アルミニウムのミグ溶接材料, 溶接施工法*

立 花 知 之**

Materials and Procedures for Aluminum MIG Welding*

by TACHIBANA Tomoyuki**

キーワード：アーク溶接，MIG，アルミニウム，溶接材料

1. はじめに

アルミニウムのミグ溶接は、鋼の溶接に比べて難しいとよく言われる。これは、実際のアーク溶接の中で、ビードが垂れ易い、不活性ガスシールド故にアークが不安定になり易い、ブローホールや割れなどの溶接欠陥が出易い、等々、アルミ・ミグ溶接特有の苦労があるからと感じている。

その一方で、軽くて腐食にも強いアルミ合金は輸送機材の主要材料となりつつあり、自動車・鉄道車両といった実際の生産現場では、今後ともミグ溶接を中心としたアーク溶接が採用されて行くと考えられる。したがって、本稿で述べるアルミ溶接のかんどころを理解して頂き、より健全なアルミ・ミグ溶接が広く適用されることを望むものである。

2. アルミ・ミグ溶接における留意点

2.1 アルミニウムの諸性質とミグ溶接

どうしてアルミは溶接しづらいのか？

⇨ アルミという金属に対する理解が必要！

金属としてのアルミニウムの諸性質(図1)を以下に列記する。

①熱伝導率が高く、かつ比熱が大きい

このことは、アークの熱が周囲へ拡散し易く、かつ温度を上げる為に大きなエネルギーを要するわけであるか

ら、鋼の溶接感覚で溶込み・馴染みを得ようとするとう入熱過剰となりがちとなる。鋼の様に融点近傍温度で赤くならないので、油断するとビードが垂れ易く溶け落ちてしまう。当然のことながら、アークスタート部での馴

図1 アルミニウムの諸性質

*原稿受付 平成13年1月19日

**正 員 神戸製鋼所 Member, Kobe Steel Ltd.

染みがあるくなるので、アーク発生点を開先の外に置くなど施工の工夫が必要である。

②線膨張係数が高い

これは熱変形が大きく、溶接後の歪みが大きいことを示している。歪みがいやだからといって板厚を厚くしたりすると、折角のアルミの軽量化メリットが失われてしまうので、溶接順序や入熱管理に注意して、低歪みを心掛けて頂きたい。

③酸化し易い

鋼よりも酸素との親和性が高いため酸化皮膜が出来易く、かつその皮膜の融点が高い為に、融合不良等溶接欠陥の原因となり易い。

④水素に敏感である

表1と図2に、アルミの水素溶解度¹⁾の温度変化を示す。アーク直下の溶融金属の温度は、鋼もアルミも2000℃近傍と言われている。その高温下で吸収された水

表1 溶接凝固時の水素溶解度の変化

	アーク直下の 溶湯温度での 水素溶解度	凝固点(融点)での 水素溶解度	溶接凝固時の 水素溶解能
アルミ	3.7(@1900℃)	0.07(@660℃)	1.9%
鉄	4.2(@2093℃)	3.0(@1537℃)	71%

表中の水素溶解度は、アルゴン中水素濃度1%の場合の水素溶解量(cc/100g)

図2 水素溶解度の温度変化（鋼とアルミとの比較）
矢印は溶接凝固時に固相に放出される水素量を示す。

素が、凝固温度まで冷却される過程で、溶解度差から放出された水素が、気泡（ブローホール）となって固相に残ると考えられる。2000℃近傍と凝固点との溶解度差異を鋼と比較すると、アルミは鋼の40倍も水素のブローホールが発生し易いということになる。

アルミ・ミグ溶接に際しては、まずこういったアルミの諸性質を十分理解した上で、溶接施工を行うことが大切である。この中でも、特にブローホール対策は、アルミ・ミグ溶接を行う上で最も気をつけなければならないので、以下にその対策を列挙する。

2.2 ブローホールの発生防止

どうしたらブローホールを防げるのか？

□ 施工面で、溶接環境への十分な配慮が必要！

ブローホールの発生原因は水素であるが、図3²⁾に溶接時の雰囲気中に混入してくる水素源の要因別割合を試算したものを示す。この図から分るように、施工面から注意すべき点として、大気巻き込み、溶接ワイヤの保管管理、シールドガスの露点管理が上げられる。

①大気巻き込みへの注意

シールドガスへの大気中からの水分混入には最も注意を払うべきである。ノズルからのガス放出が乱流にならないような適正流量を守ること、オリフィス等の使用はもちろん、溶融池の大きさを十分にカバーできる口径のノズルを選択すること、高速度・高電流の場合は、2重或いは3重構造のシールドノズルを使用するといった配

図3 シールドガスへの水素源別混入寄与率

表2 アルゴンガスホースの露点測定結果

種類 長さ (l/min) Ar 流量 ジョイント数	ビニールホース			硬質テフロンホース	
	ホース長 1 m	ホース長 10 m	ホース長 11 m	ホース長 10 m	ホース長 11 m
	ジョイント数 2	ジョイント数 2	ジョイント数 6	ジョイント数 2	ジョイント数 6
50	-60℃	-49.5℃	-49℃	-64℃	-63.5℃
30	-58.5℃	-47℃	-46℃	-61.5℃	-63℃
10	-50.5℃	-38.5℃	-37.5℃	-50℃	-55℃

備考 1) 測定時間 2～3分

2) ジョイント数 2 ガス配管と直結

ジョイント数 6 溶接機からのガス回路を通し、トーチ入口で測定

3) 直読式の露点指示計を利用（試料ガスに接する鏡を液体窒素で冷却し、鏡の表面に結露する温度を熱電体により測定する方法）

慮も必要である。

②ガス配管を含めた露点管理が重要

シールドガスへの水分混入には細心の注意が必要である。ガスホースとして一般的なゴムホースや塩化ビニールホースの使用は、アルミ・ミグ溶接用ガスホースとしては不適切である。これらは、一般的に水分透過率が高く、ホース経路が長い場合、表 2³⁾に示すごとく露点が高下らない。また表にある様に、フッ素樹脂系のホースを用いることが必要である。

③ワイヤの保管管理

ワイヤの水素源は、その大部分がワイヤの表層部に存在する。従って、ワイヤの保管について水分の付着に最も注意を払うべきであり、開封したワイヤは出来る限り早く使い切って頂きたい。ワイヤ表面には目には見えない薄い酸化皮膜が形成されているが、結露などで大気中の水分と反応すると水酸化物に変質する。従って、長期開封したままのワイヤの使用は避けた方が望ましい。

ミグワイヤの製造面からの工夫について言えば、ワイヤ自身の水素含有量を極力低減すべく、皮剥き工程と入念な脱脂洗浄工程を経て仕上げられている。皮剥き工程とは、水素源となる線材表面の水酸化皮膜や表面層に巻き込まれた異物を機械的に削除するものであり、洗浄工程では伸線加工潤滑油から来るワイヤ表層の油分をほぼ完全に脱脂するものである。これらの製造上の配慮により、ミグワイヤの低水素化が達成されているのだが、製造時の状態を施工現場で保持することが重要である。

④母材開先面の清浄化

母材からの水素源として考えられるのは、開先部表面の酸化（水酸化）皮膜である。この皮膜をヤスリがけ等で十分に除去することが必要である。

また、開先加工等で付着した加工油類は、強力な水素源となるので、完全に脱脂することが必要である。図 4 の様に溶接時には若干の前進角をつけ、アークのクリーニング作用を利用することも、母材清浄化の点で施工面のノウハウである。

2.3 送給性の確保

どうしたらアーク不安定を防げるのか？

□ ミグワイヤの送給性を確保すること！

次に、良好なアークの安定性を得るためには送給性確保が重要であるのでこの点について述べる。アルミワイヤは、全般的に鋼系ワイヤに比べて軟質であり削れ易く挫屈しやすい。更に、表面仕上げについて言えば、耐ブローホール性の観点から送給潤滑剤の適用も極めて制限される。このようなアルミワイヤを用いて長時間連続溶接すると、ワイヤとコンジットライナーあるいは送給

ローラーとの摩擦によって、軟質な溶接ワイヤ表面が削られてしまう。結果として、発生したアルミ粉がコンジットライナーの中に堆積してくると送給不良を引き起こす。このアルミ粉の発生は使用条件によっても異なるが、送給経路が長いほど顕著であり、また、ライナー自身の樹脂製削り粉も混ざり合って、この切り屑がチップとワイヤの間に入り込み、アーク停止にも及ぶことがあるので要注意である。ワイヤ面からのこの点に対する工夫としては、出来る限り表面を平滑に仕上げ、摩擦抵抗を低減する様に製造上の配慮がなされている。

送給装置面からの工夫としては、剛性の低いアルミワイヤを送給するためにフッ素樹脂製のコンジットライナーやダブルギアの送給ローラーなど溶接機器メーカー側での種々工夫がなされているが、特に自動化ライン設営に於いては、コンジットライナーは極力大きな曲げ半径でしかも短く配置すること、送給ローラーはアルミワイヤ用のものを使用すること、等々のアルミ粉発生防止に対する配慮が必要である。ロボットとの組み合わせに際しても、ロボットのアームに送給装置を載せる、ブルトーチを使用する等の配慮が望ましい。このような注意を払っても、アルミ粉発生を皆無にすることは困難なので、定期的なコンジットライナーの交換を行って頂きたい。

2.4 その他欠陥の発生防止

どうしたら強度低下を防げるのか？

□ パス間温度は人肌が基本！

JIS Z 3232 では「溶接開始時の試験材の温度は 40℃以下とし、…」とある。この意味するところはパス間温度管理であって、これが高すぎれば溶接部の機械的性質は低下する。「アルミのパス間温度は人肌が基本」と、覚えて頂きたい。

3. ミグ溶接材料の種類・形態と選定指針

3.1 溶接材料の種類

図 5⁴⁾に品種別の国内溶材メーカー生産実績割合（2000 年度上半期）を示す。表 3 には、その品種毎の適用事例等ポイント紹介に留めたものを掲げた（詳細な情報は JIS Z 3232 の解説を参照されたい）。参考までに文末に、欧米も含めたアルミ溶接材料の一覧表（表 5）を示した。

ワイヤ径としては、φ 1.2 mm、φ 1.6 mm が主流であるが、最小は φ 0.6 mm のものが市販されている。太径ミグワイヤとしては、大電流ミグ用に φ 3.2 mm、φ 4.0 mm が作られている。

包装形態としては、5 kg 単位のスプール巻が主流であるが、昨今溶接の自動化に伴い、鋼系溶接ワイヤと同

図4 アルミ・ミグ溶接の模式図

表3 主たる溶接材料の特徴・用途

	特徴・用途
A5356	鉄道車両、自動車、オートバイ等、種々の用途に使用され、国内で最も多用される材料である。
A5183	漁船、パトロール艇、LNGタンク等で使用される板・A5083用の溶接材料。強度・靱性にすぐれており、国内の溶材メーカーは船級認定材料として販売。
A5556	A5183よりは靱性・延性がやや劣るが、高い継手強度が要求されるときに用いる。
A5554	耐SCC（応力腐食割れ）仕様のワーク（使用温度が65℃を超える装置等）で使用される。
A4043	自動車部品関連で最近増加傾向にある材料。溶接金属の強度・延性・靱性が低いが、高温割れ感受性が低く、6000系熱処理合金や鋳物の溶接に適する。
A4047	鋳物等の溶接に使用。AlとSiの共晶点組成で、実用上最も低融点。ろう付け用材料としても用いられる。
A1100	99.0%以上の純度のアルミ。純アルミの溶接および3000系のアルミ合金の溶接に用いる。
A1070	99.7%以上の高純度アルミ。純アルミ溶接時、母材と同等の耐食性・延性が求められる場合に使用される。
A1200	99.0%以上の純度のアルミ。A1100よりもCuの含有量が少ない。

じくパック入りワイヤ（図6）も作られており、自動車や鉄道車両の製造ラインで多用されるようになってきている。

3.2 母材と溶接材料との組み合わせ

どうやって使い分けるのか？

⇒ 基本は共金（ともがね）。但し異材継手と相関化合物に要注意！

以上のような種々の溶接材料を、母材に対してどのように選択するのかについては、JIS Z 3604の選定指針「組み合わせ表」を参照されたい。選定にあたっては、溶接金属部での成分が母材希釈等によって変化することを考慮する。例えば、耐割れ性の観点から望ましい溶接材料と母材との組み合わせを選ぼうとすると、Si含有量が0.6～0.8 mass%、或いはMg含有量が1～2

表4 母材と溶接材料との組み合わせ

母材		溶接材料	耐割れ性		継手強度	韌性	耐食性	高温保持	陽極酸化色調
同種母材の継手	Al-高Mg系 (A5083)	A5356	A	C	A	A	×	A	
		A5183	A	A	B	A	×	A	
		A5556	A	A	B	A	×	A	
	Al-中Mg系 (A5454)	A4043	×	×	×	×	×	×	
		A5554	B	C	A	A	A	B	
		A5356	A	B	A	B	×	A	
	Al-Mg-Si系 (A6061)	A4043	A	C	B	A	A	×	
		A5554	C	B	A	B	B	A	
		A5356	B	A	A	C	×	A	
異種母材の継手	A5454 A6061	A4043	A	D	B	A	×	×	
		A5554	C	C	A	B	B	B	
		A5356	B	B	A	C	×	A	

脚注
 1) ランク表示：A→Dの順に劣る。×印は推奨できない。
 2) 「耐割れ性」とは、溶接時の高温割れ感受性で評価したもの。
 3) 「靱性」とは、継手の曲げ試験性能で評価したもの。
 4) 「高温保持」とは、65.5℃以上の使用環境での保持を意味する。

図5 アルミ・ミグワイヤの品種別生産実績割合

mass%となる場合は、溶接割れ感受性が高くなるので、その領域を避けるような材料選定上の注意が必要である。

異材継手の場合も、 Mg_2Si 等の硬くて脆い化合物を作り易い組成域を避けつつ、母材との強度バランスや耐食性、耐応力腐食割れ性等、その継手に求められる性能をも加味し、総合的に溶接材料を選択すべきである。一例としての組み合わせを、表4に掲げておいた。

4. 終わりに

以上、アルミ・ミグ溶接について注意すべきポイント等を述べてきた。要は、①アルミニウムそのものの物性に対する理解、②品種毎に軟鋼とステンレス鋼ほどの違いがある種々のアルミ合金に対する理解、③溶接施工面でのブローホールに対する注意、④溶接接合部の使用目

表 5 アルミ溶接材料の化学成分

AA 分類記号	化学成分 (wt.%)													参照規格 ^{*1}
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga, V	Ti	Zr	その他		Al	
											個々 ^{*2}	合計		
1070	0.20	0.25	0.04	0.03	0.03	-	0.04	V 0.05	0.03	-	0.03	-	99.70	JIS
1080A	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	-	0.06	Ga 0.03	0.02	-	0.02	-	99.80	CEN
1188	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	-	0.03	Ga 0.03 V 0.05	0.01	-	0.01	-	99.88	AWS
1100	Si+Fe ^{*3} 0.95		0.05-0.20	0.05	-	-	0.10	-	-	-	0.05	0.15	99.00	JIS AWS ^{*3}
1200	Si+Fe 1.0		0.05	0.05	-	-	0.10	-	0.05	-	0.05	0.15	99.00	JIS
1450	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	-	0.07	-	0.10-0.20	-	0.03	-	99.50	CEN
2319	0.20	0.30	5.8-6.8	0.20-0.40	0.02	-	0.10	V 0.05-0.15	0.10-0.20	0.10-0.25	0.05	0.15	残り	JIS AWS
3103	0.50	0.7	0.10	0.9-1.5	0.30	0.10	0.20	-	Ti+Zr 0.10		0.05	0.15	残り	CEN
4009	4.5-5.5	0.20	1.0-1.5	0.10	0.45-0.6	-	0.10	-	0.20	-	0.05	0.15	残り	AWS
4010	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.30-0.45	-	0.10	-	0.20	-	0.05	0.15	残り	AWS
4011	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.45-0.7	-	0.10	-	0.04-0.20	-	0.05	0.15	残り	AWS ^{*4}
4018	6.5-7.5	0.20	0.05	0.10	0.50-0.8	-	0.10	-	0.20	-	0.05	0.15	残り	CEN
4043	4.5-6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	-	0.10	-	0.20	-	0.05	0.15	残り	JIS AWS
4043A	4.5-6.0	0.6	0.30	0.15	0.20	-	0.10	-	0.15	-	0.05	0.15	残り	CEN
4046	9.0-11.0	0.50	0.03	0.40	0.20-0.50	-	0.10	-	0.15	-	0.05	0.15	残り	CEN
4047	11.0-13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	-	0.20	-	-	-	0.05	0.15	残り	JIS AWS
4047A	11.0-13.0	0.6	0.30	0.15	0.10	-	0.20	-	0.15	-	0.05	0.15	残り	CEN
4145	9.3-10.7	0.8	3.3-4.7	0.15	0.15	0.15	0.20	-	-	-	0.05	0.15	残り	AWS
4643	3.6-4.6	0.8	0.10	0.05	0.10-0.30	-	0.10	-	0.15	-	0.05	0.15	残り	AWS
5249	0.25	0.40	0.05	0.50-1.1	1.6-2.5	0.30	0.20	-	0.15	0.10-0.20	0.05	0.15	残り	CEN
5554	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20	0.25	-	0.05-0.20	-	0.05	0.15	残り	JIS AWS
5654	Si+Fe 0.45		0.05	0.01	3.1-3.9	0.15-0.35	0.20	-	0.05-0.15	-	0.05	0.15	残り	JIS AWS
5754	0.40 ^{*5}	0.40	0.10	0.50	2.6-3.6	0.30	0.20	-	0.15	Mn+Zr 0.10-0.6	0.05	0.15	残り	CEN ^{*5}
5356	0.25	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	0.10	-	0.06-0.20	-	0.05	0.15	残り	All
5556	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	0.25	-	0.05-0.20	-	0.05	0.15	残り	JIS, AWS
5556A	0.25	0.40	0.10	0.60-1.0	5.0-5.5	0.05-0.20	0.20	-	0.05-0.20	-	0.05	0.15	残り	CEN
5183	0.40 ^{*5}	0.40	0.10	0.50-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	-	0.15	-	0.05	0.15	残り	All ^{*5}
5087	0.25	0.40	0.05	0.7-1.1	4.5-5.2	0.05-0.25	0.25	-	0.15	0.10-0.20	0.05	0.15	残り	CEN

(脚注)
*1) 表の値が1つしかないものは、規格上限を示す。参照規格 JIS Z3232 (2000), AWS A5.10 (1999), CEN(欧州規格)は ISO 規格案 1999 を参照。
*2) 4011 を除く全ての品種は、Be 含有量が 0.0008% を超えないことが規格化されている。
*3) 1100 については AWS A5.10 では Si+Fe ≤0.95% とあるが、一方 JIS Z3232 では Si+Fe ≤1.0% と差異がある。
*4) 4011 は 0.04-0.07% の Be を含有し、溶加棒のみ使用できる。
*5) 5754 と 5183 の Si 量は、CEN 規格では ≤0.25% となっている。

図 6 アルミ・ミグワイヤのバック包装品

的に合った溶接材料選定・・・等々である。
今後も、アルミ材料の進展に比例して、数多くのアルミ・ミグ溶接が適用されんことを期待するものである。

参 考 文 献

1) 軽金属溶接構造協会編：アルミニウム及びアルミニウム合金溶接部の気孔発生メカニズム, p 119-122
2) 同上, p 100-101.
3) 同上, p 31.
4) 軽金属溶接, Vol. 38 (2000) No. 6-No. 12.