

特集：建築関連技術の最新動向

最新のデジタルサブマージアーク溶接システム

株式会社ダイヘン
馬場 勇人

1. はじめに

サブマージアーク溶接は厚板向けの溶接方法として広く知られており、幅広い分野に適用されている。図1に示すように、サブマージアーク溶接用ワイヤ・フラックスの国内需要量に占める業種別の割合は鉄骨・橋梁が約4割を占めており¹⁾、溶接組立H形鋼（ビルトH）のすみ肉溶接や溶接組立箱形柱（四面ボックス柱）の角溶接、鋼床版の溶接等にサブマージアーク溶接が適用されている。2電極の溶接システムが広く普及しており、溶接安定性に優れる定電流特性または垂下特性の交流溶接電源が用いられる場合が多いが、深い溶込みを得るために、先行電極に定電圧特性の直流溶接電源が用いられる場合もある。

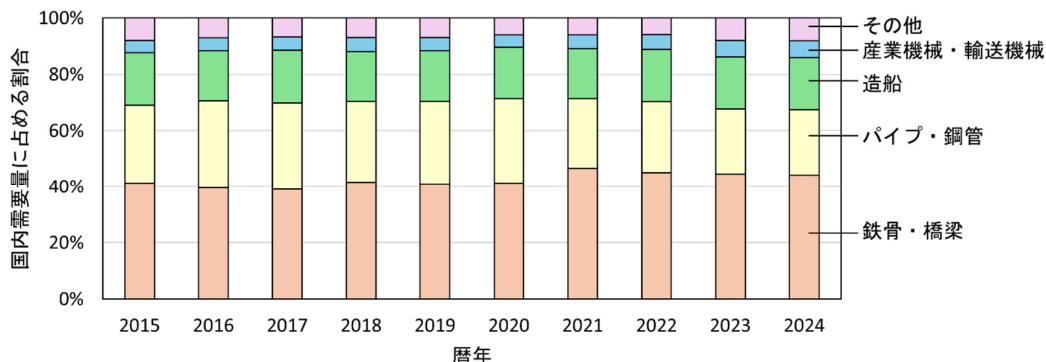


図1 サブマージアーク溶接用ワイヤ・フラックスの国内需要量に占める業種別の割合¹⁾

1930年代に開発されたサブマージアーク溶接は、被覆アーク溶接に次ぐ長い歴史を持つアーク溶接方法である。初めに実用化されたのは垂下特性の交流溶接電源であり、その後1970年代には定電圧特性の直流溶接電源が開発された。1990年代には、垂下特性よりも出力電流の安定性に優れる定電流特性の交流溶接電源も市場投入されたが、コスト面で優れる垂下特性電源の人気も根強く、用途に応じて使い分けられている。

2000年代に入ると、海外メーカーのデジタル溶接システムが登場したが、我が国におけるデジタル機の出荷台数は全体の1割前後に留まっていたようである²⁾。この背景には、当該のデジタル機の容量が比較的小さく適用環境が限られていたことに加えて、当時は今日ほどは溶接オペレータの不足や技量低下が深刻でなく、アナログ機の運用にさしたる支障がなかったという事情もあるように思われる。

しかしながら、近年、特に 2020 年代に入ってから、溶接オペレータの世代交代・若年化が著しく、サブマージアーク溶接に必要な技量の確保がいよいよ難しくなりつつある。サブマージアーク溶接は自動溶接に分類されるが、逐次の出力確認や微調整、溶接開始時のスチールウールのセッティング、入力結線の繋ぎ換えによる電極間位相差の調整など、溶接オペレータの介在を要する様々な工程が存在し、取り扱いには十分な技量・経験を要する。例えば日本建築学会刊行の鉄骨工事技術指針・工場製作編では、サブマージアーク溶接を使いこなすには被覆アーク溶接やガスシールドアーク溶接よりも高い技術力と経験が必要であるとも述べられている³⁾。サブマージアーク溶接では作業工程の脱技能化が喫緊の課題となっており、その解決手段としてデジタルサブマージアーク溶接システムへの期待が高まっている。そこで当社では、脱技能化に貢献する高出力のデジタルサブマージアーク溶接システムを開発し、2024 年に市場投入した。本稿では、この最新のデジタルアーク溶接システムについて紹介する。

2. 溶接システムの概要

溶接システムの概観を図 2 に示す。溶接電源、制御装置、送給装置およびキャリジ（台車）を基本構成品としている。溶接電源は表 1 に示すあらゆる極性・特性の溶接法を搭載しており、どのような従来電源からも置き換えることができる。極性としては、磁気吹きに強く比較的良好に使用される交流極性、深溶込み溶接に適した直流 EP（Electrode Positive、電極プラス）極性、高溶着溶接に適した直流 EN（Electrode Negative、電極マイナス）極性の 3 種類を搭載している。特性としては、汎用の定電流特性と、特定用途において有効な定電圧特性を搭載している。送給装置の送給モータおよびキャリジの走行モータはエンコーダフィードバック制御されており、ワイヤ送給速度や溶接速度を正確に制御することができる。また、出力電流・電圧をはじめとする各種データログを取得・保存することができ、アナログ機と比べてレサビリティの確保が格段に容易となっている。



図 2 最新のデジタルサブマージアーク溶接システム

表 1 搭載溶接法の一覧

特性	極性		
	直流(EP)	交流	直流(EN)
定電流	○	○	○
定電圧	○	○	○

本機の定格出力電流は、デジタル機として世界最高の 1500A である。デジタル機の高出力化は技術的なハードルが高く、従来は定格出力電流 1000A の電源が主流であったが、本機では主回路構成の最適化や排熱・冷却構造の工夫により定格出力電流 1500A を実現しており、二次側パワーケーブルが長い環境でも高い電流を出力することができる。参考までに、二次側パワーケーブルの長さに応じた最大出力電流の試算例を図 3 に示す。例えば二次側パワーケーブルの長さが往復 60m(片側 30m) の場合、定格出力電流 1000A の溶接電源では最大出力電流が 630A 程度まで低下するが、定格出力電流 1500A の本機では最大約 1000A の高い電流を出力することができるため、幅広い環境に適用することができる。

溶接法：交流定電流、ケーブルループ：なし

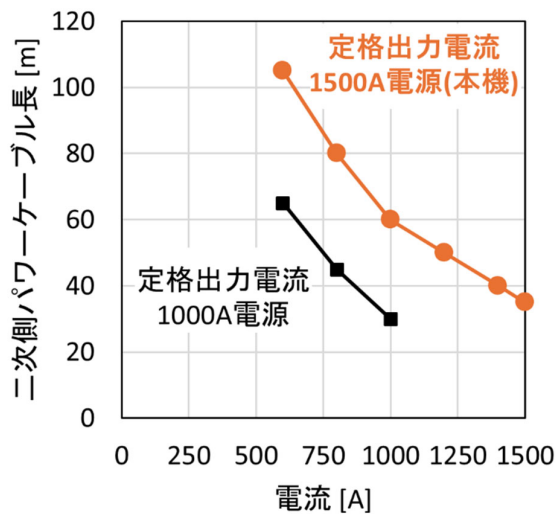


図 3 二次側ケーブル長に応じた最大出力電流の試算例

3. デジタル制御による脱技能化

デジタルサブマージアーク溶接システムでは、従来必要だった様々な作業工程を単純化または省略することができる。本章では脱技能化に関する具体例を紹介する。

3.1 溶接条件調整の単純化および省力化

従来のアナログサブマージアーク溶接システムでは、図 4 に示すような操作部で電流・電圧を調整する。電流・電圧の出力値は指針計から目視で読み取る必要があるが、特に電圧は変動が大きく指針計がふらつきやすいため、正確な値を読み取るためには一定の技量と経験が必要であり、溶接オペレータによって読み取り値に差が生じることもしばしば問題となる。また、電流・電圧の調整は、出

力値を読み取りながら無単位のボタンやツマミを用いて行うため、溶接開始前には正確な条件設定ができず、溶接を開始してから電流・電圧を所望の値に調整する必要がある。このため、溶接開始部の溶接品質は、溶接開始後に電流・電圧をいかに素早く正確に調整できるかにかかっており、溶接オペレータに高い技量が要求される一因となっている。



図 4 アナログサブマージアーク溶接システムの操作部

これに対し、出力の高度なフィードバック制御が可能な最新のデジタルサブマージアーク溶接システムでは、図 5 に示す操作 BOX を用いて、電流・電圧を数値で簡単に設定することができる。三段の 7 セグメント表示は、上から順に、電流 [A]、電圧 [V]、溶接速度 [cm/min] を示しており、操作に一切の熟練を要さない。また、出力電流・電圧は入力電圧変動等の外乱の影響を受けず、設定値に応じた安定かつ正確な出力が得られるため、溶接オペレータによる逐次の出力確認や条件微調整が不要となり、オペレータは溶接と並行して行われるビード後方のスラグ剥離・フラックス回収等の作業に注力することもできる。溶接結果がオペレータの技量によって左右されることもなく、安定した溶接品質を得ることができる。このように、最新のデジタルサブマージアーク溶接システムでは、溶接オペレータに対しての従来の様々な障壁を取り払うことが可能となっている。



図 5 デジタルサブマージアーク溶接システムの操作 BOX

3.2 環境変化時の条件再調整工程の削減

当社のデジタルサブマージアーク溶接システムでは、設置環境による出力のばらつきが生じないため、環境が変わっても同じ溶接を確実に再現することができる。特に、定電流特性の溶接法を選択した場合には、出力電流が設定値に一致するだけでなく、電圧も設定どおりに出力されることが、本機の大きな特長のひとつである。従来機の場合、アナログ機／デジタル機ともに、設定どおりの出力電流を得ることはできても、出力電圧は必ずしも設定値に合致しない。一例として、設定電流・設定電圧を変えずに、突出し長さを変化させて溶接を行った場合の、出力電圧の測定結果を図6に示す。本機（右）では、突出し長さによらず設定どおりの電圧を出力できており、設定値に対する出力再現性の高さが示されている。二次側パワーケーブルの長さや引き回し等が変化した場合にも、同様に設定どおりの電流・電圧が出力される。このように、溶接環境が変化しても電流・電圧に変化が生じないため、条件の再調整・微調整の工程を削減可能することができる。また、本機には、溶接条件を最大100件まで記憶できるメモリ機能も搭載されており、例えばテスト環境で調整し記憶した溶接条件を読み出せば、実際の施工現場でも同等の溶接を再現することができる。

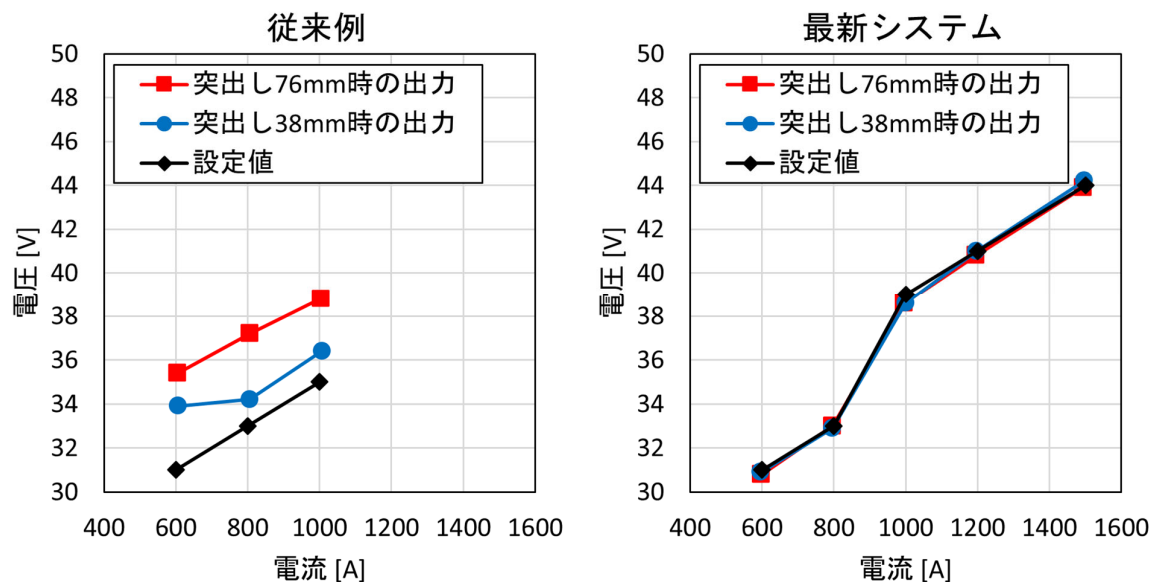


図6 設定電圧と出力電圧の比較（定電流特性選択時）

3.3 アークスタート工程の簡略化

太径ワイヤを用いるサブマージアーク溶接では、アークスタート時に溶接ワイヤを短時間で熔融・移行させてアーク長を確保することが難しい。そのため通常は、図7および図8（動画）に示すように、容易に燃焼するスチールウールを溶接ワイヤと母材の間に設置してアークスタートを行うが、スチールウールの密度（丸め方）や大きさによってはスタート直後の溶接が不安定になるため、溶接オペレータはスチールウールの適切なセッティング方法を会得しなければならない。また、高張力鋼や高合金鋼を溶接する場合には、スチールウールの使用による溶接金属組成の変化や不純元素の混入が問題視される場合もある。

このような問題を解消するために、当社のデジタルサブマージアーク溶接システムには、スチールウールレススタート機能を実装している。これは、最新のデジタル制御により、出力制御とワイヤ送

給制御を高度に連携させることで実現されたものであり、**図 9** および**図 10**（動画）に示すように、ワイヤ先端と母材を接触させて溶接起動するだけで、確実かつ良好なアークスタートを行うことができる。アークスタート時には溶接ワイヤ先端のカットを推奨しているが、これはワイヤ先端に付着した絶縁スラグを除去するためであり、溶接ワイヤと母材が電氣的に導通さえすれば、どのような状態でもアークスタートが可能である。もちろん従来と同じようにスチールウールを使用してもよく、スタート方式によってスタート条件を変える必要もないため、誰でも簡単に確実なアークスタートを行うことができる。

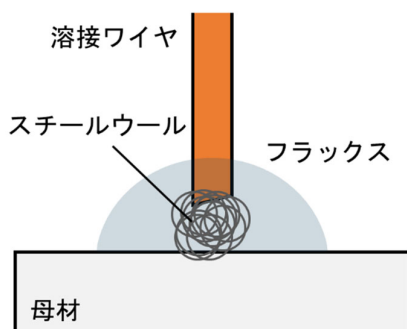


図 7 従来のアークスタート（模式図）

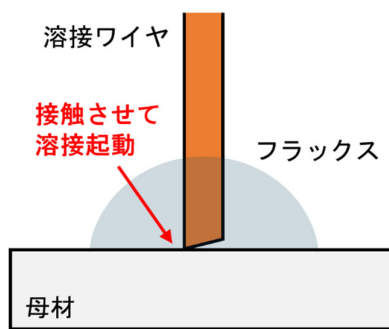


図 9 スチールウールレススタート（模式図）

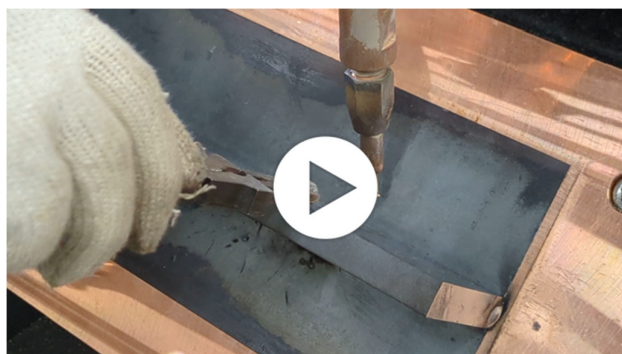


図 8 従来のアークスタート（動画）

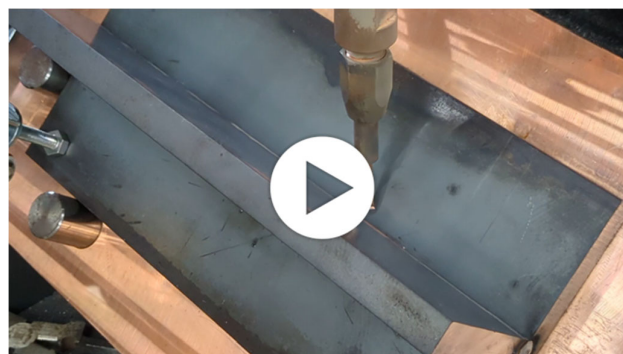


図 10 スチールウールレススタート（動画）

3.4 長期短絡に起因する溶接不良の抑制

太径ワイヤを用いるサブマージアーク溶接では、溶接ワイヤと溶融池または母材が短絡した場合、溶接ワイヤの溶融が遅く、アークの再点弧に時間がかかる。このような長期短絡は、溶込み不良やビード幅の不揃いといった溶接不良の原因となる。場合によっては、アークが再点弧できないまま溶接ワイヤが供給され続け、キャリジが溶接ワイヤで押し上げられて転倒することもある。

このように、サブマージアーク溶接は従来、短絡に弱い溶接方法であった。しかしながら、最新のデジタルサブマージアーク溶接システムには短絡解除制御が実装されており、**図 11** の波形例のように、短絡時に最大 2000A 程度の高電流を流して早期のアーク再点弧を促進することで、短絡に対する裕度が大幅に向上している⁴⁾。短絡解除制御の有効性を示す例として、タンデム（2電極）溶接における先行電極の電圧を極端に小さくした場合の溶接結果を**図 12**に示す。本来であれば溶接開始直後に長期短絡が生じて溶接が進まない低電圧条件であっても、短絡解除制御を適用することで、溶接を持続させることができている。短絡解除制御を適用すると、低電圧側の条件調整裕度を確保できる

だけでなく、エンドタブへの乗り上げ時や周溶接のラップ部等において意図せず生じる短絡に対する裕度も向上するため、溶接不良が発生しにくく、手直しに要する工数を削減することができる。

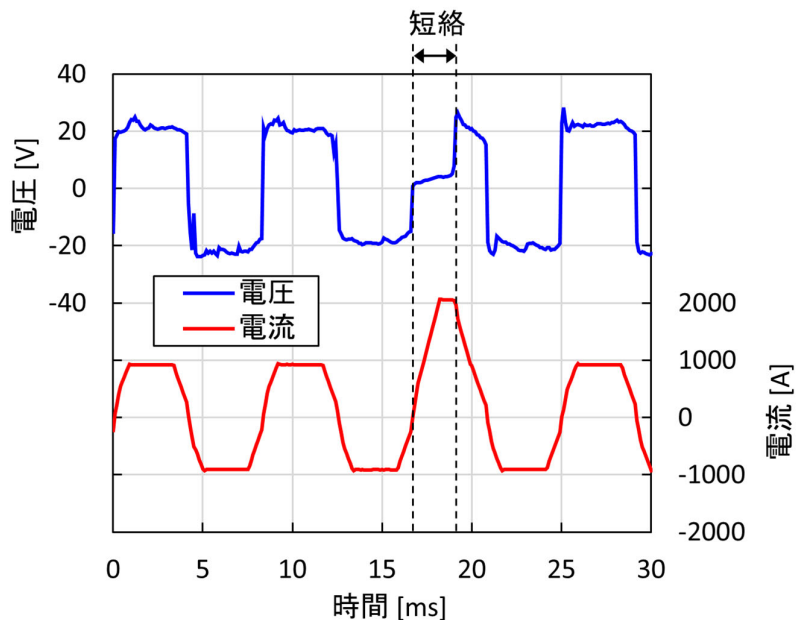


図 11 短絡解除制御の電流・電圧波形例

タンデム（2電極）溶接，ワイヤ径：φ4.8，溶接速度：60cm/min，下向きすみ肉溶接
 先行電極：800A/20V（低電圧条件） 後行電極：800A/30V

短絡解除制御なし



短絡解除制御あり



図 12 短絡解除制御の効果

4. 溶接結果例

本機を用いた溶接結果の一例を図 13～図 16 に示す。継手・材料によらず、良好な溶接結果が得られている。本機はビルト H をはじめとした種々の製品の実生産に適用されており、本機の適用により溶接能率やビード外観、溶接安定性が向上したと評価されている⁵⁾。

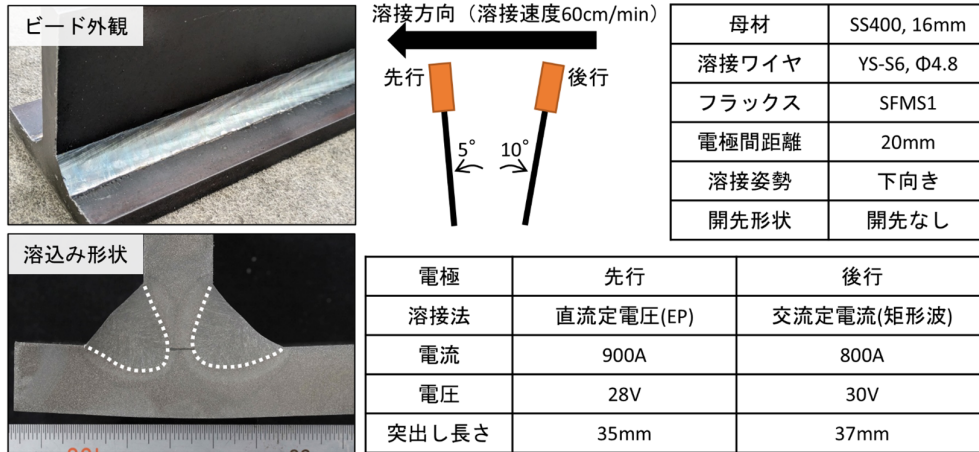


図 13 下向きすみ肉溶接例 (板厚 16mm)

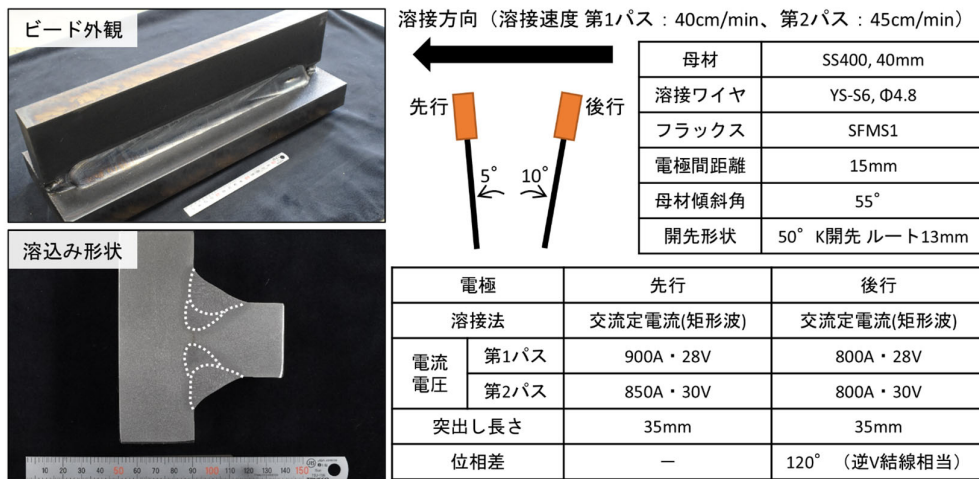


図 14 下向きすみ肉溶接例 (板厚 40mm)

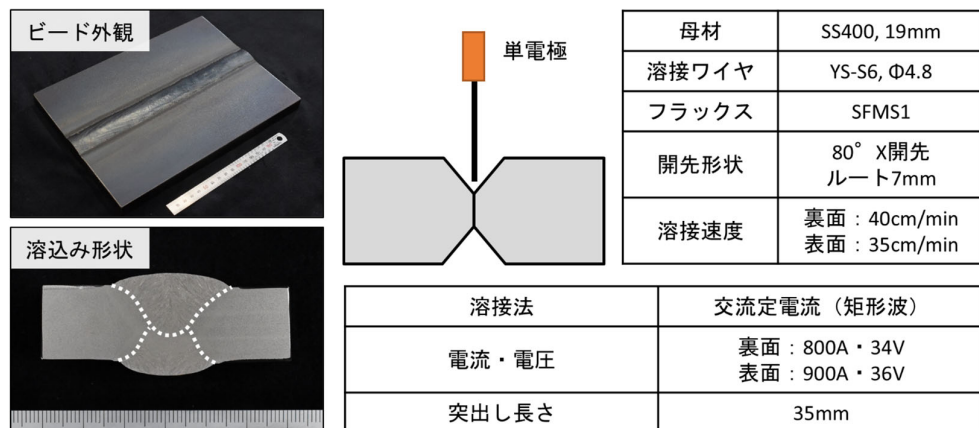


図 15 突合せ溶接例 (板厚 19mm)

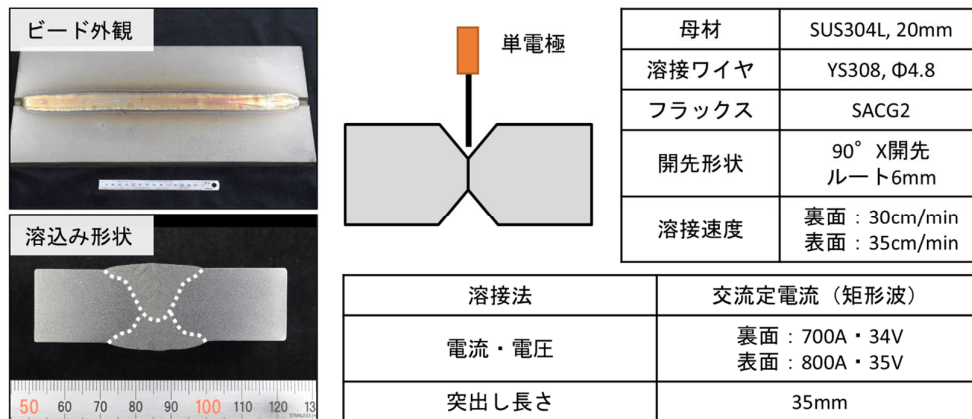


図 16 突合せ溶接例 (板厚 20mm、ステンレス鋼)

5. 今後の展望

本稿で紹介したデジタルサブマージアーク溶接システムは 200V 入力用のスタンダードパッケージであるが、今後は 400V 入力用機種の開発や、四面ボックス柱の溶接に求められる電源並列運転への対応など、新機種・新機能の拡充を通じて適用範囲を拡張し、本機の更なる普及に取り組んでいく。また、電流波形制御のデジタル化によって、従来は難しかった様々な基礎実験を容易に行えるようになり、様々な新しい知見が得られている。一例として、当社と大阪大学との共同研究として実施した、サブマージアーク溶接部の X 線透過観察例を紹介する。図 17 に示すように、大阪大学接合科学研究所の高輝度 X 線透過型溶接接合機構 4 次元可視化システムに本機を組み合わせ、目視では観察できないフラックス内部の現象を可視化することで、電流・電圧出力とアーク近傍現象の対応関係を明らかにしている⁶⁾。例えば、キャビティと呼ばれるアーク近傍の気体空間が縮小すると、電流の減少および電圧の増加が生じることが示されており⁷⁾、筆者らは数値計算を活用して、この現象が生じる理由について考察している⁸⁾。サブマージアーク溶接現象にはまだまだ解明の余地があり、新たな発見を通じて、サブマージアーク溶接のさらなる性能向上に努める所存である。

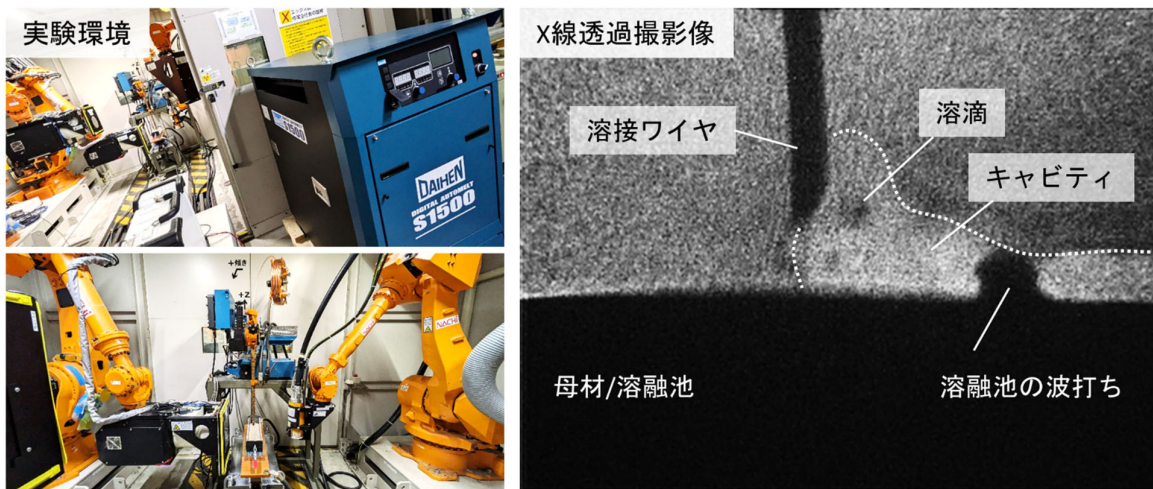


図 17 サブマージアーク溶接部の X 線透過観察

6. おわりに

本稿では、最新のデジタルサブマージアーク溶接システムを紹介した。溶接の脱技能化や高品質化、トレーサビリティの確保⁹⁾や電力使用料の低減¹⁰⁾等、様々な利点を持つデジタル機の普及は、今後ますます加速することが予想される。顕在化しつつあるサブマージアーク溶接施工の課題を解決するうえで、本稿・本機がお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) 新報株式会社：ウェルディング MART/2016-2025
- 2) 例えば、新報株式会社：ウェルディング MART/2009
- 3) 日本建築学会：鉄骨工事技術指針・工場製作編，第6版 (2018)，368
- 4) 馬場ら：サブマージアーク溶接への短絡解除電流の適用，溶接学会全国大会講演概要，115 (2024)，188-189
- 5) 鉄鋼新聞：住吉工業／BH 製作ライン増強／溶接機、溶接架台を更新／構内物流清流化で生産性向上，2024年4月22日
- 6) 馬場ら：サブマージアーク溶接におけるキャビティ挙動の X 線透過観察，溶接学会全国大会講演概要，117 (2025)，290-291
- 7) 馬場ら：アーク長およびキャビティがアーク電圧に及ぼす影響，溶接学会全国大会講演概要，117 (2025)，292-293
- 8) 古免ら：キャビティがアーク特性に及ぼす影響の数値計算，溶接学会全国大会講演概要，117 (2025)，294-295
- 9) 馬場勇人：サブマージアーク溶接のデジタル化への期待，溶接技術，72-8 (2024)，106-109
- 10) 馬場勇人：デジタルサブマージアーク溶接システム「DIGITAL AUTOMELT」について，溶接技術，72-9 (2024)，101-103

<略歴>

馬場 勇人 (ばば はやと)

2014年 大阪大学 大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 博士前期課程 修了
2014年 株式会社ダイヘン 溶接機事業部 第二技術部 配属
2015年 溶接機事業部 研究開発部に組織名変更
2021年 溶接・接合事業部 研究開発部に組織名変更
2021年 大阪大学 大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 博士後期課程 修了
現在に至る