

(技術資料)

# 短絡移行を前提としないワイヤ送給制御プロセスAXELARC™の開発

北村佳昭\*<sup>1</sup>・山崎 圭\*<sup>2</sup>(工学博士)・中司昇吾\*<sup>2</sup>・小川 亮\*<sup>2</sup>・井上芳英\*<sup>2</sup>・橋本裕志\*<sup>3</sup>

## Development of Non-short-circuit-type Wire Feed Control GMAW Process "AXELARC™"

Yoshiaki KITAMURA・Dr. Kei YAMAZAKI・Shogo NAKATSUKASA・Akira OGAWA・Yoshihide INOUE・Hiroshi HASHIMOTO

### 要旨

従来の短絡型ワイヤ送給制御プロセスでは低スパッタ・低入熱溶接を実現できるものの、高電流かつ中・厚板/多層多パス溶接への適用が困難であった。そこで、ワイヤ送給方向を前進・後退させることにより、慣性を溶滴移行に利用した世界初の短絡フリーワイヤ送給制御プロセスAXELARC™を開発し、中・厚板分野への適用性を検討した。その結果、AXELARC™を用いることにより、低電流から高電流の広い条件範囲において低スパッタかつ低ヒューム溶接が可能になり、深い溶込みを維持しつつ、高溶着・高速度溶接が可能となることを確認した。開発プロセスは、中・厚板分野の溶接品質・能率向上に大きく貢献できると考えられる。

### Abstract

While conventional short-circuit wire feed control processes are effective in achieving low spatter and low-heat-input welding, they present challenges when it comes to high-current ranges, medium-to-thick plates, and multi-layer multi-pass welding. To address this issue, the world's first short-circuit-free wire feed control process, AXELARC™, has been developed, in which the process leverages the inertia for droplet transfer by alternating the wire feed direction forward and backward. The applicability of the process to the field of medium-to-thick plates has been examined. The results confirm its ability to achieve low spatter and low fume welding in a wide range of conditions, from low to high currents. Additionally, it enables deep penetration, high deposition, and high-speed welding capabilities. The newly developed process is expected to make a significant contribution to improving welding quality and efficiency in the field of medium-to-thick plates.

### 検索用キーワード

ワイヤ送給制御, 溶滴移行, 慣性, 低スパッタ, 低ヒューム, 深い溶込み, 高能率, 中厚板

まえがき＝消耗電極式アーク溶接法では、溶接ワイヤが電極となる。電極ワイヤは突出し部のジュール発熱とアーク熱により溶融し、その溶滴がワイヤ先端から離脱する度にアーク長が変化する。すなわち、溶滴移行の周期や溶滴サイズはアーク安定性を支配する因子であり、溶滴が円滑に移行できない場合はスパッタやヒュームの発生を誘起する。したがって、アーク溶接プロセスにおいて、高能率化に加えて溶接品質向上などさらなる高機能化を目指すうえで、この溶滴移行制御技術の高度化が果たす役割は極めて大きい。これまでの代表的な溶滴移行制御技術には、短絡移行過程において短絡した溶滴のくびれを検出して電流波形を制御する手法<sup>1)</sup>、溶接電流をパルス状に変化させることにより定期的に溶滴を離脱させるパルスマグ・ミグ溶接法<sup>2)</sup>がある。これらは溶滴に作用する表面張力、電磁気力、プラズマ気流によるせん断力、アーク圧力など外力のバランスを溶接電流波形の操作により制御したプロセスである。しかし、これら電流波形による外力バランスの制御のみでは、今後のアーク溶接プロセスに現状からの飛躍的な進歩を期待することは難しい。

そこで、当社ではワイヤ送給方向および速度を時間的に変化させ、ワイヤ送給方向を反転させることによる

「慣性」を新たな溶滴移行制御因子として利用した世界初のワイヤ送給制御プロセスAXELARC™<sup>注1)</sup>を開発した。本稿では、AXELARC™の概要と効果の一例を紹介する。

## 1. 短絡移行を前提としない新ワイヤ送給制御プロセスAXELARC™の概要

### 1.1 短絡型ワイヤ送給制御プロセスの特徴と課題

近年、デジタルインバータ制御溶接電源による溶接電流波形制御とACサーボモータによるワイヤ送給制御を高度に協調させた、極低スパッタかつ低入熱溶接法が薄板溶接分野を中心に普及しつつある。国内外の溶接機器メーカーからは、さまざまな溶接プロセスが発表されている<sup>3)~7)</sup>。これらワイヤ送給制御を用いた溶接プロセスの溶滴移行形態は、いずれも短絡移行モードである。溶接ワイヤ先端の溶滴が溶融池に短絡すると、溶接電流を低下させ、溶接ワイヤを反転・後退することにより短絡を解消し、アーク再点弧時のスパッタ発生を大幅に抑制していることが共通の特徴になっている（以下、これらワイヤ送給制御プロセスを短絡型ワイヤ送給制御プロセ

脚注1) AXELARC™は当社の登録商標である。

\*<sup>1</sup> 溶接事業部門 技術センター（現 技術開発本部 企画管理部） \*<sup>2</sup> 溶接事業部門 技術センター \*<sup>3</sup> 技術開発本部 機械研究所

スという)。この短絡型ワイヤ送給制御プロセスは、短絡電流を抑制できる。このため、一般的な短絡溶接プロセスと比較して低入熱化が図れ、板厚1.0 mm程度の極薄板において、ひずみ低減や溶落ち抑制にも効果を発揮する。

いっぽう、この優れた低スパッタ効果は、低電流域における短絡移行現象の安定化によるものであるため、同様の溶滴移行形態とその効果を高電流域においても維持することは一般的に困難である。また、短絡移行を前提にする限り、溶込みが浅くなるとともに余盛が高くなり、ビード幅の狭い凸ビード形状になりやすい。溶接能率向上を実現すべく、溶接電流（ワイヤ溶融量）を増加させた場合、この凸ビード化傾向は顕著になり、中・厚板分野に求められる高電流化や溶接速度の高速度化による能率向上効果は期待できない。また、開先内を多層多パス溶接した場合、溶込み不足や融合不良などの溶接欠陥が発生しやすいという欠点もあり、短絡型ワイヤ送給制御プロセスの中・厚板分野への適用には課題が多い。これに対して、AXELARC™では、ワイヤ先端の溶滴を溶融池に短絡させることを前提条件にしていない。すなわち、上記の短絡型ワイヤ送給制御プロセスの課題を克服すべく開発したプロセスであり、中・厚板分野へ適用できる可能性があるプロセスである。

### 1.2 AXELARC™のシステム構成

AXELARC™プロセスの実験装置構成を図1に示す。本システムの送給系は、設定されたワイヤ送給速度でワイヤを前進送給するプッシュフィーダに加え、溶接トーチに内蔵されたプルフィーダとそれを制御するサーボドライバからなる。また、ワイヤ送給量の誤差を検知・補正すべく、プッシュフィーダとプルフィーダ間にワイヤバッファ機構を設けている。なお、溶接ワイヤには特殊表面処理を施した軟鋼ソリッドワイヤφ1.2 mm、シールドガスには炭酸ガスを用いている。

### 1.3 AXELARC™における溶滴移行形態

AXELARC™の溶接電流波形およびワイヤ送給速度波形の模式図と溶滴移行画像の一例を図2に示す。ワイヤの送給は正弦波状に前進と後退を繰り返し、電流波形はワイヤ送給波形の位相に同期したパルス電流波形を用いている。図2(a)~(b)に示すように、ワイヤ先端に溶滴を形成しながらワイヤを前進させることにより、

溶滴は溶融池方向へ加速される。その結果、図2(c)でワイヤ送給方向を反転後退させた後も、ワイヤ先端の溶滴は慣性によって溶融池方向へ動こうとする。このため、図2(d)において溶滴上部にくびれが形成され、図2(e)において短絡を伴わずとも溶滴離脱(自由移行)が可能になる。なお、その溶滴離脱時の電流が低電流状態、すなわちベース電流となっていれば溶滴離脱直後に発生する小粒スパッタも抑制できる。通常、炭酸ガスアーク溶接法の高電流域では、溶滴下部にアークによる上向きの力が作用することにより反発移行形態となり、大粒スパッタが多量に発生する。しかし、本プロセスの手法により慣性を適切に溶滴離脱に利用できれば、その離脱方向はワイヤ送給方向から大きくそれることはない。したがって、低電流から高電流の広い条件範囲においてワイヤ送給速度波形に同期した規則的な溶滴移行が実現でき、大粒スパッタもほとんど発生しない。

### 1.4 AXELARC™の溶滴移行現象に及ぼす溶滴サイズとワイヤ先端最高加算速度の影響

AXELARC™において安定した溶滴移行を実現するためには、溶接電流波形およびワイヤ送給速度波形に関連する種々の溶接パラメータの適正化が必要になる。ここでは、溶滴サイズとワイヤ先端の最高速度に着目して溶滴移行現象を観察した。なお、AXELARC™における溶滴移行はワイヤ前進・後退の1周期で1回の溶滴離脱を基本としている。溶滴サイズ $V_{drop}$ は、式(1)により求められる。

$$V_{drop} = Wf_{avg} \times \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{1}{f} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $Wf_{avg}$ は平均ワイヤ送給速度、 $d$ はワイヤ径、 $f$ は前進・後退の送給周波数である。

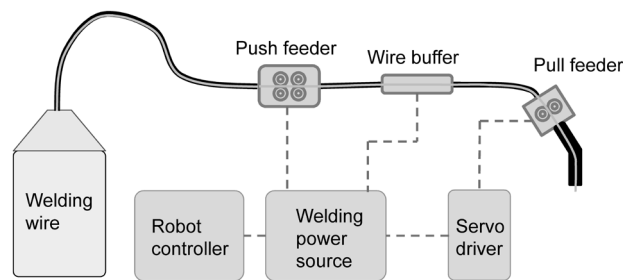


図1 実験系の構成図  
Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

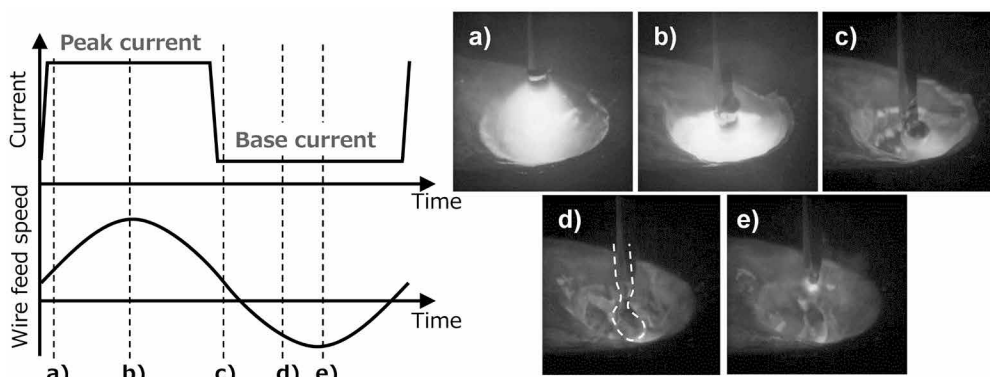


図2 慣性を利用した溶滴移行現象  
Fig.2 Droplet transfer phenomenon using inertia

また、ワイヤ先端の最高速度は、最高加算速度  $Wf_{max}$  を用い、式 (2) により求められる。

$$Wf_{max} = L_m \times \pi \times f \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $L_m$  はワイヤ送給の振幅、 $f$  は前進・後退の送給周波数である。

$Wf_{max}$  は、ワイヤ先端が最高速度に到達した際に平均ワイヤ送給速度に加算されている速度を意味する。

以下の実験では、平均ワイヤ送給速度 13~19 m/min の範囲において、溶接電流波形パラメータを調整した。とくに、ワイヤ送給パラメータの中で振幅と周波数を操作することにより、溶滴サイズとワイヤ先端の最高加算速度を変化させた。

はじめに、溶滴サイズを一定とし、最高加算速度を変化させた場合について述べる。平均ワイヤ送給速度 19 m/min、溶滴サイズ 3 mm<sup>3</sup> での最高加算速度 90 m/min と 70 m/min の溶滴移行現象を図 3 に示す。図 3 (a) に示す最高加算速度が 90 m/min の場合、溶滴移行現象は図 2 と同様の自由移行を実現できる。しかし、図 3 (b) に示す最高加算速度が 70 m/min の場合、図 3 中の 3)~4)

の過程で溶滴上部にくびれが形成されず、5) の過程で溶滴が離脱しない。すなわち、AXELARC™ において溶滴移行に慣性を利用するためには、所定の平均ワイヤ送給速度を確保しつつ、溶滴サイズに応じて適切な最高加算速度が得られるようにワイヤ送給条件を設定する必要がある。

つぎに、最高加算速度を一定とし、溶滴サイズを変化させた場合について述べる。平均ワイヤ送給速度 13 m/min、最高加算速度 70 m/min での溶滴サイズを 2 mm<sup>3</sup> および 3 mm<sup>3</sup> とした場合の溶滴移行現象を図 4 に示す。図 4 (a) に示す溶滴サイズが 3 mm<sup>3</sup> の場合は溶滴移行現象は図 2 と同様であるが、図 4 (b) に示す 2 mm<sup>3</sup> の場合は図 4 中の 3)~5) の過程で溶滴を離脱させることができない。すなわち、AXELARC™ において溶滴移行を実現するためには、平均ワイヤ送給速度に応じて適切な溶滴サイズとなるように電流波形および送給速度波形パラメータを設定する必要がある。

以上の実験結果から、AXELARC™ において溶滴離脱の成否を左右するポイントは、溶滴を加速させて慣性により溶滴上部にくびれを形成できるか否かにある。溶滴

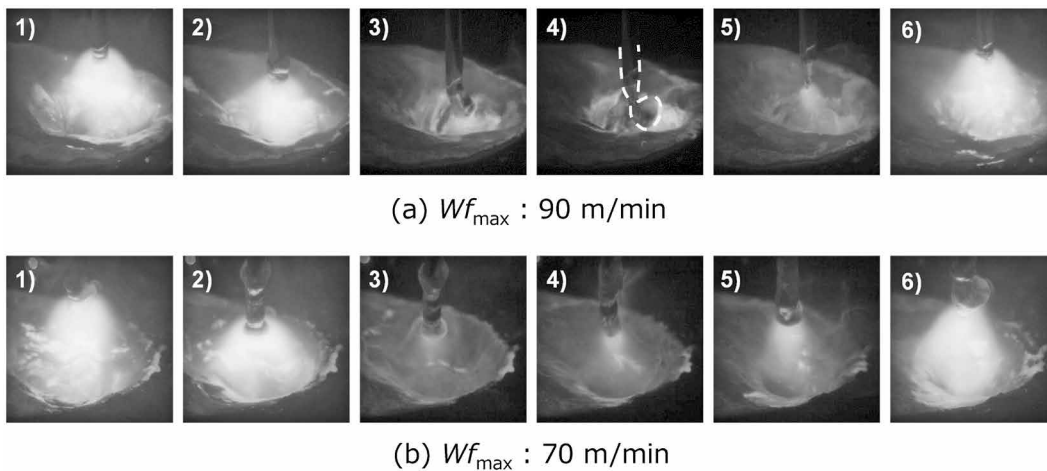


図 3 溶滴移行現象に及ぼすワイヤ最高加算速度の影響  
Fig.3 Effect of maximum wire feed speed on droplet transfer phenomenon  
( $Wf_{avg}$ : 19 m/min,  $V_{drop}$ : 3 mm<sup>3</sup>)

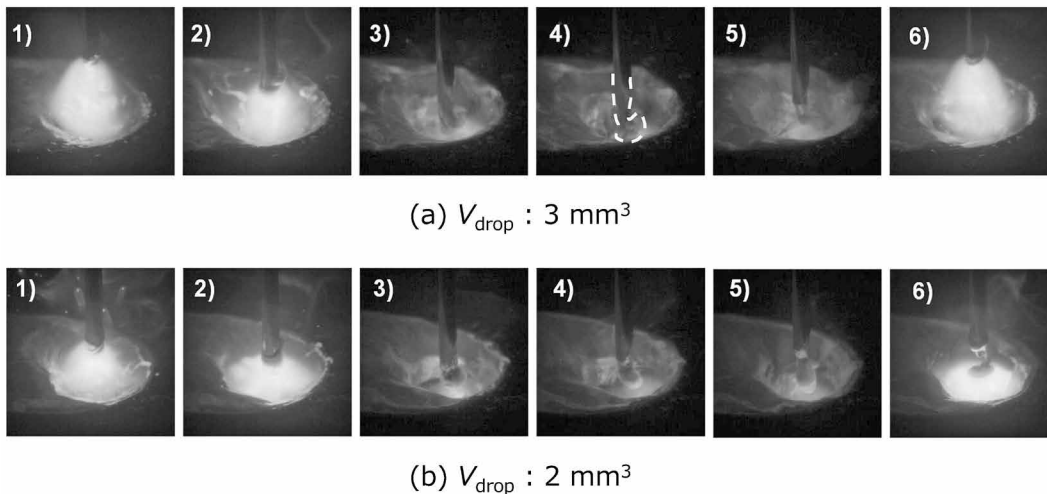


図 4 溶滴移行現象に及ぼす溶滴サイズの影響  
Fig.4 Effect of droplet size on droplet transfer phenomenon  
( $Wf_{avg}$ : 13 m/min,  $Wf_{max}$ : 70 m/min)

の到達速度が不十分である場合、ワイヤが後退動作に入ると、くびれが形成されずにワイヤと共に溶滴も引き戻されてしまう。このため、次周期のワイヤ溶融により溶滴が肥大化し、不安定な溶滴移行モードとなってしまう。いっぽう、溶滴サイズやワイヤ先端の最高加算速度が適切に設定されている場合、形成された溶滴がワイヤと連動し、溶滴が溶融池方向に十分に加速される。ワイヤが後退動作に入った後、慣性によって溶滴上部にくびれが形成されれば、後退動作中に溶滴を離脱できるようになる。なお、この溶滴移行を実現するためには電流波形や送給速度波形のパラメータを設定する必要があるが、ワイヤ組成、ワイヤ径、シールドガス組成、平均ワイヤ送給速度によっても最適パラメータは変わってくる。

## 2. 新ワイヤ送給制御プロセス AXELARC™ の適用効果

### 2.1 スパッタおよびヒュームの低減効果

定電圧制御を用いた一般的な炭酸ガスアーク溶接法（以下、一般的な炭酸ガスアーク溶融法という）と AXELARC™ のスパッタ発生量を図 5、溶接中のスパッタ飛散の様子を図 6 に示す。図 5 では、ワイヤ送給速度とチップ-母材間距離（CTWD）を同一条件にして、電流を 230～330 A で溶接した時のスパッタ発生量を比較している。一般的な炭酸ガスアーク溶接法では、短絡後のアーク再点弧に伴うスパッタや反発離脱により、溶滴自体が回転飛散する大粒スパッタが大半を占める。いっぽう、AXELARC™ では、溶滴移行の過程で短絡がほとんど発生しないうえ、慣性を利用することにより溶滴の離脱方向がワイヤ送給方向からそれないため、炭酸ガスシールド下においてもスパッタ発生量が極めて少なく

なる。一般的な炭酸ガスアーク溶接法に比べて、AXELARC™ のスパッタ発生量は、低電流から高電流の広い条件範囲でおおむね 1/10 以下となっており、図 7 に示すように、溶接ビード周辺に付着するスパッタ量も少ない。

つぎに、一般的な炭酸ガスアーク溶接法と AXELARC™ におけるヒューム発生量を図 8 に示す。AXELARC™ のヒューム発生量は一般的な炭酸ガスアーク溶接法に比べていずれのワイヤ送給速度条件でも少なく、とくに高速送給（高電流）条件において 40 % 以下となっている。溶接ヒュームはアークによって過熱された溶滴表面からの金属蒸気を主な起源とし、短絡・再アーク等に伴う周囲ガスの収縮・膨張を繰り返すことにより拡散していく<sup>8)</sup>。すなわち、AXELARC™ によるヒューム低減効果は、短絡がほとんど発生しないことと、

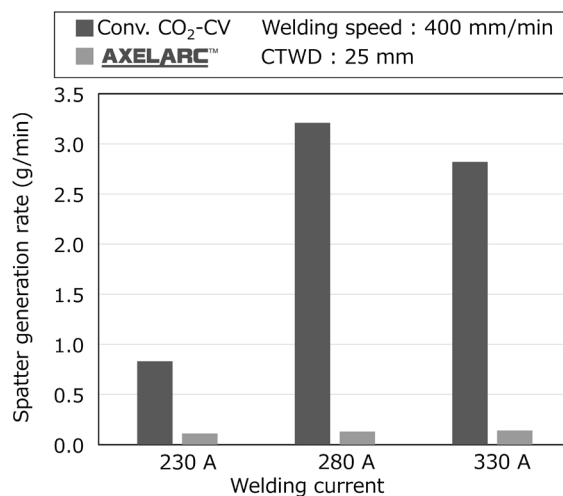


図 5 スパッタ発生量の比較  
Fig. 5 Comparison of spatter generation rate

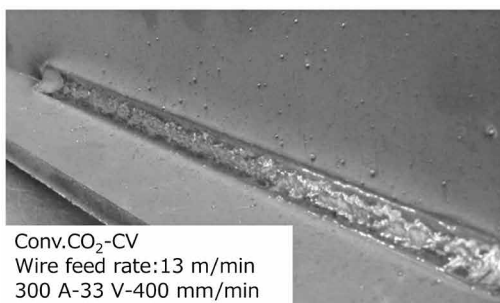


Wire feed rate : 16 m/min  
350 A-37 V-500 mm/min

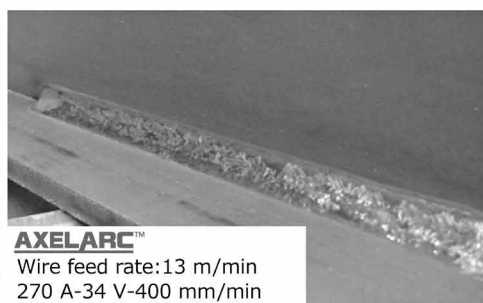


Wire feed rate : 16 m/min  
310 A-38 V-500 mm/min

図 6 溶接中のスパッタ飛散状況の比較  
Fig. 6 Comparison of spatter scattering



Conv. CO<sub>2</sub>-CV  
Wire feed rate: 13 m/min  
300 A-33 V-400 mm/min



AXELARC™  
Wire feed rate: 13 m/min  
270 A-34 V-400 mm/min

図 7 下向きすみ肉溶接におけるビード外観の比較  
Fig. 7 Comparison of bead appearance in flat fillet welding

溶滴移行周期が短くなり溶滴の加熱時間が低減されていることに起因していると考えられる。

## 2.2 ワイヤの溶融特性

一般的な炭酸ガスアーク溶接法と AXELARC™ における溶接電流とワイヤ溶融速度の関係を図9に示す。同一平均電流に対するワイヤ溶融速度は、AXELARC™の方が15~20%程度高くなる。したがって、同一平均電流条件では溶着量の増加が見込まれ、溶接能率の向上が期待できる。これは電流変化の比較的小さい一般的な炭酸ガスアーク溶接法と異なり、AXELARC™ではパルス電流を用いるため、ワイヤ突出し部におけるジュール発熱量が大きいことが主因であると考えられる。

## 2.3 深い溶込み性能

ワイヤ送給速度16 m/min, チップ-母材間距離25 mmを共通条件とし、溶接速度を変化させてビードオンプレート溶接した場合の各種溶接プロセスにおける溶込み深さを図10に示す。AXELARC™では、従来の短絡型ワイヤ送給制御プロセスやパルスマグ溶接法と比較して溶込みが深く、一般的な炭酸ガスアーク溶接法と同等の溶込み深さが得られている。また、下向きすみ肉溶接における溶込み深さを図11に示す。広いワイヤ送給速度条件範囲において、AXELARC™の溶込みは深く、一般的な炭酸ガスアーク溶接法と同等以上の溶込み深さが得られている。従来の短絡型ワイヤ送給制御プロセスよりも平坦なビード形状が得られることも特長である。各種溶接プロセスにおける下向きすみ肉溶接での溶込み形状を比較して図12に示す。AXELARC™では、一般的な炭酸ガスアーク溶接法と異なり、ワイヤ送給速度7 m/minにおいても平坦なビード形状が得られている。これは一般的な炭酸ガスアーク溶接法が短絡移行であるのに対して、AXELARC™では短絡の少ない自由移行を実現していることに起因していると考えられる。以上の実験から、AXELARC™では耐欠陥性の向上が期待でき、中・厚板に対する溶接の高品質化に貢献できる可能性がある。

## 2.4 中・厚板の溶接における溶接能率向上

下向きすみ肉溶接における溶接条件の一例、ビード外観、断面マクロ写真を図13に示す。AXELARC™では、パルスマグ溶接法に比べて溶着量を向上できるため、溶

接速度を約20%増加させても同等の脚長が得られるとともに、お椀型の深い溶込みが得られていることがわかる。下向きすみ肉溶接において、従来のパルスマグ溶接法では3~4パスを要する脚長18 mmをAXELARC™で1パス溶接した際のビード外観、断面マクロ写真を図14に示す。このように、AXELARC™を用いた下向きすみ肉溶接では高速化・高溶着量化が期待できる。パルスマグ溶接法とAXELARC™による脚長9 mmを狙った水平すみ肉溶接の一例を図15に示す。AXELARC™では、水平すみ肉溶接においても溶接速度を約30%増

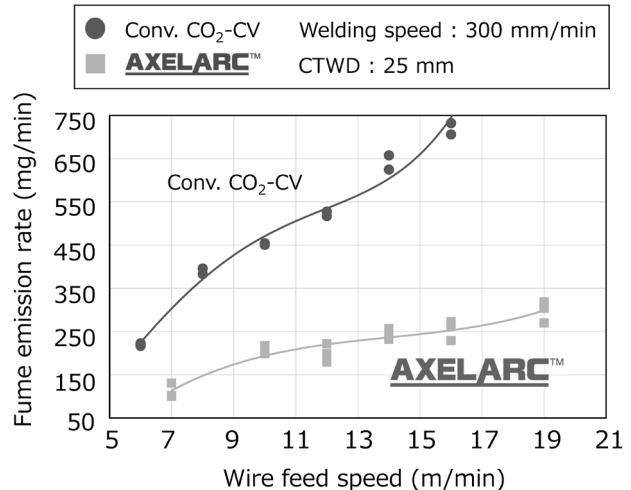


図8 ヒューム発生量の比較  
Fig.8 Comparison of fume emission rate

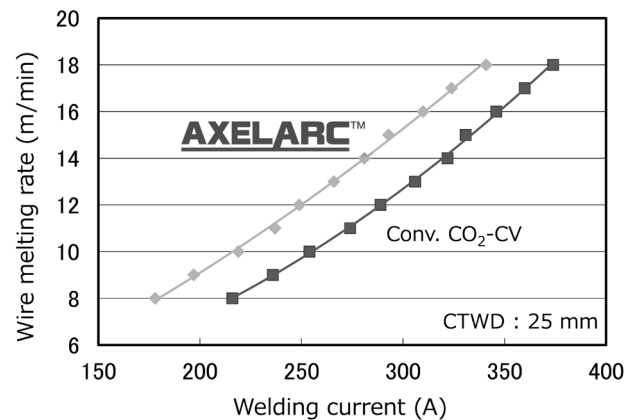


図9 ワイヤ溶融速度の比較  
Fig.9 Comparison of wire melting rate

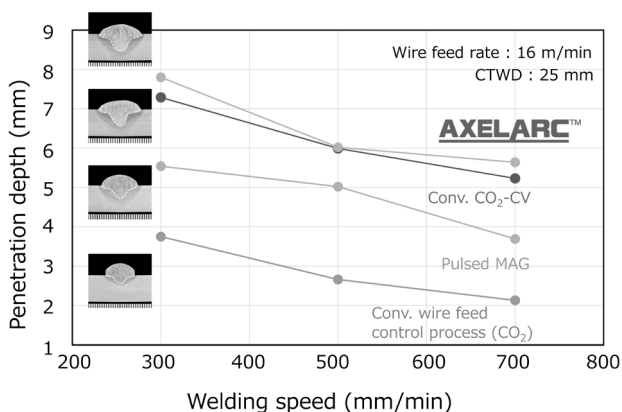


図10 溶込み深さの比較 (ビードオンプレート)  
Fig.10 Comparison of penetration depth in Bead-on-plate welding

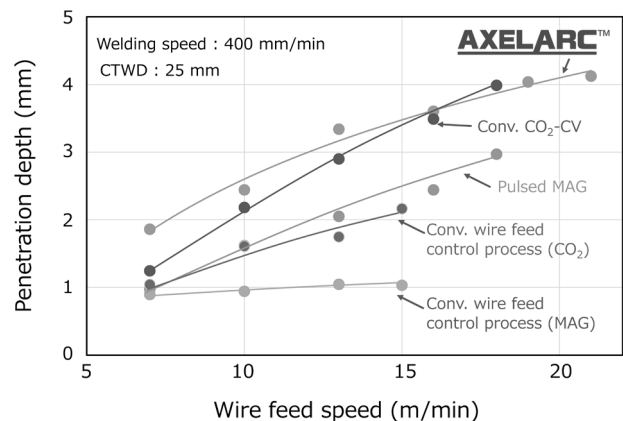


図11 溶込み深さの比較 (下向きすみ肉溶接)  
Fig.11 Comparison of penetration depth in flat fillet welding

Wire feed rate	7 m/min	13 m/min	16 m/min	21 m/min
Conv. wire feed control process (MAG)				
Conv. wire feed control process (CO <sub>2</sub> )				
Pulsed MAG				
Conv. CO <sub>2</sub> -CV				
<b>AXELARC™</b>				

図12 下向き肉溶接における溶込み形状の比較  
**Fig.12** Comparison of cross-sectional profile in flat fillet welding  
 (CTWD: 25 mm, Welding speed: 400 mm/min)

Process / Bead appearance	Leg length (mm)	Welding current (A)	Welding speed (mm/min)	Cross section
<b>Pulsed MAG</b> 	8	380	420	
	10	380	300	
	14	380	1st 420 2nd 260	
<b>AXELARC™</b> 	8	390	500	
	10	390	360	
	14	390	1st 500 2nd 310	

図13 溶接条件と溶接結果（下向き肉溶接）  
**Fig.13** Welding conditions and results for flat fillet joint

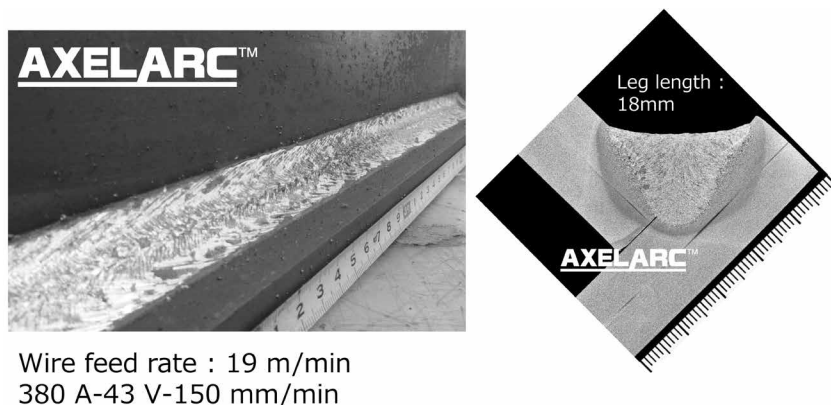


図14 大脚長下向き肉溶接におけるビード外観と溶込み形状  
**Fig.14** Bead appearance and cross-sectional profile in flat fillet welding with large leg length

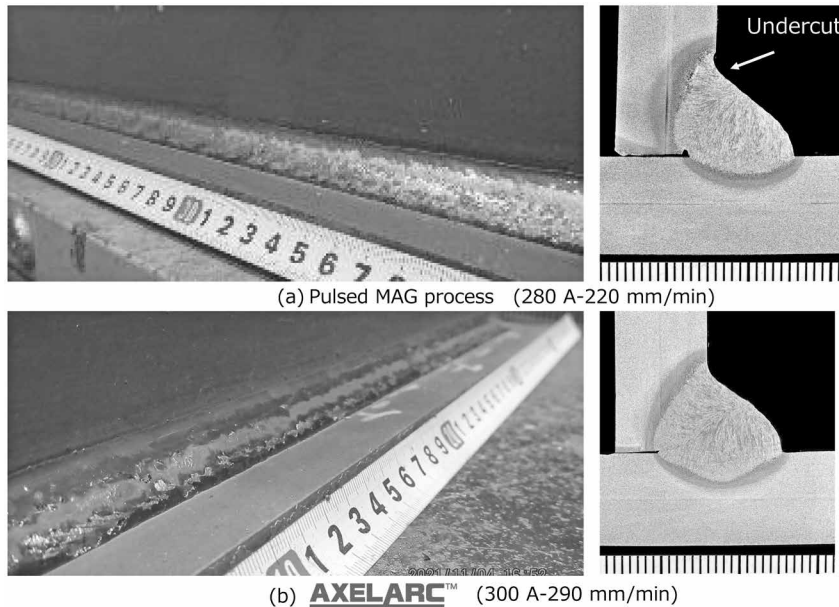


図15 水平すみ肉溶接におけるビード外観と溶込み形状（脚長 9 mm 狙い）  
 Fig.15 Bead appearance and cross-sectional profile in horizontal fillet welding aiming at 9 mm leg length

加させているが、美しいビード外観と深い溶込み形状が得られ、パルスマグ溶接で見られるような立板側の微小アンダカットも確認されない。このように、AXELARC™は中・厚板の溶接における品質および能率向上に貢献できる。

むすび=当社では、ワイヤ送給を溶滴の加速に用い、慣性によるくびれ形成を活用した溶滴移行制御法を見出し、短絡移行を前提としない新たなワイヤ送給制御プロセス AXELARC™を開発した。本プロセスを用いることにより、広い電流範囲において低スパッタかつ低ヒューム溶接が可能になり、深い溶込みを維持しつつ、高溶着・高速度溶接が可能になる。これにより、中・厚板分野の溶接品質・能率向上に大きく貢献できるものと考えられる。今後は、AXELARC™を活用し、これまでの溶接プロセスで必然的に制限されてきたワイヤ種やシールドガス組成、溶接条件範囲の枠を超えた新たな溶接ソリューションを創出していきたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 小笠原隆明ほか. R&D神戸製鋼技報. 1985, Vol.35, No.3, p.22-26.
- 2) 松縄 朗ほか. 溶接学会誌. 1984, Vol.53, No.6, p.284-322.
- 3) G. Huisman. Proc International Conference on 'Advances in welding technology 2000', Orlando, FL, USA, 2000 12-06/08, The American Welding Society, 2000, p.165-172.
- 4) K. Himmelbauer. The CMT-Process - A revolution in welding technology. IIW Doc. XII-1875-05. 2005.
- 5) S. Eggarland. Improving Welding-Quality and Reducing Costs by Using the CMT-Welding Process under Pure CO<sub>2</sub>-Shielding Gas. IIW Doc. XII-1993-07. 2007.
- 6) 藤原潤司. 溶接技術. 2011, Vol.59, No.2, p.51-56.
- 7) 恵良哲生. 溶接学会誌. 2015, Vol.84, No.4, p.234-238.
- 8) 菅 哲男ほか. 溶接学会論文集. 1984, Vol.2, No.2, p.220.