

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、

外部磁場を付加することによってアーク中の溶滴移行が不安定になり、スパッタが多量に発生するなどの問題が生じる。

また、パルスアーク溶接による結晶粒の微細化方法では、著者らの一部⁷⁾がスプレイ移行域の溶接電流値をパルス電流とし、短絡移行域の溶接電流値をベース電流としたパルス電流波形を用い、Zr, TiあるいはBなどの結晶粒微細化を促進させる元素を微量に添加した溶接ワイヤを組み合わせることで、その効果を確認している。

しかし、この方法も使用する溶接条件によっては、ティグ溶接のように安定してアークの状態を変化させることのできるパルス周波数域に制限が生じる。すなわち、上記のパルスミグ溶接法ではワイヤ融融の時定数よりも長い周期(低周波数)で溶接電流が変化すると、アーク長の変動が安定して得られない⁸⁾。そのため、20 Hz以下の周波数域での微細化に及ぼす影響については実験による検討はなされていない。また、Houldcroft試験のように薄板の試験片を用いる場合には数10 Aから100 A程度の低電流の溶接となるので、パルス周波数の設定できる条件範囲が狭く十分な検討を行うことができない。いっぽう、著者らは第1報⁹⁾において溶滴移行の良好範囲内でアークの状態を任意に変化させることのできる低周波パルスミグ溶接法を開発し、その動作原理ならびに効果について報告した。

そこで、本報ではこの低周波パルスミグ溶接法を用いてこれらの課題を克服するとともに、結晶粒微細化に及ぼす溶接電流波形条件の影響ならびに結晶粒微細化による凝固割れ感受性の改善効果について検討したので報告する。

2. 使用材料および実験方法

2.1 使用材料

実験においては母材として板厚3 mmの市販Al-Mg合金(A5052)を用いた。また、溶接ワイヤにはワイヤ径1.6 mmの市販Al-Mg合金ワイヤ(A5356-WY)を用いた。これらの化学成分はTable 1に示すとおりである。なお、溶接ワイヤには結晶粒微細化元素としてTiが0.11%添加されている。

2.2 低周波パルスミグ溶接

低周波パルスミグ溶接は、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 およびパルス幅 t_p)範囲内で、2種類のユニットパルス条件をFig. 1に示すような電流波形で周期的に切替えることのできるインバータ制御の溶接電源によって行った。

Fig. 2はワイヤ径が1.6 mmの場合の適正なユニットパルス条件範囲を後述する高速度カメラ撮影ならびに波形解析¹⁰⁾によって調べたものである。その結果、Alのパルスミグ溶接では前報と同様にワイヤ径が1.6 mmでも溶滴移行の良好な適正ユニットパルス条件が広く得られ

ていることがわかった。したがって、本実験では同図のハッチングで示した適正なユニットパルス条件範囲内で、周期的に切替える2種類のユニットパルス条件(パルス条件L, パルス条件H)をTable 2に示すように選

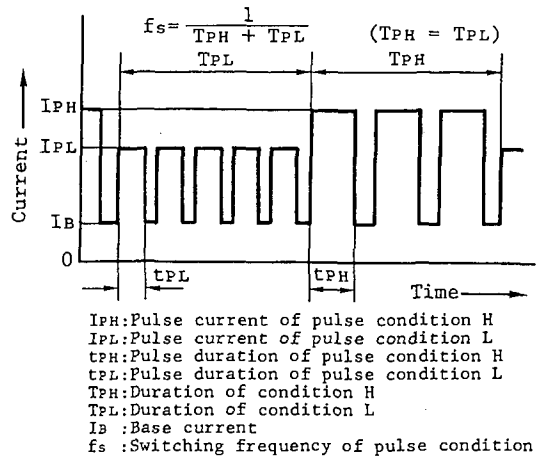


Fig. 1 Low frequency pulsed current waveform and its notation.

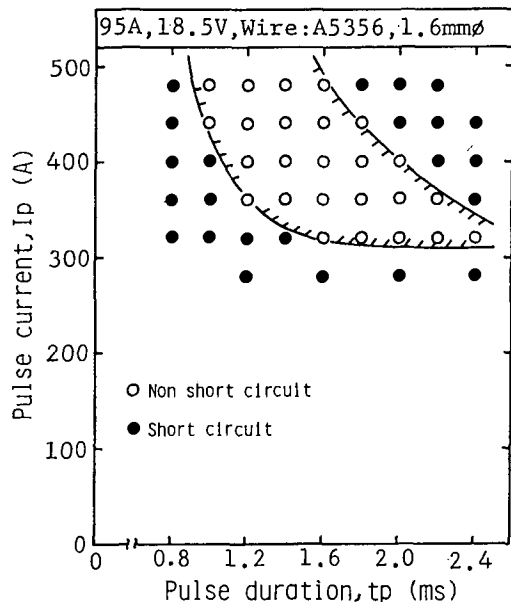


Fig. 2 Appropriate pulse conditions in pulsed MIG welding for aluminium alloy.

Table 2 Waveform conditions.

Pulse condition H	
Pulse current, I_{PH} : 360-480A	
Pulse duration, t_{PH} : 1.6-2.2ms	
Pulse condition L	
Pulse current, I_{PL} : 360A	
Pulse duration, t_{PL} : 1.2ms	
Switching frequency, f_s : 2.5-50Hz	
Base current, I_B : 30A	

Table 1 Chemical compositions of materials used.

Materials		Chemical compositions (wt%)							
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Base metal	A5052	0.10	0.27	0.02	0.02	2.40	0.21	0.01	-
Filler wire	A5356	0.08	0.14	0.01	0.10	5.16	0.09	0.01	0.11

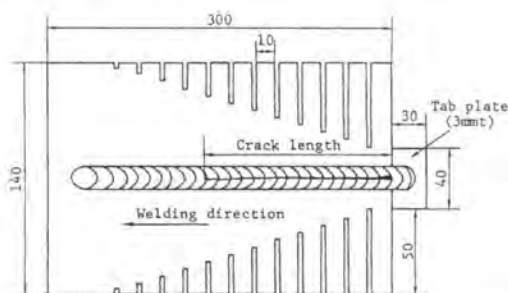


Fig. 3 Shape and dimension of Modified Houldcroft test specimen. (Specimen thickness: 3 mm)

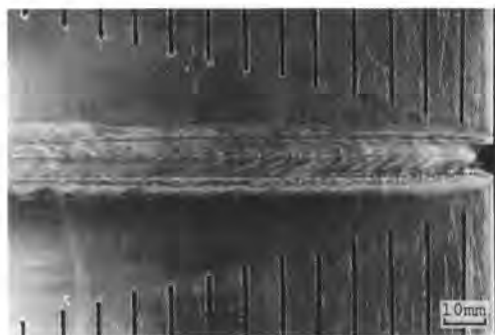


Fig. 4 Appearance of weld bead showing cracking.

定した。また、それぞれのユニットパルス条件におけるベース電流値 I_B はいずれも 30 A とし、ユニットパルス条件の切換周波数 f_s は 2~50 Hz まで変化させた。なお、ユニットパルス条件の切換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 L (パルス周波数 $f = 115$ Hz) によってビード溶接した。

2.3 凝固割れ試験法

Fig. 3 に Modified (改良型) Houldcroft 式割れ試験片の形状を示す。ビード溶接はこの試験片のスリットの深い側から浅い側にかけて行った^{11,12)}。溶接条件は 2.2 項で設定したパルス電流波形条件によって、平均溶接電流 I_{av} を 95 A、平均アーク電圧 E_{av} を 18.5 V および溶接速度 v を 40 cm/min とした。これによって、溶接開始部から終端部まで均一に裏ビードの生じる二次元ビードが得られた。

そして、凝固割れ感受性は溶接開始部から伝播した割れの停止端先端までの長さを溶接長で除した値 (%) を割れ率として評価した。

また、溶接金属のマクロ組織観察は、ビード中央部の水平断面を板厚方向に母材表面より 1.5 mm の箇所で行った。

Fig. 4 に凝固割れ試験によって得られたビード外観を示す。本実験で得られた割れは組織観察の結果、粒界割れであり、SEM 破面観察による結果から、破面はデンドライト形態を示しており、明らかに凝固割れであった。

2.4 溶融池観察および波形解析手法

溶融池振動ならびに溶滴移行現象の観察は、Xe ランプを背光として 500 コマ/秒 および 1000 コマ/秒 で撮影で

きる高速度ビデオカメラを用いて行った。また、アークの動作点の解析にあたっては、前報⁹⁾にしたがって溶接電流波形およびアーク電圧波形を A/D コンバータを介して取り込み、ユニットパルス 1 周期の溶接電流の実効値 I_{eff} 、およびアーク電圧の実効値 E_{eff} をパーソナルコンピュータによって求めた。

3. 実験結果およびその検討

3.1 溶接金属の結晶粒微細化および凝固割れ感受性に及ぼす f_s の影響

Fig. 5 はパルス条件 L を $I_{PL} = 360$ A、 $t_{PL} = 1.2$ ms、パルス条件 H を $I_{PH} = 400$ A、 $t_{PH} = 2.0$ ms に設定したパルス電流波形によって、凝固割れが停止した付近のビード中央部のマクロ組織と f_s の関係を示したものである。 $f_s = 0$ Hz すなわち、通常パルスミグ溶接では粗大な結晶粒 (平均結晶粒径: 452 μ m) であるのに対して、ユニットパルス条件の切換を行うと粗大な結晶粒に微細な結晶粒が混在するようになり、 $f_s = 30$ Hz では結晶粒微細化の程度は最も大きい (平均結晶粒径: 150 μ m)。しかし、50 Hz (平均結晶粒径: 250 μ m) になると微細化した結晶粒に再び粗大な結晶粒が混在するようになり、微細化の均一性がなくなる傾向を示した。

以上のような結果は溶融池の振動による攪拌が影響していると考えられている⁷⁾。そこで、このことを確認するために以下のような検討を行った。

Fig. 6 は本溶接法で設定した f_s と高速度ビデオ撮影によって求めた溶融池振動の周波数との相関を調べたも

f_s (Hz)	Grain structure
0 Conventional pulsed MIG welding	
2.5	
5	
10	
30	
50	

Fig. 5 Macrostructural change of weld metal caused by low frequency pulsed MIG welding process with various f_s .

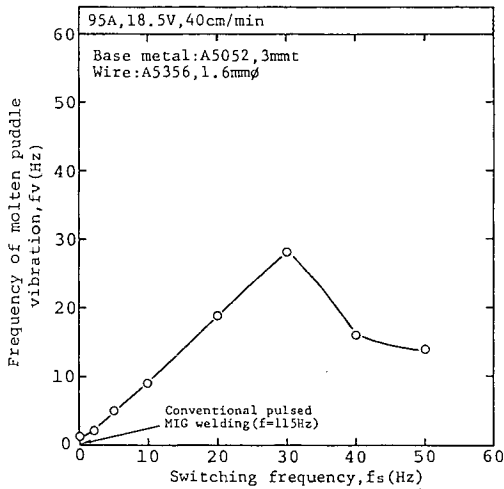


Fig. 6 Relation between f_s and frequency of molten puddle vibration.

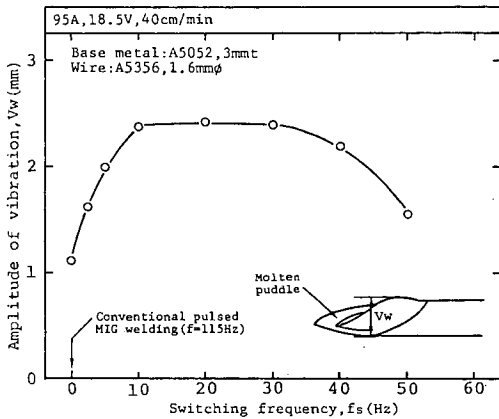


Fig. 7 Relation between f_s and amplitude of vibration.

のである。これによれば、溶融池振動の周波数は30 Hzまでは f_s とほぼ一致しているが、30 Hzを越えたと溶融池振動の周波数は f_s に追従しなくなり減少を示した。また、Fig. 7は図中に示すように母材表面から溶融池の膨らみ部の高さを溶融池振動の振幅 V_w として測定し、その測定値と f_s との関係を求めたものである。

通常パルスミグ溶接法($f_s=0$)では振幅は認められないのに対して、本溶接法では $f_s=10$ Hzまでは f_s の増加とともに振幅は増加を示した。また、10 Hz~30 Hzまで振幅は最大値のまま、ほぼ一定値を示し、一般に知られている、溶融池の振動と f_s との共振現象¹³⁾がこの周波数域で寄与していることが考えられた。しかし、30 Hzを越えたと再び振幅は減少した。

したがって、 $f_s=30$ Hzにおいて結晶粒微細化の程度が大きくなる理由としては、結晶粒成長を抑制するための溶融池振動の時定数が30 Hzで最小になることと、振幅もこの周波数では最大値を維持しているため、溶接金属内部まで十分な攪拌が得られるので溶接金属の均一な微細化効果が得られたものと考えられる。

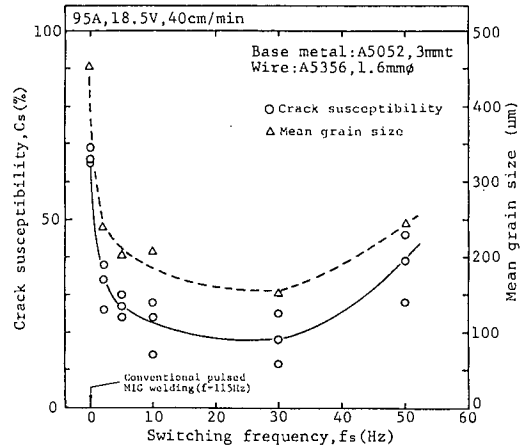


Fig. 8 Effect of f_s on crack susceptibility and mean grain size.

Fig. 8はFig. 5に対応する凝固割れ試験結果を f_s と割れ率の関係で示したものである。割れ率は粗大な結晶粒のマクロ組織であった $f_s=0$ Hzで約70%と高い値を示す。しかし、ユニットパルス条件の切換を行うと割れ率は急激に低下し、 f_s の増加とともに30 Hz付近まで減少する。また、 f_s が30 Hzを越えたと割れ率は増加する傾向を示すが、 $f_s=50$ Hzでも割れ率はユニットパルス条件の切換を行わなかった通常パルスミグ溶接に比べて低い値を示した。

また、同図より、割れ率と平均結晶粒径の関係を見ると、割れ率の低下している範囲では、平均結晶粒径は150 μm ~250 μm に微細化されており、明らかに両者には相関関係のあることが認められた。

この理由としては、固液共存域において、個々の結晶粒界に加わる歪み量が、微細化によって分散されるために減少し、このため見かけ上、凝固割れに対する延性値が増加したため¹⁴⁾、割れにくくなったと考えられる。

なお、同図における f_s と割れ率の関係は著者らの一部が報告した結果⁷⁾とほぼ同様の傾向を示しているが、本実験結果では割れ率の低下している周波数域が広がっていることがわかる。このことは母材に割れ感受性の高い7N01を使用した著者らの一部の実験では単なるマクロ的な組織微細化では割れを停止させることが不十分であり、組織を均一に、かつ微細等軸晶化させる必要がある⁷⁾のに対して、本実験で使用した割れ感受性の比較的低いA5052では組織が不均一であってもある程度の結晶粒微細化が行われておれば割れは大幅にくくなるため、割れ感受性の改善効果が認められる f_s の範囲が広く得られたものと考えられる。

また、このような結果は結晶粒微細化と良い対応を示していることが確認でき、低周波パルスミグ溶接法が結晶粒微細化とそれによる凝固割れ感受性の改善効果がることがわかった。

3.2 結晶粒の微細化および凝固割れ感受性に及ぼすパルスパラメータの影響

Fig. 9は3.1項の結果に基づいて、 $f_s=30$ Hzでユニットパルス条件を切換えた場合にパルス条件Lの値($I_{PL}=360$ A, $t_{PL}=1.2$ ms)を一定とし、パルス条件Hは I_{PH} と

t_{PH} の積が一定になるようにして I_{PH} を変化させた場合のマクロ組織を示す。これによれば、 I_{PH} がパルス条件Lの I_{PL} と同じ電流値である360 A の場合では、結晶粒の微細化は生じているもののその程度は小さい(平均結晶粒径: 320 μm)。しかし、 $I_{PL} < I_{PH}$ となる $I_{PH} = 400$ A の場合では結晶粒の微細化の程度は著しくなっていることがわかる(平均結晶粒径: 150 μm)。

同一 f_s でパルス条件Hの出力 ($I_{PH} \times t_{PH}$) が一定であるにもかかわらず微細化の程度が異なる理由としては次のように考えられる。Fig. 10 は $f_s = 30\text{Hz}$ でユニットパルス条件を切替えたときに、溶接電流の実効値およびアーク電圧の実効値の変化をそれぞれの関係で表したものを、パルス条件の I_{PH} が360 A と400 A の場合で示したも

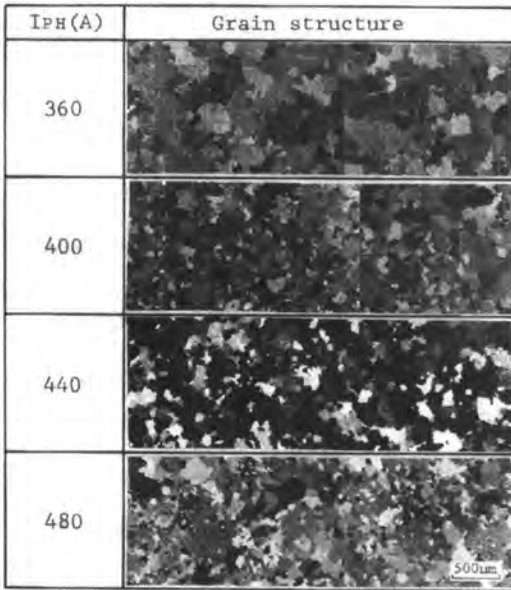


Fig. 9 Macrostructural change of weld metal caused by low frequency pulsed MIG welding process with various I_{PH} .

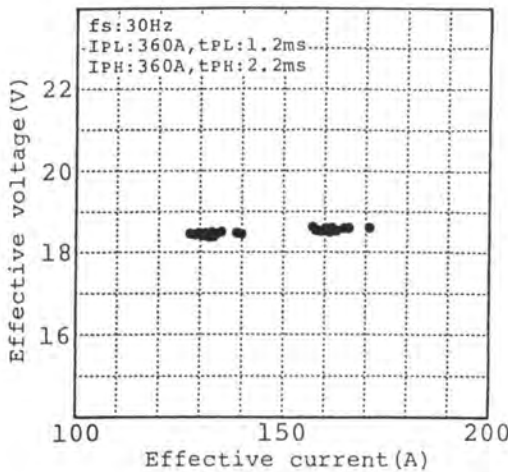
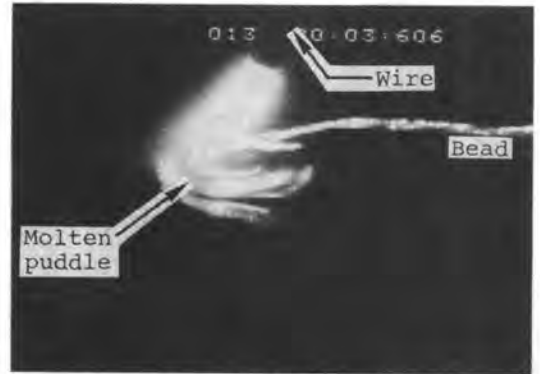


Fig. 10 Relation between I_{eff} and E_{eff} on each cycle of unit pulse.

のである。これによれば、いずれもユニットパルス条件の切換によらずアーク電圧の実効値には変化が認められない。しかし、溶接電流の実効値は大きく変化しており、 $I_{PH} = 360$ A に比べて $I_{PH} = 400$ A のほうが変化の程度が大きい。一方、溶接電流の実効値が高くなるとアーク力も大きくなることがティグ溶接の実験報告¹⁵⁾などで示されており、ミグ溶接の場合も同様と考えられる。した

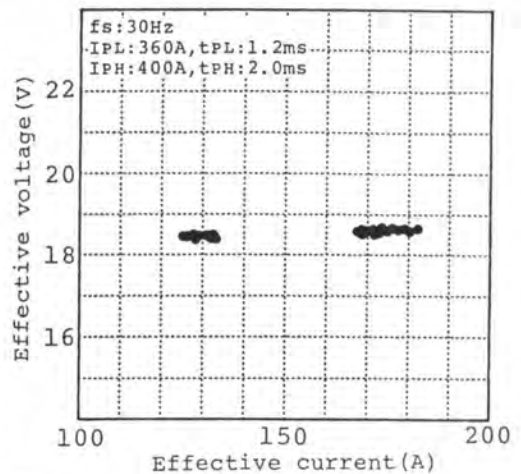


(a) $I_{PH}: 360\text{A}$, $t_{PH}: 2.2\text{ms}$



(b) $I_{PH}: 400\text{A}$, $t_{PH}: 2.0\text{ms}$

Fig. 11 Comparison of molten puddle between $I_{PH} = 360$ A and $I_{PH} = 400$ A.



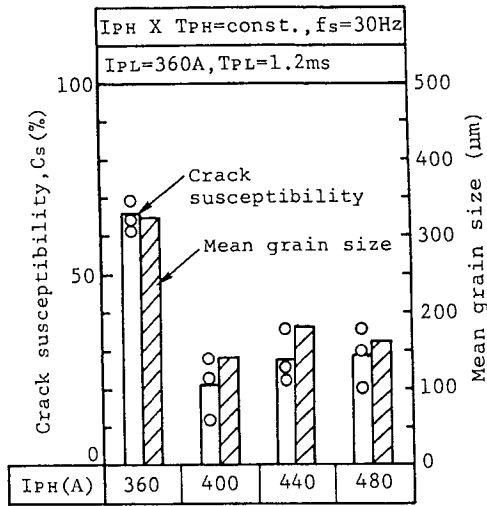


Fig. 12 Effect of I_{PH} on crack susceptibility and mean grain size.

がって、 I_{PL} と I_{PH} の値に差を持たせることによって溶接電流の実効値の変化が大きく得られ、それによりアーク力の変化の程度が大きくなるため溶融池振動が激しくなり、微細化への寄与に差が生じたものと考えられる。Fig. 11 は I_{PH} が 360 A と 400 A の場合の溶融池振動の状況を高速写真撮影結果により観察した結果を示す。パルス条件 H の期間における溶融池のくぼみを比較した場合、400 A のほうが 360 A に比べて溶融池のくぼみが深く、振動の程度は大きいといえる。

また、Fig. 9 の結果において $I_{PH} \geq 400$ A では I_{PH} によらず微細化の程度はほぼ同程度であるように観察されるが、これはある程度の溶融池振動で微細化が十分に行われていることを示唆しており、本実験範囲では $I_{PH} = 400$ A にて十分な微細化が達成できたものと考えられる。

Fig. 12 は Fig. 9 のマクロ組織に対応する凝固割れ感受性および平均結晶粒径の比較結果を示したものである。 $I_{PH} = 360$ A では高い割れ率であるのに対して、 $I_{PH} \geq 400$ A ではいずれも結晶粒の微細化に対応して割れ感受性は小さくなっており、これらの凝固割れ感受性の改善効果はやはり結晶粒微細化に対応していることが明らかとなった。

4. 結 言

本研究では低周波パルスミグ溶接法を用いて、市販 Al-Mg 合金溶接金属の結晶粒微細化に及ぼす溶接電流波形の影響、ならびに微細化による凝固割れ感受性の改善効果について検討した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

1) 低周波パルスミグ溶接法を用いることによって溶融

池の振動・攪拌が得られ、市販 Al-Mg 合金 A5052 の溶接金属は微細化された。とくに、ユニットパルス条件の切換周波数が 30 Hz で均一に微細化することが明らかとなった。

2) 切換えられるユニットパルス条件のうち、パルス電流値は結晶粒微細化に大きく影響した。すなわち、このユニットパルス条件のパルス電流値に差を持たせることによって、微細化が促進されることがわかった。

3) 結晶粒微細化は Modified Houldcroft 式凝固割れ試験による割れ感受性結果と良い対応を示し、1) 2) における微細化は凝固割れ感受性の改善効果があることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) D.C. Brown, F.A. Crossley, J.F. Rudy, H. Schwartzbart: The Effect of Electromagnetic Stirring and Mechanical Vibration on Arc Welds, *Welding Journal*, 41-6 (1962) P. 241s-250 s.
- 2) 松田, 中川, 中田, 綾仁: アルミニウム合金の溶接時における磁気攪拌とその効果, *軽金属溶接*, 16-1 (1978) P. 8-20.
- 3) V.P. Chernysh, V.A. Pakhareako: Formation of the Structure of the Weld Metal in Welding with Electromagnetic Agitation, *Automatic Welding*, 32-5 (1979) P. 12-14.
- 4) 迎, 加藤, 西尾, 筒井: 磁気攪拌による 5052 合金溶接金属の結晶粒微細化とその効果, 22-7 (1984), P. 1-11.
- 5) 松田, 中田, 塚本, 成願: ジルコニウムを添加した Al-Zn-Mg 三元系合金の溶接凝固割れ感受性に及ぼす磁気攪拌の効果, 本会論文集, 4-1 (1986) P. 120-125.
- 6) F. Matsuda, M. Ushio, K. Nakata, Y. Miyayama: Effect of Current Pulsation on Weld Solidification Structure of Aluminium Alloys, *Trans. JWRI*, 7-2 (1978) P. 139-143.
- 7) F. Matsuda, K. Nakata, K. Tsukamoto, S. Johgan: Combined Effect of Current Pulsation and Zr Addition on Improvement of Solidification Cracking of Al-Zn-Mg Alloy Weld Metal, *Trans. JWRI*, 14-2 (1986) P. 99-104.
- 8) 松縄, 山本, 平本: パルスアーク溶接法, *溶接学会誌*, 53-6 (1984) P. 20-58.
- 9) 山本, 原田, 上山, 小川: Al およびその合金の低周波パルス MIG 溶接法の開発, 本会論文集, 10-2 (1992) P. 25-30.
- 10) 山本, 原田, 安田: 高速パルスマグ溶接における電流波形制御におけるスパッタの低減, *溶接法研究委員会資料*, NO. SW-1871-88 (1988).
- 11) 安藤, 仲田, 岸田, 藤平: 回転変形による高温割れの発生進展機構と高温割れ感受性の評価方法, *溶接学会誌*, 42-9 (1973) P. 37-47.
- 12) F. Matsuda, K. Nakata, S. Harada: Moving Characteristics of Weld Edges during Solidification in Relation to Solidification Cracking in GTA Weld of Aluminium Alloy Thin Sheet, *Trans. JWRI*, 9-2 (1980) P. 83-93.
- 13) 溶接アーク物理研究委員会編: パルスアーク溶接 (1986).
- 14) 松田, 仲田, 西尾, 塚本, 成願: Al-Zn-Mg 3 元系合金の溶接凝固割れ感受性に及ぼすジルコニウムの影響, 本会論文集, 4-1 (1986) 115-120.
- 15) 岡田, 山本, 西川: TIG パルスアークの圧力測定, *アーク物理研究委員会資料*, 78-382 (1978).