



# 入門講座

鋼の凝固入門-13

## 溶接欠陥の発生機構と防止技術 —形状と気孔の制御—

Generation Mechanism and Prevention Technique of Welding Defects  
— Shape and Porosity Control —

清水弘之

(株)神戸製鋼所 溶接事業部門  
技術センター溶接開発部 部長

Hiroyuki Shimizu

### はじめに

鋼の凝固入門の最終回に、溶接部の凝固過程に伴う欠陥の発生機構と制御に関して紙面を拝借し記載させて頂く。

溶接とは、構造物を形づくることを目的に、隣合う構成部材の両方の一部を溶融-凝固させて接合する技術である。溶融に使用する熱源別に図1に示すように技術は分類される。この図の中で薄板から極厚板までの広い板厚範囲で、各種組成・組織の鋼材に使用されている溶接方法が、アーク溶接である。アーク溶接は、基本的技術の発明から実に100年以上<sup>1)</sup>が経過しているが、決して成熟・陳腐化した技術とはなっていない。電源を中心とした制御技術とその制御に対応する材料の開発により、アーク溶接技術は日々進歩している。

アーク溶接は大気圧中でのアーク放電を溶融熱源として使用する。このアーク放電を制御する溶接電源は、電子ビームやレーザー等の高エネルギービームの熱源に比較して安価である。同時にパワーエレクトロニクスとデジタル制御技術の進歩により、アーク溶接電源の出力、具体的には溶接電流をサブ $\mu$ s単位で制御<sup>2)</sup>出来るようになり、溶接材料や溶接部へ

の出力を制御することで、溶接部の凝固現象も制御<sup>3)</sup>できるようになってきている。また、アーク溶接は古くから「フラックス」を活用することが多く、フラックスの構成原料や各原料の組成を調整することで凝固を制御している。アーク溶接は、電極自体がジュール発熱し溶融する「溶極式」と電極自体が積極的にジュール発熱を利用しない「非溶極式」に大別される。

溶接材料は「ワイヤ、棒、帯」等の形態をとるが、その総量は概略粗鋼生産量の0.3~0.4%である。粗鋼生産量が1億ton/年である日本においては、溶接材料の総量は30万ton/年であり、世界の粗鋼生産量を14億ton/年(2010)とすると、溶接材料の総量は547万ton/年(2010)<sup>4)</sup>と見積もられている。高々0.4%の比率でしかない溶接材料であるが、この0.4%の材料でできている溶接凝固部とその熱影響部が、ほとんど全ての鋼構造物の信頼性を決定していると言っても過言ではない。主要5元素(C, Si, Mn, P, S)に加えてNi, Cr, Mo, Ti, V, Al, Cu等々の組成を絶妙にコントロールし、連続铸造で均一な凝固組成とし、TMCP等で組織制御することで鋼板は生産される。しかし、その溶接部には溶接材料も加わり再溶

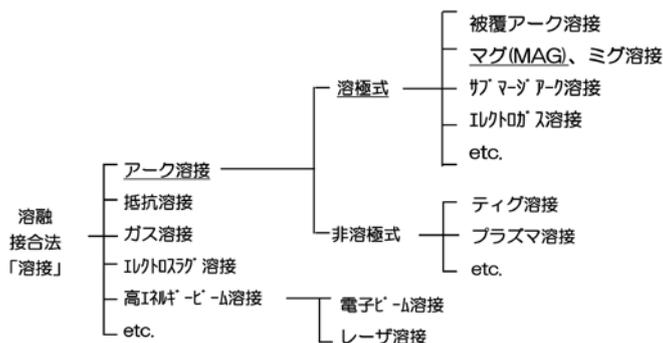


図1 溶融接合法・溶接の分類

融・凝固するために、特別に管理をしないと健全な鋼構造物をつくることが出来ないことは、容易に理解頂けると思う。

本稿では、溶接凝固部に出現する欠陥、特に『形状』と『気孔』に関して溶接における特徴的な凝固現象と最新の制御技術を紹介したい。

## 2 溶接における凝固

人件費の比較的高い国・地域において、アーク溶接でも広く使用されているのはMAG溶接である。MAGとは、Metal Active Gasであり、シールドガスとして炭酸ガス又は炭酸ガスとアルゴンの混合ガスを用いる溶接方法である。図2にMAG溶接の構成を示す。直径1.2mmのワイヤが連続的に送給されて、給電チップにおいて溶接電流を受取り、ジュール発熱とアークによって加熱され、ワイヤが連続的に昇温され、ワイヤ先端が溶滴となって落下し、溶融池を形成する。この溶融池がワイヤの移動に伴って移動することで、アーク溶接は連続的に行われる。「溶極式」の代表的溶接法がMAG溶接であり、能率が高くロボット等の自動化に適したアーク溶接である。

溶接の凝固現象は、凝固速度を把握することで理解することが出来る。平板上に連続的に溶接ビードを引く場合やT字のすみ肉溶接ビードを引く場合を考える。安定して溶接が行われている場合は、熱源であるワイヤの直下と凝固終端部で囲まれた溶融池の形状は一定であり、溶融池の長さは、溶接条件が一定に保たれれば一定となる。溶接部の凝固は、母材をヒートシンクとした熱伝導による冷却を主な駆動力として

進む。母材と溶融池界面からデンドライトがエピタキシャル成長することで凝固するため、厳密には熱流方向は溶融池の幅と深さの影響を受けるが、マクロ的には、熱源の移動速度、即ち溶接速度にほぼ等しくなる。アーク溶接は局所的加熱であり、一見すると母材への熱伝導が大きく、凝固速度は非常に速いと誤解される。アーク溶接の最高速度は高々2m/分程度<sup>5)</sup>であり、一般的な鋼の連铸速度3~4m/分<sup>6)</sup>と同じである。よってアーク溶接での凝固は、通常の鋼の凝固と速度論的には同様な扱いが出来る。

同じ溶融溶接でもレーザー等の高エネルギービームの熱源を用いて溶接を行うと、10m/minを超えて1桁程度凝固速度は速くなる<sup>7)</sup>ことがある。これは溶接部に投入されるエネルギー密度が高くより局所加熱となり、母材への熱伝導による冷却速度が大きくなるためと解釈される。凝固速度を比較して表1に示す。アーク溶接の凝固速度は比較的ゆっくりであり、鑄造時の凝固速度と大差ないために、アーク溶接における定常的な凝固挙動は本入門講座において解説された理論が当てはまることになる。

アーク溶接の凝固現象の中で鑄造との最も大きな違いは、凝固部の大きさに対して、自由表面が大きいことであろう。鑄造の場合、凝固開始点は鑄型表面であり、最終凝固部は鑄鋼中央付近となる。一方で、アーク溶接の場合、凝固開始点は溶融池と母材の境界であり、デンドライトがエピタキシャル成長することは鑄造と同じであるが、最終凝固部は溶接ビードの表面となる。特殊な溶接条件で溶接を行うと、鋼板内部の溶接中央が最終凝固部となることもあるが、凝固割れをおこしやすいために、デンドライトの成長方向を制御し中央での会合凝固は回避する。

最終凝固部となる溶接ビードの表面は、構造物の表面に露出することが多い。例えば高級な自動二輪車では、フレームやマフラーを溶接しているビード表面の形状が商品価値を決定する重要な品質の一つであり、自動車の足回り部品のビード表面は、耐食性や疲労強度にも影響する。凝固部の内部欠陥防止と同等以上に表面形状の制御は重要である。

これまでは、溶接ビード表面は主にフラックス配合を調整し制御してきた。フラックスによって溶融スラグの組成、具体的にはスラグの凝固点を調整することで、溶融池が凝固する前にスラグを凝固させて、スラグで溶接ビードを包皮することで、ビード表面形状を制御している。一例として、造船等で幅広く使用されているフラックス入りワイヤ（直径

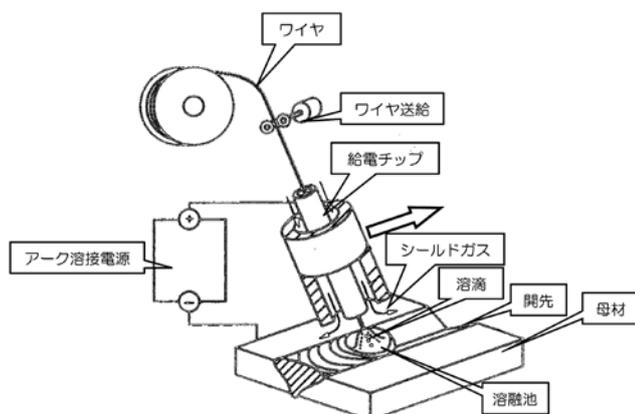


図2 MAG溶接法の構成

表1 溶接と鑄造の凝固速度の比較

アーク溶接	高エネルギービーム溶接	鑄造
~30mm/s	~300mm/s	~70mm/s

1.2mm) を用いてMAG溶接 (出力6kW) にて立向上進すみ肉溶接を行った場合の溶融池と凝固スラグの状況を図3の(a)に、溶接終了後のビード形状と自然剥離したスラグの状態を(b)に示す。スラグ凝固点を調整することで、重力に逆らった方向でも溶け落ちすることなく凝固し、健全な溶接ビードが得られること、凝固完了後の熱収縮の微妙な差異を利用して役割を終えたスラグは飛散する事なく、そのまま自然剥離させることができる。少し具体的に考えると、例えば船舶の建造においては、大型ブロックは百tonを超えることもあり、容易には方向を変えることが出来ない。設置されたそのままの状態で行わねばならず、溶接線が垂直方向、更には上向きである場合もある。凝固現象からすれば、溶融金属を垂直方向や上向方向に安定して凝固させることは不可能であり、常識的には重力に順じて溶け落ちてしまい、平坦で滑らかな溶接ビードを凝固させることは出来ない。

重力に逆らった方向に安定して溶融した鋼を置き凝固させ、部材同士を健全に溶接することが出来るのは、フラックスの制御技術による。例えば酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) の物性論的融点は、2143K (1870℃) である。純鉄の物性論的融点は、1811K (1538℃) であり、酸化チタンよりも330K程度低い。他の元素も添加されるために、相互に不純物混入による凝固点降下が発生するが、酸化チタンをフラックスの原料として適正量を使用することで、鋼が液体である時に一瞬早くスラグが凝固し、溶鋼が重力に従って溶け落ちることを防ぎ、平坦な溶接ビードを形成することが出来る。スラグと鋼の凝固温度差を利用してビードの溶け落ちと外観を制御することが溶接における重要な凝固制御技術となっている。図3がこれまでの技術開発と改良の成果の一つである。図4は、適正凝固温度のスラグ組成 (左) に対して、スラグ凝固温度を下げるとビード中央部で溶け落ちが始まり、ビードが凸化し、更にスラグ凝固温度を下げる (右) と図3と同一の6kW出力で

立向上進溶接が不可能となることを示している。フラックスによってスラグ物性を調整し溶接時の凝固を制御する技術は、製品設計ノウハウに直接関係する。そのために詳細はほとんど開示されないが、定性的にはあるが制御技術<sup>9)</sup>が公開されているので興味があればご覧きたい。

前置きはこれ位にして、溶接ビードに発生する欠陥、具体的には『形状』と『気孔』を制御する最新の技術を紹介する。『形状』に関しては、スラグの回収や廃却を嫌う場合もあり、スラグを使用せず凝固過程でビード形状を制御する技術であり、『気孔』に関しては、アーク溶接することでガス発生する鋼板を、施工効率を損なうことなく健全に溶接する技術である。

### 3 形状

フラックスを活用することで、アーク溶接は重力場においても一見重力に反した姿勢で溶接でき、健全に凝固させることができることは説明した通りである。

自動車を中心とした薄板の溶接では、フラックスを使用しないソリッドワイヤを用いたMAG溶接が好まれる。板厚が数mmと薄く、部品は比較的軽量であるためポジションナを使用し重力に対して、ほぼ下向きで溶接できること、生産性を重視するためにスラグ回収は行わないことから、フラックスは使用できない。自動車部品のプレス精度は日々改善されてはいるが、部品は複雑な3次元形状であり、溶接部にも誤差が生ずる。多少のギャップがあっても、滑らかで平坦なビード外観が得られる溶接凝固部が求められ、意匠性、塗装性や疲労特性を考へても平坦なビードが求められている。

シールドガスを変更しアーク放電自体を変えることでも平坦で滑らかな溶接ビードとすること<sup>9)</sup>も可能であるが、ここではシールドガスの組成はMAGのまま、微量成分によって溶

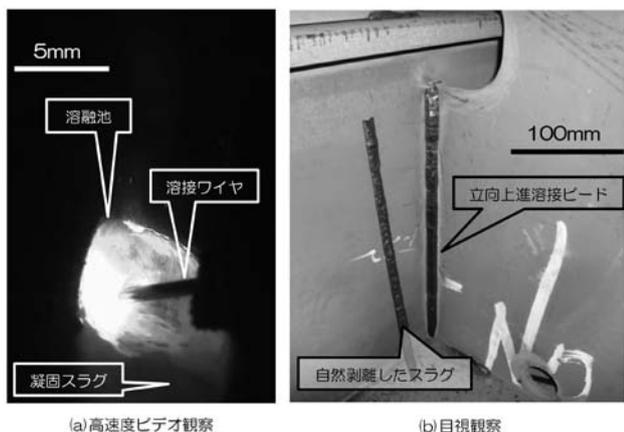


図3 立向上進溶接の溶融池とスラグ形状 (a) 及び溶接ビードと自然剥離したスラグ (b)

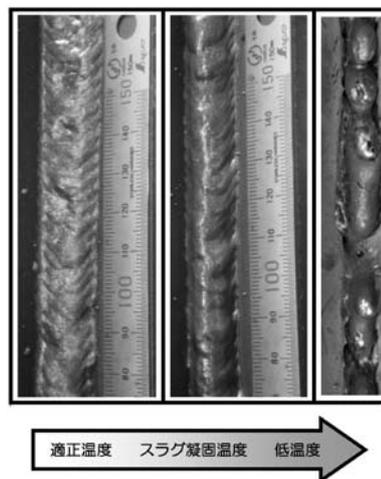


図4 スラグ凝固温度と立向上進溶接のビード形状

接ビード形状を制御する技術を紹介する。図5は最新の溶接材料を用いて自動車部品を重ねすみ肉溶接したビードの断面と外観である。従来材料を用いたビードの断面と外観を比較に示す。最新のソリッドワイヤを用いることで、ビード形状は非常に滑らかであり、酸化物を主体とするスラグのランダムな発生も無く、なおかつ最終凝固部にスラグが凝集する。溶接部にギャップがあっても、溶け落ち無く、架橋性良く溶接ができる。

硫黄 [S] は少量で鋼の表面張力を低減させる第16族元素の代表であるが、従来常識の上限を超えて添加することで、ビード形状を改善しスラグが凝集し極小化して凝固する。S増量により、表面張力が低減し、部品との濡れ性・なじみ性が向上している。またSにより溶融池での対流方向が変化する<sup>10,11)</sup>ことで、図6に示すように溶接中の溶融池表面でスラグが凝集する。Sは鋼の凝固割れを誘発する元素であるが、炭素 [C] 等の凝固割れ誘発元素を低下させることで、自動車用部品等の薄板の溶接で凝固割れは発生しない。

凝固過程を制御することで溶接ビード形状を制御しようとする技術は、最近更に進化<sup>12,13)</sup>している。具体的には溶接部

の疲労強度の改善が期待できることである。ビード形状を極限まで滑らかにし、母材とのなじみ性を向上させることで溶接部と母材の境界に応力が集中しない形状とし、更に、溶接ビードの組成を調整し、マルテンサイト変態開始温度を低くすることで、溶接ビードに圧縮の残留応力を付加する。自動車のみならず疲労強度が問題視されている首都・高速道路、鉄道等の橋梁にも適用が期待されている。

## 4 気孔

アーク溶接ビード内部の気孔欠陥は、鋼板や開先表面に付着した油分等の有機物又は水分、溶接材料、特にフラックス等の乾燥不良、シールドガス流量不足等に起因すると教科書には記載され認識されている<sup>1)</sup>。日本の大手ファブリーケータに於いて、上記のような施工管理不良による気孔欠陥発生に関する相談や苦情は聞こえてこない。施工管理不良によって気孔欠陥が発生しても、直ぐにその異常性に気付き、適正な対策が取られているからである。

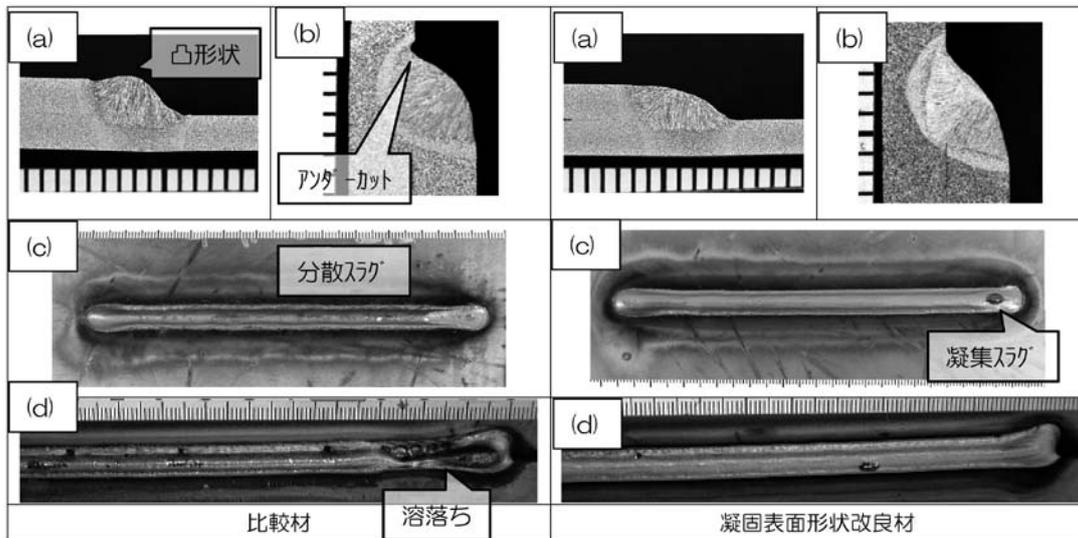


図5 微量成分調整による溶接ビードの凝固表面形状の改良  
(a) 重ね水平すみ肉, (b) 重ね横向きすみ肉, (c) ビードオンプレート, (d) ギャップあり重ね水平すみ肉

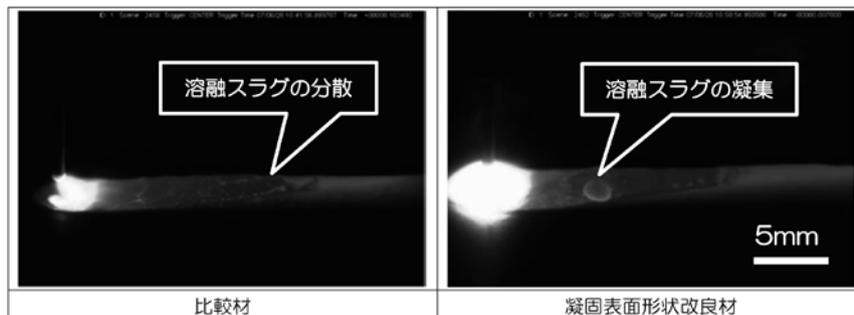


図6 S添加による溶融スラグの凝集

一方で、大手ファブリーケータは気孔欠陥に関して継続的な改善を求めている。改善を求められている気孔欠陥とは、防錆を目的として亜鉛を主成分とした金属めっき又は亜鉛化合物を含む塗膜が鋼材表面に施されていて、それらの鋼板を溶接する時に発生する気孔欠陥のことである。亜鉛の蒸気圧は高く、1180 K (900℃) 程度で沸騰しガス化する。また亜鉛を含む塗膜の有機物も低温で分解しガス化する。亜鉛を含むこれらの膜は防錆を目的に施されているために、溶接施工時にも除去することなく被膜の上からアーク溶接を行う。図7、8に代表的継手形状を示すが、自動車用薄板の場合は、両面に亜鉛めっきが付着した状態での重ねすみ肉溶接、造船用中厚板の場合は、両面に塗膜が付着した状態でのすみ肉溶接である。重なり部から亜鉛又は亜鉛を含む分解燃焼ガスが大量に発生し、溶接ビード内部に気孔欠陥が生成しやすい状態となる。理想的には溶接部、特に重なり部の亜鉛を除去し溶接を行えば良いが、実質的には不可能である。防錆性と溶接施工効率を両立させるために、亜鉛及び防錆塗膜が表面に存在しても高品質な溶接が可能となるアーク溶接が求められる。この気孔欠陥を制御する技術の一端を紹介させて頂く。

気孔欠陥を制御するためには気孔欠陥が発生する機構を理解する必要がある。

具体的には、アークにより溶融池が形成され、順次溶接

ビードとして凝固する過程を高出力のX線光源を用いて透過観察する<sup>14)</sup>。必要であれば動画と同期させて、電流等の波形も記録する。

板厚2.4mm、亜鉛めっき量片面45g/m<sup>2</sup>の鋼板を重ねすみ肉溶接した場合の気孔の発生状態を透過観察した結果が図9である。画面右から1/3にあるのが熱源のワイヤであり、溶融池内部のコントラストの白い部分が亜鉛蒸気による気孔である。アーク直下において蒸発した亜鉛が気孔欠陥を形成する機構が確認されている。板厚12mm、防錆塗膜厚さ15μmの鋼板をすみ肉溶接した場合の気孔の発生状況を透過観察しても、図9同様にアーク直下において分解生成したガスによって気孔欠陥が生成する状況が確認できる。

亜鉛めっきと防錆塗膜の気孔欠陥の発生現象に共通していることは、溶融池内部に一度気孔が生成してしまうと、気孔は凝固過程でほとんど残留するという事実である。極稀に、溶鋼とガスの密度差による浮力によって気孔が浮上し、消滅する場合もあるが、ほとんどは残留し、凝固により溶接ビード内部の気孔欠陥となる。亜鉛めっきや防錆塗膜を有する鋼板を気孔欠陥なく溶接するためには、熱源であるアーク直下で気孔を発生させない工夫が必要である。何らかの手段で母材を少し多く溶融させて、気孔源である亜鉛めっきや防錆塗膜を除去すれば良い。

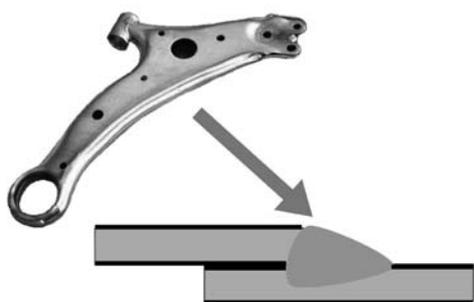


図7 自動車足回り部品における亜鉛めっき鋼板の重ねすみ肉溶接鋼板の表裏面に亜鉛めっき

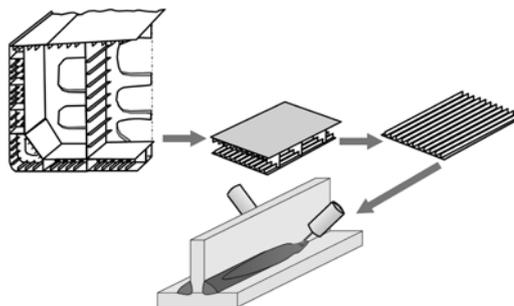


図8 造船躯体構造における防錆膜塗布鋼板のすみ肉溶接鋼板の表裏面に防錆膜塗布

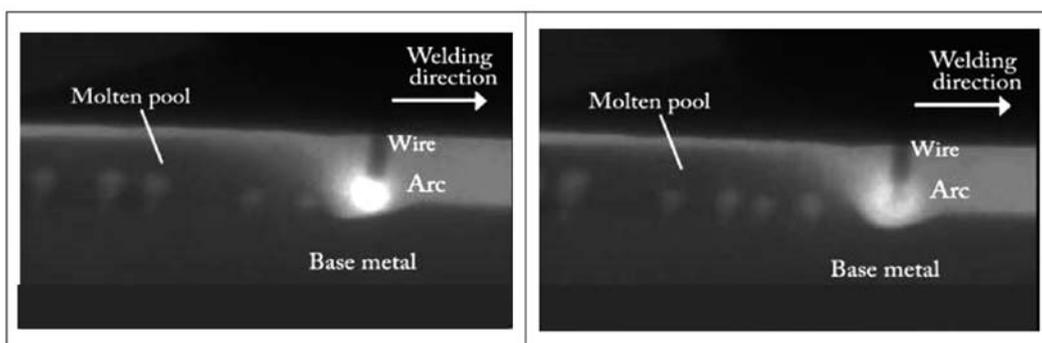


図9 亜鉛めっき鋼板の重ねすみ肉溶接部の気孔欠陥  
板厚2.4mm、亜鉛めっき45g/m<sup>2</sup>

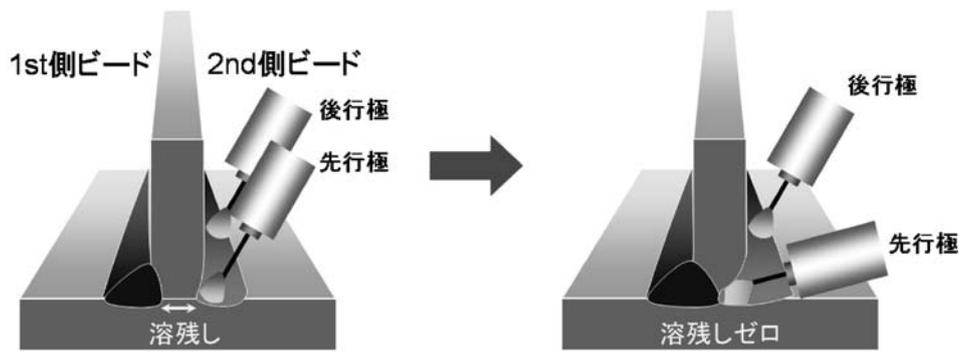


図10 防錆膜塗布鋼板のすみ肉溶接  
熱源の複合化と入熱方法の調整で気孔欠陥ゼロ

薄板は、シールドガス組成、ワイヤ組成、入熱の与え方を調整し母材溶融深さを増やすことで、中厚板は、図10に示すように熱源を複数化し先行極で防錆塗膜を除去することで凝固部に気孔欠陥を発生させないことに成功している。中厚板は多少入熱を増やしても溶け落ちる心配はないため熱源の複合化出来るが、薄板は溶け落ちが発生し易いため、単一熱源で溶け込みを増やすことが有効であることがわかっている。

亜鉛めっきや防錆塗膜に由来する気孔欠陥は、これまで溶接凝固部に残留することは当たり前と考えられてきたが、溶融-凝固過程を可視化することで現象を正確に理解し、対策の方針を明確にすることができてきている。

## 5 おわりに

一般的な鑄造・凝固に比較して、溶接の溶融・凝固部は比較的小さく、可視化の実験も容易である。一方で、アーク溶接は非平衡な過渡現象であり、シミュレーションは非常に複雑である。デジタル技術の進歩に伴い、大量の画像や波形データが手軽に安価に高速に扱えるようになり、最近の10年間において可視光の動画で観察できる現象の理解は非常に進んだ。具体的には溶滴の形成と移行の解析とその制御<sup>15)</sup>である。

高エネルギービーム溶接に比較して、アーク溶接の溶融・凝固部は適度な大きさがあり、凝固速度は鑄造と同程度にゆっくりであるために、まだまだ制御可能な現象を残している。今回紹介したX線を用いた動画観察の様に、溶融金属や溶融スラグの内部を可視化することで、凝固過程で制御すべき対象が明確になる。これまで通りの溶接電流・電圧による加熱と母材への熱伝導による冷却に加えて、CMT等のワイヤ送給と電流波形の同期制御による入熱の低減<sup>3)</sup>や付加的ワイヤを挿入することでの冷却促進<sup>16)</sup>、さらには磁気制御による溶融池保持<sup>17)</sup>・攪拌等の基礎的な取組みも進んでいる。例えば、散布されたフラックスの下でアーク溶接を行うサブマージアーク溶接は、アーク光の漏れやヒュームやスパッタ発生

はない半面、可視光の動画で観察できないために、凝固現象の理解は遅れている。フラックスの下での溶融・凝固現象を可視化し対象を明確にして制御することができれば、究極的に高能率で高品質な溶接技術が提案できるのかもしれない。

## 参考文献

- 1) 現代の溶接, 日刊工業新聞社, (1954)
- 2) 恵良哲生: 溶接学会誌, 79 (2010), 562.
- 3) H.Hackl and K.Himmelbauer: IIW Doc. XII, (2005)
- 4) ウェルディングMART/2011溶接材料市場総論, 新報, (2010), 10.
- 5) 古川尚英: 神戸製鋼技報, 63 (2013), 22.
- 6) 加藤徹: ふえらむ, 19 (2014), 371.
- 7) 片山聖二: 溶接学会誌, 78 (2009), 682.
- 8) 澤村直希: 溶接学会全国大会講演概要, 2014s (2014), 312.
- 9) 鈴木励一: 溶接学会全国大会講演概要, 2012s (2012), 222.
- 10) S.S.Glickstein and W.Yeniscavich: WRC Bulletin, 226 (1976), 1.
- 11) 田中学: 溶接学会誌, 71 (2002), 95.
- 12) 鈴木励一: 溶接学会全国大会講演概要, 2013f (2013), 339.
- 13) 鈴木励一: 溶接学会全国大会講演概要, 2013f (2013), 420.
- 14) 山崎圭: 溶接学会全国大会講演概要, 2012s (2012), 223.
- 15) K.Yamazaki: IIW Doc. XII, (2010)
- 16) 津山忠久: 溶接学会全国大会講演概要, 2012f (2012), 122.
- 17) 松田昇一: 溶接学会誌, 76 (2007), 247.

(2014年9月2日受付)