

亜鉛めっき鋼板のガスシールドアーク溶接

— 問題点と解決策 —

株式会社神戸製鋼所 技術センター
山崎 圭

1. はじめに

現在、亜鉛めっき鋼板は自動車用材料用途を中心に広く普及しており、非表面処理鋼板と比較して耐食性に優れ、錆の進行による板厚減少が少ないというメリットから、車両の長寿命化と軽量化の両立に大きく貢献してきたといえる。また、近年、自動車メーカーは環境対応の観点で更なる燃費向上を図る必要に迫られており、車重軽量化のために高強度鋼板（ハイテン）の適用による薄板化が進んでいる。今後、ハイテンの亜鉛めっき化技術も進み、適用箇所が増大していく可能性も大きい。そこで、本稿では、消耗電極式ガスシールドアーク溶接を亜鉛めっき鋼板に適用する場合の問題点と解決策の現状について述べる。

2. 亜鉛めっき鋼板溶接の問題点

亜鉛めっき鋼板の溶接で引き起こされる問題の根本的原因是、「亜鉛の沸点（906℃）が鉄の融点よりも大幅に低い」ということにある。すなわち、亜鉛が気化する際に膨大な体積膨張が瞬時に生じ、これが次に挙げるような不具合現象を引き起こす。

2.1 スパッタの多量発生

アーク直下に噴出した亜鉛ガスがアーク雰囲気中に不規則に混入し、安定な溶滴移行が困難となる。溶接法によって異なるが、ソリッドワイヤを用いた炭酸ガスアーク溶接では、普通鋼板（非表面処理鋼板）の3倍程度の発生量になると言われている（図1）。図2(a)に高速度ビデオカメラで撮影したスパッタ発生現象を示す。溶接法はパルスマグ溶接法であるが、普通鋼板では1パルス1溶滴移行となる溶接条件下において、亜鉛めっき鋼板の場合は溶融池からアーク雰囲気中に混入した亜鉛蒸気の影響を受けてワイヤ先端の溶滴が大きく成長し、溶滴が離脱できずに溶融池と短絡してスパッタが飛散している。また、図2(b)に示すように、溶融池内から噴出した亜鉛蒸気によって溶融池自体が吹き飛ばされる現象も頻繁に観察される。

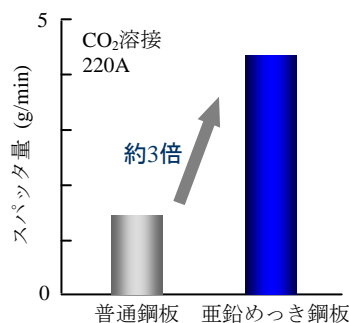
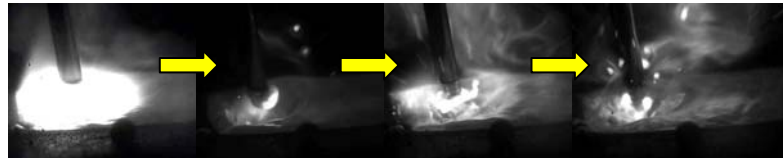
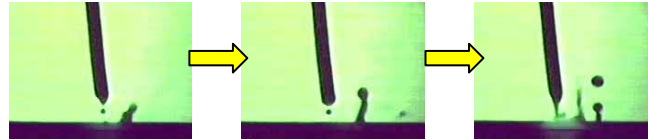


図1 炭酸ガスアーク溶接でのスパッタ発生量の比較



(a) 溶滴離脱の失敗によるスパッタ発生



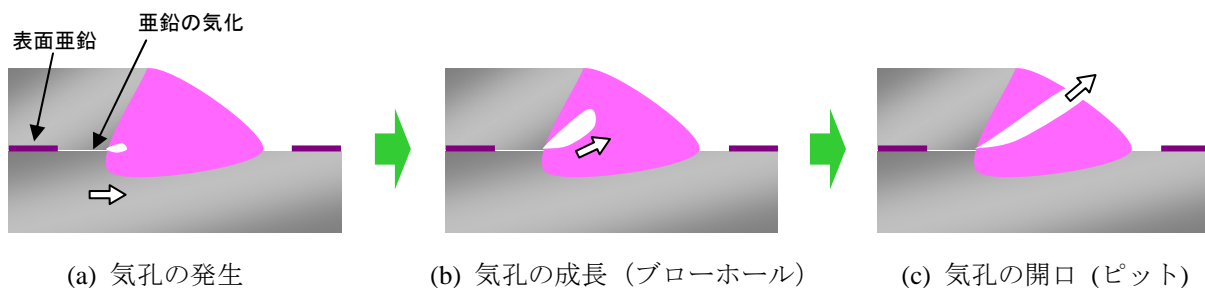
(b) 溶融池からの亜鉛噴出によるスパッタ発生

図2 パルスマグ溶接法によるスパッタ発生現象 (220A-24V-100cm/min)

これらスパッタの多量発生は、製品品質の低下、周辺設備の故障、スパッタ除去作業による生産能率の低下を招くと共に、シールドガスノズルに堆積したスパッタによって、シールド不良を発生させるリスクも高くなる。

2.2 気孔欠陥の発生

気孔については、**図3**に示すような重ねすみ肉継手の板合せ部から成長した気孔が典型例であり、溶接部に内包された気孔をブローホール、溶接ビード表面に開口した気孔をピットと称している。特に、ルートギャップがゼロの場合は板合せ面が高圧となり、気化した亜鉛ガスが溶融池内部へ多量に侵入するため、気孔欠陥が多くなる。一方、ルートギャップが存在する場合、亜鉛ガスは間隙の奥へ流れるため、溶融池への侵入は少なくなり、気孔欠陥も少ない。したがって、積極的にルートギャップを設けることが有効ではあるが、実際にはルートギャップを高精度に管理することは極めて困難である。実際の生産現場において、気孔欠陥の発生数にバラツキが大きいのは、プレス成形や設置精度によってルートギャップが一定でないことに起因するためであると考えられる。



(a) 気孔の発生

(b) 気孔の成長 (ブローホール)

(c) 気孔の開口 (ピット)

図3 気孔発生の様式図

このような気孔欠陥 (**図4**) は、外観劣化、断面欠損による引張強度低下、手直しによる生産能率の低下を引き起こすため、製品品質、コストに直結する大きな問題となっている。



図4 亜鉛蒸気によるピット発生の典型例

3. 亜鉛ガスによる気孔形成現象

気孔欠陥発生現象の詳細は未だ明らかにされておらず、生産現場においても多くの試行錯誤が繰り返されているのが現状である。そこで、以下では亜鉛めっき鋼板の重ねすみ肉溶接について、気孔形成現象のその場観察を行い、その観察結果から気孔低減指針を提示したい。

水平姿勢よりも下進姿勢の方が気孔欠陥は発生しやすいことが経験的に知られている。そこで、水平姿勢および下進姿勢において、図5に示す如く、高速度カメラを用いて溶融池表面観察を様々な条件で行った。その結果、亜鉛ガスの放出挙動とピット発生の関係を整理すると、下進姿勢時のようにアーク後方の溶融池内部を通して亜鉛ガスが放出される場合、ピット、ブローホールが多量に発生することを確認した。一方、水平姿勢時のようにアークの直下で亜鉛ガスが放出される場合は、ピットが発生し難くなり、かつブローホールも減少することが確認された(図6および7)。

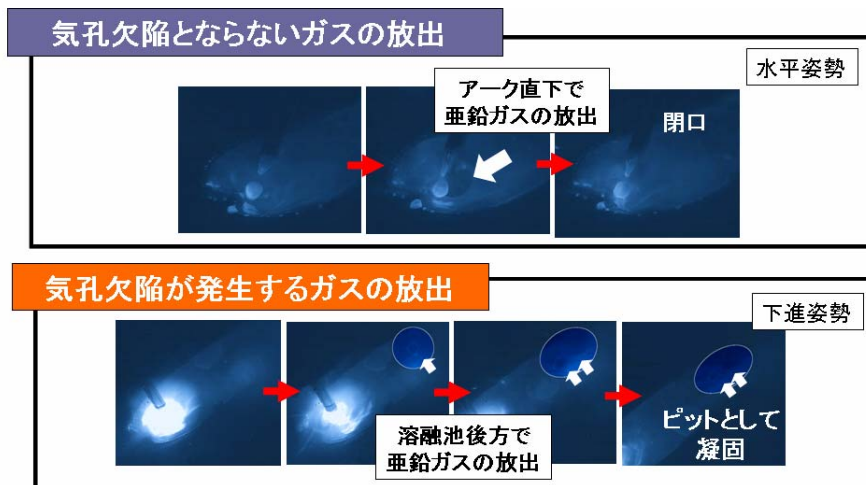


図5 高速度カメラによる亜鉛ガス放出挙動の観察

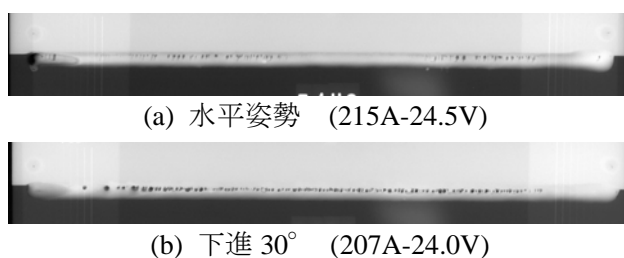


図7 ブローホール発生に及ぼす溶接姿勢の影響

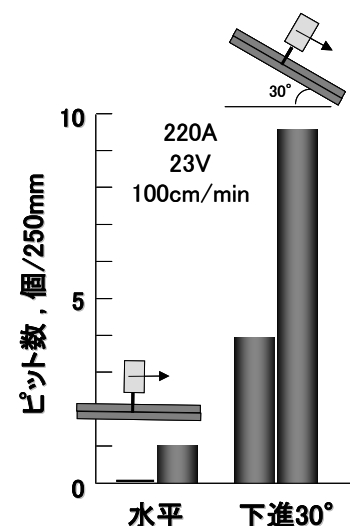


図6 ピット発生に及ぼす溶接姿勢の影響

下進姿勢では溶融池がアークより先行することが特徴であり、アーク直下の溶融池および固体面露出状態が大きく変化する。そこで、アーク直下の掘下げ状況と気孔形成現象に着目し、**図 8** に示す高輝度 X 線透過型高速イメージング装置を用いて、溶接中の溶融池内の挙動を動画として観察した。静止画の一例を**図 9** および **10** に示す。気孔は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、アークから数 mm 程度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亜鉛ガスが外気へ放出されていることも特徴的である。例えば、**図 9** (a) の矢印部で形成された気孔は、(b) 4ms 後に外気へガス放出することによって消失し、更に(c) 8ms 後に再度形成された気孔も(d) 12ms 後に消失している。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。一方、起点がアーク直下で消失されず、後方まで持ち来されてしまうと、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 10** (a) の矢印部のようにアーク直下で形成され、その後大きく成長した気孔は、(b) 4ms 後にガスを放出することによって一旦縮小するものの、その起点は消失することは無く、(c) 8ms 後には再び成長を始めている。すなわち、起点が後方まで持ち来されてしまうと、必ず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。

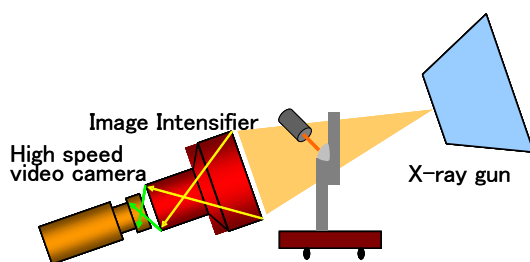


図 8 高輝度 X 線透過型高速イメージング装置を用いた観察方法

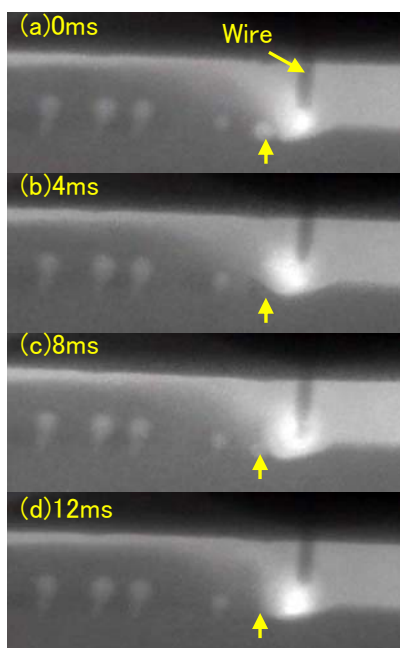


図 9 アーク直下における気孔起点の発生と消失

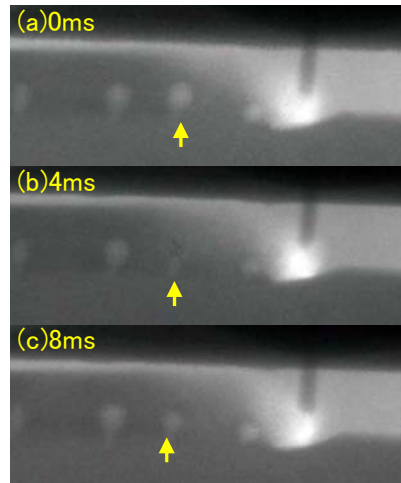


図 10 アーク後方における残留起点からの気孔形成現象

従来、亜鉛めっき鋼板の溶接において気孔欠陥を減少させる方法としては、溶融池内部で「亜鉛ガスをいかに貫通し易くできるか」、もしくは「亜鉛ガスを溶融池内部に押し止めることができるか」が志向されてきたが、これらの効果は明確に観察されない。一方、最も明らかな傾向として、アーク直下の掘下げ深さが大きくなるに伴いブローホール数が減少する相関性が得られた（図 11）。この相関性から亜鉛めっき鋼板溶接部の耐気孔性を向上させるためには、アーク直下に固体面を露出させ、できる限り多くの亜鉛ガスを早期に外気へ放出させることを志向すべきであると考えられる。

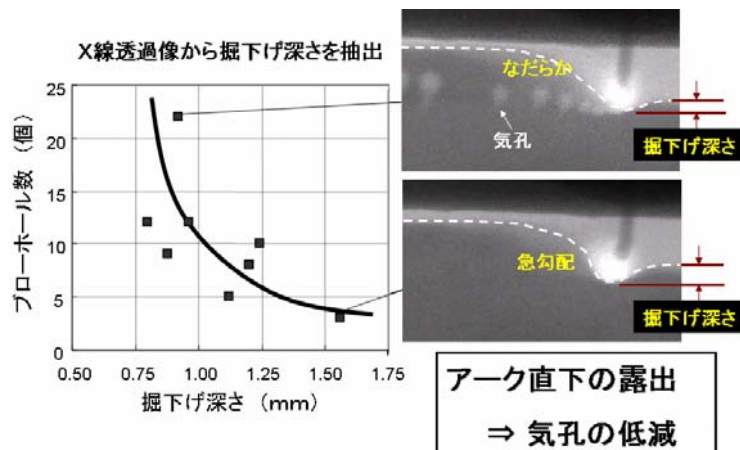


図 11 X線像からのブローホール数と掘下げ深さの関係

アーク溶接における様々な施工パラメータが気孔発生に及ぼす影響について、アーク直下の掘下げ状態という観点から整理すると図 12 のようになる。左欄のアーク直下の掘下げ効果が小さくなる設定は、薄板の溶接において多くのメリットを有しているため、普通鋼板（非表面処理鋼板）では採用されることの多い施工テクニックであるが、亜鉛めっき鋼板では気孔欠陥が増大するため、その適用は容易ではない。一方、右欄のアーク直下の掘下げ効果が大きくなる設定は気孔欠陥を低

減できる手法であるが、不良ビードやスパッタ、溶落ち発生リスクが高くなるという欠点を有しており、生産現場におけるデメリットも大きい。

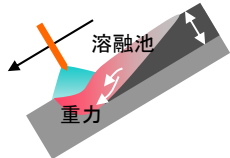
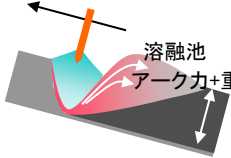
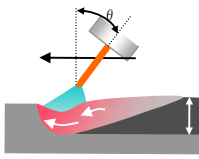
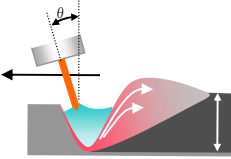
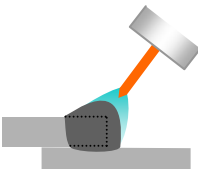
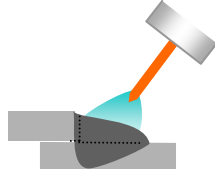
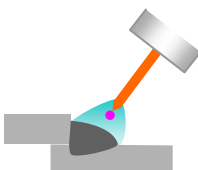
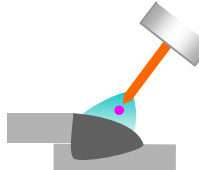
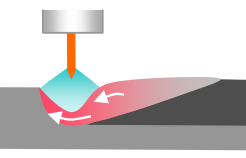
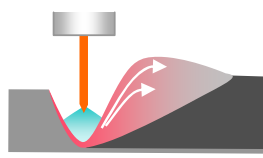
	アーク直下の掘下げ 小 気孔欠陥 多い	アーク直下の掘下げ 大 気孔欠陥 少ない
溶接姿勢	 <p>下進姿勢 幅広ビードが得られ、高速溶接が可能</p>	 <p>上進姿勢 凸ビード化、高速溶接でのアンダカットに注意</p>
トーチ角度	 <p>前進角 幅広ビードが得られ、高速溶接が可能</p>	 <p>後退角 凸ビード化、高速溶接でのアンダカットに注意</p>
狙い位置	 <p>上板狙い 溶落ち防止、ギャップ架橋性確保</p>	 <p>下板狙い 溶落ち、ギャップ架橋不良に注意</p>
溶接電流	 <p>低電流 低入熱、低ひずみ溶接が可能</p>	 <p>高電流 溶落ち、熱ひずみ増大に注意</p>
アーク電圧	 <p>高電圧 低スパッタ溶接が可能</p>	 <p>低電圧 スパッタ増大に注意</p>

図 12 施工パラメータが気孔発生に及ぼす影響

4. 耐気孔性の向上

耐気孔性改善にはアーク直下の効果的な溶融池掘下げが必要であるが、図 12 に示したような施工条件を駆使して上記を実現するには限界がある。しかし、ガスシールドアーク溶接の構成要素である「溶接材料」、「シールドガス」、「溶接電源」の最適化を図れば、それらの効果が相乗して亜鉛めっき鋼板の施工裕度・適用範囲は格段に広がる。以下に最近開発された亜鉛めっき鋼板溶接ソリューション「J-Solution™ Zn」について、その効果を概説する。

4.1 溶接材料【ソリッドワイヤ FAMILIARC™ MIX-Zn】

溶融池の掘下げを阻害する最大の要因は、アーク直下への溶融金属流入である。すなわち、重力の影響である。図 13 に示すように、重力によるアーク直下への溶融池の流入に対する抵抗力は、(1) 溶融池自体の表面張力と(2) アーク力の大きさである。(1) 溶鉄の表面張力は酸素と硫黄量が 2 大支配因子であることが知られており、制御しやすい硫黄及びその他の元素量も加味し、ビード形状等とのバランスも考慮した上で、最適ワイヤ成分系を抽出した。一方、後者はワイヤ溶融速度を

維持したまま電流を高める必要があるため、ワイヤ自体の電気抵抗に着目した。すなわち、開発ワイヤ（MIX-Zn）は、表面張力特性の最適化に加え、従来よりも電気抵抗を小さくすることによって、同一溶着量においても高電流（高アーク力）を出力させることが可能となる組成設計を行っている。**図 14** に開発ワイヤと従来ワイヤの溶融池アーク直下の観察写真を示すが、開発ワイヤでは重力による溶融池の先行現象が抑制されており、効果的に掘下げ状態を維持している。

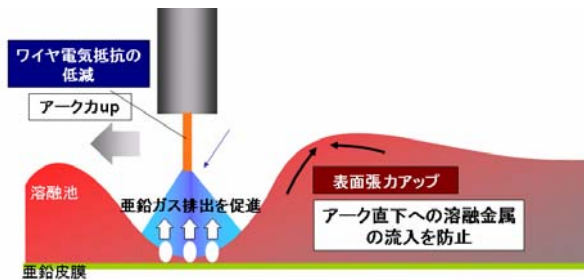


図 13 溶接ワイヤに関わる溶融池掘下げ影響因子

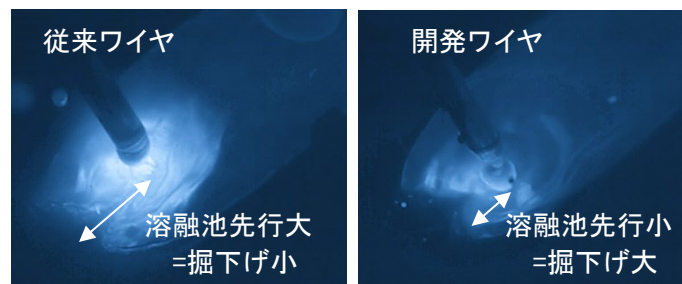


図 14 溶融池形状の比較（30°下進溶接）

4.2 シールドガス【70%Ar-30%CO₂】

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りアークは緊縮し、電流密度（アーク力）が増加するため、アーク直下を掘下げる作用が増加する。パルスマグ溶接用としては、低スパッタ性を重視してスプレー移行になりやすい 80%Ar-20%CO₂ 組成が一般的であるが、J-Solution™ Zn では、アーク力を高め、かつ溶融池表面張力の低下抑制、後述する諸施策による低スパッタ性が維持出来る組成の限界バランスから、より CO₂ 比率の高い 70%Ar-30%CO₂ ガスとした。わずか 10%のガス組成の違いであるが、その耐気孔性に及ぼす差は非常に大きく、シールドガスの影響度は大きい（**図 15**）。

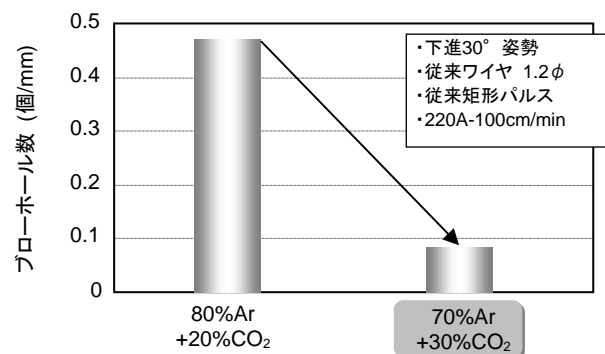


図 15 耐気孔性に及ぼすシールドガス組成の影響

4.3 溶接電源【低周波重畳パルス波形】

図 16 に示すように、J-Solution™ Zn では、パルス周波数の粗密を切替えることにより、アーク力に強弱をつける低周波重畳パルス波形（楕ダイヘン名称；ウェーブパルス）とし、溶融池を大きく揺らすことで、アーク直下の溶融池薄肉化期間中（High 期間中）に亜鉛ガスの排出を促進している。

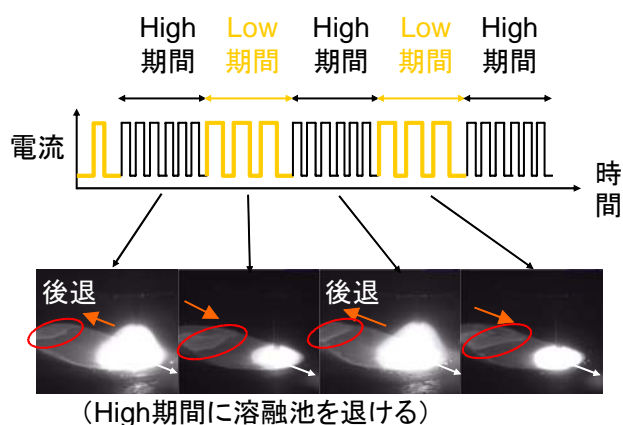


図 16 ウェーブパルス機能の原理

5. スパッタの低減

上記方法によって優れた耐気孔性は確保できるが、亜鉛めっき鋼板の溶接は、図 2 で示したように、もともとスパッタが発生しやすく、さらに 70%Ar-30%CO₂ ガスを採用することも相乗して従来溶接法よりもスパッタが発生し易い傾向となる。スパッタの発生は溶滴離脱の安定性に依存し、そのメカニズムとしては、亜鉛ガスの発生による押し上げ効果や CO₂ 比率増加による溶滴切断性劣化によって、溶滴が移行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にある。したがって、スパッタの低減に対しては、いかに安定かつ速やかに溶滴を離脱させるかが重要となる。

5.1 溶接電源【DP400R 2 段パルス機能】

溶滴をスムーズに離脱させる方法として、第 1 に電磁ピンチ力を増加させる（電流増加）手法が挙げられる。しかし、通常の台形や矩形パルス波形において単純にパルスピーク電流を高めれば、電磁ピンチ力の増大のみならず、溶融エネルギーを大幅に増加させることになる。すなわち、1 パルス当たりの溶滴サイズも増加するため、溶滴全体に電磁ピンチ力が作用せず、逆にアーク反力を受けやすくなり、溶滴の離脱性を損ないやすい。そこで J-Solution™ Zn では、図 17 に示すように、第 1 ピーク電流を高く、第 2 ピーク電流を低く制御した 2 段パルス波形を適用した。第 1 ピーク電流を高くすることによって、初期に溶滴上部に括れを形成させ、第 2 ピーク電流でゆっくりと離脱落下させることにより、小粒かつ安定な 1 パルス 1 ドロップの溶滴移行を実現している。

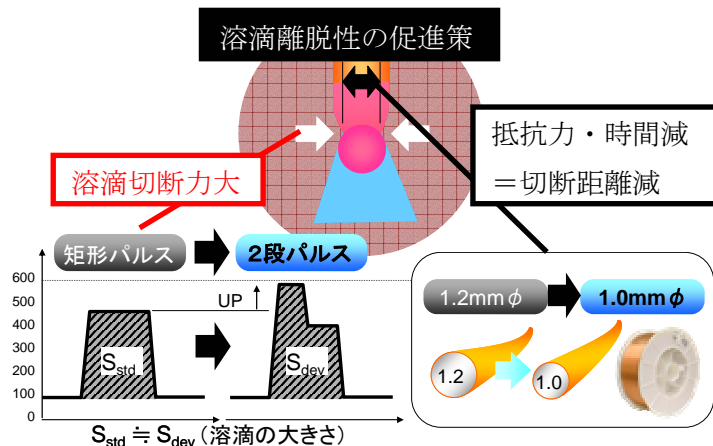


図 17 スパッタの低減策

5.2 溶接材料【細径ワイヤ】

第 2 の手段として、ワイヤ径を通常の 1.2mm φ から 1.0mm φ と細径化することで溶滴の離脱を促進させた。ワイヤ径を細くすると、送給モータ上限付近の高溶着条件では溶着能率が低下することになるが、垂鉛めっき鋼板の溶接で用いられる板厚 3mm 以下、溶接速度 120cm/min 以下程度の条件を考慮すると 1.0mm φ であれば能率面で十分であることを確認して選択した。

以上の①2 段パルス波形、②1.2mm φ ⇒1.0mm φ の細径化を組み合わせた結果、図 18 に示すように、大幅なスパッタ低減を実現した。



図 18 スパッタ低減効果

J-Solution™ Zn は、「溶接材料」、「シールドガス」、「溶接電源」の最適化を図ることによって、従来達成できなかった垂鉛めっき鋼板の溶接における耐気孔性と低スパッタ性を兼ね備えた新コンセプトの溶接法である。本溶接法を適用することにより、例えば、従来法では適用困難であった下進姿勢での溶接においてもアーク直下を掘下げることが可能となり、大幅な気孔欠陥低減を実現できる（図 19）。その結果、ピットが発生しやすいため従来適用不可能であった下進姿勢・高速度条件においても正常ビードが得られる可能性がある（図 20）。更に、高電圧条件においても気孔欠陥を抑制できる（図 21）ため、生産現場における施工裕度向上にも貢献できるものと考えられる。



(a) 従来法 (207A-24.0V-100cm/min)



(b) 開発法 J-Solution™ Zn (210A-26.5V-100cm/min)

図 19 気孔低減効果（姿勢：下進 30°）

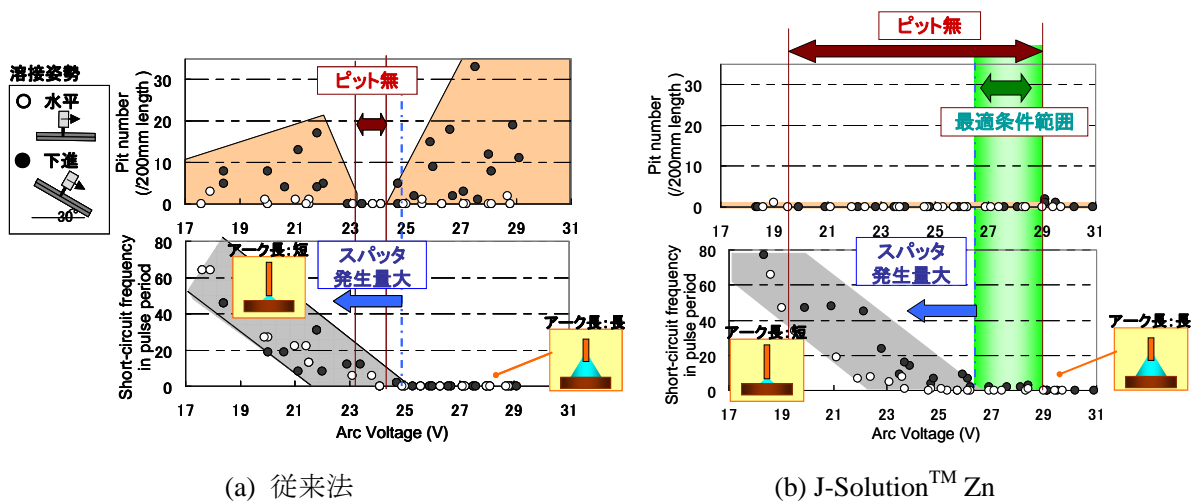


(a) 従来法 (280A-27.0V)



(b) 開発法 J-Solution™ Zn (280A-29V)

図 20 気孔低減効果（姿勢：下進 30° 溶接速度：160cm/min）



(a) 従来法

(b) J-Solution™ Zn

図 21 ピット発生および短絡回数に及ぼすアーク電圧の影響（溶接電流：220A）

6. おわりに

亜鉛めっき鋼板の消耗電極式ガスシールドアーク溶接に関する問題点と解決策として現状の到達レベルを紹介した。亜鉛めっき鋼板の溶接において、品質向上を実現する一助として本稿がお役に立てば幸いである。

以上

参考文献

- 1) 山崎ら:「亜鉛めっき鋼板溶接部の気孔形成現象について」, 溶接学会全国大会講演概要, 第 90 集, 2012, p90
- 2) 泉谷ら:「亜鉛めっき鋼板溶接部の気孔低減: 第 1 報」, 溶接学会全国大会講演概要, 第 90 集, 2012, p92
- 3) 中村ら:「亜鉛めっき鋼板溶接部の気孔低減: 第 2 報」, 溶接学会全国大会講演概要, 第 90 集, 2012, p94
- 4) 上田ら:「亜鉛めっき鋼板溶接におけるスパッタ低減」, 溶接学会全国大会講演概要, 第 90 集, 2012, p96
- 5) 泉谷ら:「亜鉛めっき鋼板溶接部の気孔低減: 第 3 報」, 溶接学会全国大会講演概要, 第 91 集, 2012, p396
- 6) 泉谷ら: 亜鉛めっき鋼板用新溶接プロセス「J - Solution Zn」の開発, 溶接技術,60 卷(2012)9号,p80

<略歴>

2001 年 大阪大学大学院 マテリアル生産科学専攻 修了

2001 年 株式会社神戸製鋼所入社 溶接カンパニー
技術開発部配属

2013 年 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部
主任研究員 現在に至る