アルミニウム-銅複合ワイヤによるアルミニウム合金の ガスシールドアーク肉盛溶接法*

—アルミニウム合金の硬化肉盛溶接 (第 1 報)—

神戸良雄**, 中田康俊**, 栗原繁**, 小池弘之**, 三宅聰之**

Gas Metal Arc Welding Process for Surfacing Aluminum Alloys

with Al-Cu Cored Wire*

—Surfacing on Aluminum Alloy (Report 1)—

by Yoshio Kanbe**, Yasutoshi Nakada**, Shigeru Kurihara**,
Hiroyuki Koike** and Toshiyuki Miyake**

Surfacing on aluminum alloy has been investigated by gas metal arc welding (GMAW) process using a newly developed Al-Cu seamless type cored electrode wire of 1.2 mm in diameter. Two types of cored wires were tested, one is copper sheath type with aluminum solid wire as inside core, and the other aluminum sheath type. Their chemical compositions were both 30Al-70%Cu.

Investigation were performed on metal droplet transfer phenomena, microstructure and hardness distribution versus arc current, effect of weld heat input on porosity formation, analysis of hydrogen gas from porosities.

The copper sheath cored wire showed far superior quality to the aluminum sheath one. It has excellent arc stability, uniform and stable metal transfer, uniform hardness distribution in the surfacing weld metal. The overlay hardness 220-280 HV decreased with increasing weld heat input. Hydrogen gas causes porosity formation, which is reduced by increasing weld heat input readily to a low level of total area 1% in transverse cross section of surfacing weld metal.

The porosities were very small in size, mostly less than 0.2 mm in diameter. Oxygen also seems to cause porosity formation.

Key Words: Surfacing, aluminum alloy, Al-Cu alloy, cored electrode wire, gas metal arc welding, metal droplet transfer, overlay, hardness, hydrogen, porosity.

1. 緒 言

アルミニウム (以下 Al と記す) 及び Al 合金は軽量 (軟鋼の密度の約 1/3) で熱伝導性に優れ、耐食性がよく、比強度 (強度/比重) が大きいという特性を生かして、航空機、車両、建築材、電気機器、化学プラント等その適用分野は多岐に亘っており、さらに自動車、産業用車両、船舶等の輸送機器関係など構造材としての活用が活発化しつつある。このような利点を有する反面、鉄系金属材料と比べ、強度、耐摩耗性、耐熱性にやや劣っている問題がある。その中で特に耐摩耗性を改善する目的で、Al 表面に銅粉、Al-銅合金または混合粉による表面硬化肉盛溶接を実施する各種の方法が報告されている。柴田等は¹⁾、交流プラズマアーク肉盛溶接装置 (以下 PTA 装置と略す) による純 Al 板への Al-銅合金の肉盛溶接において、純銅粉、50 Al-50 mass% 銅混合粉、50 Al-50 mass% 銅合金粉を用いて肉盛溶接を実施しており、微小気孔が発生するが割れ等の発生はなかった事を報告している。李等は²⁾、交流 PTA 装置により、Al 合金鋳物板に球状の銅粉を用いて肉盛溶接を検討し、気孔の発生は全体的に少なく、小さく、その形成場所は概してビード表

面である事を報告している。また、富田等は³⁾、直径 4 mm の中実の Al-銅合金鋳造溶加棒を用いて、純 Al 板及び Al 合金に TIG 溶接法により肉盛溶接した結果を報告しているが、そのビード断面には気孔が多く発生している様子が伺える。辻村等⁴⁾はアルミ鋳物に銅系ソリッドワイヤを使用し、MIG 溶接では鋳物材からのガス発生が多く健全なビード形成が出来なかったが、TIG-MIG 溶接では良好な肉盛改質層溶接ビードが形成されたとの報告がある。上記報告から判るように、粉粒体を用いる場合には、粉体表面に吸着される水分や内部に含有されるガスに起因して微小気孔発生の問題があるようである。また、中実の連続鋳造溶加棒を用いる場合にも気孔が散見される結果が報告されている。MIG 溶接についても、使用する母板によっては、TIG 溶接を先行させガス放出させた後 MIG 溶接する事が必要と報告されている。著者等は、Al 合金の表面硬化肉盛溶接の問題点である溶接金属中の気孔の減少及び新しい肉盛材料の開発を目的として、従来表面硬化肉盛溶接には使用されていなかった新しい Al-銅複合ワイヤを、不純物の減少するように工程に留意して試作し実験に供試した。銅被覆の Al 線については、銅被覆率の比較的低い 15 mass% 程度を標準として、米国で同軸ケーブルなどに使用されているとの報告⁵⁾があるが、肉盛溶接用ワイヤとして Al の表面改質に使用された例は未だ報告されていないようである。

本報では、外皮として Al または銅パイプを用い、内質

*原稿受付 平成 4 年 5 月 11 日 平成 3 年度秋季全国大会で発表

**正 員 日鐵溶接工業株式会社 Member, Nippon Steel Welding Products & Engineering Co., LTD.

Table 1 Chemical compositions of pure aluminum base metal.

Secification (JIS H 4000)	Plate thickness (mm)	Chemical composition (mass%)							
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
A 1050P	10	0.08	0.28	Tr	Tr	Tr	0.01	Tr	99.6

Table 2 Seamless type Al-Cu cored wires newly developed for the test.

No.	Wire specification				
	Size (mm)	Sheath	Core	Chemical composition (mass%)	
				Al	Cu
1	1.2	Cu	Al	28.3	71.7
2	1.2	Al	Cu	27.3	72.7

としてそれぞれ銅または Al の中実ワイヤを充填して新たに試作した Al-銅複合ワイヤを使用して、肉盛溶接ワイヤとしての移行性、溶滴粒度、溶滴成分などの特性を調査すると共に、肉盛金属硬さ特性、溶接部組織、耐気孔特性などについても調査を実施した。

2. 実験方法

肉盛溶接実験のための母材として、10 mm 板厚の展伸材の純 Al 板 (JIS H4000, A1050P) を 100 mm×150 mm に切断し、表面を #400 まで研磨後、アセトンで脱脂、洗浄し実験に供した。母材の化学成分を Table 1 に示す。

一方、溶接ワイヤとして、水分、酸化物等の汚染付着物の少ないワイヤを製作する目的で、外径 9.5 mm、肉厚 0.7 mm の純 Cu パイプ (無酸素銅, JIS H3300 C1020) 中にワイヤ径 4 mm の MIG 溶接用 Al ワイヤ (JIS Z3232, A 1070-WY) を充填し、1.2 mm まで伸線した外皮が銅で内質が Al の Al-銅複合ワイヤ (銅外皮ワイヤと以下記す) および外径 10 mm、肉厚 1.0 mm の Al パイプ (JIS H4100 A1200S) 中に直径 5 mm の銅ワイヤ (JIS H3250 C1020B) を充填し、1.2 mm まで伸線した外皮が Al で内質が銅の Al-銅複合ワイヤ (Al 外皮ワイヤと以下記す) を試作した。複合ワイヤ試作にあたっては、極力ワイヤを清浄に保つために銅パイプの内面洗浄 (15 vol% 硝酸酸洗)、水洗、アセトン洗浄後乾燥した無酸素銅パイプにアセトン洗浄後乾燥した Al ワイヤをアルゴンでパージしながら充填し、最終径 1.2 mm まで伸線後、最終洗浄 (アセトン洗浄, 15 vol% 硝酸酸洗)、水洗、乾燥を行い試作した。試作した Al-銅複合ワイヤの化学成分を Table 2 に示す。Al-銅複合ワイヤ中の銅比率は約 70 mass% で、これは従来の実験結果から、溶着金属中で母材による希釈を考慮して溶着金属で硬度約 300 HV が得られるほぼ 50 Al-50 mass% 銅成分になる様に調整したものである。

複合ワイヤによる溶接アーク現象、溶滴移行性を調査するため、溶接線に直角方向から高速度ビデオカメラ (1000 駒/秒) により観察した。なお、溶滴移行状況をシルエットとして明確に観察するため、溶接アークの後方から直流 TIG アークで照明して撮影した。複合ワイヤの溶接条件は溶接電流 160 A、アーク電圧 23 V、溶接速度 400 mm/min、で、予熱温度は 100°C に設定した。シールドガスとしては Ar を 25 l/min、送給した。

溶着金属硬さ特性、組織調査、気孔発生状況調査のた

Table 3 Surfacing conditions for GMAW process.

Welding current (A)	Arc voltage (V)	Travel speed (mm/min)	Preheating temperature (t)	Shielding gas (l/min)
140	22	400	100	25 (Ar)
160	23			
180	24			
200	24			

め、インバータ制御方式定電圧直流電源を用い、Ar シールドによるガスシールドアーク溶接を実施した。Table 1 に示す母材上に Table 3 に示す溶接条件でビード溶接を行った。溶接電流を 140-200 A に変化させ、アーク長を約 6 mm の一定長さに調整するために溶接電流に応じてアーク電圧を 22-24 V に調整した。溶接速度は 400 mm/min、予熱温度は 100°C と一定とした。シールドガスとしては、Ar を流量 25 l/min、送給した。

3. 実験結果および考察

3.1 Al-銅複合ワイヤのアーク現象及び溶滴移行性

溶滴の移行性について高速度ビデオ画面を観察すると、銅外皮ワイヤではほぼワイヤ径に近いサイズの溶滴が一樣に移行するのに対して、Al 外皮ワイヤではワイヤ径よりやや大きい溶滴移行とこれよりも 1/2 以下の直径の小さい溶滴がペンシル状に尖った先端から高速度で移

Fig. 1 Metal droplet transfer with two types of Al-Cu cored wires. a) Projected transfer with copper sheath type wire. b) 1) Projected transfer with aluminum sheath type wire. 2) Streaming transfer with aluminum sheath type wire.

Fig. 2 Metal droplet size from two types of Al-Cu cored wires. (Welding current; 160A)

Fig. 3 Sections of two types of Al-Cu cored wires.

Fig. 4 Microstructures of surfacing weld metal of two types of Al-Cu cored wires. a) Copper sheath type wire. b) Aluminum sheath type wire.

行し、移行形態の異なる 2 種類の移行がほぼ周期的に発生する様子が観察された。Fig. 1 に 2 種類のワイヤによる特徴的な溶滴移行例を示す。

そこで、高速度ビデオ画面から移行する溶滴直径を測定した結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 は溶接電流値 160 A の例で、横軸は駒送りから換算した溶滴移行時間を示し、縦軸は画面上で測定した溶滴サイズを示す。

銅外皮ワイヤでは、ワイヤ直径 (1.2 mm) 程度の溶滴がほぼ 0.02 秒の間隔でワイヤ先端に形成・成長し、ワイヤ先端から離脱して溶融池にプロジェクト移行する。一方、Al 外皮ワイヤでは、直径が 1.5 mm 程度の大粒の溶滴が周期的にプロジェクト移行する時期と直径が 0.1 mm-0.5 mm 程度の小粒の溶滴がペンシル状に尖ったワイヤ先端から高速度でストリーミング移行する時期が交互にあり、移行状態が銅外皮ワイヤ程定常的ではない。

このような移行形態を示すのは、ワイヤの外皮材料と内質材料の溶融温度の違い及び Fig. 3 に示すそれぞれのワイヤの断面形状からも判る様に、Al と銅との密度差からワイヤとしては同一成分でも外皮厚さが異なる事によるものと考えられる。すなわち、銅外皮ワイヤでは、外皮材料が銅で溶融温度が 1083°C であるのに対して内質材料の Al は溶融温度が 660°C である事から外皮材料よりも早く内質の Al が溶融し、比較的薄い外皮から溶融した銅とよく混合して一定の大きさの溶滴に成長した後溶融池に移行する現象を示すものと考えられる。一方、Al 外皮ワイヤでは、外皮材料が Al であるため、内質の銅よりも早く溶融してワイヤ先端に成長し、内質の銅は

Table 4 Chemical compositions of metal droplets solidified in water.

Sheath	Metal droplet	
	Size (μm)	Chemical composition (mass%)
Cu	900	Al
		Cu
Al	1070	Al
		Cu
- 340	13.9	Al
		Cu

Table 5 Chemical composition of surfacing weld metal.

Sheath	Chemical composition of surfacing weld metal (mass%)	
	Al	Cu
Cu	57.7	42.3
Al	60.8	39.2

細くワイヤ先端から突き出した状態でまず外皮の Al の多い成分の溶滴がワイヤ先端から移行し、その後突き出した内質の銅が溶融して元のワイヤ径よりも細いワイヤ先端から増加した電流密度に助けられて高速度でストリーミング移行するものと考えられる。

銅ワイヤからの溶滴がストリーミング移行する最低電流値は、0.9 mm 径の場合 180 A、1.2 mm 径の場合 210 A、1.6 mm 径の場合 310 A と報告⁶⁾されており、Fig. 4 の Al 外皮ワイヤの断面写真から測定すると内質の銅ワイヤの直径はほぼ 0.76 mm であり、上記遷移電流値を外挿して遷移電流を推定すると約 150 A となる。従って、Fig. 1 (b) の Al 外皮ワイヤの内質の銅ワイヤはほぼストリーミング移行領域にあると言う事が出来る。

2 種類のワイヤから移行する溶滴の成分が異なっている事を実証するために、銅外皮ワイヤおよび Al 外皮ワイヤの溶接時の移行溶滴を水中で捕集し、溶滴の化学分析を実施した。Table 4 に溶滴の化学成分を示す。Al 外皮ワイヤの場合、明らかに大きな溶滴と小さな溶滴の化学成分は異なっており、大きな溶滴は Al 成分が多く、小さい溶滴は銅成分が多い事が確認できた。

3.2 肉盛溶接部の組織について

2 種類のワイヤで溶滴の移行状態、溶滴成分が異なれば、溶融池での広域成分の均一化攪拌は期待できるとしても、2 種類のワイヤによる溶着金属組織に差異が認められるものと考えられる。

Fig. 4 に 2 種類のワイヤを使用して 160 A の溶接電流による肉盛溶接ビードに直角な横断面のマクロ組織及びミクロ組織を示す。試験片はエメリーペーパーで #1500 まで機械研磨を行い、1 μm のダイヤモンド研磨を行った後光学顕微鏡による組織観察を行った。組織観察のための腐食液としては、弗化水素 5 ml、硝酸 25 ml、塩酸 25 ml と水 45 ml の混合液を使用した。Table 5 に肉盛溶接部の化学分析値を示す。Fig. 4 (a) は、銅外皮ワイヤの横断面組織で、Table 5 の分析値から過共晶組織である事が推定出来る。すなわち、初晶としての白色の緻密で均一に分散した θ 相 (CuAl₂) と、α 相 (Al) と θ 相の共晶組織を示すのに対して、Fig. 4 (b) の Al 外皮ワイヤでは θ 相が不均一に分散した過共晶組織を示し、溶融境界部には一部銅も認められるなど不均一な組織を示している。

2 種類のワイヤによる溶接ビード横断面中央部の X 線

Fig. 5 Hardness distribution in the transverse cross section of the surfacing layer.

Fig. 6 Hardness distribution on the surface of the surfacing layer.

マイクロアナライザー CMA による Al, 銅元素分析分布写真, 及び Al 及び銅の元素分布を合成した CMA 分析による複合元素分布写真からも上記組織が確認されている。また, 該当組織の X 線回折結果から初晶が θ 相である事が確認されている。

これは前述の 2 種類のワイヤの溶滴移行性の差異に依存するものと考えられ, 銅外皮ワイヤでは, Al と銅の合金化した溶滴が安定して溶融池に移行するため銅元素が均一に分布した肉盛金属が得られるのに対して, Al 外皮ワイヤでは, Al 元素の比率の多い溶滴と銅元素の比率の多い溶滴の移行が周期的に繰り返されるので, 溶融池での成分の均一化が十分に行われず, 銅の偏析が生じ θ 相が不均一に晶出したものと考えられる。

以上の結果から, 安定した Al の表面肉盛溶接用ワイヤとしては銅外皮ワイヤが適していることが判った。

3.3 肉盛溶接部の硬さ分布

溶接電流 160 A, アーク電圧 23 V, 溶接速度 400 mm/min の溶接条件を用いて 100°C の予熱を施した後 Ar シールドによるガスシールドアーク溶接 (MIG 溶接) を実施し, 溶接部の溶接線に直角方向の横断面試験片及びビード表面から 1 mm 切削した試験片を #1500 のエメリーペーパーで研磨した後, マイクロビッカース硬度計により荷重 2.9 N, 0.5 mm 間隔で測定した。

Fig. 5 に 2 種類のワイヤについて溶接金属の横断面のビード表面中央部から母材融合線に至る縦位置の硬さ分布を示す。銅外皮ワイヤによる断面硬さは, ビード表面部から溶融境界部まで HV220~280 (平均硬度約 HV255) と比較的ばらつきの少ない硬さ分布を示しているのに対して, Al 外皮ワイヤでは, ビード表面部から溶融境界部まで HV150~300 (平均硬度約 HV222) と測定位置による硬度のばらつきが大きい結果が得られた。ここで, 平均

Fig. 7 Hardness distribution on the lapping part of surfacing layer.

Fig. 8 Cross section of lapping part of the surfacing weld metal.

硬さ値に差が見られるのは, Fig. 4(a)(b)のビード横断面からも判るように, Al 外皮ワイヤでは溶滴がストリーミング移行する時期に溶込みが増大し, 母材希釈率が増加したためと考えられる。

Fig. 6 に 2 種類のワイヤについて肉盛金属表面部の溶接線方向の硬さ分布を示す。銅外皮ワイヤによる表面硬さは, HV230~300 (平均硬度 HV267) で比較的ばらつきが少ないのに対して, Al 外皮ワイヤの表面硬さは HV170~350 (平均硬度約 HV262) でばらつきが大きい結果が得られた。このように 2 種類のワイヤで表面及び断面硬さのばらつきの程度が異なる理由としては次の様に考える事が出来る。すなわち, 銅外皮ワイヤでは, Fig. 4(a)の組織写真にも示されている様に, 金属間化合物の θ 相 (硬度 HV400~600) が緻密・均一に分散した共晶との混合組織を示すため肉盛金属の断面硬さ, 表面硬さが安定した値を示したものと考えられる。これに対して, Al 外皮ワイヤでは, Fig. 4(b)に示す様に, θ 相が不均一に晶出したため肉盛金属の表面硬さ, 断面硬さのばらつきが大きくなったものと考えられる。

Fig. 7 に銅外皮ワイヤを用いて 2 本のビードを横に並べて肉盛溶接した場合の溶接金属重ね部の硬さ測定結果及び Fig. 8 に横断面マクロを示す。重ね部の硬さに特に異常は認められない。

Fig. 9 に上記検討結果から硬度の安定した銅外皮ワイヤにより Table 3 に示す溶接条件で肉盛溶接を実施した溶接ビードのビード外観, 横断面マクロ写真を示す。この断面平均硬度を Fig. 5 と同様の方法で測定した結果, 溶接ビードの銅元素の分析結果及び溶接ビード断面から,

$$\text{希釈率} = \frac{\text{溶込み部断面面積}}{(\text{余盛部} + \text{溶込み部断面面積})} \times 100 (\%)$$

で測定した希釈率をそれぞれ Fig. 10 に示す。溶接電流

Fig. 9 Appearance and cross sections of the surfacing weld metals with welding current range from 140A to 200A (Copper sheath type wire).

Fig. 10 Relation among welding current, cross section hardness, copper content and dilution rate (Copper sheath type wire).

が140 A から200 A に増加するに従い、溶込み深さが増大し母材希釈率が45%から53%に増加、銅元素の含有率が低下し、その結果金属間化合物 θ 相の晶出面積比率が減少するため同一組成のワイヤを使用しても平均硬度がHV290 から HV210 まで低下する結果が得られた。

以上の検討結果から、安定した硬度分布を得るためには、銅外皮ワイヤが適している事、また同一組成のワイヤを使用しても溶接条件により溶込み深さ、母材希釈率が変化するため得られた溶接金属の硬度が異なる事がわかった。

3.4 肉盛溶接部の気孔について

Al の肉盛溶接部の気孔は一般に微小なものが多く、放射線透過試験 (JIS Z 3105-1984) では正確な評価が困難であるため、本実験では、Table 3 に示す溶接条件及び溶接速度 (溶接入熱) の影響を調査するため溶接速度300 mm/min. の条件を追加して肉盛溶接した試験板から、160 A, 180 A, 200 A の試験板について各ビードから3箇

Fig. 11 Relation between welding current and porosity area percentage.

Fig. 12 Relation between heat input and porosity area percentage.

Fig. 13 Relation among welding current, porosity size and number of porosities.

所の断面試験片を採取し、10倍の拡大写真を撮影し、その写真から気孔粒径と個数を測定し、気孔断面を円形と仮定して全気孔断面積 (S_B) を算出し、溶接金属断面積 (S_W) との比率から

$$\text{気孔面積比率} (=S_B/S_W) \times 100 (\%)$$

を求め3断面の平均値で評価した。この気孔断面積測定に際して、気孔粒径 (D) を次の4段階 ($D_1 < 0.1 \text{ mm}$, $0.1 \text{ mm} \leq D_2 < 0.2 \text{ mm}$, $0.2 \text{ mm} \leq D_3 < 0.4 \text{ mm}$, $0.4 \text{ mm} < D_4$) に区別し、それぞれの個数を勘定して算出した。

Fig. 11 に溶接電流と気孔面積率 (%) との関係を示す。溶接電流の増加により、気孔面積率は低下する傾向を示しており、溶接速度の低下に対しては溶接電流160 A の場合には明瞭に低速溶接の方が気孔面積率が低下しているが、溶接電流180 A, 200 A ではほぼ同程度のデータが得られている。溶接入熱の影響を明確にするため、Fig. 11 を溶接入熱で整理した図を Fig. 12 に示す。Fig. 12 か

Fig. 14 Effect of oxygen content in copper pipe on porosity area percentage.

Fig. 15 Measurement of involved gases in the porosities.

ら、気孔面積率は溶接入熱の増加により減少し、小入熱域ではばらつきはあるものの、8 kJ/cm 以上の大入熱域では顕著に減少して1.0%以下になる事が確認できた。なお、気孔の大きさは概して微小なもので、大きさを区分すると Fig. 13 に示すようになり、殆ど直径0.2 mm 以下である。

この結果は、従来の PTA 溶接結果に比較して気孔発生は減少しており、特に直径の大きい気孔は全く発生していない。

気孔の発生原因調査のため、酸素量の異なる2種類の銅パイプ、すなわち酸素量：約6 ppm、水素量：1.6 ppmの無酸素銅と酸素量：30-40 ppm、水素量：1.0 ppmの燐脱酸素銅を使用して検討を実施した。Fig. 14 から無酸素銅の方が明らかに燐脱酸素銅よりも気孔が少ない結果が得られており、気孔低減にはパイプ中の酸素低減が有効であるようである。

また、気孔の内部ガス成分について、真空チャンバー内で気孔中のガスを抽出し、質量分析法により調査する方法⁷⁾により測定した無酸素銅パイプの場合の結果を

Fig. 15 に示す。無酸素銅パイプによる場合には、気孔内部のガスは水素が主成分で極微量の窒素とメタンである事、燐脱酸素パイプによる場合には水素が主成分で、表層部には酸素、窒素、メタンが観察され、さらに内部では極僅かに CO₂ によるスペクトルが検出された。

鈴木⁸⁾によれば、銅の溶接では気孔は溶融銅中の酸素と水素の反応の結果生じた水蒸気により発生するもので、気孔の防止には脱酸されたものが望ましいと記されており、また別に水素と酸素が溶融銅中で水蒸気が発生するとの報告⁹⁾がある。さらに、プラズマ粉体溶接法により Al 母材上に銅粉体を用いて肉盛溶接する場合に、Cu₂O が水素と反応して水蒸気が発生するのが気孔の原因の一つと記載されている報告¹⁰⁾等から、酸素が多い場合には水素との反応により気孔を生成し、その後冷却と共に水分が凝集あるいは分解し、気孔中に水素が生成または拡散して来たため、分析結果からは水素が主として検出されたものと推察される。

4. 結 言

Al 合金表面に健全な肉盛溶接層を形成するため、ワイヤ径1.2 mm の Al-銅複合ワイヤを試作し、ガスシールドアーク溶接法により肉盛溶接を実施した結果、次の結論が得られた。

1) Al-銅複合ワイヤの特性調査結果により、銅を外皮とし、内質に Al の中実ワイヤを充填した30 Al-70 mass% 銅複合ワイヤが、ほぼワイヤ径と同程度の溶滴がプロジェクト移行し、溶滴成分の安定性が良好である事が判った。Al 外皮ワイヤでは、溶滴の移行がワイヤ径よりやや大きい溶滴とその1/2以下の溶滴の2種類の溶滴が形成され、アーク状態もプロジェクト移行とストリーミング移行が周期的に発生して溶込みが増大し、溶滴成分が局部的に不均一になる結果が得られた。

2) 溶接部の硬さについては、ビード横断面及びビード表面の硬さを荷重2.9 N のマイクロビッカース硬度計で0.5 mm 間隔で測定した。銅外皮ワイヤでは、断面平均硬さは HV255 で、表面平均硬さ HV267 の値が得られ、硬さのばらつきの幅は HV60-70 であったのに対して、Al 外皮ワイヤでは、断面平均硬さ HV222 で、表面平均硬さは HV262 の値が得られ、硬さのばらつき幅は HV150-180 あり、測定位置により硬さの差が著しい事が判った。硬さの安定度の観点からも銅外皮ワイヤが優れている事が判った。

3) 溶接条件と肉盛溶接部の硬さ、銅成分、母材希釈率の関係については、溶接電流を140 A から200 A の範囲で調査した結果、溶接電流の増大に従って、母材希釈率が増加し銅成分が減少するため、θ 相の初晶の晶出量が減少し、肉盛溶接部の硬さが低下する結果が得られた。

4) 肉盛溶接部の組織については、肉盛溶接部の目標成分として50 mass% 銅程度を狙ったため、組織的には初晶として θ 相が晶出し、Al-33 mass% Cu の共晶組織が形成されている。銅外皮ワイヤでは、銅成分が安定に分布しているため、θ 相が緻密で均一に分布した組織を示しているが、Al 外皮ワイヤでは、銅成分の移行の安定性に欠けるため、初晶の θ 相が片状に晶出しており、硬さのばらつきの原因となっている。

5) 溶接部断面の気孔について、気孔面積率を測定して評価した結果、溶接電流の増加、溶接入熱の増加により容

易に 1% 以下に減少する傾向が認められた。また、気孔サイズは 0.2 mm 以下のものが圧倒的に多い。酸素含有率の高い銅パイプを使用して試作したワイヤでは気孔面積率が増加する事が判った。この場合の気孔の生成は銅中の酸素と水素の反応による水蒸気が原因と考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に際して、検討結果のご討議をお願いした新日本製鉄㈱鈴木春義博士、研究遂行に助言を戴いた日鉄溶接工業㈱青木相談役、西常務に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 柴田, 馬久地, 小池, 中田: 交流 PTA によるアルミニウムへの Al-Cu 合金の肉盛り, 本会講概, 第 46 集 ('90-4), 132-133.
- 2) 李, 中田, 李, 松田: プラズマアーク粉体肉盛りによるアルミニウム合金への硬化厚膜合金化層の形成 (第 1 報) —厚膜表面合金化層の形成条件とその形成組織—高温学会誌 Vol. 17, No. 4, (1991) 177-190.
- 3) 富田, 松田, 中田: TIG 溶接による Al-Cu 合金の肉盛り 表面改質技術研究委員会 (1990. 10).
- 4) 辻村, 上村: アルミの TIG/MIG 組み合わせ工法による表面改質に関する研究, 本会講概, 第 49 集 ('91-9).
- 5) 高山: 電線用クラッド線材の製法と特性 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌) 第 31 巻第 355 号 (1990-8).
- 6) Welding Handbook Eighth edition Volume 2 Welding processes (1991) P. 116.
- 7) 大坪, 後藤, 安田: ブローホール中ガスの分析装置の開発と応用 鉄と鋼 第 68 年 (1982) 第 7 号 150-154.
- 8) 鈴木: 最新溶接ハンドブック改訂版, 山海堂 (1975) 672-673.
- 9) Welding Handbook Seventh edition Volume 4 Metals and Their Weldability (1982) P. 275.
- 10) トーカロ㈱アルミニウム基板に対する銅肉盛り溶接に関する検討 アルミニウム表面ミリオダー硬化技術調査 WG 資料.

低周波パルスミグ溶接法による Al 合金溶接金属の結晶粒微細化と凝固割れ感受性の改善*

—低周波パルスミグ溶接の研究 (第 2 報)—

山本英幸**, 原田章二**, 上山智之**, 小川俊一**, 松田福久***, 中田一博***

The Beneficial Effect of Low Frequency Pulsed MIG Welding Process on Grain Refinement of Weld Metal and Improvement of Solidification Crack Susceptibility for Al Alloy*

—Study on Low Frequency Pulsed MIG Welding Process (Report 2)—

by Hideyuki Yamamoto**, Shoji Harada**, Tomoyuki Ueyama**, Shunichi Ogawa**, Fukuhisa Matsuda*** and Kazuhiro Nakata***

Vibration of molten puddle is achieved with the low frequency pulsed MIG welding process of new current waveform to switch over two preset unit pulse conditions alternately.

The degree of this vibration depended on switching frequency of unit pulse conditions, f_s and there was an optimum frequency range of $f_s=10-30$ Hz, and moreover large difference between two pulse current values promoted the molten puddle vibration.

It was made clear that the stirring effect of molten puddle was expected by this process and this resulted in the remarkable grain refinement of weld structure of commercial available Al-Mg alloy base metal and wire within the optimum frequency range, especially $f_s=30$ Hz.

Moreover, this process had a beneficial effect to improve the solidification crack susceptibility of Al-Mg alloy weld metal due to the grain refinement.

Key Words: Al-Mg alloy, Solidification cracking, Crack susceptibility, Grain refinement, Molten puddle vibration, Switching frequency, Unit pulse, Low frequency pulsed MIG welding process

1. 緒 言

Al 合金における溶接金属の結晶粒を微細化する方法

*原稿受付 平成 4 年 4 月 3 日 平成 3 年度春季全国大会で発表, 平成 3 年 5 月アーク物理研究委員会で発表

**正 員 株式会社ダイヘン Member, DAIHEN Corporation

***正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Inst., Osaka Univ.

は種々の検討が行われており、例えば、ティグ溶接では磁気攪拌¹⁻⁵⁾による結晶粒の微細化やパルスアーク⁶⁾による溶融池の振動・攪拌を利用した結晶粒の微細化が検討されており、それぞれ、その効果が確認され実用化が進んでいる。しかし、ミグ溶接の場合には上記手法を併用する結晶粒微細化の試みは以下に挙げる問題点からその検討は一部なされているにすぎない。

まず、磁気攪拌を併用する場合、溶接トーチあるいは母材裏面に励磁コイルを装置することによってミグ溶接本来の特徴である溶接動作範囲に制限が生じる。さらに、