熱管理の留意点，また良好な管理を行った場合の到達強度レベルについて教えて下さい．

A-42 非熱処理合金の加工硬化材では，材料の種類や，その加工度によって多少異なりますが，一般的には200℃を越えると次第に加工歪みが解放されて回復・軟化が始まり，300℃を越えると再結晶が始まって完全に軟化します．アーク溶接における熱サイクルは，4～5秒程度の短時間に，それぞれの位置によって，その金属の溶融点から室温までの間の温度に急熱され，その加熱温度に数秒間保持された後，急速に冷却されます．従って，容易に再結晶温度以上に加熱され，比較的短時間で加工歪みが除去されます．

溶接継手部は，一般に溶接金属，軟化域及び原質部の3領域で構成されます．もちろん原質部と再結晶による軟化域の間は，最高到達温度に応じて軟化した部分となりますので，機械的性質は，原質部から軟化域へ徐々に変化します．熱影響部の幅や軟化の程度は，溶接入熱（最高到達温度）と共に増加し，また加工度が高いほど低い温度で軟化し始めますが，一般に非熱処理合金の加工硬化材では，母材の種類にほとんど関係なく，溶接継手の機械的性質は，その母材の軟質材程度まで低下します．軟質材では，溶接による熱影響は少なく，溶接材料を選択することにより，継手効率（溶接継手と母材の引張強さの比）としてほぼ100%を確保出来ます．

溶接方法による違いですが，同じ材料を標準的な条件でティグ溶接した場合と，ミグ溶接した場合を比較しますと，ティグ溶接はミグ溶接よりも，入熱の集中性ならびに熱効率が劣るため，熱影響が大きくなります．いずれにしても，加工硬化材の溶接に際しては，軟化の程度を少なくするように低入熱での溶接が望まれます．**Table 33**には，主な非熱処理合金材の溶接継手引張試験結果を示します．

熱処理合金の溶接熱影響部の挙動は，非熱処理合金と比べて複雑であり，主として合金成分，溶接入熱，母材の質別および溶接後熱処理などによって影響されます．熱処理合金の溶接継手部は，一般に溶接金属，これに隣接する融合域（局部溶融域），固溶域，過時効域および原質部の5領域に区分出来ます．融合域は母材の固相線温度以上に加熱されて粒界が局部的に溶融した領域です．固溶域は，第2相が固溶するに十分な温度に加熱された後に急冷され，室温でも部分的に固溶体である領域で，その部分の性質は母材に近いものです．過時効域は，溶接熱によって析出物が成長し過時効となる領域で，軟化を伴いますが，非熱処理合金加工硬化材の溶接継手のような軟質材までには至りません．

融合域における粒界の溶融は，溶接入熱の増加と共に増大し，また合金組成により著しく影響されます．一般的な溶接構造用合金の場合，通常の溶接施工では粒界の溶融は殆ど起こりませんが，低融点共晶成分の形成や偏析を伴う合金の場合は，母材および溶接金属のいずれにおいても粒界溶融が起りやすく，継手強度低下の原因と

Table 33　非熱処理合金の溶接継手の引張強さと伸び

母材の種類		溶接棒・溶接ワイヤ	平均引張強さ	最小引張強さ	平均耐力	最小耐力	引張伸び
AA	ASTM		N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	%
1060	996A	1260	68.7	61.8	34.3	34.3	29
1100	990A	1100	89.3	75.5	41.2	41.2	29
3003	MIA	1100	109.9	96.1	48.1	48.1	24
5005	GIB	5353	109.9	96.1	61.8	54.9	15
5050	GIA	5356	158.9	109.9	82.4	68.7	18
5052	GR20A	5356	193.3	172.7	96.1	89.3	19
5083	GM41A	5183	296.3	275.7	152.1	124.6	16
5086	GM40A	5356	268.8	241.3	131.5	117.7	17
5154	GR40A	5254	227.6	207.0	124.6	109.9	17
5456	GM31A	5554	241.3	213.9	109.9	96.1	17
5454	GM51A	5556	316.9	289.4	158.9	138.3	14

(Welding Handbook より)

Table 34　熱処理合金の溶接継手の引張強さと伸び

母材の種類		溶接棒・溶接ワイヤ	平均引張強さ	平均耐力	引張伸び	継手効率	溶接後熱処理継手効率
AA	質別		N/mm²	N/mm²	%	%	%
2014	T6	2014	220.5	193.1	2	46	72
2219	T81	2319	241.1	179.3	3	53	65
2219	O	2319	241.1	179.3	3	58	83
6061	T4	4043	186.2	124.5	8	60	100
6061	T6	5356	206.8	131.3	11	86	—
6063	T4	4043	138.2	68.6	12	80	100
6063	T6	4043	138.2	82.3	8	57	—
6070	T6	4643	206.8	—	—	55	91
6071	T6	5356	206.8	—	—	56	—
7039	T61	5039	330.3	206.8	10	83	93
7075	T6	5356	254.8	206.8	2	45	84

(Welding Handbook より)

なります．例えば，7075合金などは粒界溶融を生じやすく，溶接時に応力が加わって粒界割れが発生しやすい．溶接性が良好なAl-Mg合金でも，溶接入熱，予熱温度，層間温度などの条件が不適当に組み合わさった場合には，粒界割れが発生することもあります．6061-T4合金のティグ溶接部を例にとると，溶接熱サイクルで約430℃以上，370℃，290℃および230℃に加熱された領域で，それぞれ析出物の固溶，過時効（部分軟化），析出および復元が起り，これらを焼戻すと，過時効域を除く他の領域はT6並の硬さになります．しかし，過時効域は僅かに硬さの増加が見られる程度で，そのまま硬さ分布の谷間になり，引張試験においては，この領域で破断が起ります．

当然のことながら，質別がT5またはT6の母材では，T4の母材に比べて，溶接熱による過時効が顕著に現れ，その傾向は溶接入熱が大きいほど著しくなります．

なお，熱処理合金の溶接継手について，溶接のままの状態で引張試験を行うと，その継手効率は合金の種類，質別，溶接金属の化学組成，溶接入熱などにもよりますが，**Table 34**に見られるように45～85％程度となります．しかし，溶接金属の化学組成が適当であれば，溶接後の熱処理により，80％以上の継手効率が得られます．

以上のように，熱処理合金においては，溶接熱サイクルが継手部の金属組織あるいは性質に著しい影響を及ぼ

しますので，熱影響部の幅を狭くするために，低入熱の溶接を行うことが望まれます．

参 考 文 献

1) 軽金属協会：アルミニウム材料の基礎と工業技術 P. 266～267.
2) Welding Handbook.

43 溶接入熱が継手品質に及ぼす影響は？

Q-43 アルミニウム合金の溶接において，溶接入熱が継手品質に及ぼす影響と，管理方法について，教えて下さい．

A-43 溶接入熱の大きさは，ブローホールの発生や，継手引張強度等に影響を及ぼします．このため，溶接条件を設定する際には，溶接電流，アーク電圧，溶接速度等に注意が必要です．

さて，溶接入熱は，溶接部に外部から与えられる熱量であり，熱源である溶接アークが，単位溶接長さ（cm）当たりに投入する電気的エネルギQ（J/cm）は，アーク電圧をE（V），溶接電流をI（A），溶接速度をv（cm/min）とすると，次式で与えられます．

$$Q = 60\,EI/v$$

同一の溶接入熱であっても，溶接電流，アーク電圧，溶接速度の組合せは，幾通りもあります．従って，実際の溶接条件を決定する際には，予備実験を行って，最適な条件を探索することが望まれます．

なお，溶接入熱として，単位板厚当たりで，単位溶接長さ（cm）当たりの入熱（J/cm/cm）を用いると，板厚に関係せずに，現象が比較的整理し易いようです．

Fig. 67 は，下向溶接と横向溶接におけるブローホールの発生傾向を定性的に示したものであり，溶接入熱やアーク電圧によって，ブローホール（気孔）の発生傾向が変化することが分かります．

Fig. 68 は，溶接継手の引張試験を行った際の耐力と引張強さについて，横軸を溶接入熱として示したものです．溶接入熱が増大するに伴い，耐力，引張強さが低下することが分かります．同図にはMg量の影響も示されています．

Fig. 69 は，溶接金属の引張強さと単位板厚当たりの溶接入熱との関係を示したものであり，供試材の板厚が25 mmから80 mmまで変化しても，横軸である単位板厚当たりの溶接入熱で整理出来ることが分かります．

参 考 文 献

1) アルミニウム及びアルミニウム合金溶接部の気孔発生のメカニズム，㈳軽金属溶接構造協会，P. 45
2) アルミニウム合金構造物の溶接施工管理—Ⅲアルミニウム合金の溶接設計，㈳軽金属溶接構造協会，P. 30

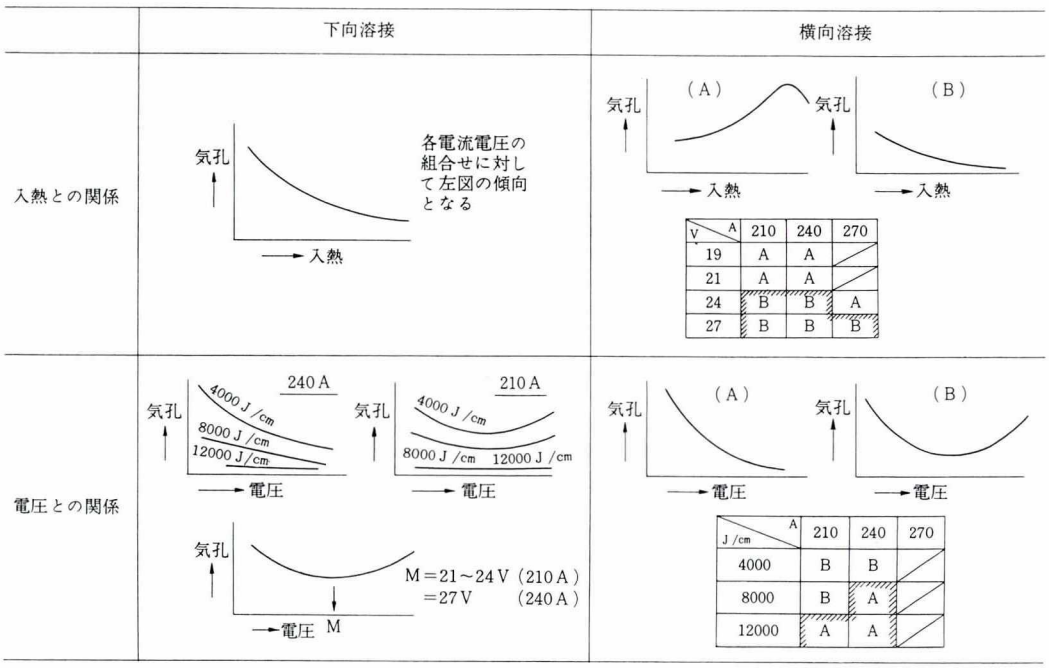

Fig. 67 ブローホールの発生傾向

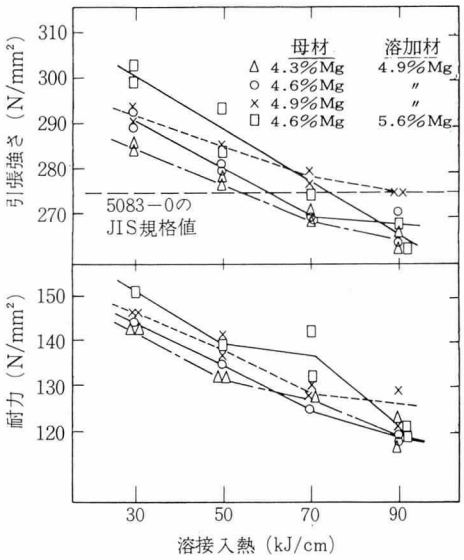

Fig. 68　溶接継手の耐力と引張強さに及ぼす溶接入熱，Mg 量の影響

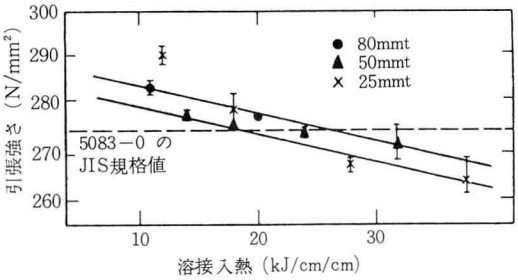

Fig. 69　溶接金属の引張強さと単位板厚当たりの溶接入熱の関係

44　フィルムシートの溶接品質への影響は？

Q-44　アルミニウム板には，光沢を保つためにフィルムシートがしばしば貼着されていますが，このフィルムシートを剥がすと，どのくらいの時間で表面酸化が始まり，溶接結果に影響を及ぼすようになるのですか，現場作業への指針を教えて下さい．

A-44　フィルムシートは，アルミニウム圧延板の表面に貼着されていますが，このフィルムシートの役割は，圧延メーカーから出荷された製品について，搬送される段階での表面疵の発生を保護することにあります．

質問内容から判断しますと，フィルムシートが貼着されたアルミニウム圧延板の表面は酸化していないと考えておられるようですが，アルミニウムは酸化しやすい金属ですので，既に酸化皮膜は形成されております．

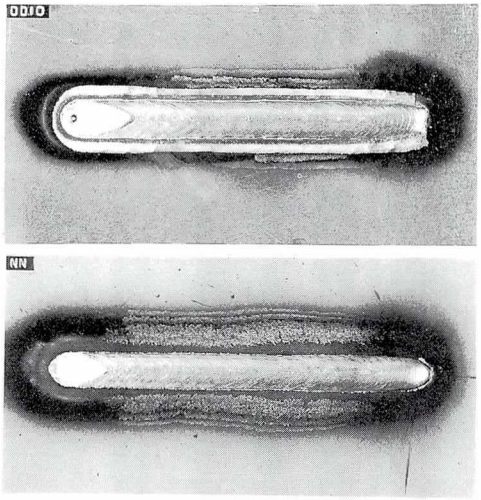

Fig. 70　スマット発生状況の比較

上：有機溶剤で表面を洗浄
下：フィルムシートを剥がしたまま

フィルムシートは，アルミニウム圧延板の表面を清浄にした後に貼着されていますので，フィルムシートを剥がした段階では，表面にゴミの残存が少ないと言えます．しかしながら，フィルムシートの粘着剤が残存しております．この粘着剤を残したまま溶接を行いますと，粘着剤がアーク熱によって燃焼し，アーク雰囲気の清浄度を低下させますので，スマットの発生が顕著になると言う報告があります．

Fig. 70 は，フィルムシートを剥がしたままの状態と，その後，有機溶剤で表面を洗浄した状態で，スマットの発生状態が顕著に異なることを示しております．

従って，フィルムシートを剥がして短時間の間に溶接を行えば良好な溶接ビードが得られると言うのは間違いのようです．

なおフィルムシート粘着剤の残存程度は，フィルムシートが貼着されてからの熱的な履歴や太陽光線の照射程度によって影響を受けるようです．綺麗にフィルムシートが剥がれたとしても，表面には粘着剤が残存しておりますので，溶接を行う前に有機溶剤を用いて洗浄するのが良いでしょう．

参　考　文　献

1)　アルミニウム合金の MIG 溶接時に発生するスマットの研究（その 1），施工法委員会報告，軽金属溶接，Vol. 36 (1998) No. 9, P. 22～30.