

プロセスの最新技術 —ダブルワイヤ MAG 溶接—

日立建機(株) ○ 山本 光 平川 学 高野 悠敬
 エア・ウォーター(株) 池上 祐一 中田 実雄 宮内 秀樹
 名古屋大学 篠田 剛

The Latest Technology in Arc Welding Process —The Double Wire MAG Welding—

by YAMAMOTO Hikaru, HIRAKAWA Manabu, TAKANO Yutaka,
 IKEGAMI Yu-ichi, NAKATA Jitsuo, MIYAUCHI Hideki and SHINODA Takeshi

キーワード: MAG, フィラワイヤ, 入熱, 多関節ロボット, 建設機械

Keywords: MAG, Filler Wire, Heat Input, Articulated Robot, Construction Machinery

1. はじめに

生産性を向上させることにより溶接構造物の製造コスト低減および製作期間の短縮を図ることは重要である。ロボットや FMS による製造ラインの高効率化の他に、溶接の高能率化もキーテクノロジーの一つとして挙げられる。最近では2ワイヤによる高溶着速度 MAG 溶接法が各種提案されている^{1)~5)}が、装置構成の違いによって現象が異なり適用範囲や導入の效果に差が生じると考えられる。そのため、対象とするワークや要求仕様等に応じて、適切な溶接法を選択することが求められる。筆者らはロボットへの搭載、既存設備からの容易かつ低コストでの移行、通常の MAG 溶接との併用も必要、との観点からダブルワイヤ溶接法に着目した。

ダブルワイヤ溶接法は、消耗電極で形成した溶融池の後方にフィラワイヤを供給することにより、通常の MAG 溶接と同一の溶接入熱で溶着速度を増加させるものである。アルミニウム合金の MIG 溶接用に開発され、2倍を超える溶着速度の増加が確認されている⁶⁾。また、フィラワイヤの挿入により溶融池温度を従来よりも低く抑えられることから、パッカリング現象の抑制や凝固割れ感受性低減等の効果が得られている^{7,8)}。ここでは、ダブルワイヤ溶接法を用いて鋼溶接を行った際の基本特性、箱形構造物材で大部分を占める T 形すみ肉継手を対象にした場合の実用性について述べる。

2. ダブルワイヤ溶接装置の概要

2.1 原理と特長

ダブルワイヤ溶接装置の構成を図1に示す。1本のノズル内に電極ワイヤとフィラワイヤを近接して配置し、溶融池の後方にフィラワイヤを送給する。この際、母材から溶接電源のアース端子に流れる電流の一部をフィラワイヤに分流して(以下、フィラワイヤ分流電流と称する)アース端子に導く。電極ワイヤに流れる電流とフィラワイヤ分流電流は逆向きとなるので、反発力によってアークは前方に傾けられる。その結果、電極ワイヤにフィラワイヤを近接させても、アークによって飛ばされることなくフィラワイヤを安定して溶融池に挿入出来る。同時に、フィラワイヤの予熱効果による溶融量の増大も期待される。

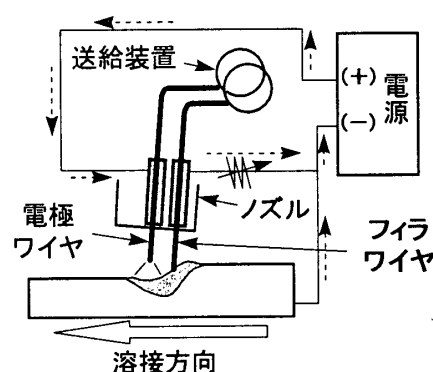


図1 ダブルワイヤ溶接装置の構成

ダブルワイヤ溶接では、通常の MAG 溶接における溶接電流、アーク電圧、溶接速度に加えてフィラワイヤ送給量を設定することが可能であり、下記の特長を有する。

- (1) フィラワイヤ送給量を制御することで溶接電流と独立して溶着金属量をコントロール出来る。フィラワイヤを供給しない場合は通常の MAG 溶接に相当する。

- (2) フィラワイヤの添加によって溶融池温度を低下させることが出来る⁷⁸⁾。
 (3) 電極ワイヤと異なる種類のフィラワイヤを使用することにより、合金元素の添加等、溶着金属成分の調整が可能となる⁹⁾¹⁰⁾。

2.2 フィラワイヤの溶融性

ビードオンプレートにより通常のMAG溶接とダブルワイヤ溶接のビード外観および溶込みを比較した例を図2に示す。電極ワイヤ径 $\phi 1.6\text{mm}$ とフィラワイヤ径 $\phi 1.2\text{mm}$ の組み合わせにおいては、通常のMAG溶接の2倍程度のワイヤ溶融速度が得られた。フィラワイヤの供給によって溶着速度が増大し、ビード幅はほとんど変化しないがやや凸形状となり余盛高さが増大した。一方、溶融池の持つ熱量の一部がフィラワイヤの溶融に使われ溶込み深さは減少した。このことから、溶接対象毎に溶込みの重要度と溶着速度向上の効果をバランスさせフィラワイヤの送給量を最適化する必要がある。

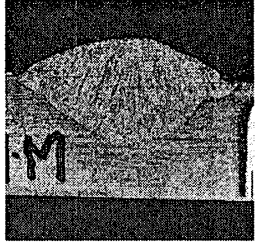
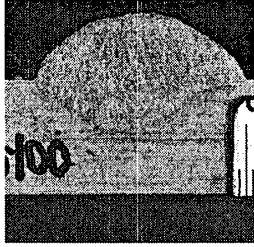
	MAG 溶接	ダブルワイヤ溶接
母材：SS400，板厚 9mm 溶接条件：470A—44V—500mm/min ウィーピング無し シールドガス：Ar+CO ₂ 20%+O ₂ 3% ワイヤ：JIS YGW15 電極 $\phi 1.6\text{mm}$ ，フィラ $\phi 1.2\text{mm}$		
ワイヤ溶融速度：電極+フィラ (g/min) ワイヤ溶融比：(電極+フィラ)/電極	122+0=122 1	122+119=241 1.98

図2 フィラワイヤ供給によるビード断面形状の変化（電極ワイヤ径 $\phi 1.6\text{mm}$ ）

電極ワイヤ径が $\phi 1.2\text{mm}$ の場合には、フィラワイヤの送給が微量であっても図3に示すようなフィラワイヤの溶融不均一が溶込み部分の底部に発生し易い。この原因としては、同溶接電流、同突出し長で比較すると $\phi 1.2\text{mm}$ では $\phi 1.6\text{mm}$ より溶融速度が大きい分、溶融池の持つ熱量の余裕が小さいこと、また $\phi 1.2\text{mm}$ における溶融池の対流・攪拌作用および凝固形態がフィラワイヤの溶融不均一を誘発し易い¹¹⁾こと等が挙げられる。そこで予めフィラワイヤ自身の溶融性を高めるべく、フィラワイヤ分流電流を増加させた場合の溶融不均一の発生状況を図4に示す。分流電流の増加に伴い予熱効果によってフィラワイヤの溶融性は向上し、100Aを超える領域で安定した溶融状態が得られた。以上により、電極ワイヤ径は $\phi 1.2\text{mm}$ でも使用可能である。

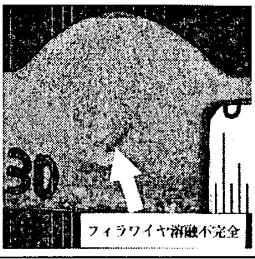
溶接条件： 350A—39V—500mm/min ウィーピング無し ワイヤ： 電極 $\phi 1.2\text{mm}$ フィラ $\phi 1.2\text{mm}$	
ワイヤ溶融量 (g/min) ワイヤ溶融比	110+17=127 1.16

図3 溶融不均一の発生例（電極ワイヤ径 $\phi 1.2\text{mm}$ ）

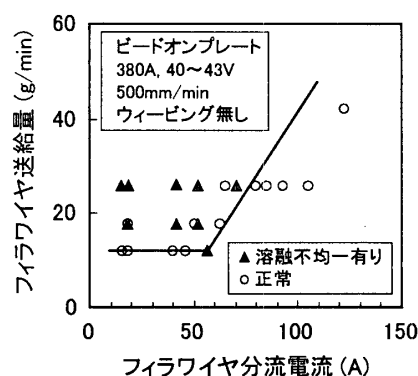


図4 フィラワイヤ分流電流と溶融不均一

電極ワイヤ径のみならず、電極ワイヤあるいは溶融池に対するフィラワイヤの供給位置によってもフィラワイヤ溶融性は変化する。図5に、フィラワイヤ分流通電を一定（125A）とし、フィラワイヤ送給量および電極ワイヤ-フィラワイヤ間の距離を変化させて、フィラワイヤ溶融不均一の発生状況を調べた結果を示す。ワイヤ間の距離が10mmを超えるとシールド不良となる。一方、ワイヤ間の距離を小さくすると溶融不均一の生じない範囲は広まるが、3mm以下ではアークと干渉する。そのため実用的には4～6mm程度が妥当と考えられる。

また原理上フィラワイヤは溶融池の後方に供給する必要があるが、真後ろから $\pm 45^\circ$ 程度の許容があり¹²⁾、多関節ロボット等への搭載時にはある程度の姿勢自由度が期待出来る。

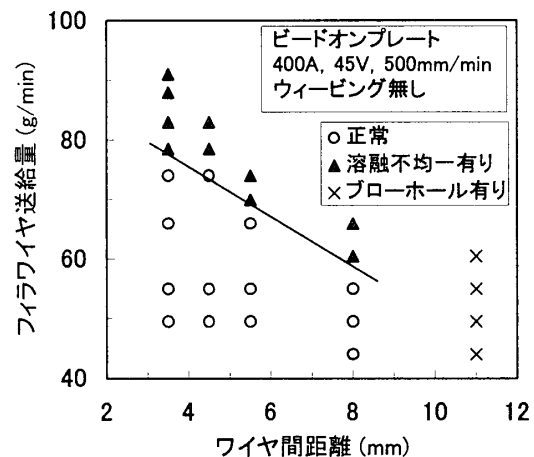


図5 溶接結果に及ぼすワイヤ間距離の影響

2.3 溶接部の性質

溶接部の機械的性質を通常のMAG溶接とダブルワイヤ溶接とで比較した。使用した母材と溶接ワイヤの化学成分を表1に、実験条件を表2に示す。溶接電流およびアーク電圧をほぼ同一とし、フィラワイヤの送給により増加した溶着速度の分のみ溶接速度を大きくして積層を同様にした。図6に3層3パスの溶接結果を示す。

表1 母材および溶接ワイヤの化学成分（質量%）

	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Zr
母材：SM490A	0.16	0.41	1.45	0.018	0.003	—	—	—
ワイヤ：JIS YGW15 $\phi 1.2\text{mm}$	0.07	0.54	1.35	0.011	0.006	0.001	0.051	<0.01
$\phi 1.6\text{mm}$	0.09	0.57	1.33	0.009	0.006	0.003	0.069	<0.01

溶接部の機械的性質と溶接金属の化学的性質を表3に示す。本実験結果から、ダブルワイヤ溶接で実施した溶接金属の特長として次の点が挙げられる。

- (1) 溶接金属の引張強さは通常のMAG溶接と同程度である。
- (2) シャルピー衝撃試験の吸収エネルギーは溶接金属では同等であるが、ボンド部ではダブルワイヤ溶接の方が高い。
- (3) 溶接金属の化学組成のうち、Si, Mn, Al, Tiの含有量はダブルワイヤ溶接の方が高い。これは、フィラワイヤから供給された合金成分が一部残存したためと考えられる。

表2 溶接条件および開先形状

	MAG 溶接	ダブルワイヤ溶接
ワイヤ径 (JIS YGW15)	$\phi 1.6\text{mm}$	電極 $\phi 1.6\text{mm}$ + フィラ $\phi 1.2\text{mm}$
溶接電流	460A	460A
アーク電圧	41V	42V
溶接速度	300mm/min	380mm/min
フィラワイヤ送給量	—	53.8g/min
溶接入熱	37,720J/cm	30,505J/cm
シールドガス	Ar+CO ₂ 20%+O ₂ 3%	
開先形状		

また、同時に観測した溶接金属および熱影響部のミクロ試験結果¹³⁾から、ダブルワイヤ溶接部の熱影響部の幅は通常のMAG溶接に比べて狭いことが分かった。これは、フィラワイヤを溶融池に挿入することにより溶融池温度が低下したためと考えられる。

以上から、合金元素の残存を考慮したフィラワイヤ化学成分の調整が必要な場合もあるが、ダブルワイヤ溶接により通常のMAG溶接と同等の溶接金属を得ることが可能である。

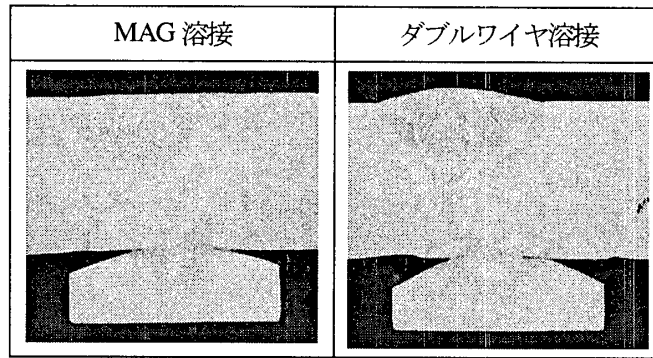


図6 多層盛溶接結果

表3 突合せ溶接継手の機械的性能および溶着金属の化学成分

			MAG 溶接				ダブルワイヤ溶接			
溶着金属の引張 試験結果	σy	MPa	438				479			
	σt	MPa	535				562			
	El	%	30.2				27.2			
シャルピー衝撃 試験結果	溶接金属	0℃	168				166			
		−20℃	145				135			
吸収エネルギー J	ボンド	0℃	177				239			
		−20℃	144				220			
側曲げ試験結果	R=2t		Good				Good			
溶着金属の化学成分 質量%			C	Si	Mn	P	C	Si	Mn	P
			0.11	0.28	0.94	0.020	0.13	0.37	1.10	0.020
			S	Al	Ti	Zr	S	Al	Ti	Zr
			0.005	0.007	0.010	<0.01	0.005	0.013	0.016	<0.01

3. すみ肉溶接における効果

3.1 溶接変形量の減少

ここでは、箱形構造部材で大部分を占めるT形すみ肉継手を対象にダブルワイヤ溶接の適用性を確認した。図7に、両側下向すみ肉溶接における通常のMAG溶接とダブルワイヤ溶接による脚長と溶接角変形量の関係を示す。通常のMAG溶接では、CO₂溶接における実験式を示す破線の近傍に分布した。一方ダブルワイヤ溶接では溶着速度の増大により同一脚長では母材への入熱が小さく、30%程度の溶接角変形量の低減効果が見られた。

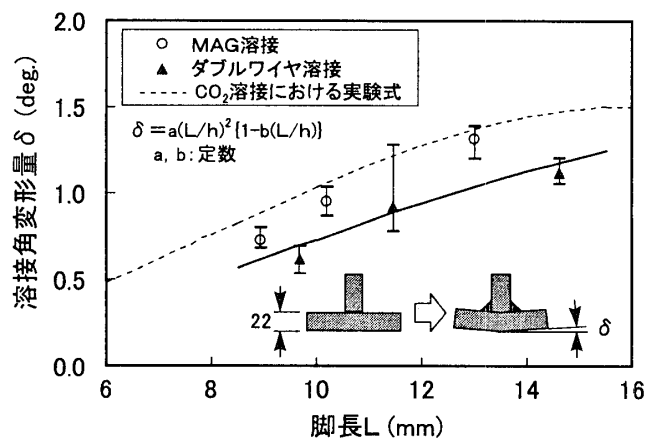


図7 下向すみ肉溶接における脚長と溶接角変形量の関係

3.2 溶接パス数の低減

開先内でのダブルワイヤ溶接の適用性を検討するため、レ形開先継手に対して通常の MAG 溶接による施工と比較した結果を図8に示す。通常の MAG 溶接では主に高温割れへの懸念から開先内で電流を上げられず2パス施工となるが、ダブルワイヤ溶接では相対的に低い溶接入熱を利用した高電流かつ高溶着速度での施工が可能であり、1パスで開先を埋めると共にほぼ必要な脚長が得られ、溶接時間の短縮および省エネルギー化に有効であることを確認した。厚板の多層盛溶接においても同様にパス数低減に寄与するものと考えられる。

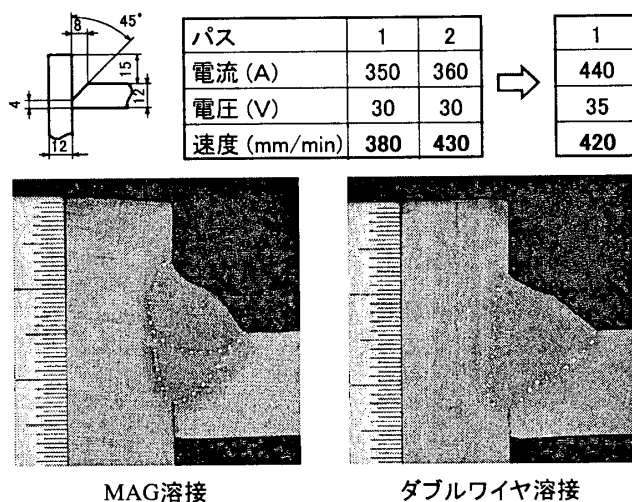


図8 レ形開先継手の1パス施工

3.3 溶接高速化の検討例

ダブルワイヤ溶接法は大幅な溶接時間の短縮が期待出来る反面、溶接に方向性を持つ。この特徴を考慮し、対象設備として直線溶接部が比較的長く、適用時に大きな効果の見込める建設機械アーム溶接ロボットシステムを選択した。図9に示すように、適用部位はワーク長手方向の直線部である。本システムは門型の架台上部に溶接ロボットが設置された天吊り型であり、ワークは台車により架台下部を搬送され自動治具で1軸回転ポジションに固定され、対象のすみ肉溶接継手部を下向施工するようポジショニングされる。溶接ロボットは6軸多関節型であり、1軸の移動装置によりワークの長手方向に対しほぼ平行に移動する。

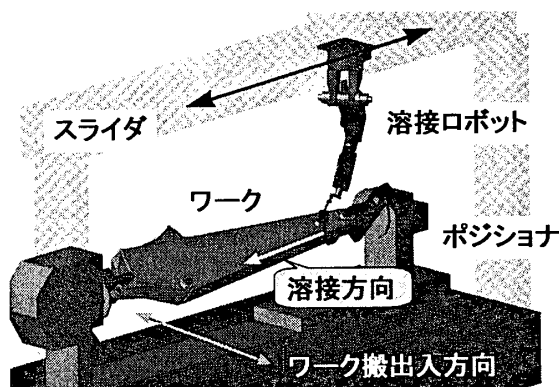


図9 アーム溶接ロボットシステムの構成

溶接電流：410A、溶接速度：470mm/min
ワイヤ溶融速度：150+46=196g/min



図10 実ワーク施工の様子

対象溶接部ではポジションによるワーク把持の都合上、約 3.5° の下り溶接を行うが、要求される品質として脚長と溶込み深さがある。このため、予めこれらを満足する実用溶接条件を見出した¹¹⁾後、実際のワークに対する施工を行い良好な溶接結果を得た。実ワーク施工の様子を図10に示す。本ケースでは現状の溶接速度向上効果は従来比約1.4倍である。今後のさらなる高速化に向けて、溶接高電流域でのアーク現象の安定化やトーチ部分を中心とした付帯機器の信頼性向上が不可欠である。

4. おわりに

ダブルワイヤ溶接法を鋼溶接に適用した際の基本特性と、すみ肉溶接における実用性について述べた。本溶接法の適用によって製造コスト低減および製作期間の短縮が可能である。MAG 溶接の高能率化という一面では2アーク方式に勝るものではないが、フィラワイヤを溶融池に供給するという特長から母材への低入熱、低溶接歪による高品質化も期待される。プロセスの開発側でセールスポイントを提案すると同時に、1ユーザとしても導入時の効果(付加価値)を厳しく見据えて、高能率溶接の一手法として最終選択肢に残るよう、機能向上やアプリケーション拡大に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 杉谷, 村山, 尾座本, 村山: 曲外板片面溶接ロボットの開発と適用, 溶接学会第 160 回溶接法研究委員会資料, No.SW-2531-97 (1997).
- 2) 馬詰, 青木, 加藤, 磯崎, 帆足, 宮崎, 中島: 船体の曲り外板片面溶接ロボットの開発, 溶接学会第 160 回溶接法研究委員会資料, No.SW-2532-97 (1997).
- 3) 児玉, 河野, 井手, 岩淵: 新高速すみ肉溶接法の開発, 三菱重工技報, Vol.35, No.2 (1998), p152-155.
- 4) 上山, 大縄, 全, 牛尾, 中田, 山崎: タンデム GMA 溶接法のアーク現象と高能率溶接への適用, 溶接学会第 138 回溶接アーク物理研究委員会資料, No.ア物-00-1087 (2000).
- 5) “パワーアシスト”によるホットワイヤ MAG 溶接, バブコック日立(株)技術資料.
- 6) 松本, 土屋: アルミニウム合金厚板のダブルワイヤミグ溶接, 軽金属溶接構造協会第 25 回研究発表会講演概要 (1994), p9-12.
- 7) 宮崎, 宮内, 杉山, 篠田: アルミニウム合金のミグ溶接におけるパッカリング現象ーダブルワイヤミグ溶接による抑止ー, 軽金属溶接, Vol.30, No.12 (1992), p655-663.
- 8) 中田, 宮内, 篠田, 杉山: アルミニウム合金溶接部の凝固割れ感受性ーダブルワイヤミグ溶接法による溶融池温度低下の効果ー, 軽金属溶接, Vol.37, No.1 (1999), p2-8.
- 9) 杉山, 中田, 宮内: アルミニウム合金のミグ溶接におけるスマットの低減ーダブルワイヤミグ (DWM) 溶接の適用ー, 軽金属溶接, Vol.30, No.8 (1992), p353-359.
- 10) 中田, 中原, 宮内, 上村, 辻村: ダブルワイヤ溶接法による Al 合金鋳物の表面改質技術の開発, 溶接学会全国大会講演概要集, 第 53 集 (1993), p282-283.
- 11) 山本, 高野, 平川, 先崎, 池上, 中田: ロボット用ダブルワイヤ溶接法の開発, 溶接学会第 172 回溶接法研究委員会資料, No.SW-2733-00 (2000).
- 12) 池上, 中田, 宮内, 篠田, 山本: ダブルワイヤ溶接法の鋼溶接への適用(5)ーフィラーメタルの溶融におよぼすフィラーワイヤ供給位置の影響ー, 溶接学会全国大会講演概要集, 第 69 集 (2001), p322-323.
- 13) 高野, 山本, 中田: ダブルワイヤ溶接法の鋼溶接への適用ー基本特性の把握と T 形すみ肉継手への実用性の検討ー, 溶接学会第 169 回溶接法研究委員会資料, No.SW-2669-00 (2000).