

(技術資料)

建築鉄骨向け溶接ロボット用ソリッドワイヤ「R」シリーズ

Solid Wires Named “ R ” Series Suitable for Building Structure Welding Robots



中野利彦*
Toshihiko NAKANO



鈴木励一*
Reiichi SUZUKI

Many fabricators are introducing welding robot systems as a method to achieve low cost, high productivity, short appointed date of delivery and improving reliability of quality in the industry of building steel structure. Solid wires named “ R ” series which have characteristics of supporting continuous operation, defect prevention, excellent mechanical properties of weld metal and beautiful appearance have been developed adjusting to this trend. The lineup of these wires is classified according to the welding method and tensile stress of weld metal.

まえがき = アーク溶接用ソリッドワイヤは全溶接材料に占める割合が約 40% の国内最大品種であり、さらにその最大の需要家が建築鉄骨業となっている。建築鉄骨業界はバブル景気以降、溶接材料の需要低下が著しく、設備投資も極めて緊縮していた。しかし、2004 年以降、IT 関連の国内工場の新設、首都圏の大型再開業をはじめとする国内景気の回復による急激な鋼材不足を背景として、材料費および加工費が上昇しつつある。このような環境変化の中、i) 近年の目覚ましいロボットの性能向上、ii) BOX 柱 S 造や SRC 造から鋼管コラムへの構造シフト、iii) 急激な需要増と短納期化、iv) 信頼性向上を一

層求める機運などが相乗り、溶接ロボットの設備投資が急拡大している。搭載される溶接ワイヤにも、ロボットの施工の特徴に合ったより使いやすいものへの要求が高まっている。これに対応して、溶接カンパニーでは「R」シリーズと称するロボット専用ワイヤを開発し、好評を得ている。(表 1)

1. 建築鉄骨向けロボットの特征¹⁾

一般的な建築鉄骨用溶接ロボットシステムは、一部の簡易型を除けば、6 軸程度の関節を持つマニピュレータと溶接部材を保持するポジションナで構成される。(図 1)

表 1 建築鉄骨ロボット用ソリッドワイヤ「R」シリーズの一覧

Table 1 List of solid wires named “ R ” series suitable for building structure welding robots

Brand name	Welding method	JIS specification	Shielding gas	Chemical composition of deposit metal(%)						
				C	Si	Mn	P	S	Ti	B
MG-55R	CO ₂	YGW18	CO ₂	0.06	0.56	1.22	0.010	0.010	0.04	Add.
MG-50R		YGW11		0.09	0.57	1.00	0.010	0.013	0.04	-
MIX-55R	Pulsed MAG	YGW19	Ar 80% + CO ₂ 20%	0.10	0.58	1.22	0.011	0.012	0.03	-
MIX-50R		YGW15		0.07	0.35	1.05	0.010	0.005	0.04	-

(Test condition ; According to JIS Z3312)

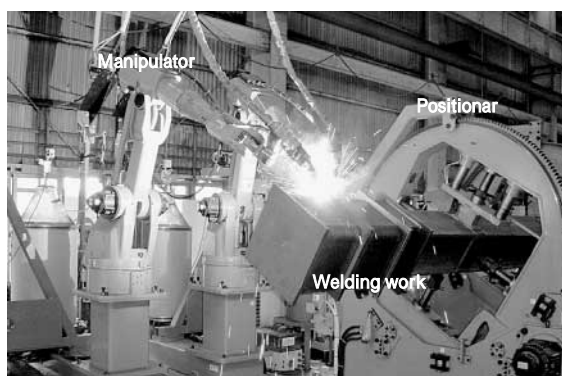


図 1 建築鉄骨向けロボットシステムの構成 (当社製アークマン溶接システム)

Fig. 1 Construction of welding robot system for building structure (“ ARCMAN ” welding system of Kobe Steel)

* 溶接カンパニー 技術開発部

自動車向けの薄板溶接用ロボットが、人間が教示した溶接線軌跡を忠実に再現するのに対し、鉄骨用ロボットは、溶接部材の板厚や大きさ、形状分類などを入力すると、溶接箇所の検知、電流、電圧、速度等溶接条件の生成、熱ひずみによる溶接線ずれの修正、溶接トーチからタガネに持替えてのスラグ除去、シールドノズルに付着したスパッタの清掃・交換など、ほとんど全ての作業を自動で行うことができ、より知能的といえる。このため、いったん部材をセットしてスタートボタンを押すと完成までほぼ何もする必要がなく、夜間の無人運転さえも可能である。さらに最近では、マニピュレータを2組搭載して異なる開先断面積のワークを同時に溶接可能な“2アークシステム”も登場している。このように、ロボットは省人化、高能率化、短納期対応の切札として普及が進んでいる。

2. ロボット溶接部の信頼性

一方、溶接部の品質信頼性についても、ロボット溶接はそれを確保できる手段として大いに期待されている。耐震性を確保するための溶接部の強度や衝撃吸収エネルギーといった機械的性質は、材料面以外に施工管理の影響も受ける。中でも、入熱やパス間温度の管理は鉄骨工事技術指針²⁾、溶接材料のJIS規格解説などで規定値が設けられているが(表2)、人手による溶接では実際に正しく管理が行われているかの確認と保証が難しいとされており、現在もその管理手段について学会などで論議されている。しかし、ロボット溶接では基本的にロボットメーカーが施工条件のプログラムを作成し型式認証されていること、施工記録の保存機能があること^{注)}から、最も高い信頼性が得られる手段として設計会社やゼネコンな

どに認められている。

このロボットによる溶接部の信頼性確保に関して、AW 検定協議会(以下、AW という)によるロボット溶接オペレータ資格を取得することが重視されている³⁾。AW は設計会社、ゼネコン、検査会社が主体で検定業務を行う建築鉄骨に特化した溶接技量検定であり、建築鉄骨の品質・安全性と溶接関連技術の向上を目的としている。従来は溶接作業者の技量向上を目指すものであり、溶接部の機械的性質は確認項目になかったが、ロボット溶接オペレータ資格においてのみ溶接金属の引張試験と衝撃試験の合格が必要とされた(表3)。特に衝撃試験については鋼材規格や実工事の要求仕様とは無関係に、全溶接箇所に対して「0 におけるシャルピー吸収エネルギーが70J 以上必要」との厳しい合否判定値が設けられている。

本質的な鉄骨溶接継手部の必要靱性についてはこれまで建築学会などで研究され、発行された「鉄骨梁端部溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説」⁴⁾において、特定の条件管理下における柱/梁継手部においてのみ70J以上の要求仕様が規定され、一般的には鋼材と同じ27Jで十分とされている。これに対し、AW 検定試験では、本来対象ではない継手にも一律に高い吸収エネルギーを要求しており、過剰要求としてその付加根拠について議論がある。しかし、このような過剰要求も、ロボットであれば確保できるとの高い信頼性に裏打ちされたためと推測される。

3. ロボット溶接に求められる溶接ワイヤの性能と分類

以上述べた溶接ロボットに要求される機能から、搭載

表2 JIS Z3312 : 1999 解説 鉄骨構造建築物におけるワイヤの使用区分
Table 2 Explanation of JIS Z3312 : 1999 "The Classification of Solid Wires for Building Structure"

	Welding condition		Tensile strength of base metal		
	Heat input kJ/cm	Interpass temperature	400N/mm ² class	490N/mm ² class	520N/mm ² class
1	15~20	150	YGW11, 15, 18, 19	YGW11, 15, 18, 19	YGW18, 19
2	15~30	250	YGW11, 15, 18, 19	YGW11, 15, 18, 19	YGW18, 19
3	15~40	350	YGW11, 15, 18, 19	YGW18, 19	-

表3 AW 検定協議会の検定種類と内容
Table 3 Licenses and contents in "AW kentei"

Kind of license	Joint	Bead appearance	X-ray test	Macroscopic test	Bend test	Tensile test	Impact test
Shop welding (Steel tab)	Full penetration					-	-
	Fillet welding		-			-	-
Shop welding (Ceramic or flux tab)	Full penetration				-	-	-
Construction site welding (Steel tab)	Full penetration					-	-
Construction site welding (Ceramic or flux tab)	Full penetration				-	-	-
Pipe welding	Butt welding					-	-
	Branch-off welding		-		-	-	-
Operator of welding robot	Cross of flat plate (RT)						
	Square column (RC) ^{Fig.2}						
	Circular pipe column (RP) ^{Fig.2}						

脚注) 当社システム

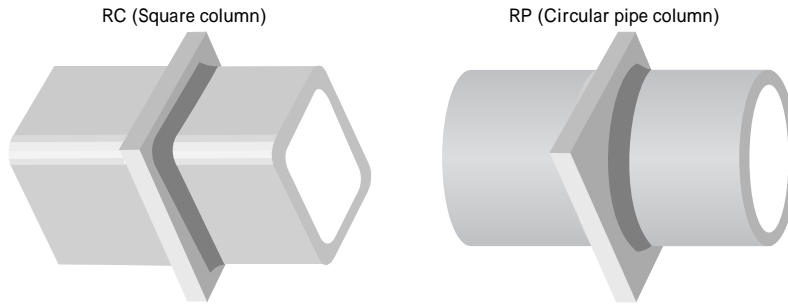


図2 AW 検定ロボット溶接オペレータ試験の継手種目 (RC, RP)
 Fig. 2 "RC" and "RP" joint of AW's license "the operator of welding robot"

表4 鉄骨溶接ロボットシステムにおける溶接法の特徴
 Table 4 Features of welding methods for steel structure using robot system

Welding method	Penetration depth	Prevention of porosity defect	Low spatter generation	Low slag generation	Mechanical properties	Efficiency	Low cost
CO ₂							
Pulsed MAG							

(:superior , : inferior)

される溶接ワイヤにもそれに見合った特性が要求される。具体的には、スラグ堆積が少ない、センシング性に優れる、送給性が良いなど作業阻害要因が極力少なく、自動運転と高能率化をさらに向上させる、ロボットの溶接条件において溶接部の欠陥防止や機械的性質が優れる、ビード形状が美しい、付着スパッタが少ないなど製品鉄骨の商品価値を高める、などが挙げられる。

建築鉄骨向け溶接ロボットメーカーは当社を含め現在数社あるが、採用している溶接法は炭酸ガス溶接法とパルスマグ溶接法の2種に大別される。それぞれの溶接法の特徴を表4に示す。最近では、コストや施工効率、溶接欠陥防止に優れた炭酸ガスアーク溶接法のシステムが主流となってきているが、当社ではそれぞれの溶接法向けに最適化したロボット用ソリッドワイヤ「R」シリーズを揃えている。

溶接材料の機械的性質の面では阪神淡路大震災以降、活発な研究が行われ、高強度・高靱性を発揮する溶接ワイヤ YGW18, 19 (通称 540MPa) 級の採用が推奨されてきた。上述の「鉄骨梁端部溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説」もその研究成果の一つである。従来ワイヤである YGW11, 15 (通称 490MPa 級) ワイヤの3割以上が 540MPa 級に替わったと考えられ⁵⁾、今後もその傾向は続く。次章以降でそれぞれの溶接法について 540MPa 級ワイヤを中心にその特徴を紹介する。

4. 炭酸ガス溶接用ソリッドワイヤ MG-55R, MG-50R

鉄骨業界では人手による半自動溶接も含めるとほとんどが炭酸ガスアーク溶接法である。理由は、深溶込み、低コスト、高能率であることによる。しかし、炭酸ガスは Ar 混合ガスに比べて酸化性が強いので、溶接ワイヤに含まれる Si, Mn, Ti がスラグ化して多く発生しやすい性質がある(図3)。490MPa 級に比べて 540MPa 級ではさらに高い強度と靱性を得るため、溶接金属の焼入れ性を高めてミクロ組織の微細化で達成すべく、脱酸

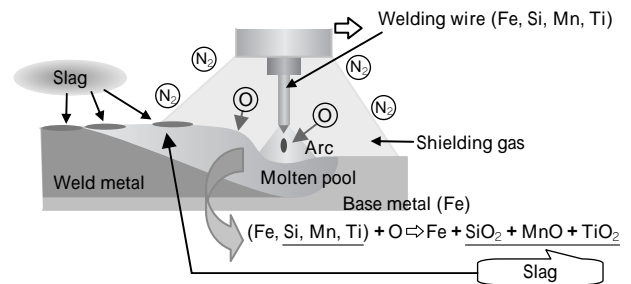


図3 溶接スラグの発生メカニズム
 Fig. 3 Generation mechanism of welding slag

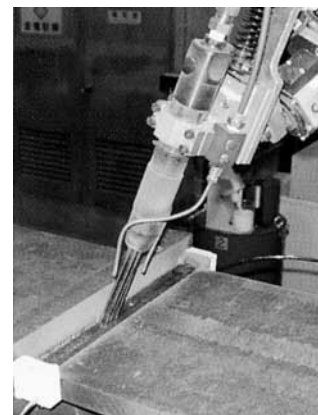


図4 スラグ自動除去システム (当社製)
 Fig. 4 Automatic slag remover (Manufactured by Kobe Steel)

元素を多く添加している⁶⁾。そのため、490MPa 級に比べてスラグ発生量が非常に多く、剥離性も劣る傾向があった。半自動溶接では適時除去作業が行われるため比較的この問題は大きくなかったが、ロボット溶接に適用した場合、頻りにスラグ除去が必要となり、連続溶接可能な板厚が小さくなる、スラグが邪魔になってビード蛇行のような外観不良が発生する、自動スラグ除去システム(図4)を用いても剥離し難く除去回数が増加して能率が低下する、スタート箇所にもスラグが残っているとアークが発生せず稼働停止することがある、といった問題があった。

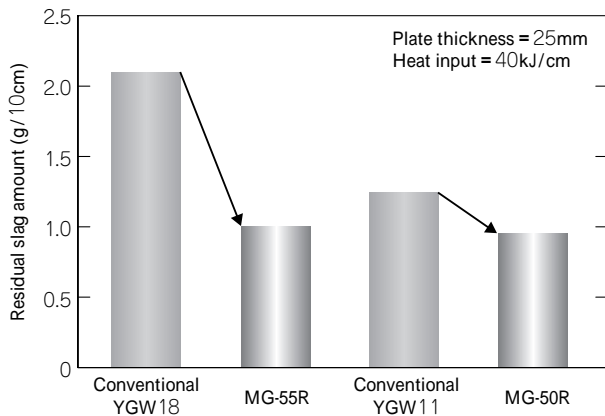


図5 ワイヤとスラグ残留量の関係
Fig. 5 Relationship of wire and amount of slag generated
(Residual = generated - natural detached)

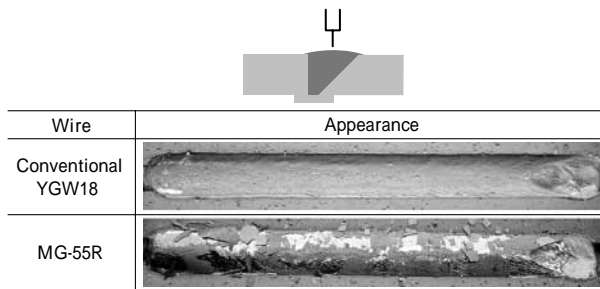


図6 スラグ剥離性の比較(1)
Fig. 6 Comparison of slag detachability (1)
(Flat position, Plate thickness:16mm, Cooled to room temperature)

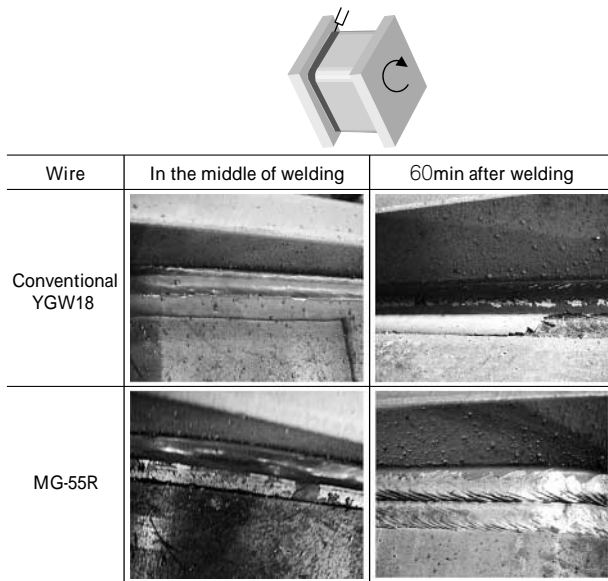


図7 スラグ剥離性の比較(2)
Fig. 7 Comparison of slag detachability (2)
(Joint:Diaphragm/Square pipe circumference, Pipe thickness:25mm)

MG-55R, MG-50Rはこの問題を改善するため、従来ワイヤに比べて大幅な低スラグ化と剥離性の向上を図っている。これによって、溶接ロボットシステムの機能を十分に発揮し、溶接時間の短縮、夜間の無人運転、ビード外観の向上、溶込みの安定化などを高めることが可能となった。

図5に一例として板厚25mmの継手溶接後のMG-55R, MG-50Rのスラグ量を従来ワイヤと比較して示す。MG-55Rでは従来YGW18ワイヤに比べて約50%に低減している。図6, 図7に溶接継手におけるスラグ剥離状況を

示す。いずれの姿勢、板厚においてもMG-55Rは従来のYGW18ワイヤよりも優れたスラグ剥離性を有している。ここでは自然剥離性を便宜的に評価したが、溶接途中にチップなどでスラグ除去を行う場合も同様であり、容易に除去が可能である。したがって、自動スラグ除去システムを用いた場合でも除去残し無く、ロボットの安定した連続運転が可能となる。

従来の540MPa級(YGW18)ワイヤは490MPa級(YGW11)ワイヤに比べてスラグ量が多く、剥離性が劣るために、スラグ除去が不要で連続積層可能な板厚上限が表5に示すように小さかった。しかし、MG-55Rはこれらが改善され、改良YGW11のMG-50Rと同等な使い勝手となり、連続積層上限が向上している。

次に溶込み深さについて説明する。幾つかの鉄骨建築用ロボットはアークセンサ機能を持ち、溶接線のずれをリアルタイムに修正して溶込み不良を回避するが、大きな溶込み深さが得られる溶接ワイヤを組み合わせることでさらに欠陥発生が抑制される。MG-55RおよびMG-50Rは、従来ワイヤよりもアークの集中性を高めることで深い溶込みを実現している。図8に従来のYGW18ワイヤと比較してMG-55Rの初層の溶込み深さを測定した結果

表5 スラグ除去無しで溶接可能な上限板厚
Table 5 Maximum thickness of continuous welding operation without any slag removal

Wire	Max. thickness (mm)
Conventional YGW11	22
Conventional YGW18	19
MG-55R, MG-50R	25

(Position : flat)

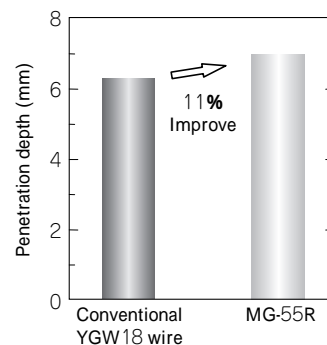
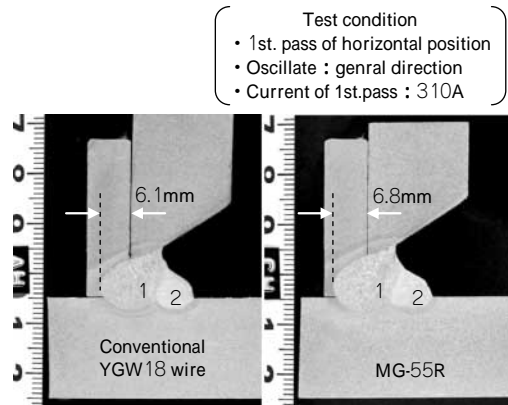


図8 MG-55Rと従来YGW18ワイヤの溶込み深さの比較
Fig. 8 Comparison of penetration depth between MG-55R and conventional YGW18 wire

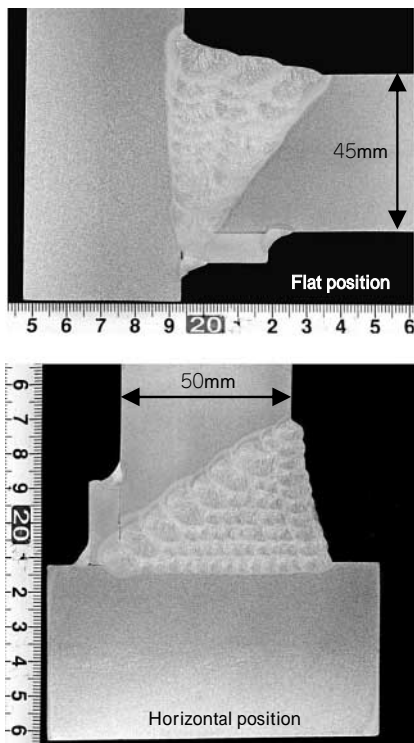


図9 MG-55R とアークマン鉄骨溶接ロボットシステム
の組合せによる溶接部断面マクロ写真例

Fig. 9 Example of cross sectional profiles of weld joint by combination of MG-55R and ARCMAN steel structure welding robot system

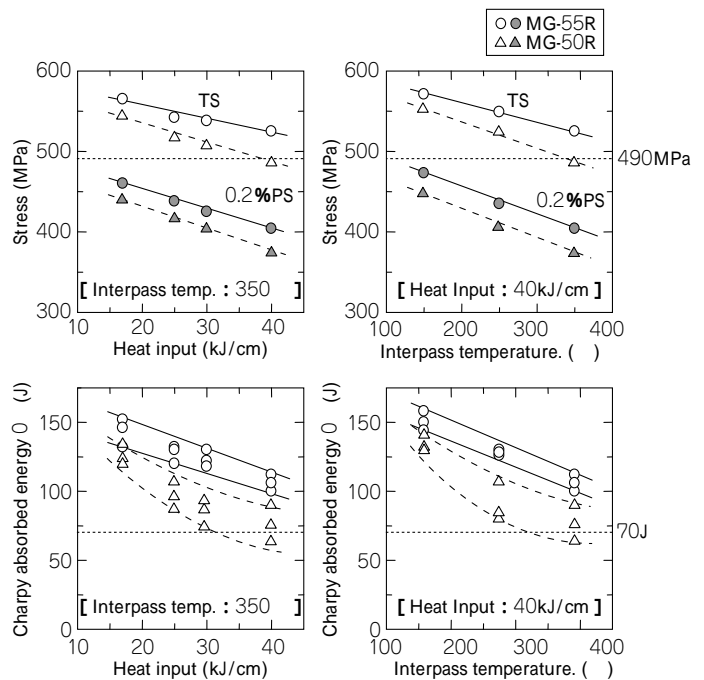


図10 MG-55R, MG-50R の溶接金属の機械的性能に及ぼす入熱・パス間温度の影響

Fig.10 Influence of heat input and interpass temperature on mechanical properties of MG-55R and MG-50R weld metal

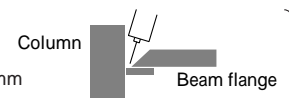
Plate thickness:25mm, Groove angle:35°, Root Gap:7mm,
Flat position, Wire dia.: φ1.2mm
Shielding gas:CO₂, N₂ content in weld metal: 70~80ppm

表6 MG-55R を用いた AW ロボットオペレータ相当試験での引張試験，衝撃試験性能例

Table 6 Example of tensile and impact properties at the welding test according to AW's license of operator of welding robot using MG-55R

Kind of test (Joint)	Heat input program	Tensile test of weld metal				Impact test of weld metal	< Reference >
		0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Charpy absorbed energy 0 (J)	N ₂ Content in weld metal (%)
RC (Square column)	Max. 30kJ/cm	524	612	29	74	103, 110, 109 (Avg.107)	95
RP (Circular pipe column)	Max. 40kJ/cm	508	594	29	75	114, 129, 113 (Avg.119)	82
spec.		-	490	-	-	70	-

Robot : ARCMAN steel structure welding robot of Kobe Steel
Material of square column : BCP325, Circular pipe column : STKN490B
Thickness of both column : 32mm, Material of beam flange : SN490B Thickness : 19mm



を示す。MG-55R では溶込み深さが約 11% 増大していることがわかる。図 9 に当社アークマン鉄骨溶接ロボットシステムと MG-55R の組合せによる数種の開先の断面形状例を示す。いずれも良好な溶込みとビード形状が得られている。

次に、MG-55R および MG-50R の溶接金属の機械的性質として、入熱およびパス間温度と溶接金属の引張強度およびシャルピー吸収エネルギーの関係を図10 に示す。MG-55R は MG-50R に比べて高強度・高靱性であることがわかる。表6 に既述の AW ロボット溶接オペレータ検定試験に相当する試験結果の例を示す。この場合でも良好な性質が得られている。

このほか、MG-55R, MG-50R はワイヤ自体の強度も高めてある。これは、溶接ロボットが開先センシングを行う際、ワイヤは鋼板に接触してセンサの役目も担ってい

るが、接触時に座屈や変形によって精度が狂うのを防止することが目的である。

MG-55R, MG-50R は業界で初めてロボット専用ワイヤとして新カテゴリを構築したワイヤであり、最近では類似のワイヤも市場に現れているが、使いやすさに関して揺るぎない評価を得ている。

5. パルスマグ溶接用ソリッドワイヤ MIX-55R, MIX-50R

表3 で示したとおり、Ar + CO₂ 混合ガス（マグガス）とパルス溶接機を組合せたシステムの特徴としては、炭酸ガス溶接システムに対して極めて少ないスパッタ発生量、少ないスラグ量が長所である。短所は 溶込み幅が狭いため（図11）融合不良が起きやすい、シールド不良や Ar の巻き込みによってブローホールが発生しやす

い^{7),8)}, 高コストといった点があげられる。したがって、同じロボット用とは言ってもワイヤに求める性質は炭酸ガス溶接用とは異なる。

MIX-55R, MIX-50R は厚板である鉄骨溶接システム用に開発されたパルスマグ溶接法専用ワイヤである。一般的にパルスマグ溶接法のほとんどは自動車向けなどの薄板の1パス溶接に適用され^{9),10)},厚板の多層溶接向けワイヤは当社ではこれらのみである。ワイヤ径はシステムに合わせφ1.4mmの太径が標準となっている。

これらのワイヤを適用した際に得られる効果は、パルス電流波形に合わせた溶滴離脱性による極低スパッタ発生量、少ないスラグ発生量、優れた機械的性質であり、本システムに組合せることでその特徴が十分に発揮される。これらの特性はワイヤ成分の最適化だけでなく、Ar混合ガス溶接に最適なワイヤ表面処理を施していることで達成されている。

パルスマグ溶接法は数百Hzの周期で高電流と低電流を繰り返し、Ar混合ガス特有のスプレー溶滴移行による極低スパッタ状態を広い出力電流範囲で実現するものである。周波数は出力電流に応じて変化するが、ワイヤが円滑な溶融と離脱性を保持しなければ周波数との同期が崩れ、スパッタが多く発生してしまう。図12にMIX-55Rの溶滴離脱性を高速度カメラで撮影した連続写真を示す。従来ワイヤに比べてMIX-55Rは溶滴先端がくびれやすく、円滑な離脱を安定して繰り返すことがわかる。図13に開先ウィーピングを行った場合のスパッタ発生量を測定した結果を示す。従来ワイヤに比べて約3割程度低スパッタとなっている。パルスマグ溶接にMIX-55Rを搭載し、コラムの周溶接を行った場合のビード外観を図14に示す。スパッタ付着が少ないだけでなく、良好なスラグ剥離性が得られている。

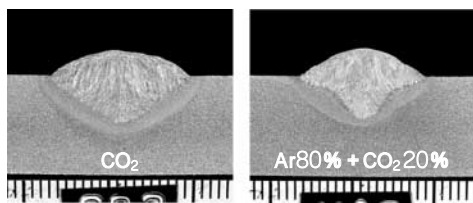


図11 炭酸ガス溶接と Ar-CO₂ 混合ガス溶接の溶込み形状の比較
Fig.11 Comparison of penetration shape between CO₂ welding and Ar-CO₂ mixture gas welding (Current : 300A)

図15にMIX-55RとMIX-50Rについて、入熱およびバス間温度と溶接金属の引張強度とシャルピー吸収エネルギーの関係を示す。Ar混合ガス溶接は炭酸ガス溶接に比べて溶接金属中の酸素量が1/2~1/3と少なくフェライト成長が抑制されることや、介在物となる酸化物が少ないことから吸収エネルギーは一般的に高く、両ワイヤ間で大きく変わらない。しかし、引張強度についてはMIX-55RはMIX-50Rよりも高強度が得られる。

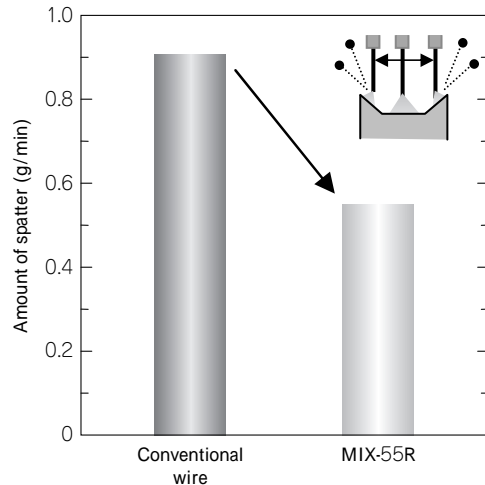


図13 スパッタ発生量の比較
Fig.13 Comparison of spatter generation (Oscillate ; 3Hz, Current ; 340A, Pulse-arc)

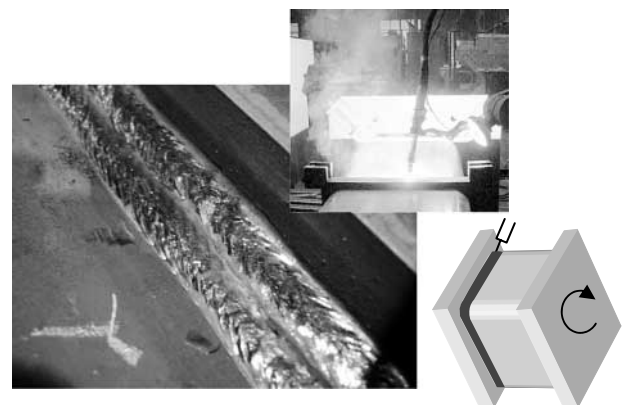


図14 MIX-55Rを角型コラム/ダイヤフラム溶接に適用した際のビード外観
Fig.14 Bead appearance of the joint of square column and diaphragm which welded using MIX-55R

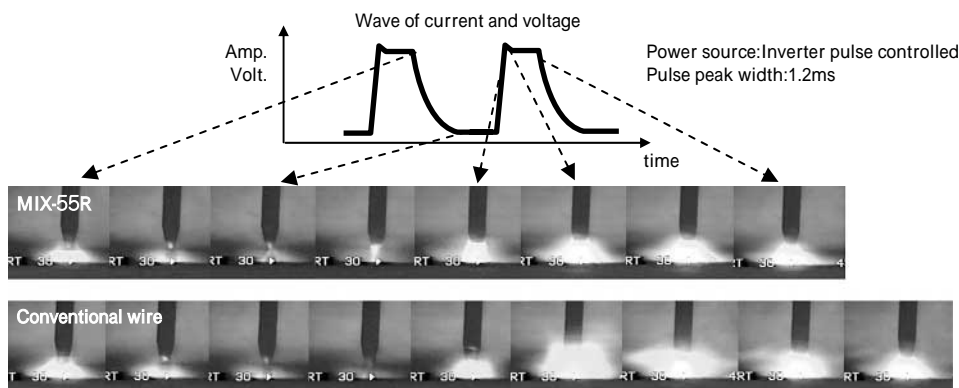


図12 パルスマグ溶接におけるMIX-55Rと従来ワイヤの溶滴移行の比較
Fig.12 Comparison of droplet transfer between MIX-55R and conventional wire at the pulsed MAG welding method

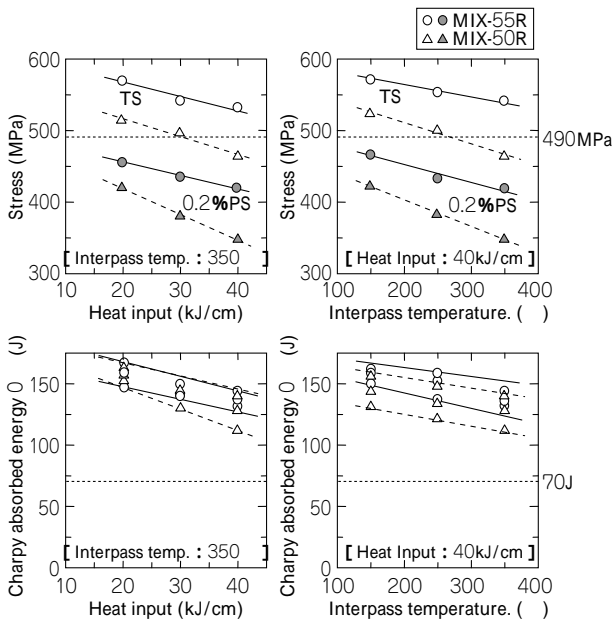


図15 MIX-55R, MIX-50R の溶接金属の機械的性能に及ぼす入熱・パス間温度の影響
 Fig.15 Influence of heat input and interpass temperature on mechanical properties of MIX-55R and MIX-50R weld metal
 (Plate thickness:25mm, Groove angle:35°, RootGap:7mm, Flat position, Wire dia. : ϕ 1.4mm, Shielding gas:Ar 80% + CO₂20%, N₂ content in weld metal: 70 ~ 100ppm)

むすび = 建築鉄骨の耐震性向上を目的とした溶接部の品質向上が叫ばれて久しいが、溶接金属の品質に及ぼす影響因子は図16に示すとおり多岐に渡っており、施工管理が難しいと言われる理由がそこにある¹¹⁾。しかし、パス間温度、入熱、アーク長といった因子についてはロボット溶接化によりほぼ管理されることになる。さらにトレーサビリティさえ担保することも可能となり、信頼性確保には極めて有効な溶接法である。今回紹介した

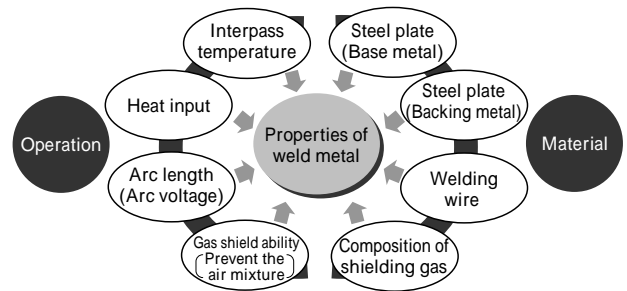


図16 溶接部の健全性や機械的性能に影響を及ぼす諸因子
 Fig.16 Factors influence on soundness and mechanical properties of weld metal

ロボット溶接用ワイヤ「R」シリーズはシステムの特徴に合わせて設計されており、高能率やトラブル防止、溶接品質向上など、ロボット溶接の長所をさらに高めることが可能となる。今後も鉄骨のロボット溶接化は益々進むことが確実視されており、今回紹介したワイヤも合わせて普及することが見込まれる。

参考文献

- 1) 日本溶接協会：建築鉄骨ロボット溶接入門(2000),産報出版.
- 2) 日本建築学会：鉄骨工事技術指針 工場製作編,(2007) p.345.
- 3) AW 検定協議会ホームページ, <http://www.aw-kentei.gr.jp/>
- 4) 日本建築センター：鉄骨梁端部溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説,(2003).
- 5) 日本溶接棒工業会統計.
- 6) 鈴木励一ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.1(2002) p.60.
- 7) マグ・ミグ溶接の欠陥と防止対策, 産報出版.
- 8) マグ・ミグ溶接 Q&A, 産報出版.
- 9) 鈴木励一ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.2(2005) p.59.
- 10) 鈴木励一：溶接だより技術がいど 神戸製鋼技報, No.368,(2000) p.1.
- 11) 鋼構造出版：鉄構技術, Vol.15, No.164(2002) p.32.