

前話では、亜鉛めっき鋼板の溶接と題するダイヘン殿執筆による連載講座の第1および2回の文献より引用し、亜鉛めっき鋼板の溶接における施工上の注意点や、溶接電源制御技術の進化による気孔抑制制御効果について紹介した。

そのなかで、筆者が着目したのはワイヤ送給同期式低周波重畳パルスマグ溶接法についてでした。日々進化するデジタルワイヤ送給技術を従来からのパルス制御技術に重畳させ、アーク長さの変動対応およびアーク安定化に適用され気孔欠陥発生抑制という成果に繋がっておられることは大変参考になりました。

さて、本話では引き続き第3回の文献紹介をします。

第3回の目次にみるように、気孔発生のメカニズムを究明し、気孔欠陥の低減方法のひとつとして溶接ワイヤ成分に着目し、(株)(株)神戸製鋼所殿との共同研究という形で取り組み、メカニズムの正しさを検証されています。以下に、概要について引用します。

### 連載講座 第3回 亜鉛めっき鋼板の溶接 気孔発生のメカニズムと溶接材料の影響

塩崎 秀男 (株)ダイヘン溶接機事業部 溶接技術誌 2013年11月号 P118～121

- 1 はじめに
- 2 重ねすみ肉継手における気孔発生のメカニズム
  - 2.1 高速度カメラによる亜鉛蒸気噴出時の観察
  - 2.2 気孔欠陥発生時の溶融池現象
- 3 気孔欠陥の低減方法
  - 3.1 溶接材料の観点から見た気孔低減方法
  - 3.2 実験による効果の検証
- 4 おわりに

## 1. 重ねすみ肉継手における気孔発生のメカニズム

最新の研究では、X線透過装置や高速度カメラなどを使用して気孔発生の様子を可視化することで、その発生メカニズムが明らかにされている。

### 1-① 高速度カメラによる亜鉛蒸気噴出時の観察

図 275-1 に示すテストピースにより重ねすみ肉溶接を行った。高速度カメラにて溶融池表面に亜鉛蒸気が噴出する瞬間を捉えた画像を図 275-2 を示す。

図 275-2(a)は、(b)の亜鉛蒸気が噴出している時と比較するため、アークや溶融池が安定している状態を表わしている。

亜鉛めっき鋼板を使用しているとは言え、アークが安定している状態では、普通鋼板の溶接時と比較してとくに大きな違いはない。しかし、図 275-2(b)に示す亜鉛めっき鋼板の場合は、亜鉛蒸気がワイヤ直下の溶融池を突き破って噴出し、開口部が閉じぬまま冷え固まってビードが形成されることで気孔が発生する。・・・

しかし、ワイヤから溶融金属が供給され続

けるため、図 275-2 (b) のようにワイヤ直下で開いた場合は、すぐに閉口し気孔欠陥にはなりにくい。

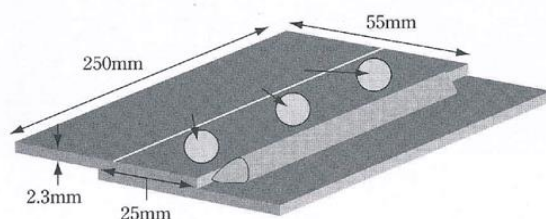


図 275-1 重ねすみ肉継手のテストピース

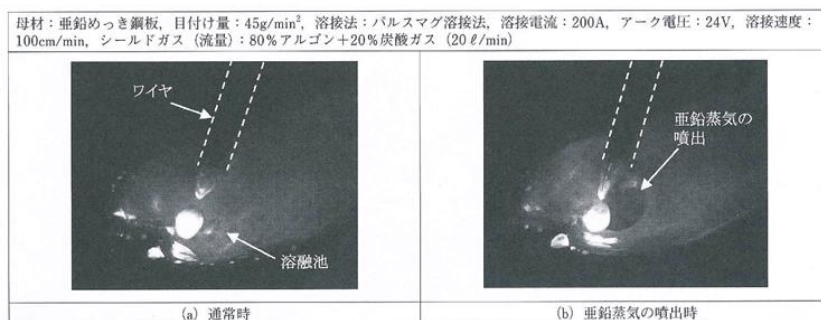


図 275-2 高速度カメラによる溶融池画像

## 1-② 気孔欠陥発生時の溶融池現象

図 275-1 のテストピースを、ピットが発生しやすくなるように下進  $30^\circ$  にして溶接を行った時の溶融池画像を図 275-3 に示す。

矢印は、フレーム(a)からフレーム(c)にかけて時間経過を表わしている。各画像の溶融池現象について説明する。

フレーム(a)

溶接方向は紙面の右上から左下の方向であり、アークや溶融池が安定している状態を示した画像である。

フレーム(b)

フレーム(a)に示した安定した状態から、アーク長の変動や溶融池の不規則な振動など、何の前触れも無い状態で急にピットが発生した状態を示した画像である。

フレーム(c)

溶融池後方では、ワイヤからの溶融金属の供給がないため、ピットを塞ぐことができないまま溶融金属が凝固し始め、ピットが残った状態を示した画像である。

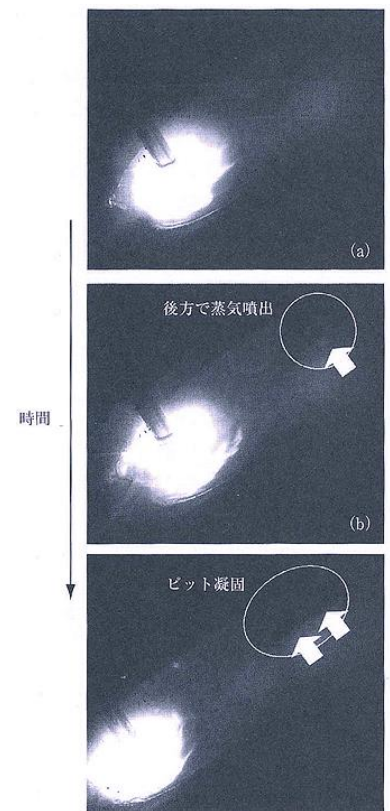


図 275-3 ピット発生時の溶融池現象

気孔欠陥は、溶融池内部に混入した亜鉛蒸気が原因となって発生するが、この現象を明らかにした最新の研究\*1)を紹介する。

図 275-4 は、X線透過装置を使用し、溶接中の溶融池内部を撮影した画像。フレーム(a)からフレーム(c)と 4 ms 毎の時間経過を表している。気孔はいずれも鋼板の重ねルート部を起点に成長するが、その起点はすべ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、各フレームの矢印の位置のブローホールを観察すると、フレーム(a)で大きく成長した気孔は、4ms 後のフレーム(b)にて、亜鉛蒸気が一旦放出されることで縮小されるものの、8ms 後のフレーム(c)では、再び気孔が成長し始めている。全観察結果を通じて、一旦形成された気孔の起点が後方にて完全に消失することはない。すなわち、亜鉛蒸気が溶融池内部に一旦混入して、その起点が後方まで持ち越されてしまうと、必ずピットやブローホールとして残留するものと考えられる。

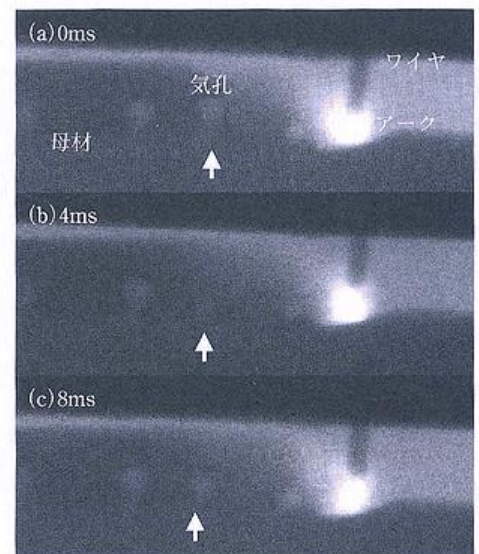


図 275-4 X線透過装置による溶融池内部の気孔発生状況

以上のように、ピットなどの気孔欠陥はアーク直下で放出しきれなかった亜鉛蒸気が溶融池前方で気孔の起点を形成し、これが溶融池後方まで持ち来たされる過程において、成長し形成されるものである。したがって、気孔欠陥を抑制するためには、アーク直下を露出させ、図 275-5 に示すように、できる限り多くの亜鉛蒸気を早期に前方にて外気へ放出させることが重要である。

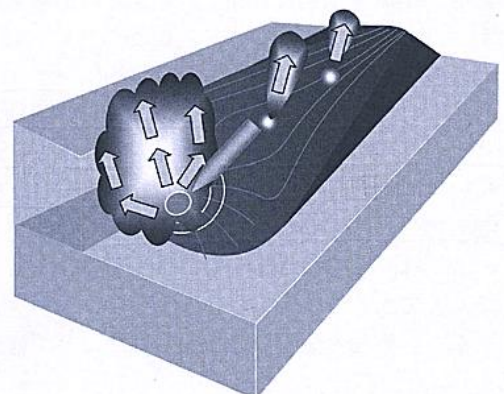


図 275-5 気孔欠陥発生メカニズム



## 2. 気孔欠陥の低減方法

前項の気孔発生メカニズムは、繰り返しになりますが以下のようになります。

- ①亜鉛蒸気を溶融金属に混入させないようにするにはアーク直下で亜鉛蒸気を放出させる必要がある。
- ②直下で放出できなかった場合はそれが気孔の起点となる。
- ③気孔の起点が溶融池後方において溶接金属内部に留まればブローホール、外気に抜ければピットとなる。
- ④気孔抑制にはアーク直下の溶融金属層を露出させ、溶融金属が覆いかぶらないようにする。

本文献では、以上のような気孔発生メカニズムを裏付けるために、溶接材料の観点から亜鉛蒸気を溶融金属に混入させない方法を紹介している。

### 2-① 溶接材料の観点から見た気孔低減方法

溶接材料の観点からは、アーク直下を露出させるために、ワイヤ成分の調整による表面張力の増加と電気抵抗の調整によるアーク力増加による手法を紹介。

図 275-6 は、夫々の作用によって、アーク直下の露出面が多くなることを示した模式図である。表面張力が増加すると溶融金属が後方に引っ張られるため、アーク直下は露出しやすくなる。また、アーク力が増加すると、アーク直下を押し下げる力を増加させ、露出しやすくなることを表わしている。

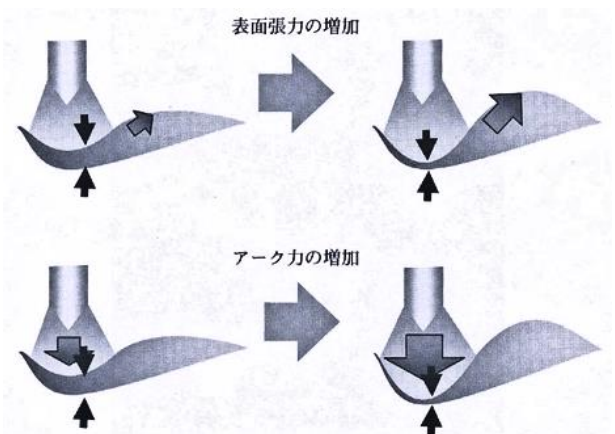


図 275-6 アーク直下の露出を多くする方法

### 2-② 実験による効果の検証

**表 275-1** は実験に用いたワイヤの化学成分を示している。溶融金属の表面張力は、一般的に硫黄 (S) 量が少ないと増加するので、wire 3 の表面張力がもっとも大きくなる。

また電気抵抗はマンガン (Mn) 量が少ないと小さくなるので、wire 4 の電気抵抗がもっとも小さくなる。

実験で用いたテストピースは板厚 2.3mm、目付け量 45g/mm<sup>2</sup> の合金化溶融亜鉛めっき鋼板であり、気孔欠陥が発生しやすくなるように、ギャップ 0mm、下進溶接 30° の重ねすみ肉溶接とした。溶接条件を **表 275-2** に示す

表275-1 実験で用いたワイヤの成分

	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

表 275-2 溶接条件

Base metal	Galvanized steel sheet (Zinc amount : 45g/min <sup>2</sup> )
Joint type	Lap fillet joint (Gap : 0mm)
Wire	Test Wires
Shielding gas	80%Ar+20%CO <sub>2</sub> (20L/min)
Welding process	Pulsed MAG Welding
CTWT (*)	15mm
Welding speed	100cm/min
Wire feed rate	7.3m/min
Arc voltage	23~24V
Welding position	Downhill 30°

\* : Contact tube to work distance

気孔欠陥抑制の検証結果を図 275-7～275-9 に示す。  
 図 275-7 は S 量とピット数の関係、図 275-8 はワイヤ化学成分とブローホール数の比較、図 275-9 は X 線透過試験結果を示す。

図 275-7 に示すように、硫黄量が低くなるほど、ピットおよびブローホールはともに減少している。

また、図 275-8 に示すブローホールに関しても、1.5mm 以上のサイズが顕著に減少している。したがって、表面活性元素である硫黄の添加量を最小限に抑えることで表面張力を高める手段は、ピット数およびブローホール数を減少させる効果があることが確認できた。

また、wire 4 は低マンガン材であり、ほぼ同程度の硫黄を含有する wire 3 よりもピット数およびブローホール数をさらに減少した。これは、ワイヤの電気抵抗が低下することでアーク力が増加したためと考えられる。

以上の結果から、溶接ワイヤの成分調整を行い、硫黄量低減による表面張力の増加と、マンガン量低減による電気抵抗の低下によって、アーク直下の露出を促し、気孔欠陥が大きく低減することを確認できた、と結言されている。

本文献は、当初、部分引用を考えたが、アーク力および表面張力などに基本的な考え方が秩序立てて示されているため、読者の皆様にも参考になると考え、ほぼ全文の引用としました。

亜鉛蒸気による気孔発生メカニズムより気孔欠陥防止には、アーク直下の露出が必要になり、露出させるには溶融池後方に溶融金属を引っ張る表面張力を強くすること、及びアーク力を増加しアーク直下を押し下げる力を増加させることが必要と説明されていることにはかなり説得力があります。

一方、実際に当たって「露出を確保」するには種々の制約があるため、かなりの工夫が要求されると感じます。

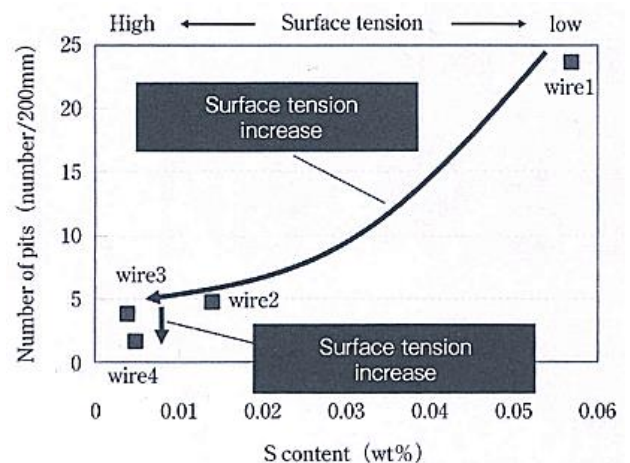


図 275-7 ワイヤ中の S 量とピット数の関係

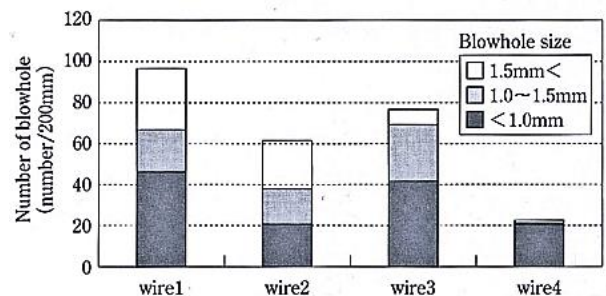


図 275-8 ワイヤ成分とブローホール発生比較

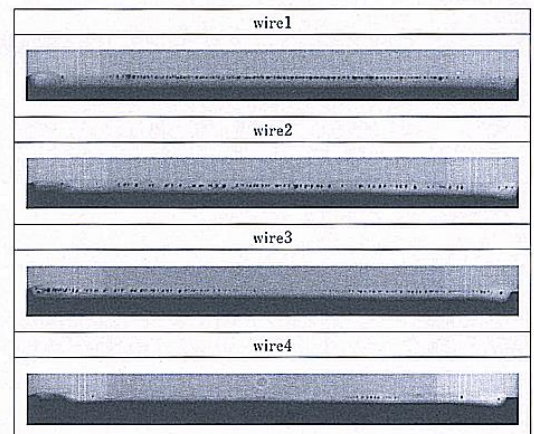


図 275-9 X線透過試験結果

\*\*\*\*\*参考文献\*\*\*\*\*

\*1) 泉谷ら；亜鉛めっき鋼板溶接部の気孔形成現象について、平成 25 年度秋季全国大会講演概要集，pp90-91