

(技術資料)

REGARC™を搭載した鉄骨溶接システム

Robotic Welding System for Architectural Steel Frames Equipped with REGARC™ Process



横田順弘*1
Masahiro YOKOTA



松村浩史*1(工博)
Dr. Hiroshi MATSUMURA



高田篤人*1
Shigeto TAKADA



竹村義也*1
Yoshiya TAKEMURA



草野惣一郎*1
Soichiro KUSANO



山崎 圭*2(工博)
Dr. Kei YAMAZAKI

The CO₂ gas-shielded arc welding is a low cost and high efficiency process and is the main welding process used in Japan. However, it generates a large amount of spatter. The REGARC™ process, which controls the metal droplet transfer by using the waveform control of an output current, significantly decreases the spatter generation rate in a globular transfer. Applying the REGARC™ process to a robotic welding system for architectural steel frames enables the quick removal of spatter and further shortening of the cycle time.

まえがき＝製造業においては溶接工程のコスト削減に向けた様々な取組がこれまでに行われている。建築鉄骨の製作現場においても、溶接技能者不足を補うべく1980年代後半から導入された溶接ロボットは、その後のバブル崩壊による景気低迷下において、「生産コスト低減」の切札としてその導入が拡大した。

しかし、大型公共工事の減少と加工単価の下落が進む一方、鉄骨ファブリケータにおける鉄骨溶接に対する品質管理要求は、阪神・淡路大震災以降の改正建築基準法によって一段と厳しくなり、作業コストの増加や納期圧迫の要因となっていた¹⁾。

そのような状況に対し当社では、入熱量が制限される中においても、2台のロボットで二つの継手を同時に溶接することによって入熱制限と生産性の大幅向上を両立する2アーク溶接システムなど、様々なシステム機能を開発し、省人化、高能率化およびリードタイム短縮に寄与してきた。

このような20年余りの動向において、溶接ロボットなどのハードウェア、およびロボット制御、アプリケーションソフトなどのソフトウェア機能は目覚ましく進歩した。しかしながら溶接施工方法は、長い間その多くが炭酸ガスアーク溶接法にて実施されており、大きな変化はない。

炭酸ガスアーク溶接法は溶接能率が高く、アルゴンなどの高価なガスを使用しない低コスト溶接法として我が国の主要な溶接法となっている。しかし、高電流領域では大粒の溶滴が不規則に移行するグロービュール移行形態となり、スパッタ発生量が著しく増加するという欠点がある。また、その溶滴は複雑かつ不安定な挙動を呈するため溶滴移行制御は困難とされ、炭酸ガスアーク溶接法が開発されて50年が経過した現在でも、グロービュール移行領域での低スパッタ化は実現されていなかった²⁾。

上記の課題に対し、当社はパルス波形制御による規則的な溶滴形成と溶滴離脱を実現する低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法「REGARC™^{注)}」を開発した。本溶接法は、規則化されたグロービュール移行を特長とする炭酸ガスアーク溶接法であり、スパッタ発生量を劇的に低減でき、さらに高溶着、ヒューム発生量の低減といった付加価値の高い溶接法となっている。本稿では、REGARCプロセスとこのプロセスを搭載した新しい鉄骨溶接システムについて紹介する。

1. REGARCプロセス^{2)~4)}

1.1 グロビュール移行の規則化

従来の炭酸ガスアーク溶接法では、溶接電流が増加するとワイヤ先端に形成される溶滴が大粒化したグロービュール移行という溶滴移行形態となる。グロービュール移行では、シールドガスとして用いられる炭酸ガスがアークプラズマにより解離する。解離する際にはエネルギーを必要とするため、アークは熱緊縮を起こす。緊縮したアークがワイヤ先端に形成される溶滴下部に集中するため、溶滴はアークの反力によって上方に持ち上げられながら成長する。溶滴には、アーク反力や表面張力などワイヤ先端からの溶滴の離脱を阻害する力と、重力や電磁ピンチ力など溶滴を離脱させる力が働いている。アーク反力などの離脱を阻害する力に対し、重力などの離脱させる力が上回ったときに溶滴がワイヤ先端より離脱する。

溶滴移行形態がグロービュール移行である場合、スパッタが発生する機構はおおむねつぎの三つのパターンに分類することができる。

- ①溶滴が成長するにつれて自重によって垂れ下り、溶融池と接触(短絡)してアークが消弧する。続いて、

脚注) REGARC (REGARC™) 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

アークが再点弧した直後に溶融池の一部と溶滴が飛散しスパッタとなる (図 1 (a))。

②溶滴がアーク反力によって押し上げられ、溶融池に移行することなくアーク反力によって飛散してスパッタとなる (図 1 (b))。

③溶滴がワイヤ先端から離脱した直後に、アーク発生点が溶滴からワイヤ先端近傍にある溶融部に移動する。そのとき高電流アークによって溶融部が吹飛んでスパッタとなる。

これらスパッタ発生機構に基づき、グロービュール移行領域におけるスパッタ発生量を低減するためには、①溶滴の過大な成長を抑制することによる溶融池との短絡の防止、②溶滴を過大に持上げるアーク反力の低減、③溶滴離脱直後の溶接電流低減、の三点が重要であると考えられる。REGARCプロセスにおいては、出力波形を制御することによって上記の課題を解決し、スパッタ発生量の低減を実現している。

図 2 にREGARCプロセスにおける出力波形の一例、図 3 に溶滴移行現象を示す。REGARCプロセスでは、溶滴の形成を担うパルス波形と溶滴の離脱を担うパルス波形を交互に出力しており、この 2 種類のパルスを 1 周期として 1 周期ごとに 1 溶滴を移行させている。

アルゴンガスを主成分とする混合ガスをシールドガスとして用いるMAGパルス溶接では、1パルスで1溶滴移行が一般的である。それに対し、シールドガスが炭酸ガスの場合、上述のスパッタ発生機構において、①、②は主に溶滴形成段階、③は溶滴離脱段階でのスパッタ発生機構であり、それぞれの段階で最適な溶接電流範囲とその出力時間が異なる。このため、REGARCプロセスでは

2 種類のパルス波形を設定し、スパッタ発生量の低減を図っている。まず、溶滴形成において、従来法では溶滴に作用する力（離脱させる力と離脱を阻害する力）のバランスによって溶滴サイズが変化する。それに対してREGARCでは、溶滴形成においてワイヤ送給量に応じて設定されたパルス波形を用いるため、ワイヤを溶融するエネルギーが一定となり溶滴のサイズが均一化する。その結果、溶滴の過大成長が抑制でき、短絡スパッタの発生を低減することが可能となる。また、溶滴形成パルスのピーク電流およびピーク時間を最適化することによって過大なアーク反力を抑制し、溶滴が押し上げられて飛散するスパッタの低減を図っている。

一方、溶滴離脱においては、溶滴の安定的な離脱および溶滴離脱時の溶接電流低減によるワイヤ先端の溶融部吹飛ばしスパッタの抑制が重要である。まず、安定的な溶滴移行を実現するためには、溶滴が離脱する起点とな

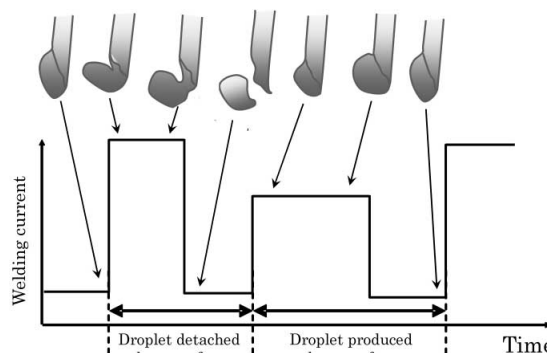


図 2 REGARCプロセスによる出力波形の一例
Fig. 2 An example of output waveform by REGARC process

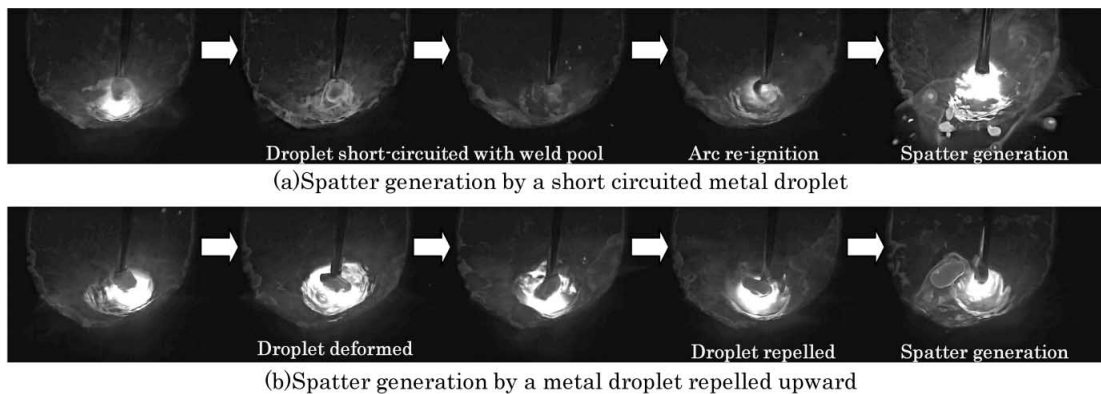


図 1 通常の炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生現象
Fig. 1 Spatter generation phenomenon by conventional CO₂ gas shielded arc welding

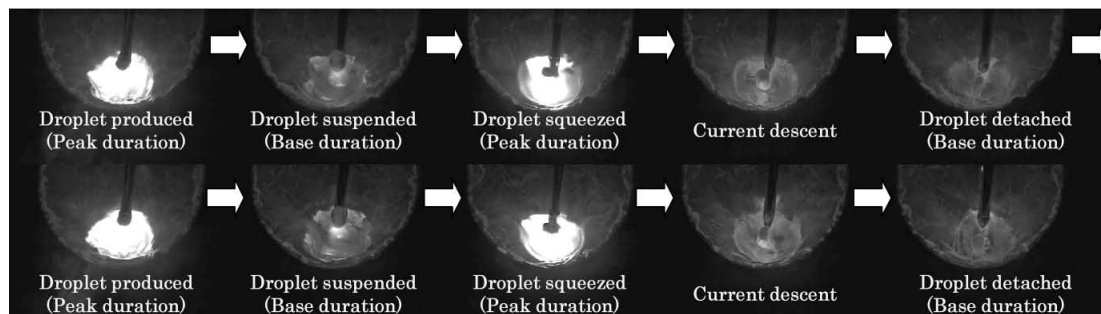


図 3 REGARCプロセスによる溶滴移行現象
Fig. 3 Metal droplet transfer by REGARC process

るくびれを溶滴上部に形成することが必要である。REGARCプロセスでは溶滴離脱パルスのピーク電流を溶滴形成時のピーク電流より高くし、くびれを形成する力の一つである電磁ピンチ力を増大させることによって確実にくびれを形成させている。そして、溶滴の離脱タイミングを捉えて速やかにベース期間へ移行させるため、溶滴離脱直後にアーク発生点がワイヤ先端の溶融部へ移動したときにはすでに溶接電流は低下し、ワイヤ先端の溶融部からは低電流アークが発生する。これによって、ワイヤ先端の溶融部を吹飛ばすことが極めて少なくなる。

従来法およびREGARCにおける溶滴移行周波数を図4に示す。従来法では溶滴移行周波数に大きなばらつきが認められるのに対し、REGARCでは溶滴移行周波数のばらつきが非常に小さく規則化されており、溶滴移行周波数も高い。この結果から、REGARCでは従来法と比較して溶滴の大きさが均一、かつ細粒化されており、また短絡スパッタやアーク反力による押し上げスパッタなどの不規則な溶滴移行が抑制されていることが分かる。

1.2 スパッタ発生量の低減

従来法とREGARCにおける下向き肉溶接でのスパッタ発生量の一例を図5に示す。

REGARCは、その波形制御による規則的なグローブ移行によってスパッタ発生量が大幅に低減しており、とくにワイヤ送給速度12~16m/minの範囲ではスパッタ発生量が約1/10に低減している。また、溶接後に付着

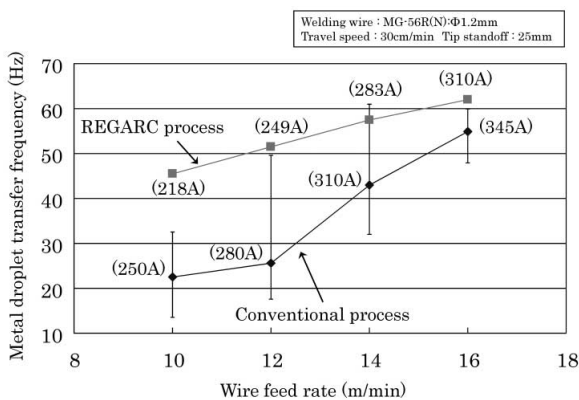


図4 溶滴移行周波数の比較

Fig. 4 Comparison of metal transfer frequency between conventional process and REGARC process

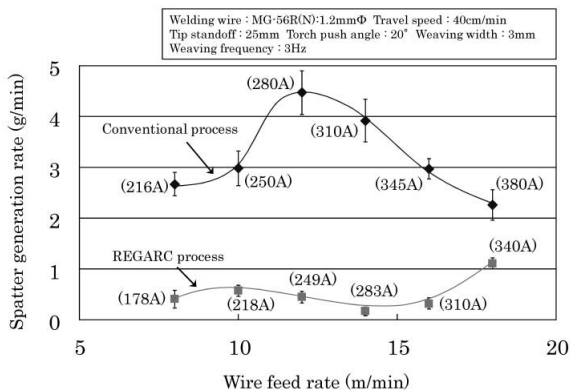


図5 スパッタ発生量の比較

Fig. 5 Comparison of spatter generation rate between conventional process and REGARC process

するスパッタにおいても、従来法では粒径が大きく多量であるのに対し、REGARCではスパッタの粒径も小さく、付着スパッタも非常に少なくすることができる。

1.3 高溶着化と入熱量の低減

図6は、従来法とREGARCにおける平均溶接電流とワイヤ溶融速度の関係を示したものであり、同一の平均電流に対するワイヤ溶融速度はREGARCの方が10%以上高いことが分かる。REGARCではパルス波形を用いているため、パルスピーク期間の電流は従来法よりも高くなる。ワイヤの溶融速度はアーク熱とワイヤの抵抗発熱によって決まるが、アーク熱は溶接電流に比例し、ワイヤの抵抗発熱は溶接電流の2乗に比例する。これより、REGARCでは従来法と比較して、とくにワイヤの抵抗発熱が大きくなるため、平均溶接電流値が同じ場合は溶融速度が増加し、これによるアークタイムの短縮が可能となる。

つぎに、ワイヤ突出し長さが同じである場合、同一溶着量としたときの平均溶接電流値を比較すると、REGARCは従来法に対し、約10%低下する。例えば、従来法で300A程度である場合、REGARCでは275A程度で同じ溶融速度となる。したがって、同じ溶融速度で溶接を行う場合、入熱量を低減することが可能となり、溶接金属の機械的性質の向上や溶接ひずみによる変形の低減も期待できる。

1.4 ヒューム発生量の低減

ヒュームは、アークによって過熱された溶滴や溶融池表面から発生する金属蒸気が起源である。健康に対して有害な物質であり、吸引すると化学中毒症状や、長期的にわたるとじん肺などの健康障害を引起こす要因となる。

図7は、従来法とREGARCにおけるワイヤ単位重量あたりのヒューム発生量を比較したものである。従来法と比較してREGARCのヒューム発生量は半減しているのが分かる。これは、従来法では短絡やアークの再点弧などが頻繁に起こり、溶滴や溶融池の挙動が不安定となってヒュームの発生と拡散が著しいのに対し、REGARCでは短絡がほとんど発生せず、また図4のように、溶滴移行周期が短く溶滴加熱時間が短縮されるため、溶滴表面からの金属蒸気発生量が低減しているものと考えられる。これより、REGARCはその低ヒューム性により、溶接作業現場の作業環境改善にも寄与することができる。

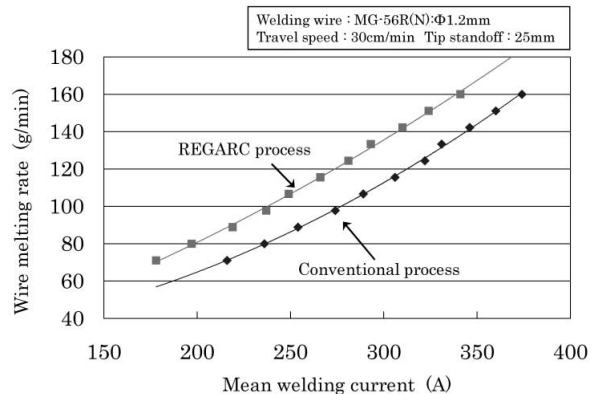


図6 平均溶接電流とワイヤ溶融速度の関係

Fig. 6 Relations of mean welding current and wire melting rate

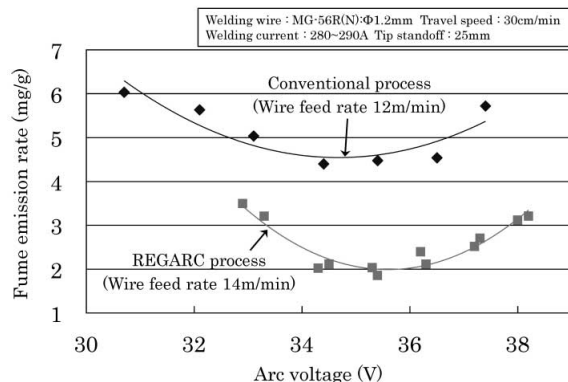


図7 ヒューム発生量の比較

Fig. 7 Comparison of fume emission rate between conventional process and REGARC process

2. REGARCプロセスを搭載した鉄骨溶接システム⁵⁾

つぎに、REGARCプロセスを搭載した鉄骨溶接システムを紹介する。

鉄骨溶接システムには、省スペース型コア・仕口兼用溶接システム(図8)のように角形鋼管柱の中にあるコアの溶接を主体とする小形システムや、全長10mを超える鉄骨柱を溶接する柱大組立溶接システムなどがラインナップされている。とくに、柱大組立溶接システムのような大形システムでは、搭載するワークが大形化かつ厚板化するため、夜間にわたって長時間連続運転するケースも多い。また、建築鉄骨の溶接継手は、そのほとんどがレ形開先である。鉄骨溶接システムにおいてREGARCプロセスの特長を發揮させるためには、鉄骨溶接システムに特有の使用状況を考慮した設計が必要となる。

本章では、長時間連続運転や鉄骨溶接継手に対してもREGARCプロセスの特長を發揮させるために搭載している鉄骨溶接システムの新機能を紹介する。

2.1 振り子ウィービング

ロボット溶接で対象となる継手形状はレ形開先の継手が主体となり、REGARCの適用有無にかかわらず、ワイヤ先端が開先面に接近し過ぎるとスパッタが発生しやすくなる。そこで鉄骨溶接システムでは、REGARCの低スパッタ性を保つため、振り子状にウィービングすることでスパッタの低減を図っている。この方式では、図9のように開先面およびダイアフラム面とのなす角を従来ウィービング法に比べて大きくとることができるため、スパッタを減少させることができる。

ウィービング方法を変えるとシールド性能の変化が懸念されるため、シールド性能の目安となる溶接金属中の窒素量を測定した(表1)。従来ウィービング法と同等に良好な値が得られており、シールド性能は従来法と同等であることが確認できている。

2.2 長時間連続運転への対応

鉄骨柱のような大形ワークを溶接する柱大組立溶接システムは、コアの溶接を主体とする省スペース型コア・仕口兼用溶接システムと比較して継手数も多く鋼材も厚板化するため、一つのワークに要する溶接時間が長くな



図8 REGARC搭載省スペース型コア・仕口兼用溶接システム

Fig. 8 Robotic arc welding system equipped with REGARC process for structural hollow section joint and diaphragm to beam flange joint

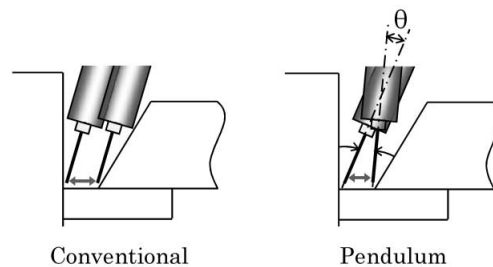


図9 ウィービング法

Fig. 9 Weaving patterns

表1 ウィービングにおける溶接金属中の窒素量の比較

Table 1 Comparison of nitrogen content in weld metal of diaphragm to structural hollow section joint between conventional weaving pattern and pendulum weaving pattern

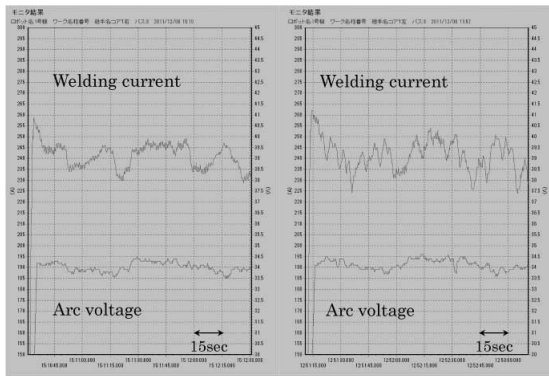
Weaving pattern	Analyzed section	Nitrogen content (ppm)
Conventional	Flat	78
	Corner	80
Pendulum	Flat	79
	Corner	82

る傾向にある。

長時間連続運転における懸念事項は、溶接ワイヤに給電するコンタクトチップの摩耗による溶接トラブルである。すなわち、溶接時間が経過するにつれてコンタクトチップの穴が摩耗によって拡大し、コンタクトチップ内の溶接ワイヤとの給電位置が変化する。これによって、スパッタ発生量の増加やアークの不安定、さらには溶接欠陥の発生などを引き起こす可能性がある。

REGARCをはじめとするパルス溶接は、出力電流の急峻な変化を繰返すため、定電圧溶接に比べコンタクトチップの摩耗の影響を受けやすい傾向にある。図10にREGARCにおけるコンタクトチップ交換直後と交換後8時間経過したときの溶接電流とアーク電圧波形の一例を示す。交換直後は溶接電流が安定しているが、交換後8時間経過したときの溶接電流は大きく変動している。これは、コンタクトチップ内の給電位置が変化し、実際のワイヤ突出し長さが変化していることに起因していると考えられる。そして、この変動が激しくなるほどスパッタの多量発生やアーク不安定が発生する。このため、摩耗の影響が現れる前にコンタクトチップを交換する必要がある。

実機においては、長時間連続運転あるいは夜間無人運



Just after contact tip exchange 8 hours after contact tip exchange

図10 コンタクトチップの摩耗による溶接電流の変動

Fig.10 Fluctuation of welding current by the abrasion of contact tip

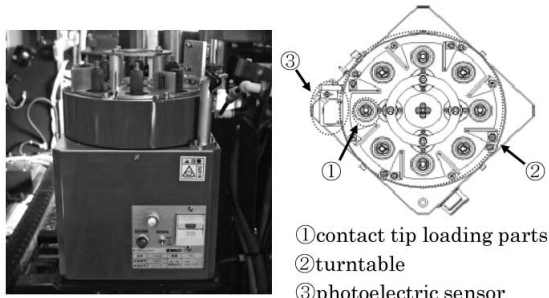


図11 コンタクトチップ自動交換装置

Fig.11 Automatic exchanging equipment for contact tip

転の最中にチップ交換のタイミングを迎えることが想定されるため、新たに自動でコンタクトチップを交換する装置『チップチェンジャー』を開発した。チップチェンジャーの外観写真および装置の概略を図11に示す。チップチェンジャーは、①チップを置く把持部、②ターンテーブル、③チップ脱着を確認するセンサなどで構成される。最大交換可能回数は7回であり、最初に取り付けた1本を加えて合計8本分の連続運転が可能である。あらかじめコンタクトチップ交換時間を設定し、溶接中のアークタイム積算時間がその設定時間を超える前にチップ交換作業を行う。これにより、人の手を介さずにコンタクトチップの交換が可能となり、長時間連続運転や夜間無人運転においてもREGARCの性能を発揮させることが可能となった。

3. 鉄骨溶接システムへのREGARCプロセス適用効果

開発したシステムでは、REGARCの特長と前述した新機能を組合せることによって、従来システムと比べてつぎのような効果を発揮させることが可能となった。

3.1 スパッタ発生量の低減と能率向上

図12はレ形開先の角形鋼管の溶接におけるパスの経過とシールドノズルへのスパッタ付着量を測定したものである。このように、開先内の溶接においてもREGARCを適用した場合のスパッタ発生量は、従来法と比べて1/4程度に低減できている。

従来法では、発生するスパッタがシールドノズルに堆積し、シールド不良（大気中の窒素混入）に起因する溶接金属の機械的性質の劣化やブローホールなどの溶接欠

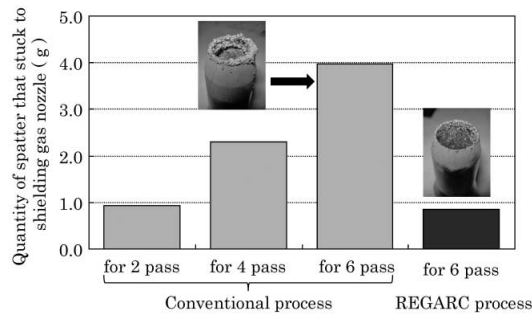


図12 従来法とREGARCにおけるシールドノズルに付着したスパッタ量の比較

Fig.12 Comparison of Quantity of spatter stuck to shielding gas nozzle between conventional process and REGARC process

Conventional process	Arcing time	0:44	0:28
	Non-welding operation time		
REGARC process	Arcing time	0:43	0:23

図13 従来法とREGARCにおけるサイクルタイムの比較例

Fig.13 Comparison of cycle time required for welding diaphragm to structural hollow section joint between conventional process and REGARC process

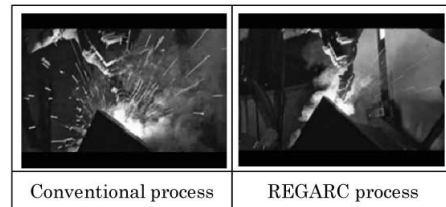


図14 従来法とREGARCにおけるコラム溶接の状況

Fig.14 Comparison of views of welding diaphragm to structural hollow section joint between conventional process and REGARC process

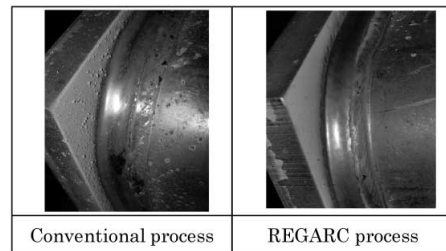


図15 従来法とREGARCにおけるダイアフラムとコラムのスパッタ付着状況の比較

Fig.15 Comparison of spatter adhered to diaphragm and structural hollow section between conventional process and REGARC process

陥が発生する場合がある。このため、ロボット溶接においては、長時間の連続運転性能を維持するために自動的にノズルの清掃や交換を行い、スパッタを除去している。REGARCを適用した鉄骨溶接システムでは、シールドノズルに堆積するスパッタ量が激減するため（図12）ノズルの清掃頻度を半減させることができ、アーク発生率の向上とサイクルタイムの短縮が可能となる。図13は角形鋼管（ $\square 400 \times t22\text{mm}$ ）を溶接した場合のサイクルタイム比較の一例であるが、この場合約10%の短縮を図ることができている。

また、図14は角形鋼管の溶接状況、図15は溶接後の

スパッタ付着状況を比較したものである。従来法では溶接中の飛散スパッタが多く、ダイアフラムや角形鋼管に多くのスパッタが付着している。それに対し、REGARCでは飛散スパッタ、付着スパッタとも非常に少なくなっており、システムのサイクルタイムに含まれる溶接後の付着スパッタ除去作業の軽減が可能となる。

3.2 REGARCによる溶接金属の機械的性質

従来法とREGARCによる溶接金属の機械的性質を調査した。試験条件は、板厚19mm、35°レ形開先、ルート間隔7mmの角形鋼管と通しダイアフラム継手を模した試験体と、MG-56R (N)、ワイヤ径φ1.2mmの供試ワイヤを用いて溶接を行った。表2に示す溶接金属部のシャルピー衝撃試験と引張試験の結果より、溶接金属の機械的性質も十分な結果が得られており、建築鉄骨溶接技量検定(AW検定)のロボット試験基準に対しても十分満足している。図16は、角形鋼管の直線部とコーナ部の断面マクロ写真である。従来法と比べて十分な溶込み深さが得られていた。

3.3 柱大組立シングル溶接システムへの適用結果

鉄骨ファブリケーターへ納入したREGARC柱大組立シングル溶接システム(図17)を用いて鉄骨柱の施工を行った。溶接後のスパッタ付着状況を図18に示す。溶接の

表2 従来法とREGARCによる溶接金属の機械的性質の比較

Table 2 Comparison of mechanical properties of weld metal of diaphragm to structural hollow section joint between conventional process and REGARC process

	0.2% proof Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Charpy absorbed energy 0°C (J)	
				Flat	corner
REGARC process	508	597	31	avg.146	avg.123
Conventional process	501	592	32	avg.141	avg.113
spec	-	≥490	-	≥avg.70	

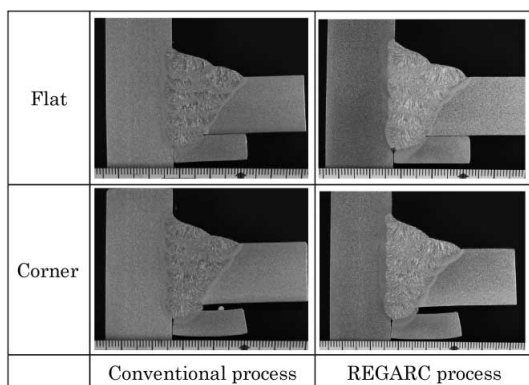


図16 従来法とREGARCによる溶接部の断面マクロ写真

Fig.16 Cross sectional profiles of weld metal of diaphragm to structural hollow section joint between conventional process and REGARC process



図17 REGARC搭載柱大組立溶接システム

Fig.17 Robotic arc welding system equipped with REGARC process for steel frame columns



図18 REGARC搭載柱大組立溶接システムによる鉄骨柱溶接後のスパッタ付着状況

Fig.18 Spatter adhered to diaphragm and steel frame column after welding by Robotic arc welding system equipped with REGARC process for steel frame columns

状況においては、飛散スパッタおよびダイアフラムや角形鋼管に付着しているスパッタとも非常に少なく、実際のシステムにおいてもREGARC溶接の特長であるスパッタの少ない溶接が行えることが確認できている。

むすび＝スパッタの少ない溶接を可能とするREGARCプロセスと、この特長を建築鉄骨の溶接においてさらに発揮させる新機能の搭載により、生産効率の向上と高品質な溶接を両立できる鉄骨溶接システムが実現した。今後も、REGARCプロセスの適用アプリケーションを増やし、建築鉄骨分野へのREGARCプロセスの浸透を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 松村浩史ほか. 鉄構技術. 2010, Vol.23, No.268, p.27-29.
- 2) 山崎 圭ほか. 溶接技術. 2010, Vol.58, No.5, p.80-84.
- 3) 特許第5036197号.
- 4) 黄地尚義. 溶接・接合選書 第1巻 溶接・接合プロセスの基礎 初版. 産報出版, 1996, p.87-133.
- 5) 草野惣一郎. 溶接だより技術がいで 技術レポート. Vol.52, 2012-9, p.1-6.