アルミニウム溶接部の高品質化

柳田 治美* 関口 康弘* 稲澤 勝史* 渡辺 知明** 鳥澤 純** 山﨑 雅史**

Qualitative improvement of Aluminum Weld Hiromi YANAGITA, Yasuhiro SEKIGUCHI, Katsufumi INAZAWA Tomoaki WATANABE, Jun TORISAWA and Masashi YAMAZAKI

アルミニウム合金 A6061 の TIG 溶接における溶接部の高品質化を目指して,自動溶接システムにより, ブローホール発生量に及ぼす溶接条件(溶接電流,溶接速度,トーチ角度,シールドガスの流量等)の 影響について検討した。

その結果,溶接部断面マクロ写真からブローホールの発生メカニズムが確認でき,溶接電流を上げて 溶融部と母材の固液界面を動かすことで,ブローホールの発生を低減できることが分かった。

これらの結果を踏まえて溶接作業者による TIG 溶接に適用して実施したところ,ブローホールの発生 量が約4分の1となり,ブローホール発生量を大幅に低減させることに成功した。

Key Words : アルミニウム合金, TIG 溶接, ブローホール

1 はじめに

アルミニウムは溶接部にブローホール(気孔)が発 生しやすい金属である。これは,周辺の空気や溶接箇 所にある水分,酸化皮膜に含まれる結晶水などが,溶 接の熱によりアルミニウムと反応して水素ガスが発生 し,溶融金属に水素が吸収され,凝固時に水素の溶解 度が低下し,ブローホールとして発生すると考えられ る¹⁾。ブローホールの発生を抑えるためには,溶接部 にシールドガスを流し,溶融金属と空気の接触を遮断 したり,酸化皮膜などを除去したりするが,ブローホ ールの完全な抑制は難しい状況である。

ブローホールは溶接部の強度を低下させるので、少 ない方が望ましいが、許容値は部材を使用する場所や 目的等に応じて当事者間で決めることが多い。

また,溶接部の品質は,作業者の熟練度に大きく左 右されるため,誰が溶接しても安定した品質になるこ とが強く望まれている。

そこで今回,上記の対策で苦慮しているアルミニウ ムのTIG溶接における溶接条件等の違いが欠陥発生に 及ぼす影響を明らかにし溶接欠陥の低減を図ることを 目的に本研究を実施した。

2 研究の方法

2.1 供試材

供試材は、「JIS H 4000 アルミニウム及びアルミニ

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

** 株式会社サンテクノロジー

ウム合金の板及び条」で規定される A6061P-T6(板厚 3mm)と, A6061P-T651(板厚 8mm)とした。

2.2 溶加棒

溶加棒は、「JIS Z 3232 アルミニウム及びアルミニ ウム合金の溶加棒及び溶接ワイヤ」で規定される直径 3.2mmのA5356-BY-3.2を用いた。

2.3 溶接試験の実施方法

初めに溶接作業者による従来の手溶接の条件で溶接 試験を行い欠陥の発生状況を確認し,次に,自動溶接 システムで溶接条件を変えたときの欠陥発生状況を確 認し,欠陥発生に最も強い影響を与える溶接条件因子 について検討した。

2.4 溶接機

2.4.1 手溶接用の TIG 溶接機

TIG 溶接機はダイヘン製, COMP A500P を用いた。ノ ズルは内径 11mm (呼称 No.7)を用いた。電極は直径 3.2mm長さ150mmの2%セリウム入りタングステンを用 いた。シールドガスはアルゴンガスを用いた。

2.4.2 自動溶接システム

溶接速度,トーチ角,アーク長を一定にして溶接で きる装置を製作した。また,温度や湿度を調整できる ようにするため,ビニールハウスを製作し,その中で 実験を行った。TIG 溶接機は,ダイヘン製,インバー タエレコン 300Pを用いた。ノズル,電極,シールドガ スは手溶接用のTIG 溶接機と同じ種類のものを用いた。 自動溶接システムのトーチ周辺部を図1に示す。



図1 自動溶接システムのトーチ周辺部

2.5 溶接部の評価試験

2.5.1 溶接部のX線試験

溶接部のX線撮影を,X線透視検査装置(エクスロ ン・インターナショナル製,Y.MU2000-D)を用い,「JIS Z 3105 アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法」 に準拠して行った。

2.5.2 溶接部断面マクロ試験

研磨,エッチングした溶接部の断面を,金属顕微鏡 (オリンパス製,GX-71)で観察し,溶け込み具合やブ ローホールの発生状況を確認した。

2.5.3 金属中の水素濃度測定

溶加棒,母材に含まれる水素濃度測定は,酸素窒素 水素同時分析装置(堀場製作所製,EMGA-930)を用い た。

3 結果及び考察

3.1 手溶接による溶接実験

3.1.1 板厚 3mm 試験片の手溶接実験

表1に示す一般的な条件で,板厚3mm 試験片同士の 手溶接を行った。

X線撮影の結果、ブローホール等の欠陥は確認できなかった。

溶接部断面マクロ観察においても溶け込み具合は良 好であった。マクロ写真を図2に示す。図2より,溶 接金属部に黒い斑点が確認できるが,これは小さなブ ローホールで,最も大きいものでも直径0.1mm以下で あり,X線透視検査装置では識別できない程度の大き さである。また,JIS Z 3105の規定で算定しないきず 像の寸法0.4mmより十分小さいため,本研究では,溶 接部は良好と判断した。

従って,板厚 3mm の手溶接では一般的な溶接条件で 良好な結果が得られたので,自動溶接システムによる 溶接実験は実施しないこととした。

表1 板厚 3mm 試験片の溶接条件

	電流	運棒	速度		
	А		mm/min		
初層	$2 \ 0 \ 0$	S	280		
2 層	160	S	180		
・運棒S:ストリング					
・試験片:突合せ開先形状 V型,開先角度 80度,ル					
ート面なし(0mm),ルート間隔なし(0mm),溶接長 150mm					
 気温・27 度 湿度 40% 					



図2 板厚 3mm 試験片溶接部断面マクロ写真

3.1.2 板厚 8mm 試験片の手溶接実験

表2に示す一般的な条件で,板厚8mm 試験片同士の 手溶接を行った。

表 2 板厚 8mm	□試験片の溶接条件
------------	-----------

	電流	運棒	速度	
	А		mm/min	
初層	$2 \ 4 \ 0$	S	120	
2 層	$2 \ 2 \ 0$	W	66	
3層	250	W	150	
 ・運棒S:ストリング、W:ウィービング 				
・試験片:突合せ開先形状 V型,開先角度 80度,ル				
ート面なし(0mm),ルート間隔なし(0mm),溶接長 150mm				
 ・気温:27度,湿度43% 				

X線撮影の結果を図3に示す。ブローホール(白い 点)は,溶接部に沿って,ほぼ同じ大きさで多数発生 している。発生量は,溶接開始付近が多く,溶接が進 むにつれて減少していく傾向が見られた。



(ブローホール発生量:約100個/19.5cm²)
 図3 板厚 8mm 試験片のX線透過写真

深さ方向のブローホール発生について、溶接部中央 付近(図3のA線)と溶接部終了付近(図3のB線) の断面観察により検討した。それぞれの断面写真を図 4に示す。溶接部中央付近の断面は、溶接部終了付近 の断面と比べて, 溶接部と母材の固液界面がはっきり と見えることがわかる。この違いについて溶接部と母 材の固液界面を拡大して観察した断面写真を図5に示 す。溶接部中央付近の固液界面は,母材の開先形状と 思われる直線が確認でき,この直線に接する溶接部で は、微小なブローホールが発生しており、溶接部内部 へ進むにつれ大きく成長していることがわかる。一方, 溶接部終了付近の固液界面は、直線として明確に確認 できなかった。これらの現象について、溶接部の溶融 中の冷却過程から凝固までを推測する。まず,図6に 示すとおり,常温でのアルミニウムは,平衡状態にお いて水素をほとんど固溶できないが、本実験で使用し たアルミニウム材料には、表3に示すとおり平衡溶解 度以上の水素が含まれ過飽和となっている。溶接の際, 溶融アルミニウムの過飽和な水素は気体となり気泡へ と成長していく。一般的に,液体中に溶けている気体 成分は, 固液界面が存在する場合, 固体の表面で気泡 として発生する。溶接部中央付近では,固液界面が母 材側にあまり動いておらず、明確な固液界面が存在し ているため,気泡が出やすくなり,ブローホール発生 量が多くなったと考えられる。また、溶接部終了付近 では, 固液界面が母材側に動いて明確な固液界面が存 在していないため、気泡が出にくくなり、ブローホー ル発生量が少なくなったと考えられる。

これらのことから,ブローホールは,固液界面の母 材側への動きで発生量が変化すると考え,発生を低減



図 6 1 気圧の水素と平衡するアルミニウム 中の水素量 [出所:参考文献 2), 3)]



図4 溶接部断面写真



図5 溶接部と母材の固液界面

表3 溶加棒,母材の水素濃度

試料名	水素濃度
	(ppm)
溶加棒(A5356-BY-3.2)	5
母材(A6061P-T651)	8

するには,溶接入熱を大きくすることで固液界面を動 かすことが有効であると考えた。

3.2 自動溶接システムによる溶接実験

3.2.1 試験片加工

人的な影響を少なくするため,自動溶接システムで 溶接条件を変えたときの欠陥発生状況を調べた。

まず, 凝固界面で発生するブローホールや入熱の影響を検討するため, 図7のような, 厚さ 8mm×幅 95mm ×長さ 150mm の平板に, 半径 6mm のボールエンドミル で深さ 4mm の溝加工を行い,溝幅 11.3mm に仕上げた試 験片を作製し,溝上に溶加材を加えながら,ビードオ ンプレートによる TIG 溶接を行った。



図7 ビードオンプレート溶接試験片略図 (板寸法:厚さ8mm×幅95mm×長さ150mm) (溝寸法:幅11.3mm,深さ4mm,半径6mm)

3.2.2 溶接速度と溶接電流(入熱)の影響

酸化皮膜除去,トーチ角度0度,シールドガス(Ar) 流量10L/minで一定とし,溶接速度を変化させること によるブローホールの発生量について,X線透過写真 と溶接部断面マクロ写真により比較した。

各条件で溶接した試験片のX線透過写真,及び溶接 部断面マクロ写真の結果を図8に示す。

図8の条件1と2のX線透過写真から,溶接電流が 同じで,溶接速度が遅くなる(入熱大)と,ブローホ ールの発生量は減少した。溶接部断面マクロ写真から, 溶接速度が速くなる(入熱小)と,凝固界面付近にブ ローホールが発生していることが分かる。

また、図8の条件2と3のX線透過写真から、溶接 速度が同じで、溶接電流が小さくなる(入熱小)と、 ブローホールの発生量は増加した。

これらのことから,溶接速度が遅く溶接電流が大き い条件では試験片への入熱が大きくなり,入熱が大き い場合にブローホールが低減する傾向が確認できた。

3.2.3 固定ジグ温度の影響

溶接電流 230A,酸化皮膜除去,トーチ角度 0 度,シ ールドガス(Ar)流量 10L/min で一定とし,固定ジグの 温度を変化させることによるブローホールの発生量に ついて,X線透過写真により検討した。

各条件で溶接した試験片について,溶接速度 200mm/min における固定ジグ温度とブローホール発生 量の関係を図9に,固定ジグ温度約30℃における溶接 速度とブローホール発生量の関係を図10に示す。

図9より,固定ジグ温度が25℃を超えると,ジグ温 度の上昇に伴い,ブローホールが減少する傾向が見ら れた。また,図10より,溶接速度が上昇すると,ブ ローホールが増加する傾向が見られた。 これらの結果より,ジグ温度が高くなると,また同 じジグ温度でも溶接速度が遅くなると,凝固速度が遅 くなり,溶融金属中の水素が外部に放出されやすくな ると考えられる。



及び溶接部断面マクロ写真



図 9 固定ジグ温度とブローホール発生量の関係 (溶接速度 200mm/min)



図10 溶接速度とブローホール発生量の関係 (固定ジグ温度約 30℃)

3.2.4 外部からの水素侵入の影響

3.2.4.1 溶接雰囲気(湿度)の影響

溶接速度 150mm/min,溶接電流 230A,酸化皮膜除去, トーチ角度 0 度,シールドガス(Ar)流量 10L/min で一 定とし,湿度 81%と 54%のブローホール発生量について, X 線透過写真により比較した結果,この実験方法にお いては,大きな違いは見られなかった。湿度 81%でブ ローホール発生量は増加していないことから,湿度の 影響は少ないことが分かった。一例として湿度 81%で 溶接した試験片のX線透過写真の結果を図11に示す。

(ブローホール発生量:10個/17cm ²)
【溶接雰囲気】気温 17℃,湿度 81%
(参考)固定ジグ温度 17℃,溶加材質量 12.8g
図11 湿度 81%での溶接試験片のX線透過写真

3.2.4.2 その他(トーチ角度,シールドガス(Ar)流量,酸化皮膜)の影響

溶接速度 150mm/min,溶接電流 230A,酸化皮膜除去, トーチ角度 0 度,シールドガス(Ar)流量 10L/min を基 準の条件とし,基準の条件に対しトーチ角度を 20 度に した場合,シールドガス(Ar)流量を 8L/min にした場合, 酸化皮膜あり(200℃の電気炉に 5 時間投入し酸化皮膜 を生成)にした場合,それぞれの溶接条件におけるブ ローホール発生量について,X線透過写真により比較 した結果,この実験方法においては,大きな違いは見 られなかった。

これらのこと(3.2.4項全体の実験結果)から, 本研究の実験方法においては,外部からの水素がブロ ーホール発生量に及ぼす影響は少ないと考えられる。

3.3 手溶接による再溶接実験

自動溶接システムによる結果を参考に,従来の溶接 条件(表2)よりも可能な範囲で溶接電流を上げ,溶 接速度を遅くする方法で,板厚8mm試験片の手溶接を 行った。溶接条件を表4に示す。表2と表4を比較す

	電流	運棒	速度	
	А		mm/min	
初層	2 5 0	S	95	
2 層	$2 \ 4 \ 0$	W	83	
3 層	250	W	9 0	
 ・運棒S:ストリング,W:ウィービング 				
・試験片:突合せ開先形状 V型,開先角度 80度,ル				
ート面なし(0mm),ルート間隔なし(0mm),溶接長 150mm				
· 気温:26度,湿度58%				

表4 板厚 8mm 試験片の溶接条件



図12 板厚 8mm 試験片のX線透過写真

ると、2層目の速度は表4の方が大きいが、これは電 流を20A上げたことにより溶接速度を落とすことが できなかったためである。同様に3層目の電流値は同 じであるが、これ以上電流を上げると溶接部形状に支 障が出るため同じ値とした。

X線透過写真の結果を図12に示す。図12より, 非常に小さなブローホールが溶接部右半分に集中して いるが,全体的には25個程度で,図3に示すX線写真 と比較するとブローホールが約4分の1に低減した。

4 おわりに

溶接条件等の違いが溶接欠陥発生に及ぼす影響を調 べるために,手溶接による溶接試験と自動溶接システ ムによる溶接試験を併用し,欠陥発生の要因を検討し た。

得られた結果は次のとおりである。

(1) 一般的な溶接条件で手溶接を行った結果,板厚 3mmの試験片ではブローホールはほとんど発生 しなかった。一方,板厚8mmの試験片ではブロー ホールは発生したが,発生量は溶接が進むにつれ て減少傾向を示した。また,断面観察では,溶接 部と母材の固液界面で細かいブローホールが発 生し,そのメカニズムを推測した。これらのこと から,ブローホールの発生原因の一つとして,固 液界面の影響が大きいと考えられる。

- (2)自動溶接システムによる実験の結果,実用的な範囲で溶接速度を下げ,溶接電流を上げ,固定ジグ温度を上げることにより,ブローホールの低減を図ることができた。高湿度雰囲気,酸化皮膜,シールドガスの乱れ(トーチ角度,流量)などによる外部からの水素がブローホール発生量に及ぼす影響は少なかった。
- (3) 手溶接による再実験において、溶接部形状に支障 がない範囲で、従来条件より溶接電流を上げ、溶 接速度を遅くすることにより、ブローホール発生 量を従来の約4分の1に減らすことができた。

参考文献

- "溶接・接合工学の基礎 溶接学会編", 丸善株式 会社, (1993).
- 2) C. E. Ransley and H. Neufeld: J. Inst. Metals, 74(1948), 599.
- W. Eichenauer, H. Hattenbach and A. Pebler:
 Z. Metallknde., 52(1961), 682.

