

(解説)

最近の片面サブマージアーク溶接技術

Trend of One Side Submerged Arc Welding Technology



杉山大輔*¹
Daisuke SUGIYAMA



芳賀拓弥*¹
Takuya HAGA

One side submerged arc-welding is capable of single-layer welding fully exploiting the features of submerged arc-welding; however, the process suffers from cracking occurring at joint ends, an issue that has remained unsolved since its development. This paper introduces the state-of-the-art technology of the one side submerged arc-welding process, including an outline of the process and visualization technology, as well as simulation analysis for preventing end cracks and verification by actual welding.

まえがき＝サブマージアーク溶接は、施工法の特徴から溶接姿勢は下向きと横向きに限定されるものの、他の溶接施工法に比較して高能率かつ安定した溶接品質などが理由で造船や建築、化工機などの分野で広く適用されている。本稿では、サブマージアーク溶接の特徴と、その特徴を最大限に活用した片面サブマージアーク溶接特有の継手終端部に発生する割れ（以下、終端割れという）の防止、さらに片面および一般のサブマージアーク溶接に関わる施工技術について最新の取り組みを紹介する。

1. 片面サブマージアーク溶接の特徴

1.1 サブマージアーク溶接の特徴

サブマージアーク溶接は、粒状フラックス中にソリッドワイヤ等の電極ワイヤを自走（自動）供給し、ワイヤの先端と母材の間に連続的にアークを点じてワイヤ、フラックス、母材を溶融して接合する方法である（図1）。図2に示すようにサブマージアーク溶接は太径ワイヤによる高電流条件と鉄粉を含有したフラックス、さらに多電極を組み合わせたことができる。これによってほかの溶接施工法に比較して高溶着、すなわち高能率化が実現できる施工法である。高能率以外の長所としては以下の二つがある。作業環境面では有害光線やスパッタ、ヒュームがほとんど発生しない。また、溶接品質面では溶接技量の影響を受けず比較的安定で再現性が高い。いっぽうで次のような短所がある。設備が比較的大型となり広い設置スペースが必要で、セッティングにも時間を要するため短い溶接長には不向きである。また、アークが見えないため溶接不良が発生した場合の原因を可視的に解明することが困難である。

1.2 片面サブマージアーク溶接の概要

船舶の接合方法としてアーク溶接が採用されていた当

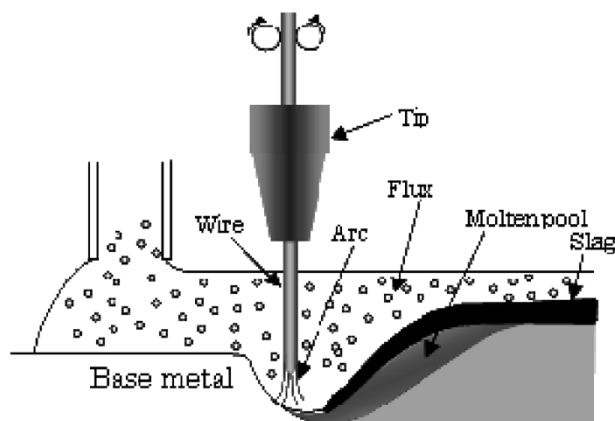


図1 サブマージアーク溶接の原理
Fig.1 Principle of submerged arc welding

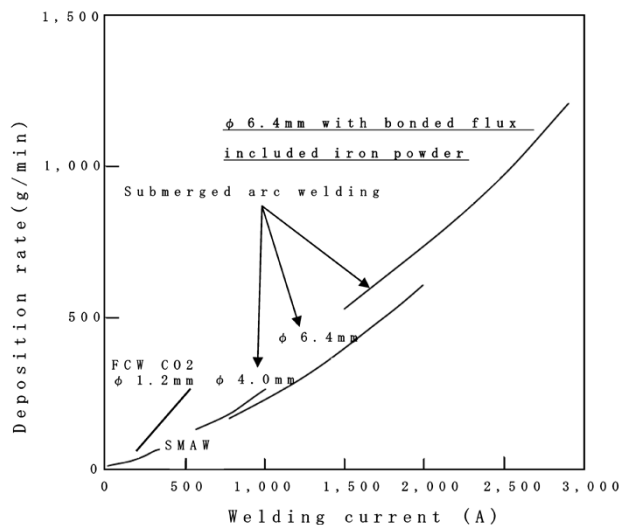


図2 溶接電流と溶着速度の関係
Fig.2 Relationship between welding current and deposition rate

*¹ 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

初は、船体平行部の板継溶接として母材の両面から1層溶接を行う両面サブマージアーク溶接施工が適用されていた。時代が進むにつれて船体の大型化が進み、建屋の制約から反転ができない、あるいは反転するクレーンを待つ時間が長いなどの問題が生じた。そこで、片側から1層で仕上がる施工法の開発ニーズが高まった。当社は、ニーズに対応する溶接施工法として1964年にFCBTM注1) (Flux Copper Backing) とRFTM注2) (Resin Flux) をほぼ同時に開発した。FCBTMとRFTMは現在も専用の溶接装置とともに国内外で広く採用されている^{1), 2)}。

1.2.1 FCBTM, RFTMの特徴

FCBTMの模式図を図3(a)に示す。FCBTMは、銅板の上に裏当てフラックスを散布してエアホースの圧力で銅板裏面と密着させる構造である。大電流を使用する厚板への適用性に優れているため、図4(a)に示すように4電極を用いることで板厚40mmまで適用可能である。その反面、溶接ひずみが多い薄板や銅板裏面に板厚差のある、いわゆるサーピン継手などには密着性確保の観点から適用に多少の難がある。

RFTMの模式図を図3(b)に示す。RFTMは、下敷フラックスの上に裏当てフラックスを散布しエアホースの圧力で銅板裏面と密着させる構造である。銅板裏面の段差やひずみに対する追従性に優れているため、FCBTMの不得意とする薄板や図4(b)に示すサーピン継手などには最大の効果を発揮する。いっぽう、大電流を使用する厚板では裏ビード形状がやや不安定になりやすい傾向にある。

両施工法に共通する最大の問題は、溶接継手終端部に発生する割れ、いわゆる「終端割れ」であり、施工法開

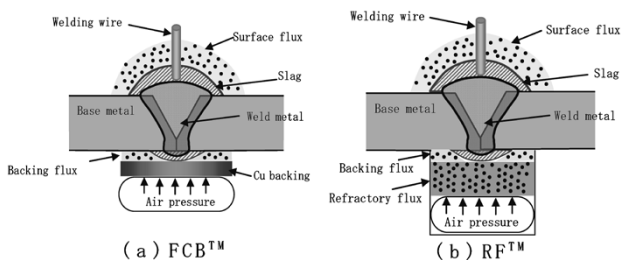


図3 FCBTM, RFTM概略図
Fig. 3 Schematic of FCBTM process and RFTM process

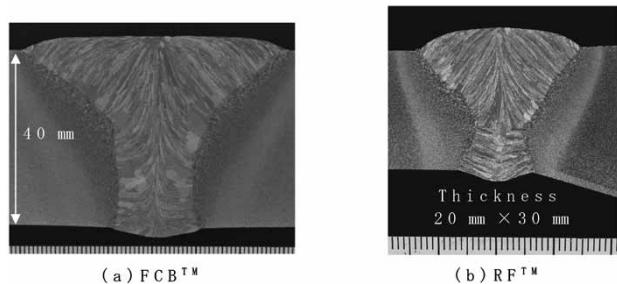


図4 FCBTMとRFTMの断面マクロ写真
Fig. 4 Macro structure with FCBTM process and RFTM process

脚注1) FCBTMは当社の商標である。
脚注2) RFTMは当社の商標である。

発から現在まで根本的な解消には至っていない。

2. 片面サブマージアーク溶接の終端割れ防止

2.1 終端割れとは

片面サブマージアーク溶接は、大入熱溶接であるがゆえに銅板の回転変形は大きい。図5に示すように、先行する第1電極がタブ板に乗り上げた直後、それまで蓄積された応力が一気に開放され、溶接金属中央に凝固割れが生じることがある(図6)。凝固割れの発生確率は極めて高い。

図7に示すように、凝固中における固液共存領域である固相線温度 T_s と液相線温度 T_L の温度範囲は、一般に凝固脆性温度領域(Brittleness temperature range, 以下BTRという)と呼ばれる。延性が極めて低く、ひずみ速度が速く、かつ高温延性曲線と交差した場合には凝固割れが発生すると考えられている³⁾。したがって、終端割れはひずみ速度が速いと割れ発生の確率が高くなる。このため、終端割れの発生を防止するためには、ひずみ速度を抑制する手段を講じる必要がある。

終端割れ防止法として、スリットタブ法やシーリングカスケード法など、これまでいくつかの方法が提案され実用化もされている。しかしながら、いずれの防止法も一長一短があり、溶接作業効率を低下させず、かつ確実に防止できる方法は確立されていないのが現状である。

2.2 シミュレーションによる凝固割れ解析

従来の終端割れ防止技術の検討は、実験室で可能な銅板サイズに限定される⁴⁾。このため、測定される継手終

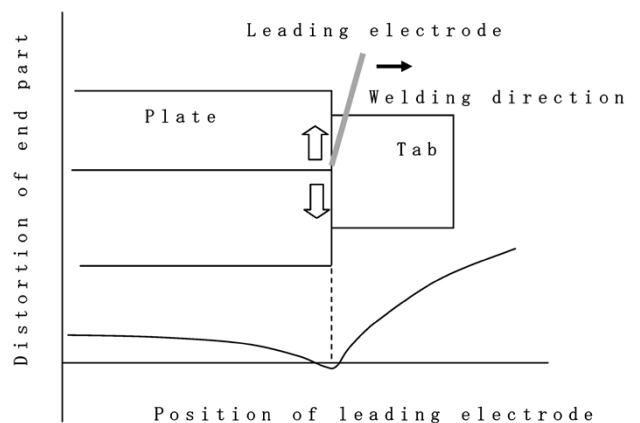


図5 溶接継手終端部の変形挙動
Fig. 5 Deformation behavior of end part in the weld joint

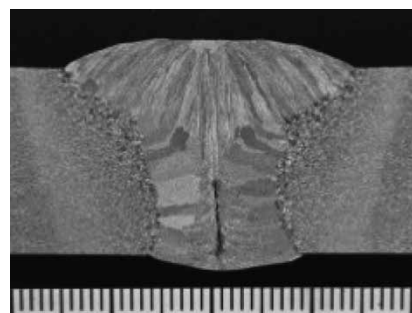


図6 終端割れ部の断面マクロ組織の一例
Fig. 6 Example of macro structure including end cracking

端部のひずみ量や再現される終端割れの長さなどは実ワークと比較して大きい傾向にあり、実体を模擬した検討とは言いにくい。そこで、大阪府立大学との共同研究によって、同大学が保有する大規模解析が可能な理想化陽解法FEM⁵⁾を用いた熱弾塑性解析に基づき凝固割れについて検討を行った。

解析では降温過程においてBTRに作用する塑性ひずみ増分（以下、BTR塑性ひずみ増分という。図8）を割れ発生の指標としている⁶⁾。

板厚40 mm、板幅750 mm、溶接長5,000 mmとし、溶接施工条件に4電極の片面サブマージアーク溶接とタック溶接（仮付溶接）を加えた解析モデルにおける解析結果を図9に示す。BTR塑性ひずみ増分はタック溶接の溶接方向に対して後方で高く、継手終端部に近づくにつれて増加し、溶接速度が遅くなるにしたがって減少する傾向を示している。つまり、溶接速度は小さく、継手終端部の連続したタック溶接を施すことでひずみを抑制できることが示唆された。シミュレーション解析で得られた溶接施工上の諸因子とBTR塑性ひずみ増分の関係を表1に示す。

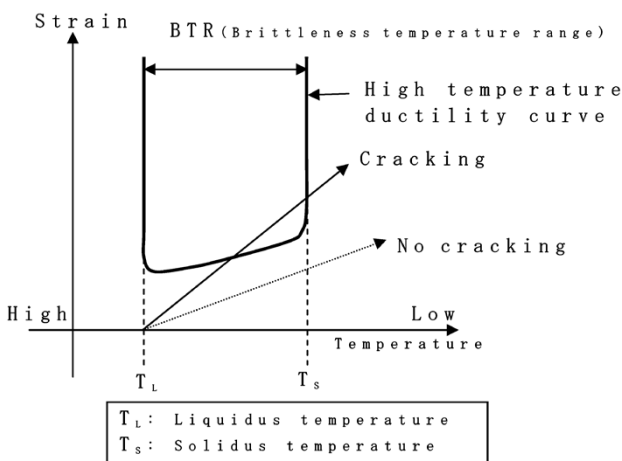


図7 溶接中における凝固割れのメカニズム
Fig.7 Mechanism of solidification cracking during welding

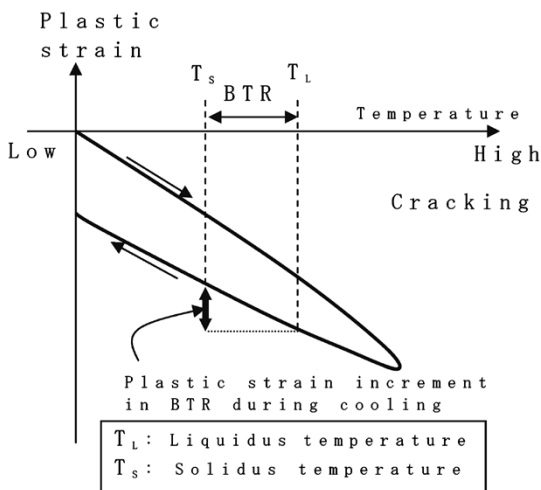


図8 冷却過程におけるBTR塑性ひずみ増分の略図
Fig.8 Schematic illustration of plastic strain increment in BTR during cooling

2.3 実溶接による検証

図10に実溶接における継手終端部の変形測定方法を示す。また、測定された変位からひずみ速度を求め（図11）、シミュレーションで得られたひずみを抑制するパラメータとの関係を調査した。その結果、連続したタック溶接を施し、溶接速度を下げ、かつ終端タブ板サイズを大きくすることでひずみを小さく抑制できた（図12）。また、実溶接において、シミュレーション結果と同一傾向であることが確認された。

図13はシミュレーション結果と実溶接の結果から得られた割れ発生のクライテリアである。溶接施工条件の

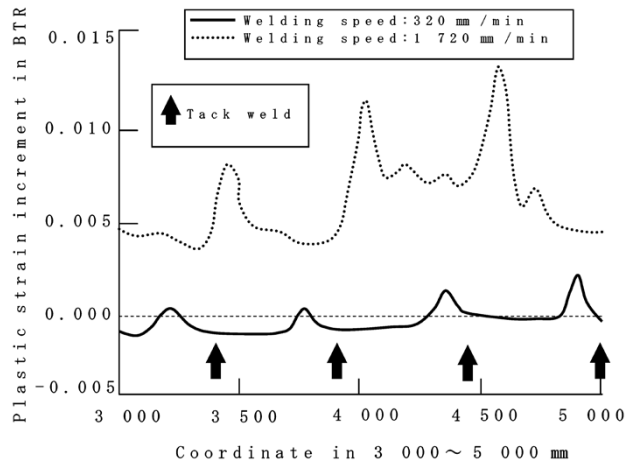


図9 BTR塑性ひずみ増分の溶接速度、タック溶接位置の関係
Fig.9 Relationship between plastic strain increase in BTR and welding speed and tack weld position

表1 終端割れに及ぼす諸因子の影響
Table 1 Factor's effect of end crack

Factor	Plastic strain Increment in BTR		Protective Effect on end crack
	High	Low	
Plate width	Narrow → Wide		Effective (high)
Welding speed	Fast → Slow		Effective (high)
Tack weld pitch	Long → Short		Effective (high)
Tab plate width	Narrow → Wide		Effective (middle)
Joining strength plate to tab plate	Weak → Strong		Effective (low)

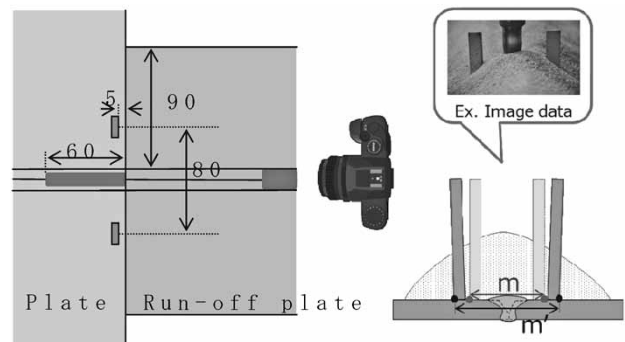


図10 変位量の測定方法
Fig.10 Measurement method of distortion (m-m)

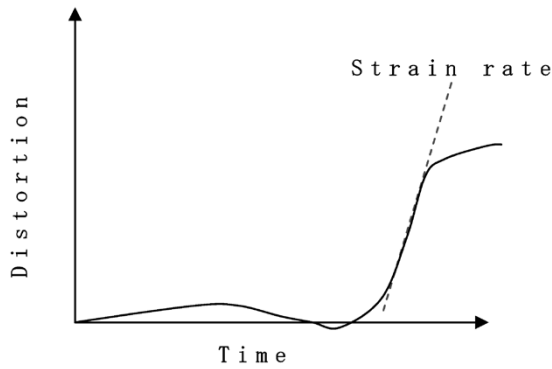


図11 ひずみ速度の定義
Fig.11 Definition of the strain rate

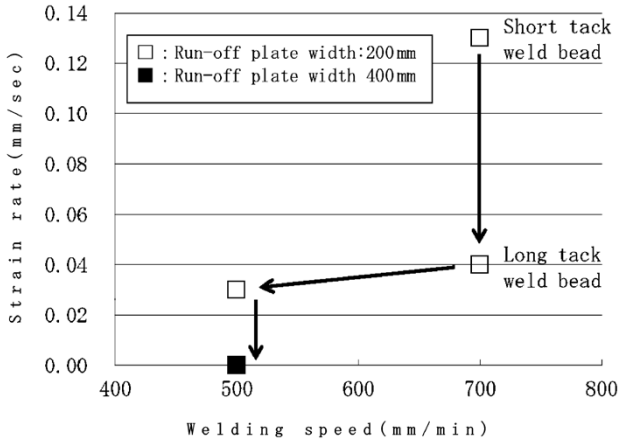


図12 ひずみ速度とタック溶接長、タブ板幅、溶接速度の関係
Fig.12 Relationship between strain rate and tack weld length and run-off plate width and welding speed

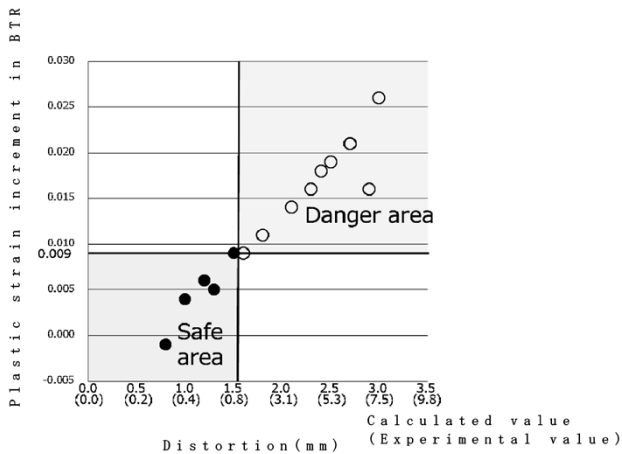


図13 終端割れ発生クライテリア
Fig.13 Criteria of end cracking

調整でひずみ量を最小限に抑制し、終端割れを防止できる可能性が示唆された。

本検討の成果により、永遠の課題と言われていた終端割れが、近い将来解決されるものと期待される。

3. 片面サブマージアーク溶接施工の取り組み

3.1 RFTM片面サブマージアーク溶接の適用板厚拡大

1.2.1項では、RFTMの短所として大電流となる厚板の溶接で裏ビード形状が不安定になることを挙げた。近年は、船体の軽量化に伴って板厚の異なる継手の増加、客

船などの薄板から大型コンテナ船に代表される極厚板の継手に対応した溶接施工法の開発ニーズがある。そこで、鋼板裏面の密着性に優れたRFTMを基本に、溶接材料特性と溶接施工条件などから適用板厚範囲を最少板厚5 mm、最大板厚40 mmに拡大できる溶接施工法を当社は開発している。

3.1.1 薄板施工法

客船には5 mm前後の板厚が多用され、溶接で発生するひずみの抑制が最大の課題となる。ひずみは溶接入熱と大きく関係し、溶接入熱を低く抑えることが極めて重要となる。通常、片面サブマージアーク溶接はポンドフラックスが広く適用されている。ポンドフラックスは、配合された原料に粘結剤を添加して造粒した後に焼成されたものであり、融点は比較的高く、必然的に溶接入熱は高くなる。いっぽう、とくに化工機分野などで適用率が高い溶融フラックスは、原料を溶解し、凝固させた後に粉碎したものである。このため、融点が低く、低電流域の溶接作業性や高速溶接性に優れるとともに、溶込みが深いという特長がある。溶融フラックスの組成と組み合わせるワイヤの径を最適化することにより、溶接入熱1.1 kJ/mm程度と極低入熱で低ひずみとなる溶接施工法を開発している。図14は本施工法を板厚5 mmに適用した例である。

3.1.2 厚板施工法

RFTMの短所である厚板の溶接品質安定化に対しては、電源特性においてはRFTMの基本となる先行する電極(第1電極)の極性を直流棒プラス(DCEP)から溶込みが浅くなる特徴がある直流棒マイナス(DCEN)に変更する。これにより、電流変動がおよぼす溶込み深さへの影響が鈍感となり、大電流溶接においても安定した裏ビードが形成される。また、裏ビードを第1、第2電極で形成させる従来の電極配置を大幅に見直した。第1電極のみで裏ビードを形成させ、第2、第3電極で耐割れ性やスラグ巻き込みを防止する。これに加えて、第1電極で形成された裏ビードに影響を与えない配置および溶接条件を最適化することで、安定した裏ビード形状と良好な内部品質が確保される。

4電極を用いたRFTMを実施した板厚40 mmにおける断面マクロ組織を図15に示す。図16は、溶接板長さ1,500 mm内の安定領域を対象に、レーザ変位計を用いて裏ビードの余盛高さを計測した結果である。板厚35 mmおよび40 mmにおける余盛高さの変動幅は1 mm

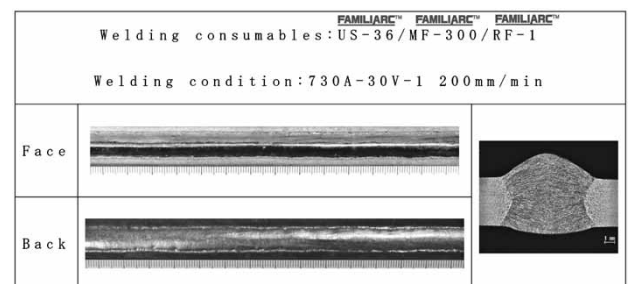


図14 板厚5 mmにおけるビード外観と断面マクロ組織
Fig.14 Bead appearance and macro structure of 5 mm thickness

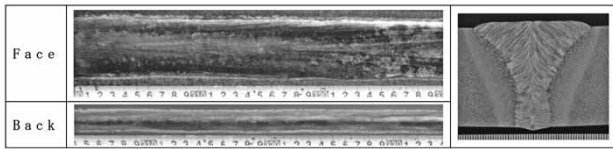


図15 板厚40 mmにおけるビード外観と断面マクロ組織
Fig.15 Bead appearance and macro structure of 40 mm thickness

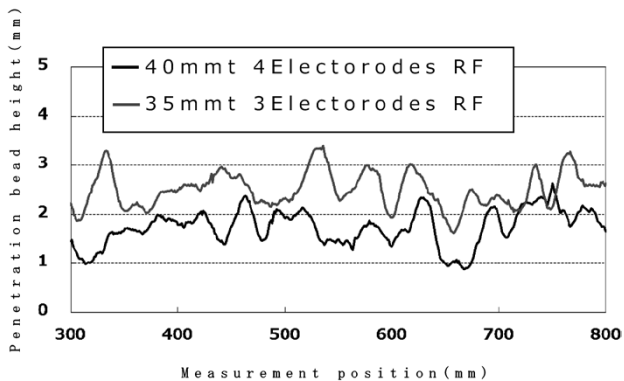


図16 レーザ変位計による裏ビード高さの測定結果
Fig.16 Measurement results of the penetration bead height with a laser displacement gauge

程度と本施工法は極めて安定しているといえる。

3.2 デジタル電源による波形制御技術

サブマージアーク溶接では、使用する極性によってフラックスやワイヤの溶融量、あるいは溶込み深さが変化する。DCENはDCEPに比較してワイヤ溶融量は増加し、溶込み深さは浅くなる。いっぽう、交流はDCENとDCEPとの中間に位置することが知られている⁷⁾。また、交流極性を多電極で用いた場合、近接する電極の位相差で溶接ビードや溶込み形状が変化する。

これらの極性や位相差は、最近のデジタル電源を用いてコントロールできる。このため、サブマージアーク溶接の電流、電圧、溶接速度以外で溶接品質を安定・向上させるパラメータとして期待される。

3.3 サブマージアーク溶接の可視化技術

前述のとおり、サブマージアーク溶接はフラックス中でアークを発生させるため、アーク現象を直接観察することができないのは自明である。このため、溶接欠陥が発生した場合は、溶接施工条件、環境、ビード外観などの情報と、過去の経験あるいは再現実験などの結果から原因を推定して対策を講じることになる。いっぽう、炭酸ガスアーク溶接などは、ハイスピードカメラなどを駆使して、溶滴移行や溶融プールの状態などを観察することができる。これらに基づき、溶滴移行の制御による低スパッタ化⁸⁾や高速すみ肉溶接施工⁹⁾が開発されている。

最近では、溶接のX線透過画像をハイスピードカメラで撮影する装置を用いることによって、サブマージアーク溶接の溶滴の生成や移行、アーク空洞の形成状態など

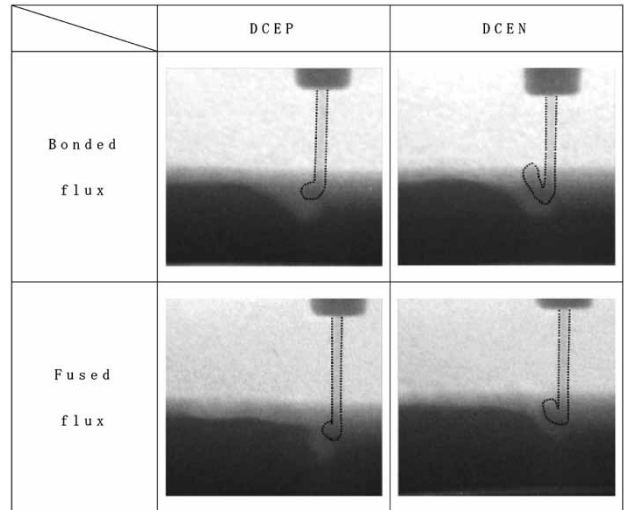


図17 高輝度X線透過撮影システムを用いたワイヤ溶融現象の観察結果
Fig.17 Observations of wire melting phenomena with high luminance X-ray transmission imaging system

を観察できるようになっている。図17に観察例を示す。図17では、フラックスの種類と電源極性によって溶滴の大きさが異なることがうかがえる¹⁰⁾。サブマージアーク溶接の可視化により、フラックス組成の役割や電源極性あるいは多電極溶接時の相互干渉の度合いなどをより深く理解することができ、溶接品質の向上に加え新たな施工法や溶接材料開発につながると考えられる。

むすび=サブマージアーク溶接は他の溶接施工法に比べて、溶滴移行や溶融池の挙動を捉えることが困難である。また、溶接不良が発生した際の調整は溶接材料、装置、施工条件など多岐にわたる。これらの理由から、これまでは経験則が大きなウェイトを占めていた。本稿で紹介した可視化技術やデジタル電源などを活用し、アーク現象の解明と最適な波形制御を組み合わせることにより、新しい施工技術やさらなる高能率、高品質化につながる開発が重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 長谷 薫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.70-73.
- 2) 村西良昌. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.27-31.
- 3) 細井宏一ほか. 溶接学会誌. 2009, 第78巻, 第6号, p.41-47.
- 4) 奥田直樹ほか. 溶接学会誌. 1982, 第51巻, 第4号, p.23-29.
- 5) 生島一樹ほか. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2009-11, p.509-516.
- 6) 柴原正和ほか. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2014-12, p.247-254.
- 7) 田中和雄. 神戸製鋼所 ぼうだより. 技術レポート. 1992, Vol.32, No.264, p.8-14.
- 8) 横田順弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.42-47.
- 9) 古川尚英. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.1, p.22-26.
- 10) 佐々木誉史ほか. 溶接学会全国大会講演概要. 2015, 第97集, p.440-441.

PDFにて本記事をご覧の方へ

図10にある動画マーク  をクリックいただくと動画が再生されます。