

(論文)

自動車向け亜鉛めっき鋼板用新溶接法「J-Solution™ Zn」

New Welding Process, "J-Solution™ Zn," Suitable for Galvanized Steel in the Automotive Industry



泉谷 瞬*1
Shun IZUTANI



山崎 圭*1(工博)
Dr. Kei YAMAZAKI



鈴木 励一*1
Reiichi SUZUKI

In the automotive industry, galvanized steel sheets have been applied for quality improvement. However, their porosity defects and increased spattering cause a debasement of weldability. Porosity-generating behavior, which had not hitherto been clarified, was observed for this study, which also examines a method of reducing both the porosity defects and spatter. The results indicate that it is effective to release the porosity defect as zinc vapor from just under the arc to outside the molten pool. Based on this knowledge, the problem was solved by optimizing (a) the composition and size of the welding material, (b) the shielding gas composition and (c) the current pulse wave pattern. This welding process was named the "J-Solution Zn".

まえがき＝自動車産業においては近年、長期品質向上、さらには軽量化を目的とした薄板化を図るべく、鋼板の亜鉛めっき化率が高まりつつある。しかし、亜鉛めっき鋼板は普通鋼板と比較して溶接性が非常に悪い。その大きな短所の一つは、溶接時に亜鉛が蒸発することによって、溶接ビード表面に開口した穴として発生するピットや、ビード内部に内包されて残留するブローホールといった気孔欠陥が発生することである。もう一つの短所は、亜鉛ガスの影響によって溶滴および溶融池が吹き飛ばされ、スパッタが多く発生する点が挙げられる(図1)。このような問題に対しては従来、溶接材料または溶接電源の面からの改善が試みられてきた^{1)~4)}。しかし、まだ耐気孔性、スパッタの同時解決に至ったとは言えない。とくに気孔欠陥は、板重ね部のめっき層から発生した亜鉛ガスが溶融池に侵入して形成されると推測されているものの、その発生挙動の詳細は明らかにされていない。そこで本稿では、亜鉛めっき鋼板の重ねすみ肉溶接部

について、気孔形成現象の動的観察を試み、その観察結果から気孔欠陥を低減させるための指針を提案する⁵⁾。さらに、本検討結果から開発に至った、気孔欠陥とスパッタ量の低減を両立する亜鉛めっき鋼板用新溶接プロセス「J-Solution™^{注1)} Zn」^{6)~9)}(以下、J-Solution Znという)の特徴と効果を報告する。

1. 気孔欠陥の発生メカニズム

1.1 実験方法

供試材は、板厚2.3mmの合金化溶融亜鉛めっき鋼板(亜鉛目付量45g/m²)を用い、スポット溶接にて板重ね面の密着性を確保し(図2)、ギャップから亜鉛の蒸気が外部に排出されないようにした。表1に示す条件にてパルスマグ溶接を行い、ピットおよびブローホール発生量に及ぼす溶接姿勢の影響を調査した。溶接中の溶融池表面は、高速度カメラを用いてフレームレート6,000fpsで観察し、溶融池内部の気孔形成現象は図3に示す高輝度X線イメージング装置(大阪大学接合科学研究所設備)を用いてフレームレート500fpsで動的観察を行った。

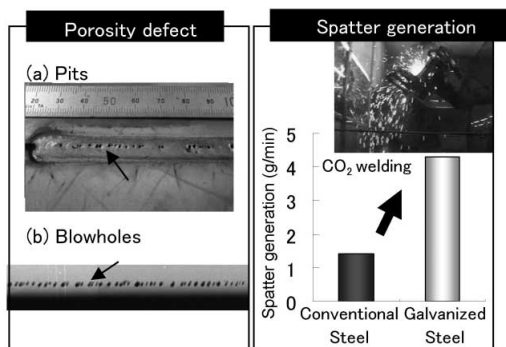


図1 亜鉛めっき鋼板溶接の課題
Fig. 1 Welding problems of galvanized steel

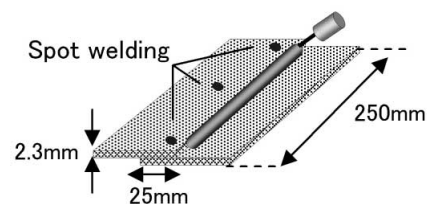


図2 重ねすみ肉溶接の概要図
Fig. 2 Schematic diagram of lap joint in fillet welding

脚注1) J-Solutionは当社と(株)ダイヘンの商標である。

*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

表 1 溶接条件
Table 1 Welding condition

Base plate	Galvanized steel sheet (Zinc amount ; 45g/m ²)
Joint type	Fillet lap joint (Gap:0mm)
Wire	JIS Z 3312 YGW15 φ1.2mm
Shielding gas	80%Ar+20%CO ₂ (20 L/min)
Welding process	Pulsed MAG Welding
Tip height	15mm
Welding speed	100cm/min
Wire feed rate	7.3m/min
Arc voltage	18~30V
Welding position	Horizontal, Downward 30°

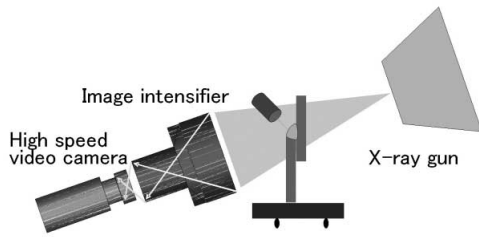


図 3 X線透過イメージングシステムの概要図
Fig. 3 Schematic diagram of X-ray radiography imaging system

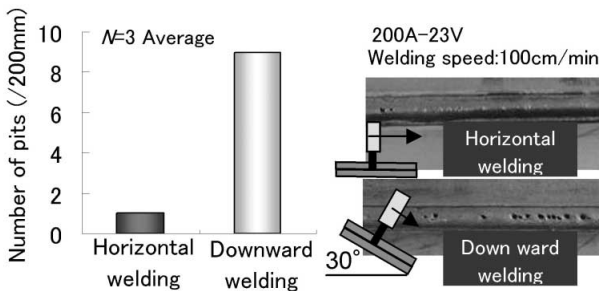


図 4 ピット数に及ぼす溶接姿勢の影響
Fig. 4 Effect of welding position on number of pits

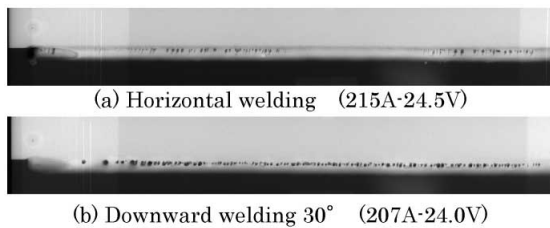


図 5 ブローホールに及ぼす溶接姿勢の影響
Fig. 5 Effect of welding position on blowholes generation

1.2 気孔欠陥の観察

気孔欠陥の発生は、溶接姿勢に大きく影響を受けることが経験的に知られている。水平および下進姿勢におけるピット発生量とブローホール発生状況をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。下進姿勢では水平姿勢と比較してピット発生量やブローホールが明らかに多い。また、高速度ビデオカメラで溶融池の表面状態を観察した結果を図 6 に示す。図 6 (b) の下進姿勢時のように、垂鉛めっきの蒸発によって発生する垂鉛ガスが、アーク後方の溶融池内部を通して放出される場合、ピットやブローホールが多量に発生しやすいことが確認された。一方、図 6 (a) の水平姿勢時のように、アーク直下で垂鉛ガスが放出される場合は、ピットが発生し難く、かつブローホー

ルも減少することが確認された。本傾向は溶接電流やアーク電圧を変化させても同様であった。下進姿勢では、溶融池がアークより先行することが特徴的であり、本実験結果は、アーク直下の掘下げ状態が気孔形成現象に大きく影響を与えることを示唆している。

上記仮説より、アーク直下での気孔形成現象を確認すべく、高輝度 X 線イメージング装置を用いて溶融池内部における気孔形成挙動の動的観察を行った。その結果を図 7 および図 8 に示す。本装置を用いることによって鮮明な透過像が得られ、500fps でも気孔の形成および成長が明瞭に観察された。気孔はいずれも板重ねルート部を起点に成長するが、その起点は全てアーク直下の薄い溶融金属層下で形成されることが特徴である。すなわち、アークから少し離れた後方にて突然に気孔の起点が出現することはない。また、アーク直下および直後の掘下げ部からは常に多量の垂鉛ガスが溶融池外へ放出されていることも特徴的である。例えば、図 7 (a) の矢印部で形成された気孔は、4 ms 後に溶融池外へガス放出することによって消失し (図 7 (b)), さらに 8 ms 後に再度形成された気孔 (図 7 (c)) も 12ms 後に消失している (図 7

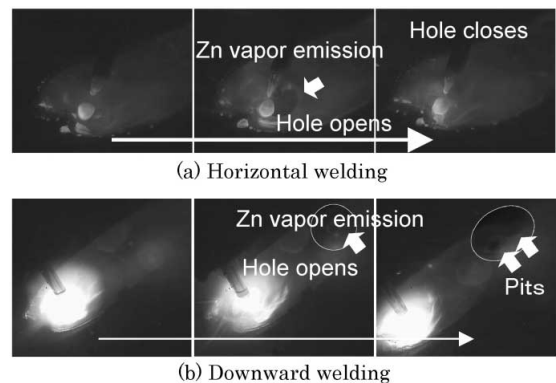


図 6 高速ビデオカメラによる溶融池表面の観察
Fig. 6 Observation of molten pool surface by high-speed video camera imaging

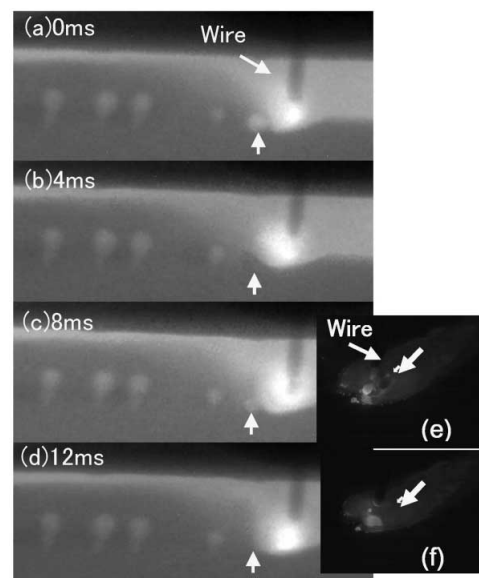


図 7 ブローホールがアーク直下において溶融池外へ放出される現象
Fig. 7 Behavior of blowhole released from under the arc to outside of the molten pool

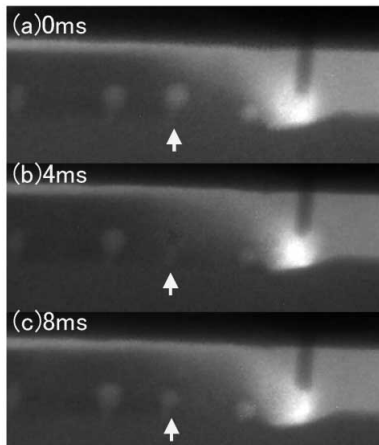


図8 アーク直下において放出されなかった残留ブローホールの挙動
Fig. 8 Behavior of the residual blowhole which was not released under the arc

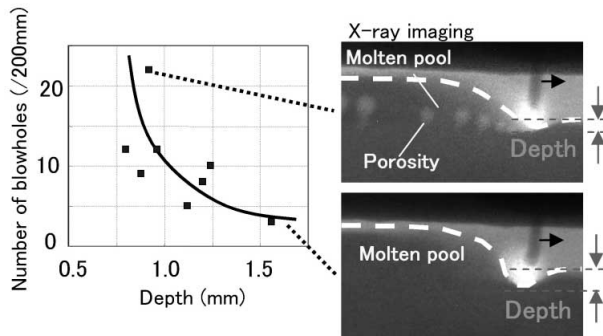


図9 アーク直下の掘下げ深さと気孔欠陥の関係
Fig. 9 Relationship between depth of molten pool under the arc and porosity defects

(d)。上記の現象は図7 (e), (f) に示すように、溶融池表面からも観察された。このようにアーク直下では気孔が形成と消失を繰り返すが、一方、起点が後方まで持ち越されてしまうと、その気孔が後方において完全に消失することは皆無であった。例えば、図8 (a) の矢印部のように大きく成長した気孔が4 ms後にガスを放出することによっていったんは縮小するものの、その起点は消失することはない(図8 (b))、8 ms後には再び成長を始めている(図8 (c))。すなわち、起点が後方まで持ち越されてしまうと、ほとんどの場合ブローホールあるいはピットとして残留するものと考えられる。また、図9に示したように、掘下げ深さとブローホールの関係で整理すると、X線の動画像から得たアーク直下の掘下げ深さが大きくなるに従ってブローホール数が減少する相関性が得られた。

このように、継手ギャップがゼロの場合での最終的な気孔発生量は、アークと溶融池の相対的位置関係に支配されるものと考えられ、気孔を抑制するためには、アーク直下の溶融金属層を薄く保ち、垂鉛ガスを早期に溶融池外へ放出させることが気孔欠陥を大幅に減少させることに有効であると考えた。

2. 気孔欠陥低減の検討

1章での観察結果から、気孔低減策としては、いかにアーク直下より垂鉛ガスを放出させるかが重要となる。そのためには、アーク直下に流入する溶融金属を何らか

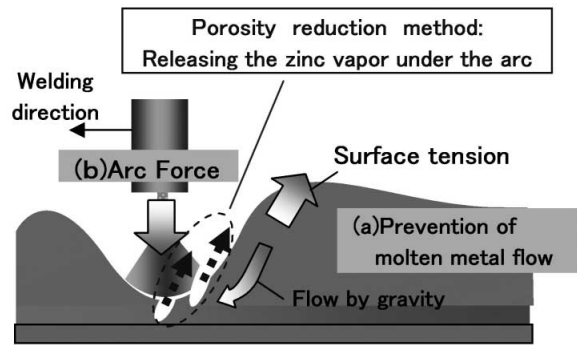


図10 気孔欠陥の新低減方針
Fig.10 New ideas for reduction of porosity defect

表2 供試ワイヤの化学成分
Table 2 Chemical composition of test wires

	C	Si	Mn	P	S
Wire1	0.03	0.92	1.36	0.008	0.057
Wire2	0.05	0.56	1.12	0.003	0.014
Wire3	0.05	0.76	1.25	0.008	0.004
Wire4	0.05	0.72	0.60	0.009	0.005

の手段で減少させ、母材面を露出させることが有効と考えられる。

アーク直下の溶融池形状は、アーク力と溶融金属の湯流れとのバランスに支配される(図10)。そこで、(a)湯流れ抑制による溶融池にかかる力のバランス制御、および(b)アーク力の増大によってアーク直下の掘下げを促進できると考えた。その手段として、MAG溶接の基本構成となる溶接ワイヤ、シールドガス、および溶接電源の電流波形制御の面から検討を行った。

2.1 溶接ワイヤの検討

アーク直下への溶融金属の湯流れを重力に抗して抑制する方法として、表面張力の増大が挙げられる。溶鉄の表面張力はワイヤの化学組成に依存し、とくにカルコゲン元素と呼ばれるO量とS量が2大支配因子であることが知られている¹⁰⁾。その2大因子の中でも制御しやすいSの含有量に着目した。

また、アーク力を増大させるには高電流を出力させる必要がある。そのためには、ワイヤの電気抵抗を小さくしてワイヤ突出し部におけるジュール発熱の寄与率を低下させればよい。ワイヤの電気抵抗はその化学組成に影響を受けることから、最も影響の大きいMnに着目し、この含有量を制御した。

2.1.1 実験方法

S量およびMn量を変化させた供試ワイヤを表2に示す。表面張力は一般的に、S量が少ないと増加することから、供試ワイヤの中ではWire3の表面張力が最も大きい。また、ワイヤの電気抵抗はMn量が少ないと小さくなるため、Wire4が最も小さい。これらの供試ワイヤを用いて、アーク直下の母材面を露出させる方法について検討を行った。

溶接は、気孔欠陥が発生しやすくなる下進30°姿勢で3回行い、ピット数は目視、ブローホールは放射線透過試験(RT)にて計数した。

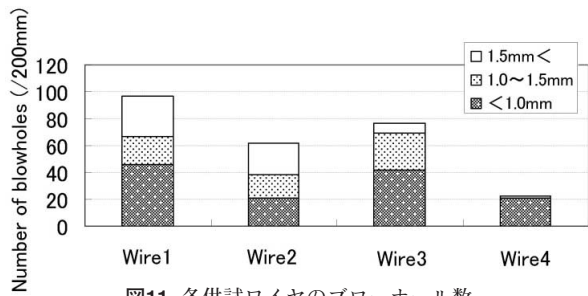


図11 各供試ワイヤのブローホール数
Fig.11 Comparison of number of blowholes

2.1.2 溶接ワイヤ組成による気孔欠陥低減

各供試ワイヤのブローホール数（3回の平均値）を図11に示す。S量が低くなる（表面張力が高くなる）ほど、ブローホールは減少し、とくに1.5mm以上の大きなサイズが顕著に低減する結果が得られた。この結果から、表面活性元素であるSの添加量を最小限に抑え、表面張力を高める手段が有効であることが確認できた。また、Wire4は低Mn材であり、同S量のWire3よりもブローホール数はさらに低減された。これは、ワイヤの電気抵抗が低下し、ワイヤ溶融速度を維持するための電流が増加することによってアーク力が増大したためと考えられる。また、Wire1（低表面張力）およびWire4（高表面張力、低電気抵抗）を用いて下進姿勢30°で重ねすみ肉溶接を行ったときの溶融池形状を高速カメラで撮影した（図12）。Wire1は表面張力が小さいため、重力の影響によって溶融池の先行が大きいがわかる。一方、表面張力が大きいWire4は溶融池の先行が小さく、掘下げも深いことがわかる。アーク力によって後方に押し上げられた溶融金属が重力に抗してその形状を維持することにより、アーク直下へ流れ込まないためであると考えられる。このように、耐気孔性に有効なワイヤ組成は低S-低Mn系であることが示唆される。

2.2 シールドガスの検討

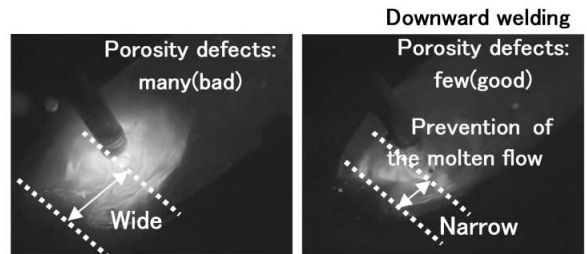
シールドガスはアークの形状に大きな影響を及ぼすことが知られている。ArとCO₂の混合ガスを前提とした場合、CO₂ガス比率が多くなるほどCO₂の分解反応による冷却効果によってアークは緊縮する¹¹⁾。その効果により、狭い範囲にアーク力が集中する。すなわち、アークの電流密度が高くなることにより、アーク直下を掘下げ的作用が増加すると考えられる。

2.2.1 実験方法

上記仮説、すなわちCO₂ガス比率の効果を検証するため、パルスマグ溶接法において、溶接ワイヤにYGW15（φ1.2mm）を用い、80%Ar+20%CO₂および70%Ar+30%CO₂の2種類の混合ガスにて溶接部に発生する気孔を調査した。気孔などの計測手段は2.1節と同じである。

2.2.2 ガス組成による気孔欠陥低減

図13にシールドガス組成と気孔の関係を示す。一般に用いられている80%Ar+20%CO₂では40個以上のブローホールが発生する。一方、CO₂ガス比率を増加させた70%Ar+30%CO₂では約14個であった。また、高速カメラで撮影した各ガスにおける溶融池形状を図14に示す。80%Ar+20%CO₂のガス組成よりも70%Ar+30%



(a)Wire1 (low surface tension) (b)Wire4 (High surface tension)

図12 従来および開発ワイヤ間のアークに対する溶融池先行距離の比較

Fig.12 Comparison of leading distance of molten pool against arc between conventional and developed wire

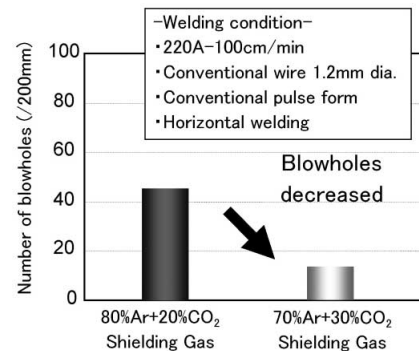


図13 気孔欠陥に及ぼすシールドガス組成の影響
Fig.13 Effect of shielding gas composition on porosity defect

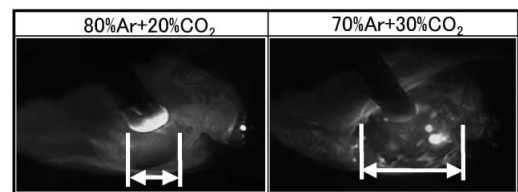


図14 溶融池内のアークによる掘下げ幅とガス組成の関係

Fig.14 Relationship between shielding gas composition and width of dig down by arc in molten pool

CO₂の方が溶融池のくぼみ幅が大きくなっていることが確認できる。このように、CO₂のガス比率の増加でアーク力が高まり、耐気孔性に対して適正な掘下げ形状を維持できることを確認した。一方、30%を超えるCO₂ガス比率の増加は極端にスパッタが増加し、溶接作業性が著しく悪くなる。このため、30%CO₂ガス比率が実施工上の上限であると考えられる。

2.3 溶接電流波形の検討

図15に示すように、周波数およびピーク電流を変調させ、アーク力に強弱をつける低周波重畳パルス波形¹²⁾を用いた溶接法と気孔発生数の関係について検討した。

2.3.1 実験方法

溶接ワイヤにYGW15（φ1.2mm）を用い、シールドガスは気孔低減効果のあった70%Ar+30%CO₂ガスを用いた。また、低周波重畳パルスの周波数は0~30Hzの範囲で行った。

2.3.2 電流波形制御における気孔欠陥低減

図16にブローホール数と周波数の関係を示す。低周波重畳パルス溶接法を用いると、周波数10Hzと20Hzにおいて溶融池が大きく振動しているのが観察された。こ

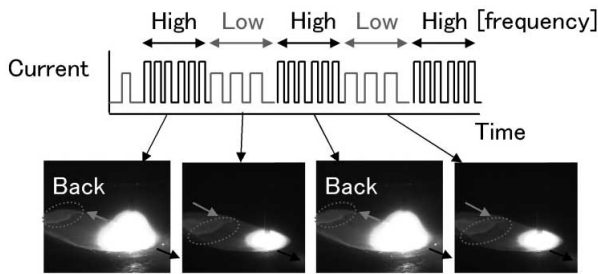


図15 低周波重畳パルスによる溶融池揺動

Fig.15 Swing behavior of molten pool by low-frequency superimposed-pulse

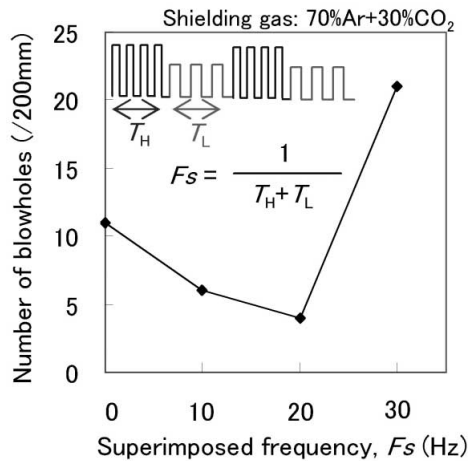


図16 ブローホール数と周波数の関係

Fig.16 Relationship between superimposed frequency and number of blowholes

の振動によってアーク直下の母材面露出と垂鉛ガスの放出が促進される結果、通常パルスと比較して、10Hzおよび20Hzにおいて気孔欠陥が低減されたと考えられる。

3. スパッタの低減方法

亜鉛めっき鋼板の溶接は、図1で示したように元々スパッタが発生しやすい。さらに、耐気孔性に優れた従来よりもCO₂比率の高いガスを用いると、相乗して従来溶接法よりもスパッタが発生しやすい傾向となる。これは、亜鉛ガスの発生やCO₂比率増加によって溶滴が離脱することなくワイヤ先端に滞留して大粒成長し、離脱が妨げられることが原因である。したがって、溶滴をスムーズに離脱させる方法として、第1ピーク電流を高くして第2ピーク電流を低く制御することによって離脱力を増加した2段階パルス波形(図17)および溶滴離脱性の向上を狙った細径ワイヤによるスパッタの低減について検討を行った。

3.1 実験方法

70%Ar-30%CO₂ガスを用い、従来の矩形パルスと2段階パルス波形の溶滴移行を比較した。

また、ワイヤはφ1.2mmとφ1.0mmで比較した。

3.2 2段階パルス波形および細径ワイヤによるスパッタ低減効果

図18に70%Ar-30%CO₂ガスにおける通常矩形パルスと2段階パルスのアーク形状を示す。一般的なパルスピーク電流一定の矩形パルス波形ではアーク発生位置が低い

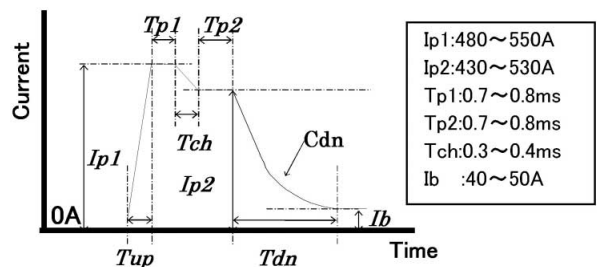


図17 2段階パルス波形の形状とパラメータ

Fig.17 Two-step pulse wave form and parameter

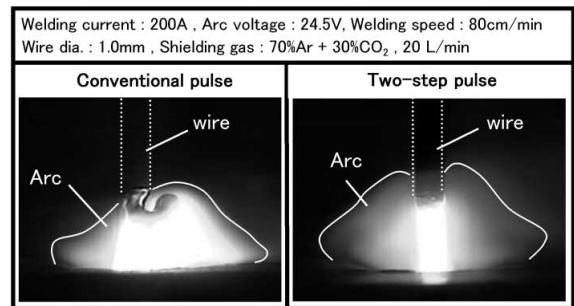


図18 従来パルスと2段階パルス波形のアーク形状比較

Fig.18 Comparison of the arc shape between conventional pulse and two-step pulse

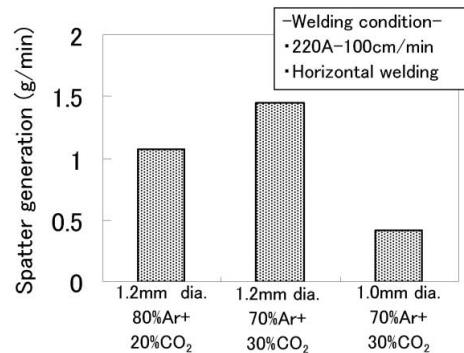


図19 スパッタ発生量に及ぼすシールドガスおよびワイヤ径の影響

Fig.19 Effect of shielding gas and wire diameter on spatter generation

ため、ワイヤ溶融部全体にピンチ力が働かず溶滴移行が不安定になる。その結果、亜鉛蒸気の吹き上げの影響を受けて溶融池以外の場所に飛散する現象、あるいは離脱できずに過大に成長した溶滴が母材と短絡してスパッタとなる現象が確認された。一方、2段階パルス波形ではアークの発生位置が高く、溶滴の成長・離脱は安定してスパッタの発生は少ないことが確認できた。

さらに、ワイヤ径を細くすることによって溶滴の細粒化傾向が高まるうえに、電流密度が増加して電磁ピンチ力による溶滴離脱性が向上する。これにより、早期の溶滴離脱が可能となり、とくにピーク電流時において強い電磁ピンチ力を有するパルス溶接では、従来よりもCO₂比率の高い70%Ar-30%CO₂ガス雰囲気においても円滑な溶滴移行が可能となる。

スパッタ量に及ぼすシールドガス組成およびワイヤ径の影響を図19に示す。φ1.2mmワイヤにおけるスパッタ量は、一般的に使用されているシールドガス(80%Ar+20%CO₂)と通常矩形パルスの組合せで約1.1g/min発生している。それに対して70%Ar+30%CO₂ガスでは、スパッタ量が約1.4g/minに増加している。一方、70%

Ar+30%CO₂ガスを用いても2段パルス波形とφ1.0mmワイヤを適用した場合のスパッタ量は約0.4g/minとなり、従来法と比較して大幅なスパッタ量低減を達成した。

4. 開発溶接法「J-Solution Zn」

図20に示すように、耐気孔性と低スパッタに効果があった①70%Ar+30%CO₂のシールドガス、②φ1.0mmワイヤ、低S-低Mnとして新しく開発した溶接ワイヤ「FAMILIARC™ MIX-Zn」(以下、FAMILIARC MIX-Znという)、③低周波重畳パルスと2段パルスの電流波形制御を搭載した(株)ダイヘン製のパルスMAG・MIG溶接電源「DIGITAL PULSE DP400R」を組合せた新開発垂鉛めっき鋼板用溶接プロセスを「J-Solution Zn」として名付けた。J-Solution Znのブローホール数およびスパッタの発生量を、表1に示した従来方法と比較して図21、22に示す。J-Solution Znは耐気孔性の向上とともに低スパッタ

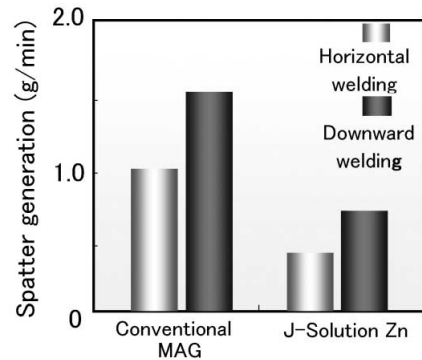
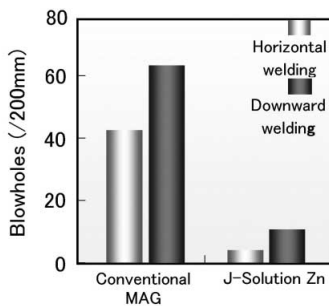


図22 J-Solution Znの低スパッタ効果
Fig.22 Reduction of spatter generation by J-Solution Zn

Reduction of porosity	Solution	Reduction of spatter
70%Ar +30%CO ₂	Shielding gas	-
Low Mn & low S	Welding solid wire FAMILIARC MIX-Zn	1.0mm dia.
Low-frequency superimposed pulse	Power source DP400R	Two-step pulse

図20 J-Solution Znの構成
Fig.20 Composition of J-Solution Zn



	Radiographic testing result (Downward welding)
Conventional MAG	
J-Solution Zn	

図21 J-Solution Znの耐ブローホール性
Fig.21 Blowhole resistance by J-Solution Zn

を実現した。

むすび=垂鉛めっき鋼板溶接部における気孔形成現象の観察を試み、その結果から気孔欠陥と溶接作業性悪化の要因となるスパッタ量の同時低減を実現し、「J-Solution Zn」プロセスとして完成させた。

今後、製品品質、生産性の向上に向け、垂鉛めっき鋼板の適用は広がっていくものと予想され、日本および世界の市場へ向けて本プロセスを発信、展開したいと考える。

本プロセスの共同開発にあたり、電流波形制御の開発にご尽力くださいました株式会社ダイヘン 上園敏郎様、上田裕司様、中村一生様、気孔発生メカニズムの解明を進めるにあたって高輝度X線イメージング装置を使用させていただきました大阪大学接合科学研究所の田中学教授および撮影にご協力いただきました田代真一助教に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木 勲一. 溶接技術 9~12. 2006, 産報出版.
- 2) 木本 勇ほか. 溶接学会全国大会講演概要第58集. 1996, p.52.
- 3) 平井宏樹. 電気製鋼. 1996, 67(3), p.221.
- 4) 松井仁志ほか. 溶接学会論文集. 1998, 16(1), p.45.
- 5) 山崎 圭ほか. 溶接学会全国大会講演概要第90集. 2012, p.90.
- 6) 泉谷 瞬ほか. 溶接学会全国大会講演概要第90集. 2012, p.92.
- 7) 中村一生ほか. 溶接学会全国大会講演概要第90集. 2012, p.94.
- 8) 上田裕司ほか. 溶接学会全国大会講演概要第90集. 2012, p.96.
- 9) 泉谷 瞬ほか. 溶接学会全国大会講演概要第91集. 2012, p.396.
- 10) 中村一生ほか. 鉄と鋼: 日本鐵鋼協會々誌. 1983, 69(16), p.1989.
- 11) 田中 学ほか. J. Plasma Fusion Res. 2012, Vol.88, No.5, p.276.
- 12) 上田裕司ほか. 溶接学会全国大会講演概要第85集. 2009, p.88.

脚注2) FAMILIARC (FAMILIARC™) は当社の商標である。