

極低スパッタ CO₂ アーク溶接技術「J-STAR[®] Welding」の開発

Development of a New CO₂ Gas Shielded Arc Welding Process, “J-STAR[®] Welding,” Ultra-Low Spatter

片岡 時彦 KATAOKA Tokihiko JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(副課長)
池田 倫正 IKEDA Rinsei JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(課長)
安田 功一 YASUDA Koichi JFE スチール スチール研究所 主席研究員(部長)・工博

要旨

J-STAR[®] Welding は、極性を従来の棒プラスに対して逆の棒マイナスとし、適量の希土類金属 (rare earth metal) を添加したワイヤを用いる CO₂ アーク溶接法である。J-STAR Welding は 250 A 以上の高電流溶接においてワイヤ先端を頂点とする円錐状のアークプラズマを形成し、ワイヤ先端から溶融池へ移行する溶滴は微細かつ連続化した「微細スプレー移行」を実現した。また、200 A 以下の低電流域では電流波形制御の適用により規則的な短絡移行が得られた。その結果、スパッタの発生量は広い電流範囲で従来 CO₂ 溶接方法の 1/10 以下に低減した。

Abstract:

J-STAR[®] Welding is performed with an electrode negative polarity using a rare earth metal added wire in CO₂ gas shielded arc. In the welding current over 250 A, a conical arc plasma was formed from the wire tip, and the droplets that transfer to molten pool became fine and continuous, what is called “spray transfer,” during J-STAR Welding. In the welding current under 200 A, application of waveform control of welding current realized periodic short circuit transfer. As a result, spatter generation was reduced to less than 10% in comparison with that of conventional CO₂ gas shielded arc welding method.

1. はじめに

ガスシールドアーク溶接法は溶接時に使用するシールドガスの種類により MIG 溶接 (Ar ガス)、MAG 溶接 (Ar と CO₂ の混合ガス)、CO₂ アーク溶接 (CO₂ ガス) に大別される。CO₂ アーク溶接法は 1950 年代に開発され、溶接電源と溶接材料の改良により、近年ではアーク溶接法の主流を占めるまでに発展してきた。しかし、ガスコストが安い反面、溶接時に多量のスパッタが発生するため、現在でもアークの安定化による溶接作業性の改善が課題とされている。

この課題に対して、「J-STAR^{*} Welding」は、微細かつ連続化したスプレー移行の実現により極低スパッタ化を可能にした^{1~3)}。この効果を得るには、比較的高い電流 (250 A 以上) を必要とし、課題として薄板の低電流溶接におけるスパッタ発生量の低減が残されている。この低電流域の低スパッタ化に対して電流波形制御の適用を検討した。また、

高電流での高速溶接において溶接線方向に均一なビード形状が得られることから、高速高能率化への展開が期待される。これら「J-STAR Welding」の特長とそれを活用した施工技術について紹介する。

2. 極低スパッタ CO₂ アーク溶接技術「J-STAR Welding」

J-STAR Welding は、JFE Spray Transfer Arc Welding の略であり、従来の CO₂ アーク溶接法の極性が棒プラス (EP) であるのに対して、J-STAR Welding は、アーク安定剤として適量の REM (rare earth metal) をワイヤに添加し、通常とは逆の棒マイナス (EN) を採用した溶接方法である。

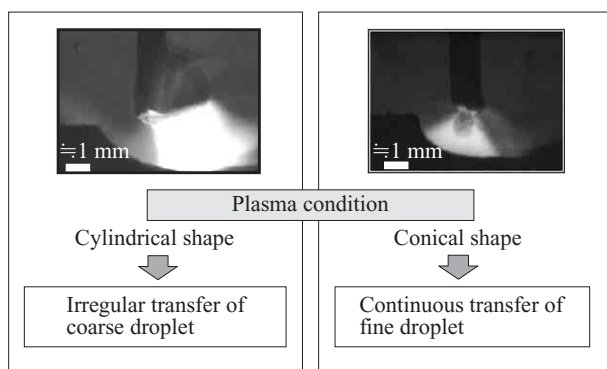
2.1 アーク現象

CO₂ アーク溶接の自由移行領域で観察されるアーク現象の特徴は、ワイヤ先端に懸垂した溶滴下部へのアーク集中とそれによって生じる溶滴の不規則な揺動にあり、スパッタの発生はこの溶滴の不規則な揺動によって引き起こされる。具体的には、溶滴と溶融池の短絡後の再アークにお

2007 年 2 月 15 日受付
*J-STAR は、JFE スチールの登録商標である。

Table 1 Evaluation of effect of polarity/wire combinations on arc stability

Polarity	Welding wire	
	Si-Mn/Si-Mn-Ti	Si-Mn-Ti-REM
Electrode positive (EP)	Normal	Poor
Electrode negative (EN)	Poor	Excellent



(a) Electrode positive welding with Si-Mn-Ti wire (b) Electrode negative welding with Si-Mn-Ti-REM wire

Fig. 1 Arc phenomena in CO₂ gas shielded arc welding

る溶融金属の飛散、あるいは、アーク力による溶滴そのものの飛散などによって生じると考えられ、スパッタ発生は溶滴の粗大化によってさらに助長される。Table 1 に極性とワイヤの組み合わせにおける CO₂ アーク溶接の安定性評価を、Fig. 1 に溶接電流 300 A における棒プラス (EP) の従来溶接法と REM 添加ワイヤを用いた棒マイナス (EN) の開発溶接法のアーク現象を示す。極性を従来の棒プラス (EP) とする溶接では、REM を微量添加したワイヤに対して REM を添加していない Si-Mn/Si-Mn-Ti 系ワイヤを用いた CO₂ アーク溶接は安定であるが、この REM を添加していないワイヤを用いた棒マイナス (EN) の溶接はアーク発生点が激しく変位し、かつ、より粗大な溶滴が形成されるためにアーク不安定となり、スパッタの発生量は倍増する。この棒マイナス (EN) の溶接において、適量の REM を添加した Si-Mn-Ti-REM 系ワイヤを用いることでワイヤ先端を頂点とする理想的な円錐状アークを形成し、微小溶滴をワイヤ先端から母材鋼板側に揺動させることなくスムーズに移行させるスプレー移行が得られる。

2.2 J-STAR Welding ワイヤ「KC-500」

Table 2 に J-STAR Welding ワイヤ KC-500 の化学組成を示す。KC-500 は、JIS Z 3312 における YGW11 に該当し、微量の REM を添加したワイヤである。

Table 3 に KC-500 を用いた CO₂ アーク溶接の全溶着金属試験結果を示す。490 N/mm² 級鋼用溶接ワイヤとして十分な強度、靱性を有している。また、溶接ワイヤ中に微量の REM を含有させることで、強度レベルに関係なく

Table 2 Chemical composition of steel welding wire

Type	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Other
Si-Mn-Ti-REM KC-500	0.05	0.7	1.6	0.01	0.01	0.2	REM

JIS Z 3312, YGW11

Table 3 Chemical composition and mechanical properties of deposited metal

Chemical composition (mass%)					Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Absorbed energy at 0°C (J)
0.06	0.40	0.96	0.01	0.01	470	560	32	160

J-STAR Welding としての溶接諸特性が得られることを確認しており、540 N/mm² 級および 590 N/mm² 級鋼用溶接ワイヤへの展開も容易である。

2.3 J-STAR Welding の溶接特性

J-STAR Welding は、ワイヤ先端を頂点とする安定した円錐状アークを形成し、最も理想的な溶滴移行と考えられる微細スプレー移行を CO₂ アーク溶接において初めて実現した。以下に、従来の CO₂ アーク溶接法に対する開発技術の特長を列挙する。

- (1) スパッタ発生量は従来の 1/10 に低減する。
- (2) 溶接ビード近傍のスパッタ付着がない。
- (3) ヒューム発生量は従来の 1/2 に低減する。
- (4) アーク音がソフトであり、音圧は従来の 1/2 に低減する。

これら J-STAR Welding の特性によって、溶接ラインの作業環境改善と溶接構造部材の美観向上が期待される。

3. 薄板の溶接

J-STAR Welding は、微細なスプレー移行の実現により極低スパッタ化を可能にしたが、この効果を得るには、比較的高い電流 (250 A 以上) を必要とする。Fig. 2(a) に板厚 2.0 mm の T 隅肉溶接継手の溶接部外観と断面マクロ組織を示す。155 cm/min の高速溶接においてスパッタ付着のない平滑な溶接ビード形状を得たが、その溶込みは板厚の 80% を超えており大きなギャップを有する溶接、あるいは、板厚 1.6 mm 以下の溶接においては溶落ちの発生が懸念される。より薄板の安定な溶接には、より低電流域でのアークの安定化が必要である。

3.1 電流波形制御による低スパッタ化

Fig. 3 に低電流溶接における電流波形制御を示す。溶接

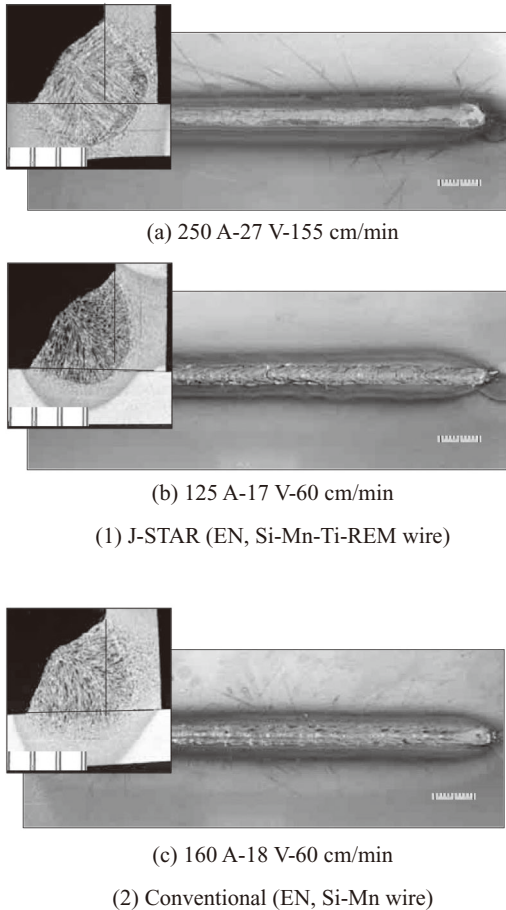


Fig. 2 Welding bead appearance and cross-sectional macroscopic organization

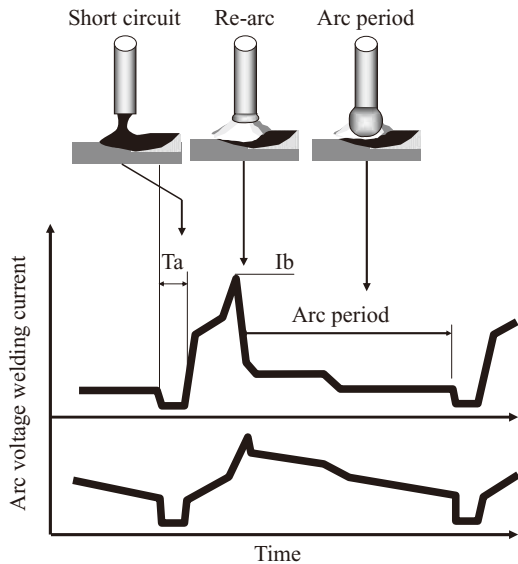


Fig. 3 Waveform control of welding current

電源の基本特性（定電圧特性）において溶接電流は電圧変動に相反する出力特性により電圧変動を抑制する。この基本特性に加えて波形制御は、電圧の急激な減少から短絡を検知し電流出力を制御することで安定な溶滴移行と再アークを実現する。溶滴と熔融池の短絡が避けられない低電流溶接には不可欠な制御技術である。

低電流溶接における J-STAR Welding の溶滴は、従来の CO₂ アーク溶接の溶滴よりもさらに粗大となり、移行回数は毎秒数回にまで減少する。この J-STAR Welding 特有の粗大な溶滴に合った波形制御パラメータについて検討し、最適パラメータとして短絡移行期間 $T_a = 10 \text{ ms}$ 、再アーク電流 $I_b = 400 \text{ A}$ を得た⁴⁾。また、アーク期間の段階的な低電流化により溶滴の移行回数が約 2 倍に増加した。

Fig. 4 に電流電圧波形と溶滴の短絡移行周期のバラツキを示す。従来の棒プラス（EP）では、溶接ワイヤ組成の違いによる短絡移行周期のバラツキに大きな差は認められないが、棒マイナス（EN）では REM を適量添加したワイヤを用いることで短絡移行周期のバラツキは 1/2 に減少し、最適波形制御の適用により 1/6 に減少した。

Fig. 5 に溶接電流とスパッタ発生量の関係を示す。ス

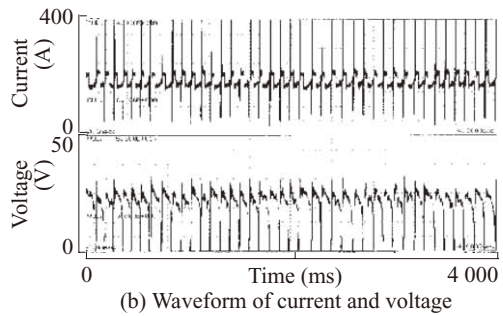
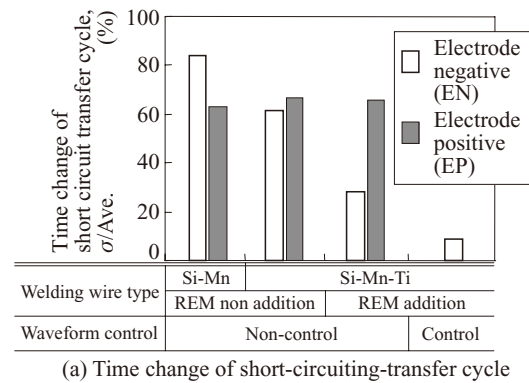


Fig. 4 Short circuit transfer cycle

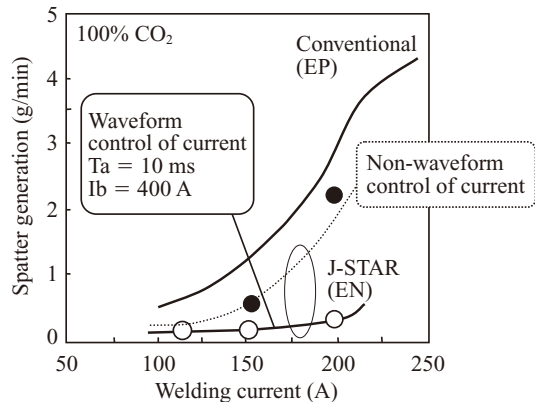


Fig. 5 Relationship between welding current and spatter generation

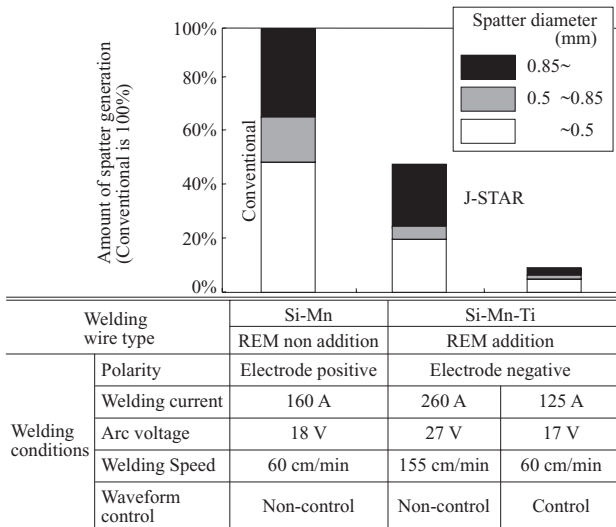


Fig. 6 Particle diameter and amount of emergence of spatter

スパッタ発生量は波形制御の適用により溶接電流 200 A 以下の領域で大幅に低減した⁴⁾。

3.2 新しい波形制御電源の適合性

近年の溶接用電源は高速インバータ回路とデジタル制御技術によりその特性が飛躍的に向上し、棒マイナス (EN) のアーク特性にも対応した電源が開発されている。この新しい波形制御電源は、短絡期間中の橋絡柱が細くなる (くびれ) 現象を検出することで再アーク発生を的確に予測し、アーク電流の急減制御を行うとともに、再アーク発生後のアーク電流を最適に制御する CBT (controlled bridge transfer) 法を採用している⁵⁾。この新電源と J-STAR Welding の適合性について調査した。

Fig. 6 にスパッタ発生量とその粒度構成を示す。板厚 2.0 mm の T 継手を溶接トーチ角 45°, 前進角 10° とし、ワイヤ突出し長さ 12 mm で隅肉溶接した。スパッタ発生量は、従来の標準条件 (160 A-18 V-60 cm/min) に対して、J-STAR welding の REM 添加ワイヤを用いた高電流高速条件 (250 A-27 V-155 cm/min) は 49%, 新電源を用いた低電流低速条件 (125 A-17 V-60 cm/min) では 10% にまで激減した。

Fig. 2(b) に低電流低速条件での溶接ビード外観と断面マクロ組織を示す。溶込みは板厚の約 2 割に抑制されており、より板厚の薄い鋼板の溶接にも十分適用可能である。また、試験体へのスパッタ付着はなく、溶接を必須とする自動車足回り部品の美観と塗装性の向上、付着スパッタの除去工数の削減が期待される。

4. おわりに

「J-STAR Welding」は、高電流域の微細スプレー移行と低電流域の新波形制御電源の採用により広い電流範囲で極低スパッタ化が可能であり、従来の CO₂ アーク溶接では避けられなかった溶接後の付着スパッタ除去作業や手直しが削減できる。また、微細溶滴の連続的な移行は、アーク電流値を安定化させることから溶接金属の品質、溶接ビード形状の安定化にも効果があると考えられ、今後、薄板の組立溶接での活用が期待される。

参考文献

- 1) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 第 75 集, 2002, p. 250-251.
- 2) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 第 75 集, 2002, p. 252-253.
- 3) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接技術. vol. 53, 2005, no. 3, p. 64-69.
- 4) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 第 76 集, 2005, p. 166-167.
- 5) 恵良哲生, 井手章博, 廣田周吾, 上山智之. 溶接学会溶接法研究委員会資料. SW-3075-05, 2005.



片岡 時彦



池田 倫正



安田 功一