

特集：最近のサブマージアーク溶接技術

## サブマージアーク溶接における 高能率施工法と最新技術

株式会社 神戸製鋼所  
溶接事業部門 技術センター  
溶接システム部 杉山 大輔

### 1. はじめに

サブマージアーク溶接（以下、SAW と略する）の原理は、**図1**の模式図に示す通り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動供給し、ワイヤの先端と母材との間に連続的にアークを点じ、ワイヤ、フラックス、母材を溶融して接合する方法である。その特徴を**表1**に示す。最大の長所は**図2**に示すように高電流条件による高溶着性であり、太径ワイヤと鉄粉を含有するフラックスを組合せることでさらなる高溶着が実現できる。

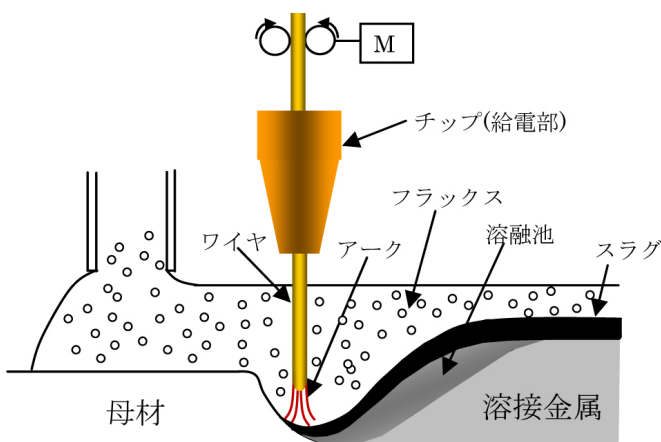


図1 サブマージアーク溶接の原理

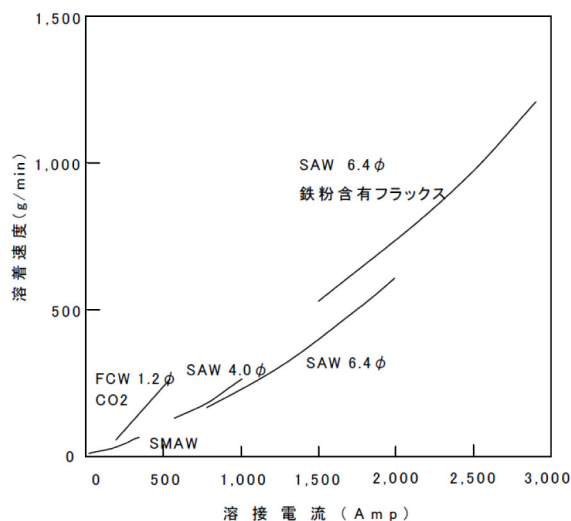


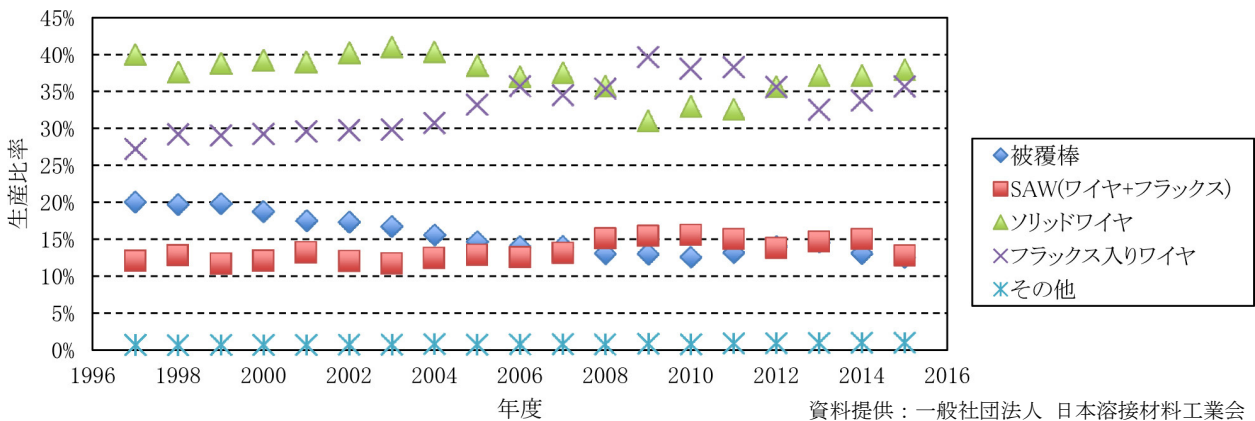
図2 溶接電流と溶着速度の関係

表1 サブマージアーク溶接の特徴

長所	短所
<ul style="list-style-type: none"> <li>●大電流溶接が可能であるため高溶着が可能</li> <li>●多電極による高速溶接が可能</li> <li>●有害光線、スパッタ、ヒュームがほとんど発生しない</li> <li>●風の影響を受けない</li> <li>●美しいビード外観が得られる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●設備が大型となりやすく設置スペースが必要</li> <li>●セッティングに時間を要する</li> <li>●アークが見えないため、溶接が終了するまで溶接内部の品質確認ができない</li> <li>●発生するスラッグ量が多い</li> <li>●溶接姿勢が下向、水平、横方向に限定される</li> </ul>
など	など

SAW は、高溶着すなわち高能率施工法と言えるが SAW 材料の出荷数量を見ると全溶接材料の 12～15%と過去から現在に至るまで大きな変化は見られない（図 3）<sup>1)</sup>。これは、既に専用設備が設置され SAW に代わる高能率・高品質な溶接施工などが無い、溶接姿勢が限定される、装置の初期投資が大きいことなどが要因として推測される。

本稿では、造船業界及び建築業界で広く採用されている SAW の特長を最大限に生かした溶接施工法と最近の施工技術や各種課題への取組、さらに最新の装置機能やアーク現象の観察手法について紹介する。



（出典先：溶接情報センター，溶接関連統計，溶接材料年間出荷量の推移）

図 3 溶接材料年間出荷割合の推移

## 2. 造船業界における適用例と各種課題への取組

船体の大型化に伴い、それまで板継溶接で適用されていた両面 SAW では、建屋の制約で反転できないことや、反転するためのクレーン待ちなどの問題から片側から一層の溶接で仕上げる施工法の開発ニーズが高まり、1964 年に SAW の片面溶接施工法として FCB<sup>TM</sup> (Flux Copper Backing)と RF<sup>TM</sup> (Resin Flux)がほぼ同時に開発され、現在も国内外で広く採用されている<sup>2),3)</sup>。最新型片面溶接装置及びレイアウト一例を図 4、図 5 にそれぞれ示す。ここでは、両施工法の特長と片面 SAW の各種課題への取組について紹介する。



図 4 最新型片面溶接装置例

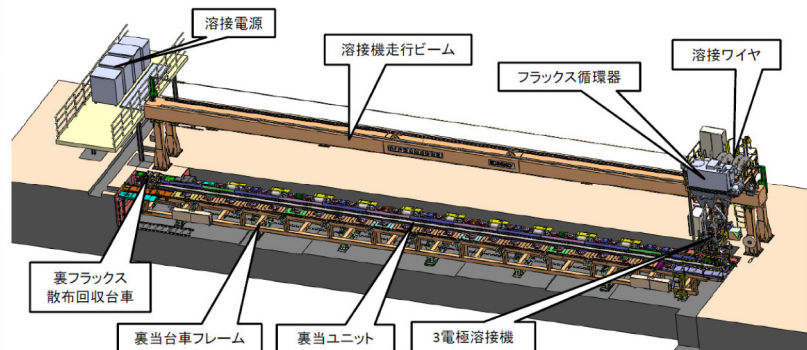


図 5 片面溶接装置全体レイアウト例

(1) FCB™、RF™の特長

FCB™の模式図を図6に示す。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り、大電流を使用する厚板への適用性に優れている反面、溶接ひずみが多い薄板には密着性の確保の面から適用に多少の難がある。

RF™の模式図を図7に示す。下敷フラックス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り、銅板裏面の段差やひずみに対する追従性に優れている反面、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易い。

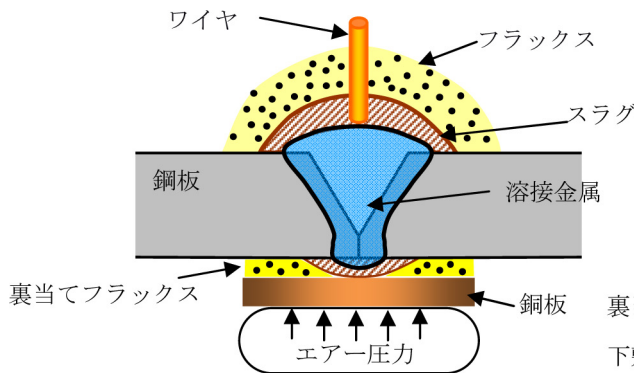


図6 FCB™の模式図

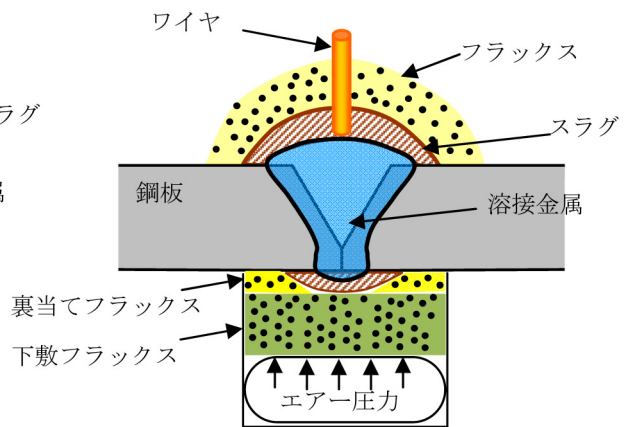


図7 RF™の模式図

(2) 適用板厚

FCB™は同板厚同士の溶接継手において4電極を用いることで図8に示すように板厚40mmまで適用が可能であるが、図9に示すような板厚の異なるいわゆるサーピン継手に対しては、裏当ての密着性を確保できる板厚差に限界がある。

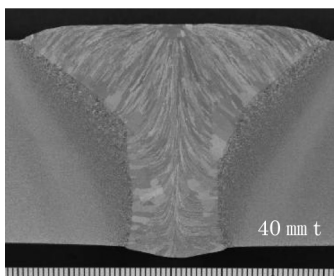


図8 FCB™の断面マクロ組織例

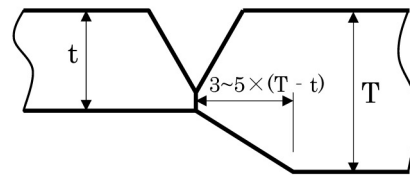
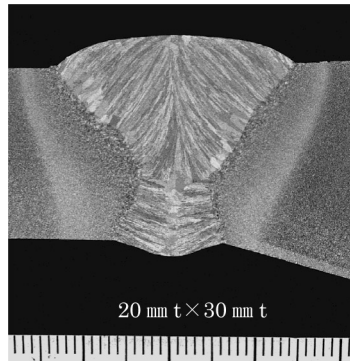
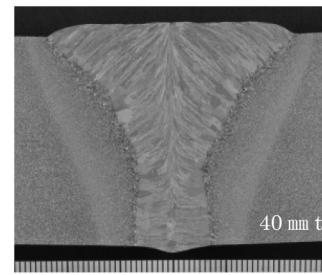


図9 サーピン継手

一方、RF™は、裏当て部が粉体のみで構成されているため、図10(a)の断面マクロ組織で示す通りサーピン継手などの鋼板裏面の形状に対する密着性はFCB™に比較して高いものの、大電流溶接では裏ビードが安定しにくく、適用板厚は25~30mm程度に限定されていた。最近のRF™の施工条件見直し(電極配置や溶接条件などの最適化)によって板厚35~40mmまで適用できる可能性を見出し、さらなる溶接品質の向上が期待される。図10(b)には4電極を用いたRF™片面SAWの板厚40mmにおける断面マクロ組織を示す。



(a) サーピン継手



(b) 板厚 40mm

図 10 RF™ の断面マクロ組織例

### (3) 溶接材料の開発

片面 SAW は、厚板における高溶着性や溶融スラグの吹上抑制、あるいは表ビード形状の安定化を目的に<sup>4)</sup>、鉄粉を含有したボンドフラックスが広く適用されているが、鉄粉が原因で表ビードに図 11 に示す微小な鉄粒が発生するという課題がある。

最近では、船体の長寿命化や保守作業の容易化を目的に全船舶のバラストタンクおよびバルクキャリアの二重船側部を対象に船体の防食効果を高めるため、一定範囲内での塗装膜厚の確保を要求しているほか、塗装性を阻害するような、例えば溶接時に発生するスパッタやビード表面汚れの除去実施の要件が定められている (IMO 決議 MSC. 215 で採択された塗装基準)<sup>5)</sup>。この塗装基準の改定に伴い、従来のフラックスでは表ビード表面に付着した鉄粒を除去しなくてはならず、グラインダー等の作業が増えることから、高品質な溶接材料のニーズが高まった。

この原因は、フラックス中の鉄粉が溶融スラグ中で凝集して大きな金属粒を形成して沈降し、ビード表面が溶融状態であれば溶接金属となるが、凝固状態であれば表面に付着して鉄粒になるためと推定された。この問題に対しては、スラグ粘度や鉄粉の溶融スラグ中での凝集を抑制するスラグ組成の最適化などを行い、図 12 に示すビード外観のように、鉄粒発生が大幅に改善されたフラックスが開発されている<sup>6)</sup>。

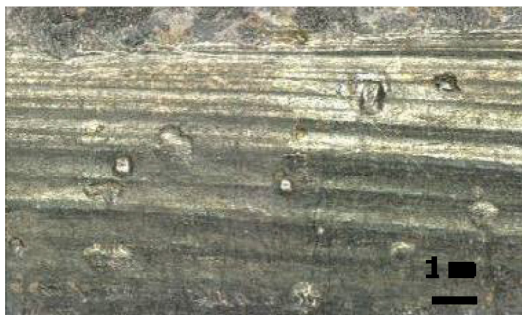


図 11 ビード表面に発生する鉄粒例



図 12 開発フラックスのビード外観例

### (4) 終端割れ防止技術

片面 SAW には、実用されてから現在までに解決できていない溶接継手の終端部に発生する鋼板の回転変形に起因した凝固割れ、いわゆる「終端割れ」の課題がある。溶接継手終端部の変形挙動を図 13 に示す。先行する第 1 電極がタブ板に乗り上げた直後に発生した大きな変形が、凝固直前の溶接部に溶接線垂直方向の引張方向に急激に働き、図 14 に示す割れが生じる。

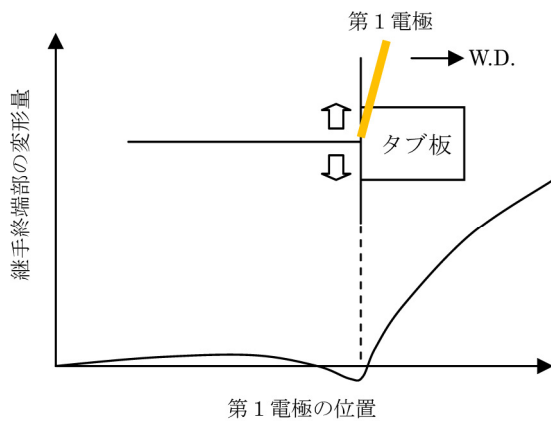


図 13 溶接継手終端部の変形挙動

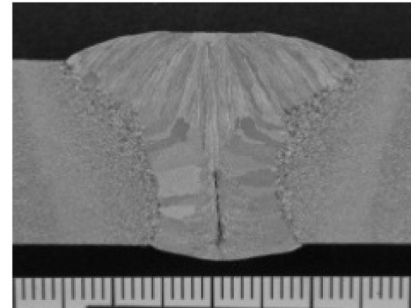


図 14 終端割れの一例

終端割れ防止策には表 2 に示す幾つかの方法が提案されているが、いずれの防止方法も一長一短があり、溶接作業効率を低下させず、かつ終端割れを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。

これまでの終端割れ防止技術の検討は、実験室で可能な鋼板サイズに限定されるため<sup>7)</sup>、測定される継手終端部の変位量や再現される終端割れの長さなどは実ワークに比較して大きい傾向にあり、実構造物を模擬した検討とは言い難い。近年では、節点数が数万を超えるような大規模な溶接解析に有効な理想化陽解法 FEM が開発されており、実ワークを想定した大規模構造物のシミュレーションが可能となっている<sup>8)</sup>。このシミュレーション解析技術を用いた片面 SAW の凝固割れの解析では、各種溶接施工パラメータを BTR (凝固脆性温度域) 塑性ひずみ増分で比較した結果、鋼板の幅が小さいほど、あるいは溶接速度が速いほど、大きな引張の BTR 塑性ひずみ増分が発生する結果が得られており、溶接施工条件の調整で継手終端部の変形量を抑制し、終端割れを防止できる可能性が示唆された<sup>9)</sup>。

表 2 終端割れ防止方法の一例

防止方法	防止効果	問題点
クレータ会合法	高	・ 2 回溶接が必要 ・ 会合部の手直し必要
スリットタブ法	薄板：高 厚板：低	・ 比較的大きなタブ板が必要 ・ スリット長さの管理要
シーリングカスケード法	高	・ シーリングカスケード溶接が必要 ・ 100%手直しが必要

### 3. 建築業界における適用例と各種課題への取組

建築構造物では、四面ボックス柱の角溶接やビルト H の下向すみ肉溶接に SAW が広く適用されている。ここではそれぞれの溶接の特長と最近の技術について紹介する。

#### (1) 四面ボックス柱の角溶接

四面ボックス柱 (図 15) の SAW 施工法は、ビルの高層化に伴う厚肉化やフロアスペースの確保、

生産性の向上などの年代毎のニーズとともに変化を遂げている。

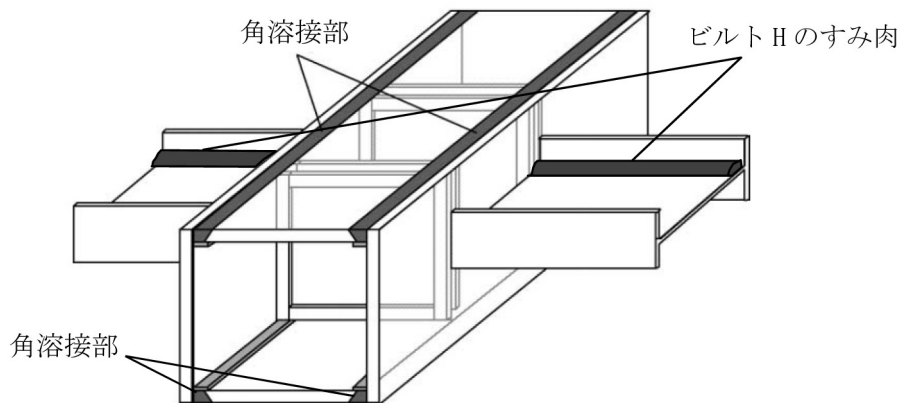


図 15 四面ボックス角継手とビルトHのすみ肉溶接箇所

1970年頃は、鉄骨部材に四面ボックス柱を適用するケースが少なく、かつ板厚が32mm程度であったため、炭酸ガスアーク溶接や小入熱のSAWが適用されていた。1980年頃には、厚肉化と加工量の増加に対応する高能率施工のニーズが高まり、溶着効率を高める鉄粉を含有したボンドフラックスと大入熱施工を組合せて板厚40mm程度まで一層溶接で仕上げる施工法が開発されている。1990年頃には、超高層化やフロアスペースの拡大に伴い厚肉化が進み、それに対応した大入熱溶接でも安定したビード形状が得られる溶接材料、溶接施工法が開発された。フラックス組成と溶接金属の機械的性質が確保できる合金成分の最適化によって、板厚60mmまで1層1パスで仕上げる事が可能になった。図16には板厚50mmの断面マクロ組織を、図17には専用装置による溶接状況を示す。

最近では、60mmを超える厚肉化が更に進み1層1パスで溶接が可能な各種施工法が検討されている。一つの方法は、開先角度を小さくすることで板厚70mmまで1層1パス溶接が可能なSAW法<sup>10)</sup>が、もう一つの方法には、四面ボックス柱を縦に配置し、2電極のエレクトログラスアーク溶接によって板厚80mmまで1層1パス溶接が可能な施工法である<sup>11)</sup>。

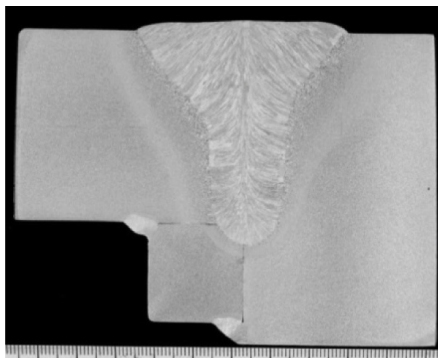


図 16 四面ボックス角継手の断面マクロ組織例

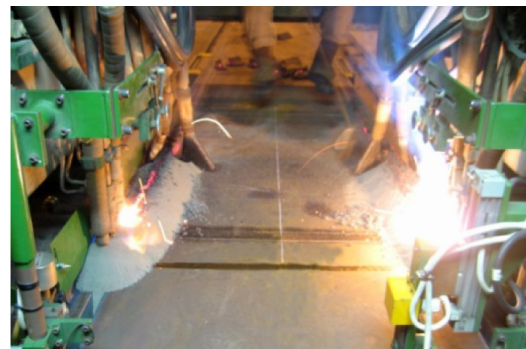


図 17 四面ボックス角継手の溶接状況

## (2) ビルトHのすみ肉溶接

建築構造物の柱や梁には、H形鋼やフランジとウェブになる鋼板を下向すみ肉溶接で組み立てて製作するビルトH(図15)が広く用いられている。ビルトHのすみ肉溶接では、溶込みが深いSAWの特長を生かしウェブ板厚25mmまで開先を取らずに必要な溶込み深さを確保することができる。ビ

ルト H を多用した特長的な建築構造物には、2010 年 10 月から運用が開始された羽田国際空港 D 滑走路栈橋部の上部ジャケットが挙げられる。

上部ジャケットの設計では、100 年間の超長期の疲労耐久性確保のため、溶接については完全溶込みの確保とアンダカットや止端形状の許容値、内部品質では、一般構造物における許容値の 2 倍程度厳しい値が要求されていた<sup>12)</sup>。本工事は短納期で、かつ溶接工数が多いため 1 パス施工が可能な 2 電極を用いた SAW が採用され、同時に厳しい要求に対応した専用の溶接材料が開発されている<sup>13)</sup>。断面マクロ組織の一例を図 18 に示す。

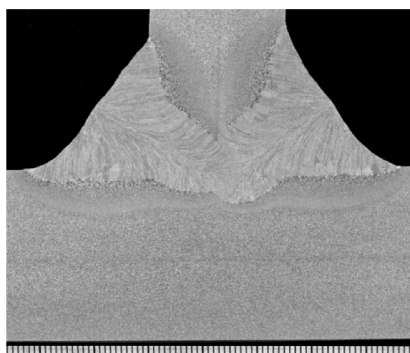


図 18 ビルト H のすみ肉溶接(完全溶込み)の断面マクロ組織例

#### 4. SAW 装置の自動化技術<sup>14)</sup>

SAW は自動溶接と称されているものの、安定した溶接品質を確保するためには、溶接中の監視や熟練の技術が必要になる場合が多く、完全な自動化とは言い難い。最近では、溶接品質の安定化や省人化あるいは作業効率向上のための様々な自動化技術が実装されており、その一部を紹介する。

##### (1) 溶接条件のプリセット機能

これまで溶接条件は、溶接オペレータ個人の経験に基づいたデータとして保有されることが多く、技能継承を難しくする要因の一つとなっている。

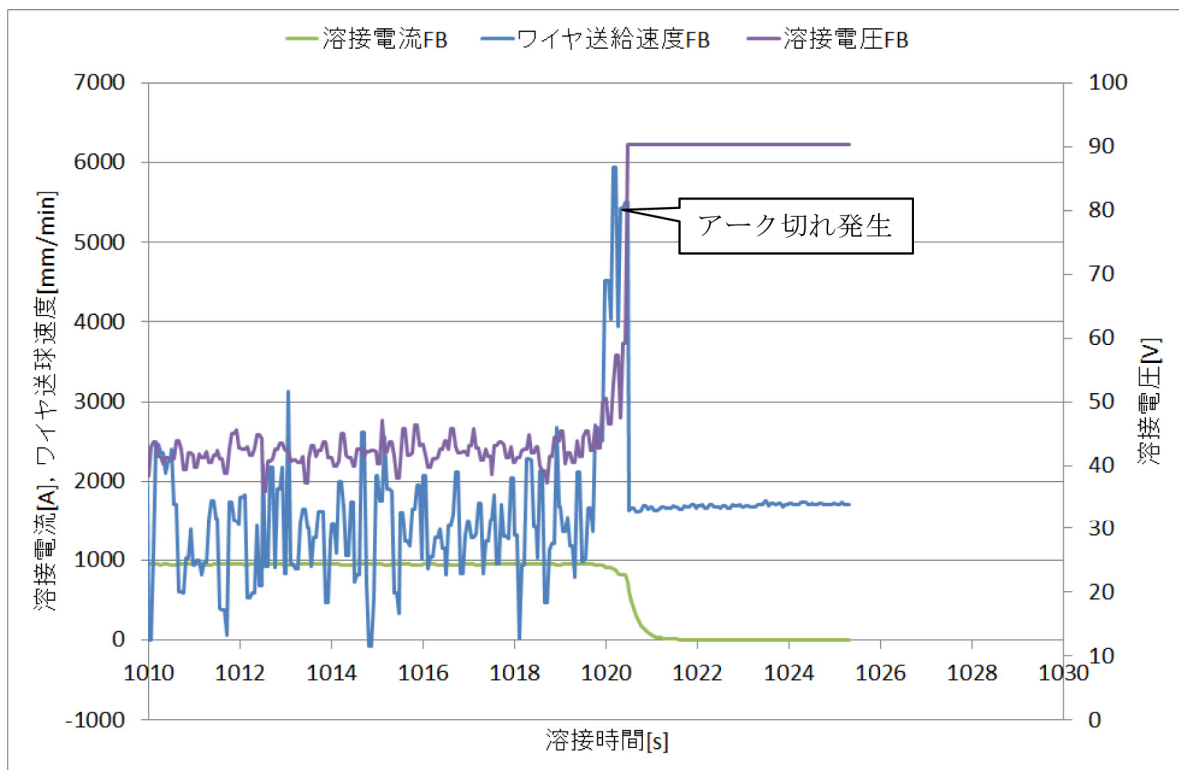
本機能は、あらかじめ板厚毎に溶接条件データを格納すれば、ワンタッチで呼び出して使用でき、開先精度が高い場合は溶接オペレータによって溶接条件を変えることなく、安定した溶接品質を得ることができる。格納された溶接条件データは表計算ソフトで作表でき、さらに表計算ソフト上で変更した溶接条件を溶接装置へ転送することが可能となっている。

##### (2) ロギング機能

通常の溶接作業では、溶接中の溶接電流やアーク電圧は溶接装置のメータを目視で確認するしかなく、ビード外観の異常や内部欠陥が発生した場合に原因を明確にできない要因となっている。短期間であれば専用の計測機器やレコーダを取付けることで対応可能であるが、長期に渡る計測は現実的ではない。

本機能では、溶接した全てのデータを収集することが可能であり溶接条件や溶接中の溶接電流やアーク電圧だけでなく、ワイヤ送給速度なども記録し、ログデータとして CSV ファイルを生成して保存する機能である。近年、品質保証におけるトレーサビリティのニーズは高く、これに対応した機能と言える。図 19 は、アーク切れが発生した時の溶接電流・アーク電圧・ワイヤ送給速度のフィードバックデータをグラフ化したものである。アーク切れ直前にアーク電圧が上昇し、それに追従して

ワイヤ送給速度を上昇させ設定電圧となるように制御されているが、アーク電圧の上昇を抑制できていないことから、ワイヤのチップ融着などによる送給不良が原因と推定でき、トラブル発生時の原因の明確化や対策にも大いに役立つ機能と言える。



(出典先：溶接技術，造船・建築鉄骨分野におけるアーク溶接の自動化技術，2015 Vol.63 p.53-60)

図 19 溶接状況ロギング機能活用例（アーク切れ発生時の一例）

### (3) マルチオペレーション機能

複数の溶接装置を保有する場合において、1台の溶接装置でもう一方の溶接装置の溶接電流・アーク電圧をモニターしつつ、溶接条件の微調整や溶接開始・停止までも操作することを可能とした機能であり、一人のオペレータが複数台を管理でき省人化に有効である。

### (4) トラブルシューティング

溶接の途中で溶接装置が異常停止した際には、停止した原因(例えばアーク切れや機器の異状など)と復旧するための確認項目が表示される。このため復旧にかかる時間は短く、さらに経験の浅いオペレータでも対応が可能である。

## 5. SAWの可視化技術

SAWは前述のとおり、フラックス中でアークを発生させるためアーク現象を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対策することに限定される。一方、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で、溶滴移行の制御による低スパッタ化<sup>15)</sup>や高速すみ肉溶接施工<sup>16)</sup>が開発されている。

SAW においても炭酸ガスアーク溶接の様にアーク現象を観察できれば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繋がると考えられる。

ここまで実施工に関する最近の溶接技術などを紹介してきたが、最後に SAW の基礎的な研究として取組みが盛んな「可視化技術」を紹介する。

### (1) 直接観察法<sup>17)</sup>

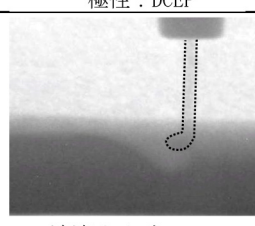
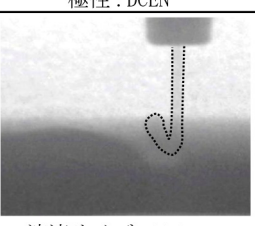
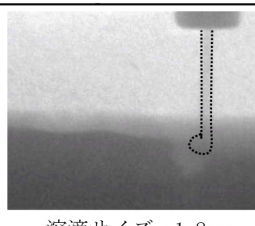
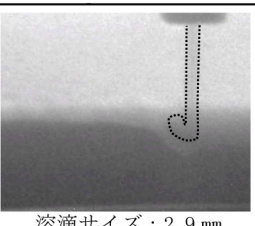
母材端部にガラス板を設置し、ガラス板越しに高速度カメラを用いてアーク現象を直接観察する手法である。溶滴移行形態は自由移行であり、離脱時に短絡を伴わないため電圧変動は小さいが、アーク電流変動は炭酸ガスアーク溶接に比べ、大きいことが観察されている。

### (2) ハイスピードカメラを用いたサブマージアーク溶接の溶滴観察<sup>18)</sup>

溶接線方向と垂直になるように薄い鋼板でトンネルを作り、ガスで充満させた状態のトンネル内をアークが通過する時にハイスピードカメラで溶滴移行を観察する方法である。

### (3) X 線透過装置とハイスピードカメラを用いた溶滴移行の観察<sup>19)</sup>

X 線透過画像をハイスピードカメラで撮影する手法で溶滴の生成や移行、アーク空洞の形成状態などを観察することができ、**図 20** に示すように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確認されている。

	極性：DCEP	極性：DCEN
焼結 フラックス	 溶滴サイズ：2.6 mm	 溶滴サイズ：5.9 mm
溶融 フラックス	 溶滴サイズ：1.8 mm	 溶滴サイズ：2.9 mm

**図 20 X 線透過装置による溶滴移行観察の一例**

## 6. おわりに

SAW は他の施工法に比較して能率のよい方法である一方、溶接中のアークの状況が見えないため、開先の精度不良や溶接条件の設定ミス、溶接装置の溶接電流・アーク電圧・溶接速度のメータ不良などが原因で全線手直しとなる可能性もある。溶接品質の安定化やトラブル発生時の早期解決には、溶接を開始する前に開先精度、開先内の汚れ、適用する鋼種や溶接材料の銘柄などの確認を実施し、溶接条件と共に記録することが肝要である。

最後に、本稿で紹介した SAW 技術が、読者の皆様にお役に立てれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 溶接情報センター, 溶接関連統計, 溶接材料年間出荷量の推移  
<http://www-it.jwes.or.jp/statistics/statistics3.jsp>
- 2) 長谷ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.50 No.3(Dec.2000), p.70
- 3) 村西: R&D 神戸製鋼技報, Vol.63 No.1(Apr.2013), p.27
- 4) 坂口ほか: 川崎製鉄技報, Vol.26, No.4 (1994), p.163
- 5) 山口: 溶接学会誌, Vol.81, No.6, (2012), p.51
- 6) 杉山ほか: 溶接学会全国大会講演概要 第95集 (2014-9), p.94-95
- 7) 奥田ほか: 溶接学会誌, 第51巻(1992)第4号、p.23-28
- 8) 生島ほか: 溶接構造シンポジウム講演論文集(2009年11月) 『理想化陽解法 FEM による溶接力学解析法の開発』
- 9) 今ほか: 溶接構造シンポジウム講演論文集(2014年12月) 『溶接時における端部割れにおよぼす諸因子の影響に関する力学的検討』
- 10) 吉村ほか: 駒井ハルテック技報 Vol.4 2014, p.46 - 49
- 11) 小林ほか: 駒井技報、Vol.27, p.19-26, 2008.6
- 12) 木村: 溶接学会全国大会講演概要 第88集 (2011-4), p.S25-S27
- 13) 村西: 技術がいとど, 技術レポート(Vol.47 2007-1), p.1-6
- 14) 小西: 溶接技術, 造船・建築鉄骨分野におけるアーク溶接の自動化技術, 2015 Vol.63 p.53-60
- 15) 横田ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.63 No.1(Apr.2013), p.43
- 16) 古川: R&D 神戸製鋼技報, Vol.63 No.1(Apr.2013), p.23
- 17) 笠野ほか: 溶接学会全国大会講演概要 第90集 (2012-4), p.102-103
- 18) P.F.MENDEZ ほか: WELDING JOURNAL / OCTOBER VOL.94
- 19) 佐々木ほか: 溶接学会全国大会講演概要 第97集 (2015-9), p.440-441

<略歴>

### 杉山 大輔 (すぎやま だいすけ)

---

2003年 横浜国立大学 工学部 物質工学科 卒業  
2005年 横浜国立大学 大学院 機能発現工学 専攻 修了  
2005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  
2015年 同社 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部配属  
現在に至る