

(技術資料)

中厚板向けロボット溶接プロセス

Robot Welding Process for Medium and Heavy Plate



辻 勝之*1
Katsuyuki TSUJI



小川 亮*1
Akira OGAWA



山崎 圭*2(工博)
Dr. Kei YAMAZAKI



袁 倚旻*2
Yimin YUAN

Welding processes are always required to have high-efficiency, quality stability, and reduced costs. The advanced controllability of the welding power sources has enabled the control of the output waveform, using an advanced control law, which has realized the new and highly value-additive process for medium and heavy plates, the "Ultra High Current GMAW Process", "Tandem Arc Welding" and "REGARC™". The "Ultra High Current GMAW Process" is a highly-efficient welding process using single arc and offers large leg length, low-spatter and deep penetration using special flux cored wire and unique waveform control. "Tandem Arc Welding" reduces spatter generation by 70 percent compared with conventional equipment thanks to its new waveform control. The advantage of this welding process is a high deposition rate and high speed welding. "REGARC™" reduces spatter generation by 90 percent compared with the conventional process using CO₂ gas-shielded arc welding.

まえがき＝自動車などの薄板分野に比べ高い技術が必要とされる中厚板溶接の分野では、半自動溶接の比率が高かった。しかしながら近年では、溶接の高効率化や熟練した技能工不足への対応、品質安定化のため溶接ロボットの適用が進んでいる。その中でも、高効率化、高速溶接化、低スパッタ化、およびコストダウンは常に求められており、新たな溶接プロセスの開発が望まれている。

当社が2010年に販売を開始したロボット専用デジタル制御溶接電源SENSARC™^{注1)} AB500（以下、AB500という）（図1）は従来機に比べ制御能力が向上し、高度な制御則による出力波形制御が可能となった。これにより、従来機では難しかった多彩な溶接モードの搭載や、高付加価値な溶接プロセスの開発が実現可能となった。

本稿では、AB500の機能向上により実現可能となった三つの高付加価値溶接プロセスを紹介する(表1)。はじめに、1電極で大電流・高溶着化を実現した「大電流MAG Process」、つぎに従来機と比べスパッタを大幅に



図1 SENSARC AB500外観写真
Fig. 1 Appearance of SENSARC AB500

脚注1) SENSARC (SENSARC™) は当社の商標である。

表1 新溶接プロセス一覧

Table 1 Summary of newly developed welding process

	Welding wire	Shielding gas	Characteristics
Ultra high current GMAW Process	FAMILIARC™ MX-A100D φ 1.4mm	Ar+20%CO ₂	One electrode High-deposition rate Big leg length Low spatter
Tandem arc Welding	FAMILIARC™ MG-50R φ 1.2mm	Ar+20%CO ₂	Two electrodes High-deposition rate High-speed welding
REGARC™	FAMILIARC™ MG-50REG φ 1.1mm	100%CO ₂	Low spatter Low gas cost

低減した2電極による高溶着・高速溶接法「タンデムアーク溶接法」、最後に、炭酸ガス溶接法でありながら極低スパッタを可能にしたREGARC™^{注2)}について解説する。

1. 「大電流 MAG Process」溶接システム^{1),2)}

1.1 背景

近年、建設機械などの中・厚板分野では、操作性の向上の点から1電極による高溶着化による高効率化が強く求められている。このニーズに応えるべく「大電流MAG Process」溶接システムを2012年10月に販売開始した。そこで本章では、大電流MAG Processのシステム紹介、導入効果、施工例について説明する。

1.2 専用フラックス入りワイヤ FAMILIARC™^{注3)} MX-A100D

従来法である炭素鋼ソリッドワイヤを用いた大電流溶

脚注2) REGARC (REGARC™) は当社の商標である。

脚注3) FAMILIARC (FAMILIARC™) は当社の商標である。

*1 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部 *2 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

接では、ローテーティング移行に起因するスパッタの発生が大きな課題であった³⁾。これは、ワイヤ突出し部がアーク発生点に到達する前に抵抗発熱によって溶融して剛性を失い、電磁力の影響を受けて回転しながら溶滴をまき散らすためである^{4)~6)}。そこで、フラックス入りワイヤ（以下、FCWという）のフラックス部が、その回転を防止する“柱”の役割を担う可能性があることに着目した。FCWは内部のフラックスに溶接電流がほとんど流れず、電流密度が増してもワイヤ外側の鉄外皮が先に溶融し、フラックスは柱状を維持する。このため、ワイヤ先端溶融部が回転しないスプレー移行とすることが可能である^{4)~6)}（図2）。さらに、フラックスを大電流溶接用の設計にすることで、耐窒素性やスラグ生成などを最適化し、大電流MAG Processの専用FCWとなるFAMILIARC MX-A100Dを開発した。本ワイヤの溶着金属の化学成分例と機械的性質例を表2に示す。

1.3 AB500による電流電圧波形制御

ワイヤ構造をFCWとすることにより、ワイヤ溶融現象の点からローテーティング移行を防止して安定なスプレー移行が得られることを示した。しかし、一般的な定電圧特性で溶接を行うと、図3に示すようなアーク電圧（アーク長）が不規則に変動する現象が見られた。これは、突出し部のワイヤ鉄外皮がアーク発生点に到達する前に過大なアーク熱やジュール発熱によって溶融し、ワイヤ形状を維持できず不規則に落下することによって発生していることが確認された^{4)~6)}。

そこで、本現象を改善すべく、溶接電流・アーク電圧の波形制御によるワイヤ突出し部の溶融状態の安定化を試みた。その結果、アーク熱やジュール発熱によるワイヤへの入熱を抑える低電流期間を周期的に設ける専用波形制御とすることでアーク長の安定化が可能となった。

1.4 大電流MAG Processを実現する溶接システム構成

大電流MAG Processのシステム構成概略図を図4、システム仕様を表3に示す。

1.4.1 AB500並列運転システム

溶接電流が500Aを超える溶接を行うためには溶接電源を従来機より高出力化する必要があった。そこで、500Aの出力が可能なAB500を2台並列接続し、分割して出力することで最大出力電流700A、使用率100%の高出力化を実現した。

また、それぞれの溶接電源をマスタ機およびスレーブ機として割当て、ロボット制御盤より指令を受けたマスタ機がスレーブ機に指令を送って制御を行っている。このため、ロボット制御盤は従来と同様に1台の溶接電源を制御していることに変わりない。したがって、ユーザは並列運転システムということを特別に意識する必要はなく、これまでの1台の溶接電源と同様に操作することが可能である。

1.4.2 大電流対応溶接トーチRTW601

大電流化に伴って溶接トーチに生じる大きな新たな問題として、パワーケーブルにおける抵抗発熱、およびアークによる輻射熱の増大が考えられる。これらに対応すべく当社は、大電流対応溶接トーチRTW601を新たに開

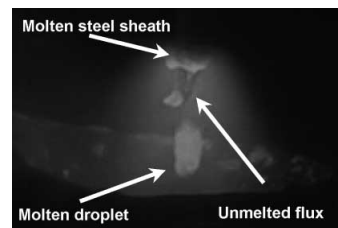


図2 開発法における溶滴移行状態

Fig. 2 Observation of droplet transfer with developed process

表2 溶着金属の化学成分と機械的性質 (mass%)

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of weld metal

C	Si	Mn	P	S	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
0.06	0.81	1.61	0.01	0.007	482	604	25

Welding condition : 500A, 39V, 60cm/min , 4layers-8passes

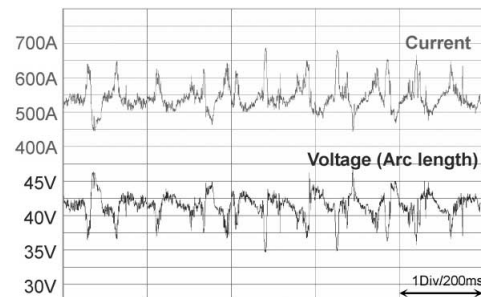


図3 定電圧溶接を使用したアーク長不安定時の電流電圧波形

Fig. 3 Current and voltage waveforms in unstable welding arc with non-pulsed constant-voltage power source

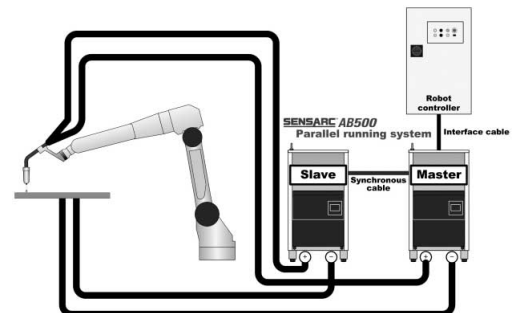


図4 大電流MAG Processシステム構成概略図

Fig. 4 Concept figure of Ultra high current GMAW Process welding system

表3 大電流MAG Process溶接システム仕様

Table 3 Specification of Ultra high current GMAW Process welding system

Manipulator		ARCMAN MP, XL
Welding power source SENSARC™ AB500 Parallel system	Rated output current	700(A)
	Usage rate	100(%)
	Load voltage	55(V)
Maximum wire feed rate		30.0(m/min)
Welding torch for Ultra high current welding RTW601	Rated current	600(A)
	Usage rate	100%(Ar+20%CO ₂)
	Application of wire diameter	1.4(mm)
	Cooling method	Water-cooling
Welding wire	Brand	FAMILIARC MX-A100D
	Wire diameter	1.4(mm)
	Maximum deposition rate	Approximately (300g/min)
Shielding gas		Ar+20%CO ₂

発した（図5）。

パワーケーブルにおける抵抗発熱に対しては、従来と同様のパワーケーブルを2台の溶接電源それぞれから、トーチの給電部まで別経路で接続することによって発熱



図5 RTW601外観写真
Fig. 5 Appearance of RTW601

を抑えると同時に、放熱を促す構造とした(図4)。

また、大電流化によってアークからの輻射熱が強力になり、600Aのアーク雰囲気ではコンタクトチップの周囲温度が従来以上に高温になる。コンタクトチップが高温になると自身の摩耗が加速され、ワイヤへの給電が不安定になって飛散スパッタの増大やビード外観不良につながる。したがって、コンタクトチップを交換する頻度や時間を抑え、大電流MAG Processの溶接効率の向上効果を最大化するためには、コンタクトチップの温度上昇の抑制が必要不可欠である。そこでRTW601では、水冷されているチップボデーとコンタクトチップとの接触面積を増やし、またチップの外形と内径を大きくすることによって表面積を増やし、放熱効率を高めた。これにより、対溶融金属量比で従来法と同等以上の耐摩耗性を実現した。

1.5 大電流MAG Processの効果

1.5.1 スパッタ発生量の低減

ソリッドワイヤを用いた従来法および大電流MAG Processにおけるスパッタ発生量を図6に示す。従来法では、ワイヤ溶融速度が150g/min(溶接電流450A)を超えるとローターティング移行に遷移し、スパッタ発生量が急激に増加する。一方、大電流MAG Processではいずれの溶接電流においても安定したスプレー移行を維持するため、大電流領域に達しても低スパッタを維持することができる。

1.5.2 耐気孔欠陥性の向上

ソリッドワイヤを用いた従来法および大電流MAG Processにおける溶接金属中の窒素量を図7に示す。前述したように、従来法の大電流領域ではローターティング移行となる。軟化したワイヤ先端部は磁力によって回転し、それに伴ってアークも回転する。その際、シールドガス雰囲気とともに攪拌(かくはん)されて大気を巻き込みやすくなり、溶接金属中の窒素量が大きく増加するものと考えられる。その結果、ワイヤ溶融速度200g/min以上ではブローホールを発生する危険性が高くなる。

一方、大電流MAG Processでは大電流領域でも安定なスプレー移行となるため大気の巻き込みが少なく、溶接金属中の窒素量を低く抑えることができる。さらに、開発ワイヤのフラックス成分を耐窒素性を重視したフラックス設計とすることにより、ワイヤ溶融速度が300g/minにおいても気孔欠陥は発生しない。

1.6 施工例

大電流MAG Processを使用した下向すみ肉、V型開先溶接の施工例を以下に示す。使用鋼材はすべてSS400であり、チップ-母材間距離は28mmである。

1.6.1 下向すみ肉, 脚長15mm, 1パス溶接

従来法と大電流MAG Processの溶接条件を表4、断面マクロ写真を図8、ビード外観写真を図9に示す。従来のシングル溶接法で脚長15mmを得るためには、2パス溶接を行う必要があった。しかし、大電流MAG Processの高溶着施工によって1パス溶接で実現可能となり、溶接効率は2.4倍に向上する。また、600Aという大電流でありながら付着スパッタがほとんどない美しいビード外観を得られていることが分かる。なお、既存の高溶着プロセスであるタンデム溶接法では難しかった5.0mmという深溶込みを実現している。

1.6.2 50°V型開先, 板厚16mm, ルートギャップ5mm

従来法と大電流MAG Processの溶接条件を表5、多層盛り概略図を図10、断面マクロ写真を図11に示す。従来のシングル溶接法では4パス溶接が必要であったが、1パス削減することが可能となるうえに、高溶着により溶接速度も上げられるため、溶接効率は1.8倍に向上した。

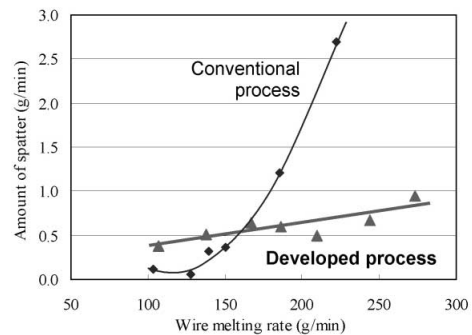


図6 スパッタ発生量の比較(ビードオンプレート)
Fig. 6 Comparison of spatter generation rate (Bead on plate)
(Welding condition: 1.4mm dia., Ext: 28mm;
Ar+20%CO₂; 60cm/min)

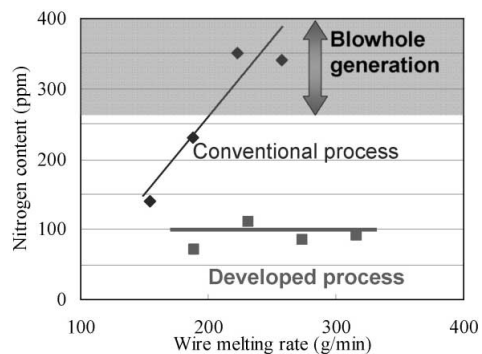


図7 溶接金属中の窒素量の比較(下向隅肉溶接)
Fig. 7 Comparison of nitrogen content in fillet weld metal
(1.4mm dia., Ext: 28mm, Ar+20%CO₂; 60cm/min)

表4 下向隅肉溶接における溶接条件比較
Table 4 Comparison of welding condition in flat fillet welding

Layers	Conventional process*		Developed process
	1	2	
Welding current(A)	420	420	600
Deposition rate(g/min)	125	125	268
Welding Speed(cm/min)	34.0	23.0	33.0
Ratio of weld efficiency	1		2.4

*Solid, 1.4mm dia., MAG, Ext 25mm

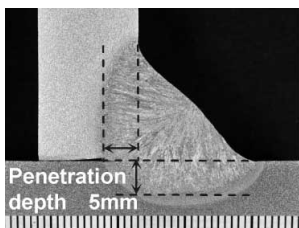


図8 断面マクロ写真例
Fig. 8 Macrostructure of cross section



図9 ビード外観写真
Fig. 9 Bead appearance

表5 V型開先溶接における溶接条件比較
Table 5 Comparison of welding condition in single V groove welding

Layers	Conventional process*				Developed process		
	1	2	3	4	1	2	3
Welding current(A)	320	360	360	360	530	530	390
Deposition rate(g/min)	88	101	101	101	255	255	153
Welding speed (cm/min)	32.0	28.0	24.0	19.0	48.0	37.0	25.0
Ratio of weld efficiency	1				1.8		

*Solid, 1.4mm dia., Ext 25mm

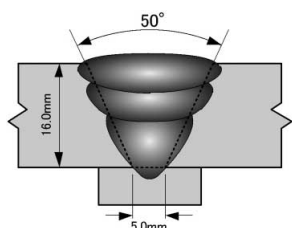


図10 溶接多層盛り模式図
Fig.10 Welding pass sequence

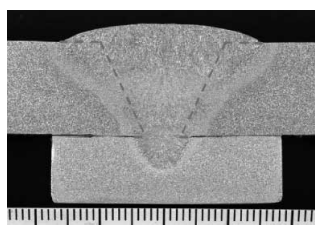


図11 断面マクロ写真例
Fig.11 Macrostructure of cross section

2. タンデムアーク溶接法

2.1 背景

溶接速度向上と健全なビード形成を両立できる溶接法として当社は、2電極1プールのタンデムアーク溶接法を適用したロボットシステムを2001年から発売し、その後も新技術・新機能を継続して開発している。今回AB500の機能向上により、操作性および溶接性の向上を実現した。本章では、新たに開発した波形制御技術とその効果を中心に説明する。

2.2 AB500における新アーク長制御

2.2.1 同期振幅変調制御

二つの電極でアークを発生させるタンデムアーク溶接では、スパッタ低減を目的にパルス溶接法を使用しており、先行極のアーク長は周波数変調により制御している。また、両極間のアーク干渉を抑え、溶接安定性を向上するために、2電極のパルス周波数を同期させる必要がある。そのため、従来機の後行極のアーク長は周波数変調ではなく、ピーク電流値の振幅変調で制御していた。しかし、本法のピーク電流値のみの振幅変調では、アーク電圧を制御するために必要な電流が不足する。また、パルス溶接の特徴である低スパッタを実現するパルス波形を維持できない場合があり、所望のアーク長を保持できないことや、スパッタが増大することがあった。

そこでAB500では、後行極の新アーク長制御として“同期振幅変調制御”を搭載した。本制御は、ピーク電

流に加えてベース電流も変調してアーク長制御を行う(図12)。この結果、先行極・後行極共に外乱に対してアーク長を維持できる裕度が広がり、溶接条件範囲も拡大した。また、従来機では先行極の溶接条件の変更に伴い、後行極の溶接電流やアーク長が変化することがあったが、このような状況も解消され、溶接条件の調整もより容易になった。

2.2.2 高度負荷特性制御(後行極アーク長制御)

タンデムアーク溶接法では、安定したアークおよび健全なビード形成を維持するためには、二つのアーク間に生じる溶融金属の盛り(以下、湯溜りという)を安定して維持することが重要である⁷⁾(図13)。

従来機では、外乱に対する先行極のアーク長制御によって溶融池の状態が変動した場合、その変動に対して後行極のアーク長を精緻に制御していた。これにより、さらに溶融池に変動が生じてかえって湯溜りが乱れ、アーク安定性を悪化させることがあった。

そこで当社は、新たに後行極のアーク長制御の一つである“高度負荷特性制御”を開発した。本制御は、アーク長の制御目標値を決定する要素としてフィードバック電流の移動平均値を使用することによって外乱の影響を弱め、溶融池に対するアーク長制御の作用を抑えている(図14)。

2.3 導入効果(スパッタ発生量の低減)

AB500のタンデムアーク溶接では、2.2節で挙げた二つの新波形制御によってアーク安定性や溶接作業性が格段に向上した。また、スパッタの発生を大幅に抑え、従来機に比べて最大70%の低減と小粒化を実現した(図15)。

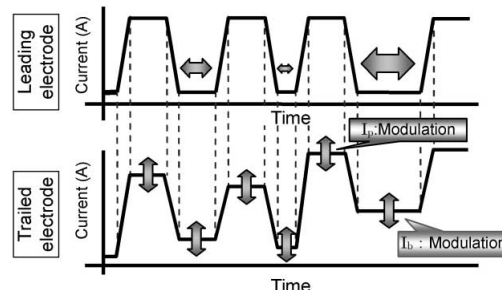


図12 同期振幅変調制御イメージ
Fig.12 Image of synchronous amplitude modulation control

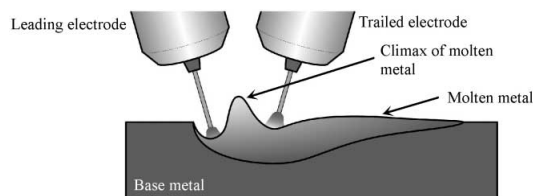


図13 タンデム溶接時のアークと溶融池の状態図
Fig.13 Situation of welding arc and molten metal in tandem arc welding

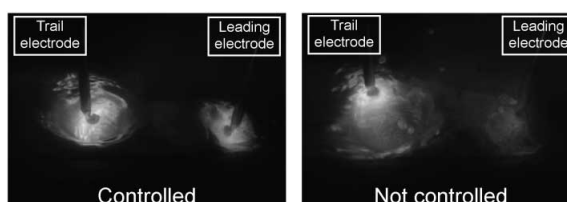


図14 高度負荷特性制御効果一例
Fig.14 Example of advanced load characteristics control

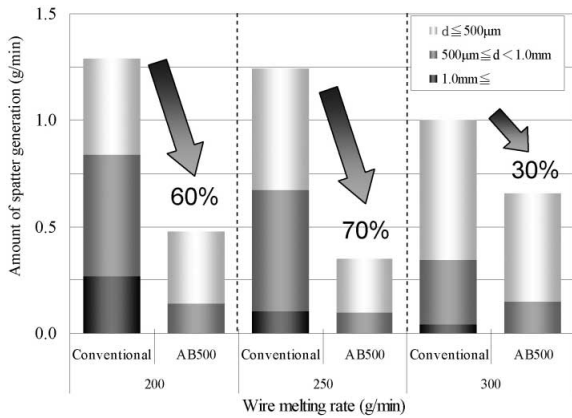


図15 スパッタ発生量の比較 (下向隅肉溶接)

Fig.15 Comparison of spatter generation rate in flat fillet welding

3. REGARC⁸⁾

3.1 背景

アーク溶接において使用されるシールドガスは主に炭酸ガスとアルゴンガスであり、前者は後者に比べ極めて安価であるというメリットがある。しかし、従来の炭酸ガスアーク溶接においては、大粒スパッタの発生が避けられなかった。そこで当社は、特殊パルス電流波形を用いた新たな溶滴移行制御に取り組み、規則的な溶滴形成と離脱によって低スパッタを実現する溶接法であるREGARCの開発に成功した。

本章では、REGARC溶接システムの特長とその導入効果について説明する。

3.2 REGARC溶接システム仕様

REGARC溶接システムの仕様を表6に示す。REGARCの専用溶接ワイヤとしてFAMILIARC MG-50REGを新たに開発した。本溶接ワイヤは、安定した送給性ととも、ワイヤ成分・ワイヤ径を最適化し、規則的な溶滴移行を実現する溶接条件範囲の拡大を可能とした。またREGARCは、溶接電源AB500による高度な電流電圧波形制御によって実現している。

3.3 REGARCにおける溶滴移行制御

従来の炭酸ガスアーク溶接では大量の大粒スパッタが発生する。その発生形態は主に二つあり、一つ目は、溶滴が熔融池と短絡して消弧した後、短絡が解放されて再アークした瞬間に溶滴や熔融池の一部が吹飛ばされることによるものである(図16 (A))。二つ目は、溶滴の下部にアークが集中して発生し、溶滴がアークと逆方向に押し上げられるため溶滴が離脱しにくくなって大きく溶滴成長する。その溶滴がさらにアーク反力によって押し上げられ、大粒スパッタとして離脱することによるものである。これは、一般的にグロービュール移行と呼ばれる(図16 (B))。

そこで、REGARCは炭酸ガスアーク溶接における溶滴形成・離脱過程の各タイミングにおいて、溶接電流を特殊なパルス波形にすることによって溶滴の押し上げを抑制する。これによって溶滴が大きく成長する前に規則正しく熔融池に移行させることが可能となり、短絡および大粒スパッタの飛散を抑制している⁹⁾(図17)。

3.4 導入効果

3.4.1 低スパッタ

従来の炭酸ガスアーク溶接とREGARCのスパッタの発生量の比較を図18に示す。REGARCのスパッタ発生量は通常の炭酸ガスアーク溶接に比べ10分の1と大きく低減している。また、スパッタの粒径も小さくなることから、飛散したスパッタは母材に到達する前に空気中で冷えて凝固するため母材表面に付着しにくい(図19)。

したがって、炭酸ガスアーク溶接を使用しているユーザはスパッタ低減による後工程の短縮や作業環境の改善が期待される。また、スパッタ低減のために混合ガスア

表6 REGARC溶接システムの仕様

Table 6 Specification of REGARC welding system

Welding power source	SENSARC AB500
Shielding gas	100%CO ₂
Welding wire	FAMILIARC MG-50REG φ1.1mm
Maximum wire melting rate	145(g/min)
CTWD	25(mm)
Applicable welding position	Flat fillet, Horizontal fillet

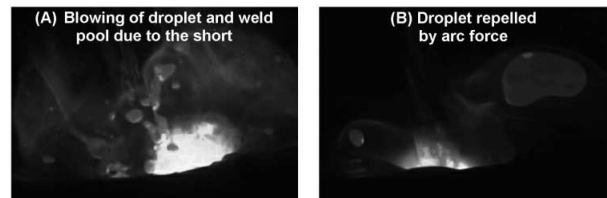


図16 炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生状態

Fig.16 Situation of spatter generation with conventional CO₂ arc welding

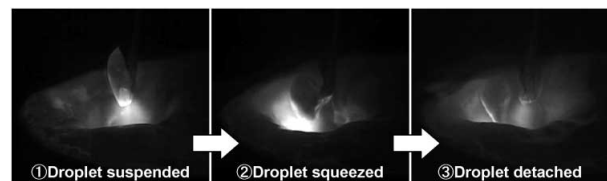


図17 REGARCの溶滴移行

Fig.17 Droplet transfer of REGARC

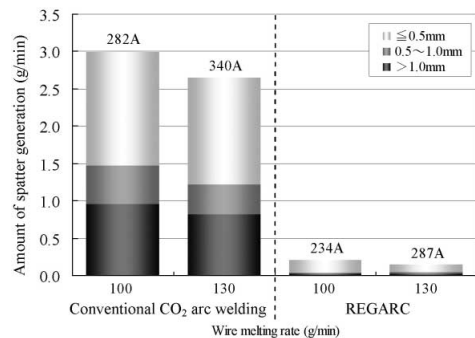


図18 スパッタ発生量一例 (下向隅肉溶接)

Fig.18 Comparison of spatter generation rate in flat fillet welding



図19 スパッタ付着状況比較

Fig.19 Comparison of adhered spatter in fillet welding

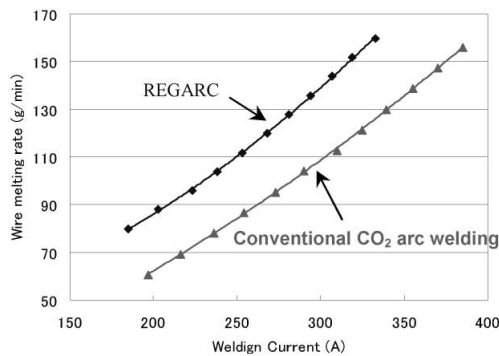


図20 ワイヤ溶融速度比較
Fig.20 Comparison of wire melting rate

ーク溶接を使用しているユーザには安価な炭酸ガスへの切替えによるコストダウンが期待できる。

3.4.2 高溶融速度/入熱低減

REGARCの同一平均電流におけるワイヤ溶融速度は、通常の炭酸ガスアーク溶接と比較して20~25%高い(図20)。これは、パルス電流を用いるため実効電流が高いことと、専用ワイヤ「FAMILIARC MG-50REG」を使用することによる。逆に、同一溶融速度において溶接電流が小さくなるため、入熱による溶接変形を抑えることができる。

むすび=三つの中厚板向けの高付加価値溶接プロセスを解説した。当社は、高溶着施工法においては、タンデムアーク溶接法と大電流MAG Processをラインナップし、提案可能な溶接法の拡充を図った。両施工法はそれぞれ強みがあり、タンデム溶接法は最大溶接速度、大電流

MAG Processは耐溶接残し・溶込み深さが優れており、ニーズに応じた施工法が適用可能となった。また、REGARCによって、これまで炭酸ガスアーク溶接では困難であると考えられていた極低スパッタ化を実現した。これらの溶接プロセスはユーザにおける溶接作業効率の向上、作業環境の改善、ひいてはコストダウンにつながることを強く期待できるものである。

今後も溶接材料・施工技術・溶接ロボットシステムを組合せた多角的なアプローチにより、新たな溶接ソリューションを提供していく所存である。

参考文献

- 1) 辻 勝之ほか. 溶接技術. 産報出版, 2012-11, Vol.60, p.112-117.
- 2) 辻 勝之. 神戸製鋼ホームページ. 溶接だより 技術がいで 技術レポート, 2012-11, vol.52.
- 3) S. Izutani et al. International Institute of Welding2006. XII Doc.212-1090-06.
- 4) 袁 倚旻ほか. 溶接学会全国大会講演概要2010-9-7. 溶接学会, 2011, p.146-147.
- 5) 袁 倚旻ほか. “ローテーティング移行を防止する高電流溶接プロセスの開発”. 第214回溶接法研究委員会資料, 2011, No.SW-3374-11.
- 6) 鈴木順一. “ガスシールドアーク溶接における溶滴および溶融池の制御プロセスの最新動向”. 溶接学会誌, 2010, 第79巻, 第6号, p.27-33.
- 7) 横田順弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.2, p.81.
- 8) 小川 亮. 神戸製鋼ホームページ. 溶接だより 技術がいで 技術レポート, 2011-12, vol.51.
- 9) 山崎 圭ほか. 溶接学会全国大会講演概要2010-3-29. 溶接学会, 2010, p.138-139.