

Al-Cu 複合ワイヤによるミグ硬化肉盛溶接について

原田 章二*, 上山 智之*, 周 大慶*, 工藤 和直*, 中田 一博***

Surface Modification of Aluminium Alloy by MIG
Welding Process with Al-Cu Cladding WireShoji Harada*, Tomoyuki Ueyama*, Daqing Zhou*,
Kazunao Kudo**, Kazuhiro Nakata***

Hard surfacing on aluminium alloy has been investigated by MIG welding process using a newly developed Al-Cu seamless type cladding wire (copper sheath with aluminium solid wire as inside core) of 1.6 mm in diameter. Two cladding wires with the different copper contents were tested. One is 34 mass% Cu and the other is 52 mass% Cu.

The effect of shielding gases on hardening characteristic and blowhole generation in weld metal has been investigated.

It was made clear that the Vickers hardness 160~280 Hv which is 2~3 times harder than base metal was obtained.

The micro blowholes which are not detected by radiographic test much occurred in weld metal. However, they decreased with increasing mixture rate of He gas.

Key Words: MIG welding process, aluminium alloy, Al-Cu cladding wire, shielding gas, hardness, micro blowhole, base metal, weld metal, hard surfacing.

1. はじめに

アルミニウム（以下、Alと略）及びその合金は軽量で比強度が高いという特性を生かして、近年いろいろな分野に広く利用されている。しかしその反面、強度、耐摩耗性、耐熱性にやや劣っている問題がある。そこで、Al表面の硬化を目的として、プラズマやレーザーなどを利用した表面改質が最近盛んとなってきた。本研究では実用上、取扱いが簡便なミグ溶接法に着目して、Al-Cu複合ワイヤによる肉盛溶接を行い、肉盛溶接部の溶込み状況、硬さ、組織、ブローホールなどの諸特性に及ぼす影響について検討した。

2. 使用材料及び実験方法

2.1 使用材料

本実験では、溶加材として芯材にAl-Mg合金(A5056)ソリッドワイヤを用い、外周部に無酸素銅で被覆させた試作Al-Cu複合ワイヤ（以下、複合ワイヤと略）を用いた。Table 1に複合ワイヤのAl及びCuの含有量を示し、Fig. 1に断面形状を示す。

また、母材にはAl-Mg合金板(A5083, 12mmt×100mmW×200mmL)を用い、表面を電動ワイヤブラシで

Table 1 Chemical compositions of Al-Cu cladding wires for the test.

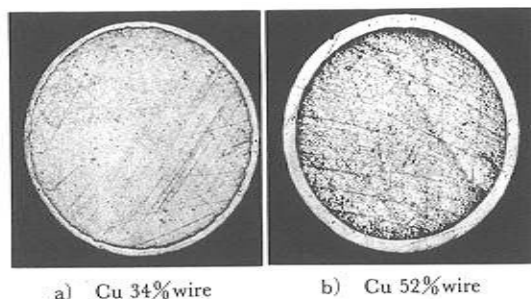
No.	Dia. (mm)	Al-Cu contents (mass%)	
		Cu (C1020T)	Al (A5056)
1	1.6	34	66
2	1.6	52	48

* 株式会社ダイヘン DAIHEN Corporation

** 住友電気工業株式会社 SUMITOMO Electric Industries

*** 大阪大学溶接工学研究所 Welding Research Institute, Osaka University

原稿受付 1993年7月8日



a) Cu 34% wire b) Cu 52% wire

Fig. 1 Sections of two Al-Cu cladding wires.

Table 2 Chemical compositions of aluminum base metal.

Materials	chemical compositions (mass%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
Base metal	A5083	0.08	0.2	0.04	0.55	4.79	0.09	0.03	0.02	RE

酸化膜を除去し、アセトンで脱脂、洗浄し、実験に供した。その化学成分を Table 2 に示す。

2.2 実験方法

本実験では、インバータ制御の脉冲ミグ溶接電源を用いて、低周波パルスミグ溶接及び通常パルスミグ溶接によるビード溶接試験を行った。低周波パルスミグ溶接¹⁾は、パルスに同期したプロジェクト移行が可能となる適正なユニットパルス条件（パルス電流値 I_p 及びパルス幅 T_p ）範囲内で、2種類のユニットパルス条件を Fig. 2 に示すような電流波形で、周期的に切替えることによって行い、ユニットパルス条件の切替周波数 f_s は 2-50 Hz まで変化させた。Table 3 に電流波形条件を示す。また、ユニットパルス条件の切替を行わなかった通常のパルスミグ溶接法では、ユニットパルス条件（パルス周波数 240 Hz）によってビード溶接した。Table 4 にそれぞれの溶接条件を示す。

ビード溶接によって得られた肉盛溶接部は、そのビード外観及びマクロ断面を観察し、割れ、ビッドなどの溶接欠陥の有無について調べた。そして、溶接部の断面を試験片中央部にて切り出し、バフ研磨（アルミナ 0.3 μm まで）及び電解研磨（2.5% ホウフッ化水素酸水溶液 25 V, 20 S）の後、光学顕微鏡で組織の観察及び EPMA による元素分析を行った。

肉盛溶接金属の硬さはビッカース硬度計を用い、9.8 N で 15 秒間の負荷で測定した。さらに、切り出した断面試験片は、投影機で 10 倍に拡大し、溶接部に発生した

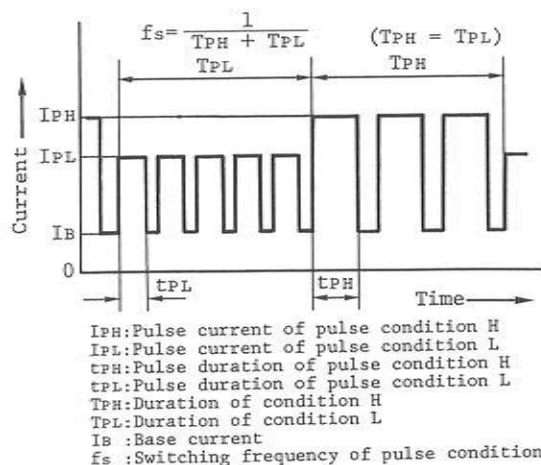


Fig. 2 Low frequency pulsed current waveform and its notation.

Table 3 Waveform conditions.

Low frequency pulsed MIG welding process (LP)	Pulse condition H Pulse current, I_{PH} : 400 A Pulse duration, t_{PH} : 2.0 ms Pulse condition L Pulse current, I_{PL} : 360 A Pulse duration, t_{PL} : 1.2 ms
Conventional pulsed MIG welding process (CP)	Pulse current, I_p : 360 A Pulse duration, t_p : 1.8 ms frequency, f : 240 Hz

Table 4 Welding conditions.

Welding current	200 A
Welding voltage	25~30 V
Welding speed	40 cm/min
Frequency	2, 5, 10, 20, 30, 50 Hz
Shielding gas (25 l/min)	100% Ar, 50% Ar+50% He, 30% Ar+70% He, 100% He
Arc length	3~4 mm

ブローホールについても検数した。

3. 実験結果及び考察

3.1 ビード外観及び溶込み形状に及ぼすシールドガスとパルスパラメータの影響

Fig. 3 に 2 種類の複合ワイヤによるビード外観例を示す。いずれの場合も全体的に黒いススで覆われた外観を示した。しかし、この黒いススはワイヤブラシなどで軽く磨いてやると簡単に除去できることがわかった。

Fig. 4 は本実験で得られたビードのマクロ断面を、シ

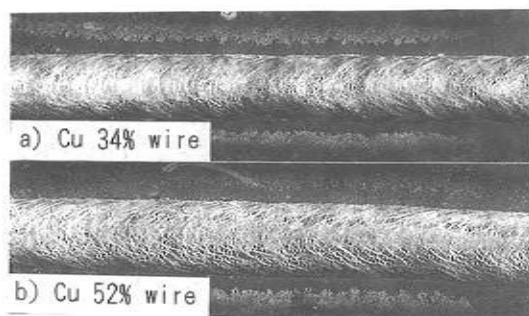
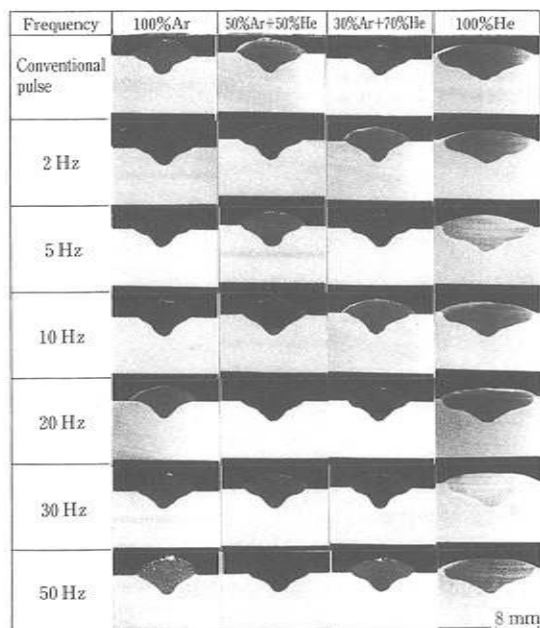


Fig. 3 Bead appearance of two Al-Cu cladding wires by conventional pulsed MIG welding process.

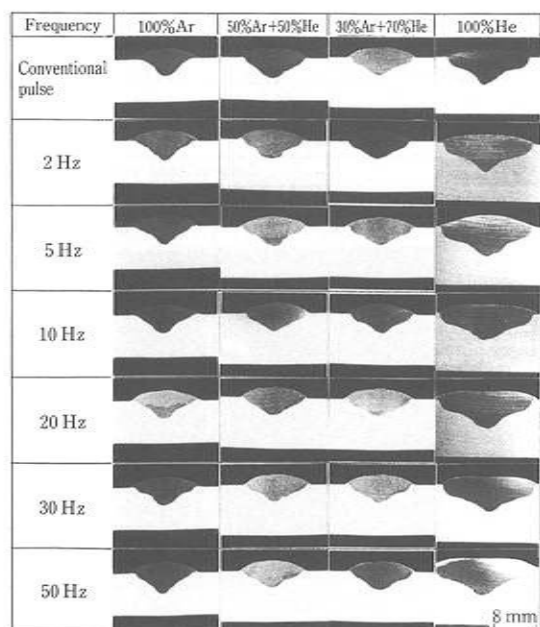
ールドガス成分比と低周波パルス溶接のユニットパルス切替周波数の関係で示したものである。a)はCu量34%の複合ワイヤ、b)はCu量52%の複合ワイヤを用いた場合である。いずれの複合ワイヤを用いた場合でも、低周波パルスミグ溶接のユニットパルス切替周波数の変化に対しては、溶込みやビード外観にはほとんど変化が認められなかった。また、低周波パルスミグ溶接と通常パルスミグ溶接と比較した場合も、溶込み形状やビード外観には有意差は認められなかった。しかし、シールドガスのHeガスの混合比の変化に対しては溶込み形状に変化が認められた。すなわち、Heガス混合比を増すと、溶込み深さが深くなることが認められた。また、いずれの場合もビード表面では、割れやビットは認められなかった。

Fig. 5はFig. 4の結果からガス組成と希釈率の関係を通常パルスミグ溶接の場合について示したものである。いずれの複合ワイヤを用いた場合でも、Heガス混合比の増加につれて、希釈率は増加する傾向が見られる。これはArガスと比べ、Heガスの電位傾度が高く、アーク電圧が高くなるため、母材への入熱が大きくなったためと考えられる。

なお、Cu量34%複合ワイヤと比べて、Cu量52%複合ワイヤの希釈率は大きいことが確認された。これは、Al-Cu状態図により、Cu含有量は共晶点まで(Cu33%)、その含有量が高いほど液相線温度が下がることを示されており、本実験で得られた熔融金属のCu含有量は33%以下であるので、Cu量34%複合ワイヤに比べ、Cu量52%複合ワイヤの場合、熔融金属のCu含有量が高く、融点が低く、同じ入熱でも、溶込み面積が大きく、希釈率が大きくなるものと考えられる。



(a) Cu 34% wire



(b) Cu 52% wire

Fig. 4 Transverse cross section of two Al-Cu cladding wires by Low frequency pulsed MIG welding process and conventional pulsed MIG welding process.

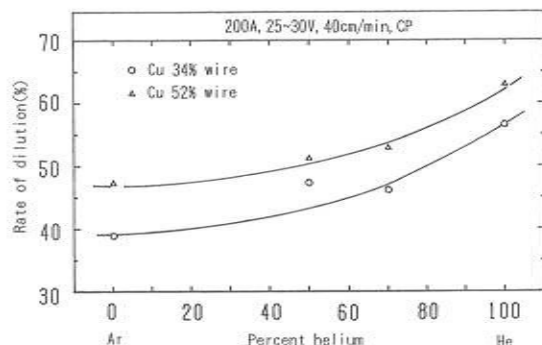


Fig. 5 Relation between shielding gas and rate of dilution.

3.2 肉盛溶接部の組織観察及び EPMA による定量分析結果

Fig. 6 に光学顕微鏡によるミクロ組織観察結果を示す。これによれば、Cu 量34%複合ワイヤでは、シールドガス組成の変化にもかかわらず、ほとんど均一な組織が形成された。一方、Cu 量52%複合ワイヤでは、特に100%Ar シールドガスの場合には不均一な組織が形成され、Cu の偏析が認められた。これは Cu 量52%複合ワイヤを使用した場合には、複合ワイヤの Cu 含有量が多

いため、Al に比べて比重の大きな Cu が、溶接中に熔融池内で十分に攪拌できなかったため、肉盛溶接部の下部に偏析したと考えられる。

Fig. 7 に Fig. 6 に示した位置での EPMA による平均 Cu 分析結果及び同測定場所の硬さを SEM 組織写真とともに示す。Cu 量34%複合ワイヤではシールドガスに100%Ar と50%Ar+50%He を使用した場合、平均 Cu 量はそれぞれ15.61 mass%と15.75 mass%であり、亜共晶組織を示す。つまり、大きな α 相とその周囲に Al+ θ 共晶組織である。また、平均硬さはそれぞれ Hv213 と Hv221 である。Cu 量52%複合ワイヤでは、シールドガスに100%Ar を使用した場合偏析部での平均 Cu 量は約35.7 mass%であり、過共晶組織を示す。すなわち、初晶 θ とその周囲に Al+ θ 共晶組織である。また、シールドガスに50%Ar+50%He を使用した場合、平均 Cu 量は約22.0 mass%であり、亜共晶組織を示す。そして、平均硬さを見ると、Cu 偏析部過共晶組織の平均 Hv281 であるのに対して、亜共晶組織の平均硬さは Hv236 であり、差異は大きいことがわかった。これは Cu 偏析部組織では、Cu 量が多く、硬い θ 相の晶出面積比率が増加するためと考えられる。

そこで、Cu 偏析に及ぼすシールドガス組成の影響を

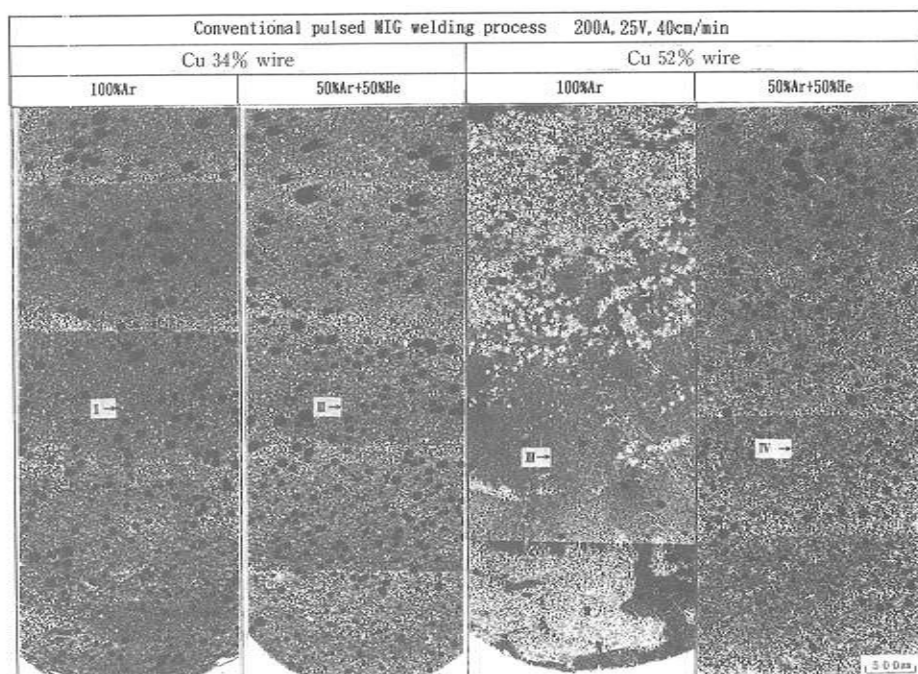


Fig. 6 Microstructural change of weld metal of two Al-Cu cladding wires by conventional pulsed MIG welding process.

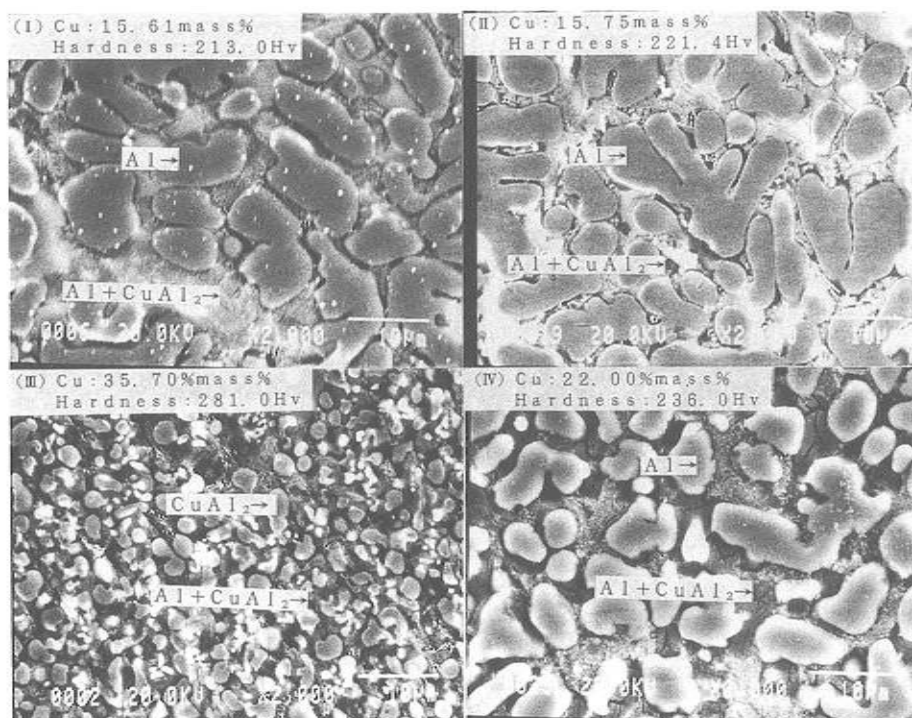


Fig. 7 Effect of Cu content on hardness and microstructure.

調べるため、Cu 偏析部面積が肉盛溶接部面積に占める割合（以下、 Scu と略）の測定を行った。Fig. 8 は Cu 量52% 複合ワイヤについて、シールドガス組成と Scu との関係を示す。単位パルス切換周波数20 Hz の低周波パルスミグ溶接と通常パルスミグ溶接とで示したものである。シールドガスに100%Arを使用した場合、通常パルス溶接及び低周波パルス溶接とも Scu は大きな値を示すが、He ガス混合比の増加とともに著しく減少することがわかった。これは前述のように He ガス混合率の増加にしたがって、希釈率が大きくなり、単位体積の Cu 量が減少し、溶接中に熔融池内で十分に攪拌できたと考えられる。

3.3 硬さ分布及び平均硬さについて

3.3.1 硬さ分布に及ぼすシールドガス組成の影響

Fig. 9a) は、Cu 量34% 複合ワイヤを用いた通常パルス溶接の場合における溶接部の硬さ分布を各混合ガスシールドについて示したものである。いずれのシールドガス組成においても、ばらつきの少ない硬さ分布を示しており、A5083母材の硬さ（Hv80程度）の約2~3倍の硬さで、軟鋼の硬さ（Hv130程度）より硬い溶融金属が得られた。また、平均硬さは100%He ガス以外のシールドガス組成の場合、Hv200程度であるのに対して、

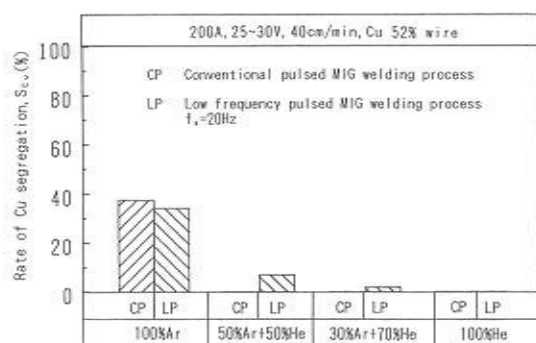


Fig. 8 Relation between shielding gas and rate of Cu segregation area, Scu .

100%He ガスの場合、平均硬さは Hv170程度と、やや低いことがわかった。これは100%He ガスの場合、他のシールドガス組成と比べて希釈率が著しく大きくなるためと考えられる。Fig. 9b) は、Fig. 9a) と同じ条件で、Cu 量52% 複合ワイヤを用いた場合における肉盛溶接部の硬さ分布を示したものである。シールドガスに100%Arを使用した場合、硬さ分布は Hv200-Hv320とばらつきの多い硬さ分布を示しているのに対して、他のシールドガス組成では Hv200-Hv260と硬さのばらつきが少な

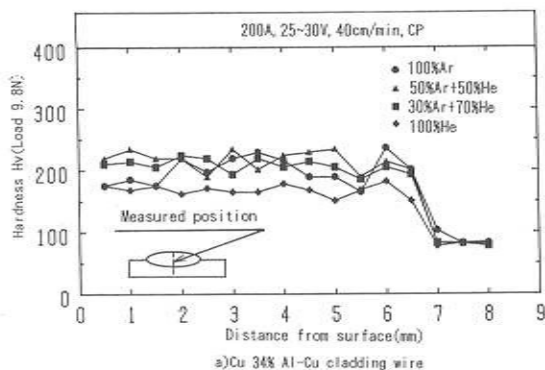


Fig. 9 Hardness distribution in the transverse cross section of the surfacing layer.

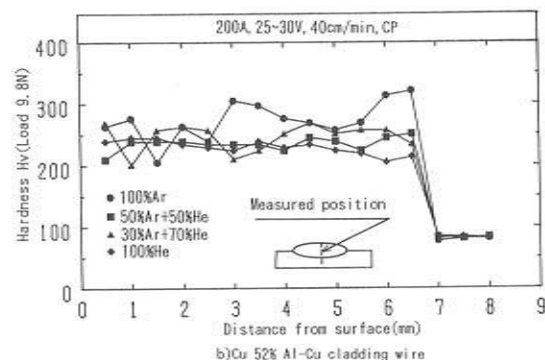


Fig. 9 Hardness distribution in the transverse cross section of the surfacing layer.

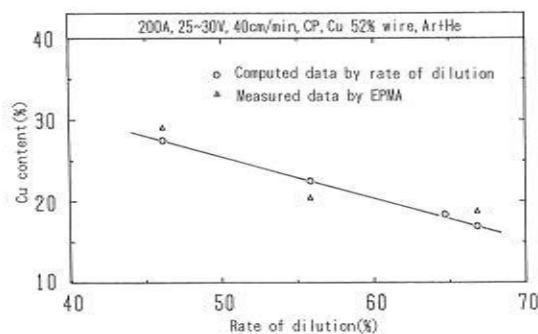


Fig. 10 Relation between rate of dilution and Cu content.

い結果が得られた。また、平均硬さは Hv220で、Cu 量 34% 複合ワイヤより高い値を示していることがわかった。以上の結果から次のように考えることができる。すなわち、Cu 量 52% 複合ワイヤで 100%Ar を使用した場合には、Fig. 6 に示すように、 S_{Cu} の偏析量の高い不均一組織を形成したため、断面硬さのばらつきが大きくなったものと考えられる。

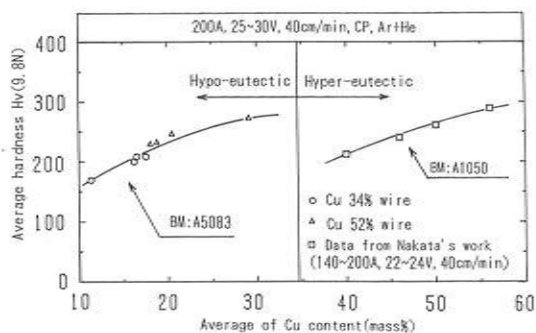


Fig. 11 Relation between average of Cu content and average hardness.

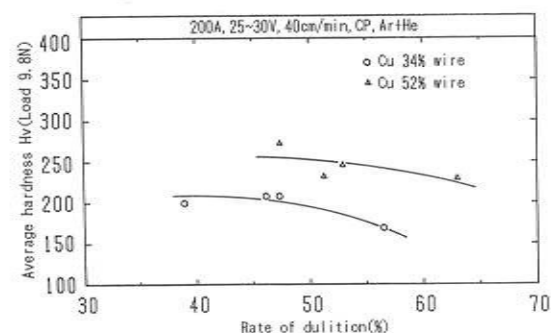


Fig. 12 Relation between rate of dilution and average hardness.

3.3.2 希釈率、Cu 含有量及び硬さの相関性

Fig. 10 は通常パルスで Cu 量 52% 複合ワイヤを使用した場合、希釈率と平均 Cu 含有量との関係を示したものである。希釈率の増加につれて、平均 Cu 含有量が減少することがわかった。また、平均 Cu 含有量の EPMA による測定値及び希釈率による計算値は、ほぼ一致していることがわかった。

Fig. 11 は 2 種類の複合ワイヤについて、Ar+He シールドガスの場合の平均 Cu 含有量及び平均硬さの関係を示したものである。なお同図は参考として、中田ら²⁾によるデータを併せて示している。これによれば Cu 含有量の増加につれて、硬さは増加することが分かった。これは Cu 含有量が高いほど、共晶 θ 相の晶出が多くなり、平均硬さが高くなるものと考えられる。なお、Cu 量 34% 複合ワイヤと比べて、Cu 量 52% 複合ワイヤの場合、Cu 含有量が高いが、両者とも亜共晶組織であることがわかった。また、中田らのデータによれば過共晶組織となっているにもかかわらず、Cu 量 52% 複合ワイヤと比べて、平均硬さがほとんど変わらないことがわかった。この理由として、中田らの実験では、母材に純アル

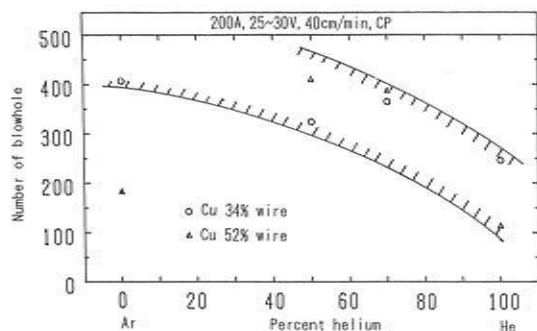


Fig. 13 Relation between shielding gas and the number of blowhole.

ミニウムを用いており、母材の平均硬さはA5083(約Hv80)と比べて、半分(約Hv40)程度であるためと考えられる。

Fig. 12は2種類の複合ワイヤについて、希釈率と平均硬さの関係を示したものである。いずれの複合ワイヤにおいても、希釈率が大きいほど平均硬さは減少する傾向にある。

3.4 肉盛溶接部のブローホールについて

Fig. 13に2種類の複合ワイヤについて、シールドガス組成とマイクロブローホールの数の関係を示す。いずれの複合ワイヤもHeの混合比の増加とともに、マイクロブローホールは減少を示す。ところで、文献⁹⁾などによればHeの混合比を増すと、希釈率が大きくなり、凝固速度が遅くなり、そのため、水素を主成分とする溶解ガスが多く放出され、マイクロブローホールとして残留するものが激減することが示されている。このため、本実験結果におけるマイクロブローホールの減少も、上記のことが一因していると考えられる。

4. 結 論

Cu量の異なる2種類のAl-Cu複合ワイヤによるミグ硬化肉盛溶接を実施し、希釈率、Cu含有量、硬さ及びブローホールについて検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 本実験におけるビード溶接試験ではいずれの複合ワイヤとも割れやビットなどの溶接欠陥はまったく認められなかった。
- 2) 肉盛溶接部の希釈率、Cu含有量、硬さ及び組織に及ぼす通常パルス並びに低周波パルスのユニットパルス切り換え周波数の影響は認められなかった。
- 3) 100%Arシールドガスによる肉盛溶接部の硬さ分布は若干のばらつきを生じていたが、Heを混合することによりばらつきの少ない硬さ分布となった。なお、Cu量34%複合ワイヤでは、硬さHv160-210の値が得られ、Cu量52%複合ワイヤでは、Hv200-280の値が得られた。
- 4) 肉盛溶接部組織について、Cu量34%複合ワイヤでは、シールドガス組成の混合比の変化にもかかわらず、均一な亜共晶組織が得られた。一方、Cu量52%複合ワイヤでは、シールドガスに100%Arガスを用いた場合、Scuにより不均一な組織となった。しかし、シールドガスにHeガスを用いると、均一な亜共晶組織が得られた。
- 5) 希釈率、Cu含有量及び硬さに関しては、シールドガスのHeガス混合比の増加にしたがって、母材希釈率が増加し、肉盛溶接部のCuは減少するため、共晶 θ 相の晶出量が減少し、肉盛溶接部の硬さが低くなることがわかった。
- 6) マイクロブローホール数は、希釈率の増加とともに減少する傾向が認められた。

参 考 文 献

- 1) 山本, 原田, 上山, 小川, 松田, 中田: Al及びその合金の低周波パルスミグ溶接法の開発, 溶接学会論文集, 10-2 (1992), P. 25-30.
- 2) 神戸, 中田, 栗原, 小池, 三宅: アルミニウムCu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, 溶接学会論文集, 10-4 (1992), P. 59-65.
- 3) 水野, 箕田, 阪口: アルミニウムとその合金の溶接, 溶接全書(13), 産報出版(1979), P. 63-65.