

連携・解説記事

ものづくりを支える最新の溶接材料と技術

(その1 中厚板編)

State-of-the Art Welding Consumables and Developments in Contribution to Steel Fabrication

清水弘之 (株) 神戸製鋼所 溶接事業部門
開発部溶接開発室 専門部長
Hiroyuki Shimizu

1 はじめに

1904年スウェーデンの造船技師Oskar Kjellbergによって被覆アーク溶接法が発明され、遅れること10年1914年に三菱長崎造船所が被覆アーク溶接棒の実用化検討を始めている。アーク溶接は、実に100年を超える歴史を有しているが、現在、更には将来もおそらく、鋼材を多用する構造物を生産するために、必要不可欠な技術であろう。

大気圧プラズマである「アーク」の熱を利用し、溶加材と母材を溶融し、フラックスからの分解ガスやボンベからのシールドガスで溶融金属の酸化・窒化を 방지、溶接金属の品質改善のために合金元素を適宜添加するという溶接の「原理・原則」は不変である。一方で、フラックス入りワイヤのフラックス組成調整やソリッドワイヤの合金成分調整は確実に進歩し、新たな特性を引き出している。また、ワイヤや母材の溶融過程を制御するために、溶接電源の出力制御やワイヤの多電極化、極性やシールドガスの選択等により、高能率で高品質な溶接が提案されている。

本号においては、建築・鉄骨、建設機械、造船・海洋構造物、橋梁、化工機、エネルギー分野で使用される中厚板の鋼板を溶接する材料と施工法の最新の技術動向を報告する。自動車分野を中心とした薄板の溶接技術に関しては次号(その2)に記載することとした。

建築・鉄骨、建設機械、造船・海洋構造物、橋梁、化工機、エネルギーなどの市場における中厚板の溶接では、薄板の溶接とは異なり、多層での溶接施工、または、大入熱施工が必要となる。従って、溶接金属の品質維持・向上に加えて、溶接施工能率の向上に寄与する溶接材料や施工法の開発が重要となる。溶接構造物も相対的に大きいことから、容易に反転・傾斜をつけるなどの作業ができなくなる場合も多い。この場合、上向溶接も含めた全姿勢での溶接性を考慮した溶接材料

の開発が必須となる。

また、昨今の溶接作業環境改善の高まりにより、低スパッタ発生量・低ヒューム発生量の溶接材料・溶接施工に関する開発も積極的に行われている。低スパッタ化は、溶接後工程の作業簡略化という点においても寄与し、生産性を向上させ、トータルのコストダウンが期待される。

一方で、構造体の軽量化及び溶接施工の高能率化の観点から、HT550～HT950MPa級などの高強度鋼板の実用化が開始されている。一般に、高強度鋼板の溶接は低温割れ感受性が高く、予熱・パス間温度及び溶接入熱量の管理が必要になる場合がある。逆に、このような溶接施工管理を軽減できる溶接材料や施工法の開発は、高強度鋼板の適用範囲を広げることにつながる。

このように、中厚板の溶接施工に関しては、溶接金属の健全性(信頼性)、高能率化、溶接環境改善、高強度化などが最新のキーワードとなっており、数多くの研究開発が行われている。以降は、最新の溶接材料、溶接施工法などを中心に説明する。

2 最新の溶接材料と施工法

2.1 汎用溶接材料及び施工法

2.1.1 建築・鉄骨向けソリッドワイヤ

炭素鋼用ソリッドワイヤは、建築・鉄骨、建設機械などの汎用性の高い市場で主に使用されている。1995年の阪神・淡路大震災を契機に、建築・鉄骨では、大入熱・高パス間温度においても良好な品質が維持できるソリッドワイヤ(JIS 3312 YGW18)が開発・実用化され¹⁾、市場に広く浸透している。その特長は①継手の優れた機械的性質(表1)、②耐割れ性、③ワイヤ送給性、④ソフトなアークと少ないスパッタ発生量などである。また、半自動用だけではなくロボットとの組み合わせで、より高能率、高性能な溶接が行える技術²⁾も

確立されている。ロボット溶接では特に、連続溶接性を加味して、多パス溶接時のスラグ量低減とスラグ剥離性を考慮した設計がなされている(図1)。従って、専用ワイヤとロボットとの組み合わせにより、高性能、高能率、優れた溶接作業性を満足する溶接施工が実用化されている。

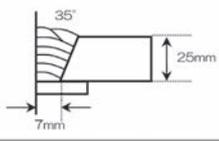
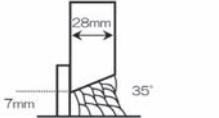
2.1.2 造船・橋梁向けフラックス入りワイヤ

造船・橋梁分野での半自動溶接では、フラックス入りワイヤ(以下、FCW)が主に使用されている。選択される理由としては、1.2-1.4mmの細径ワイヤによる全姿勢溶接性、能率性、また、良好なビード外観などがあげられる。特に、HT490-590MPa級鋼用の全姿勢FCW(JIS Z3313 T49J0T1-1CA-U、T550T1-1CA-Uなど)は、炭酸ガスで使用可能であることから汎用性が高く、低ヒューム、低スパッタの技術³⁾も付与され、定着している。最近では、特に、立向上進や上向溶接での溶接性に重点をおいた新FCWが開発され、ギャップ精度が悪い造船の外業や自動化溶接への適用が広がっている。図2に従来FCWと新FCWを比較するが、6mm程度のギャップを有したすみ肉継手でも、良好なビード形状が得られ、溶接現場の自動化の一端を担っている。また、高電流で

も耐ギャップ性に優れることから、高能率化も可能となる。

また、鋼板表面の防錆塗料が主原因で発生する気孔欠陥を防止するための専用FCWや施工法が開発されている⁴⁾。この施工法は、ツインタンデム1プール法として、実用化されており、2本のFCWを同時に使用することで、1,000mm/min.程度の高速溶接も可能にしている。近年、この施工法の改良型である新3電極高速すみ肉溶接法が実用化されている⁵⁾。この施工法は、図3に示すように、前述のツインタンデム1プール法において先行極と後行極のFCWの間にフィラワイヤ(ソリッドワイヤ)を配置している。先行極及び後行極の極性が直流逆極性(DCEP)であるのに対し、本施工法で用いるフィラワイヤの極性は直流正極性(DCEN)とし、先行極及び後行極のアーク干渉を小さくしている。また、フィラワイヤの溶接電流は80~100A程度であり、アークが発生しない特殊制御により高溶接電流でも溶融プールが安定する。さらに、専用FCWとの組み合わせより、図4に示すように溶接速度が2,000mm/minまで高品質で安定な施工が可能となっている。既に国内では複数の造船ヤードで使用され、図5に示すようにロンジ部材(スティフナー)のすみ肉溶接の高能率化・高品質化に大きく寄与している。

表1 建築・鉄骨向けソリッドワイヤで溶接した継手の機械的性能(シールドガス 100%CO₂)

溶接姿勢	鋼種	ワイヤ径(mm)	溶接方法	パス	電流(A)	電圧(V)	速度(mm/min)	継手引張		吸収エネルギー(J, 0°C)
								引張強さ(MPa)	破断位置	
下向	SN 490B	1.4		1	300	30	350	540	母材	120
				2-7	450	42	280			
横向	SM 520A	1.4		1-10	1000	42	350 400	570	母材	140
				11-15	1000	42	400			

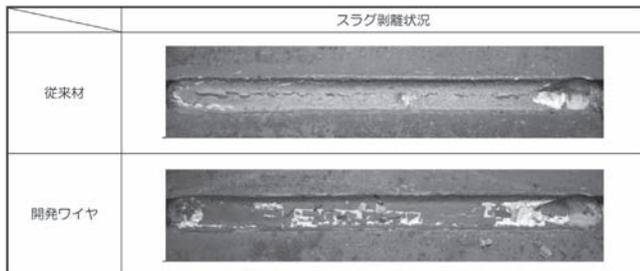


図1 スラグはく離性の比較

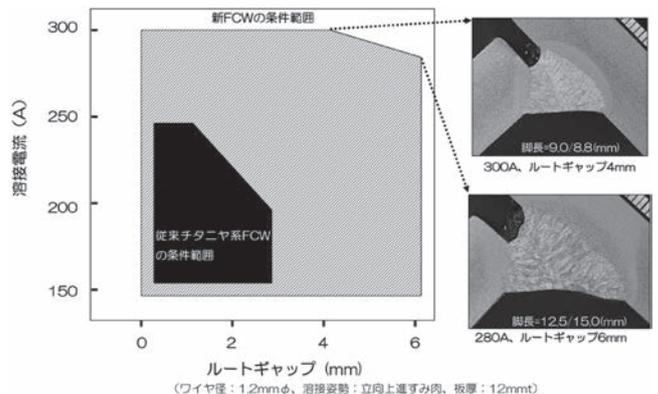


図2 立向上進すみ肉溶接の適用範囲比較

2.2 高強度溶接材料

構造物の軽量化にともなう鋼材の高強度化に対応するため、溶接部の低温割れ防止は最優先の技術的課題である。特に、フラックスを使用するFCWやサブマージーク溶接(以下、SAW)などの溶接施工では、予熱・パス間温度や溶接入熱量などの溶接施工管理が必要になり、従来、ソリッドワイヤが中心に適用されてきた。

フラックス自体の水分を除去低減し、アーク中の水素分圧を低減する弗化物を添加し、防湿性に優れる包装材料を使用することなどで、溶接部の拡散性水素量にある程度制御できることがわかっている。また、最近の高強度化の要求と溶接施工効率向上を両立させる基礎的な研究として、シームレスFCWを生産工程内で焼鈍することで、極限まで溶接金属中の拡散性水素量を下げる技術が検討され、溶接部の拡散性水素量は0.5cc/100g程度まで低減している⁶⁾。加えて、シームレスFCWは保管時における吸湿も抑制され低水素化に寄与する。実用性の面では、表2に示すように、YP690MPa級鋼用溶接材料として、全姿勢溶接が可能で、汎用性の高い混合ガス用のFCWが開発されている⁷⁾。

今後の研究で、780MPa級の高張力鋼板でも予熱や後熱の工程を省略できる可能性もあり、極低水素FCWの更なる開

発・実用化が期待される。さらに、溶接材料の低水素化に加え、溶接金属での水素トラップ⁸⁾に関する基礎的検討など、実構造体への応用も検討されている。

2.3 高信頼性溶接材料

溶接施工において、溶接金属の性能・品質(信頼性)の確保は、最も優先しなければならない。強度や衝撃性能などの機械的性質に代表される要求スペックや鋼板と同等以上の耐食性、耐酸性のみならず、極低温や高温といった使用環境も考慮した材料設計が必要である。そのため、従来は比較的品質が安定している被覆アーク溶接棒やソリッドワイヤ(TIG含む)が主に使用されていた。しかしながら、このような分野においても、高能率化の要望が増大しており、ステンレス鋼はもとより、最近ではNi基合金のFCWが実用化され始めている⁹⁾。

2.3.1 低温用溶接材料

低温用鋼とは一般に-10℃以下で使用される鋼板を指し、-60℃程度までに使用されるアルミキルド鋼から、-250℃程度の極低温まで広範な温度域で使用されるオーステナイト系ステンレス鋼まで含まれ、石油・ガスなどのエネルギー分野における生産(海洋構造物)、輸送(ガス運搬船、パイプライン)、貯槽(タンク)などの分野で使用されている。

このような低温用鋼の溶接材料としては、高い衝撃吸収エ

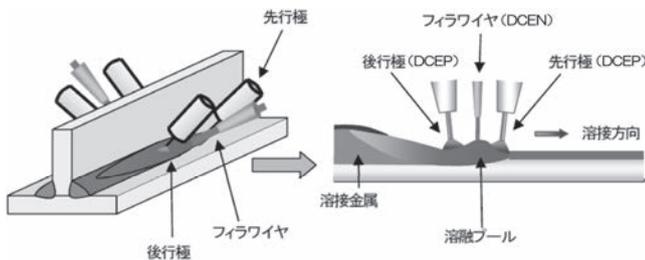


図3 新3電極高速すみ肉溶接法の概要

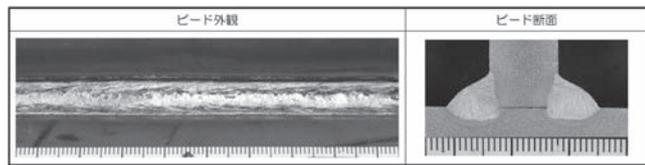


図4 新3電極高速すみ肉溶接法によるビード外観・形状の一例

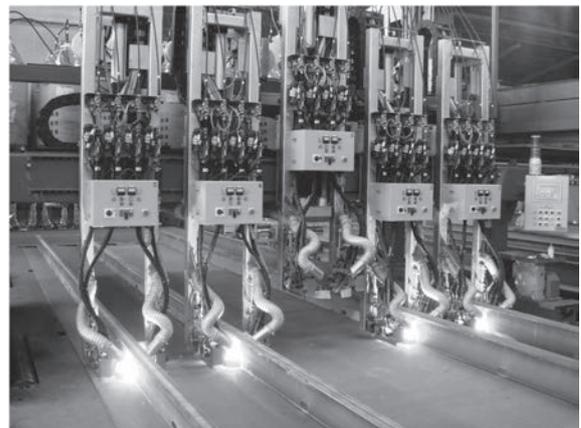


図5 新3電極高速すみ肉溶接法の実用化例

表2 開発ワイヤの溶接金属の機械的性質と拡散性水素量⁷⁾

成分系	スラグ系	機械的性能			衝撃性能 (J @-40℃)	拡散性水素量 (ml/100g)
		0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)		
Ni-Mo系	チタニヤ	754	847	22	47 (47, 44, 49)	1.9 (1.9, 1.9, 1.9)

エネルギーとCTOD性能を満足させるために溶接金属組織（アシキュラーフェライト）を微細化する必要がある、Ti、B添加の成分系が主流になっている。また、低温用鋼の溶接においても高能率化の要求が高く、低温用のFCWの開発が行われてきた。基本的には、上記Ti-B系をベースに溶接金属中の酸素量を低減し、安定した作業性と溶滴移行性を維持しつつ、良好な機械的特性を有するFCWが開発されている¹⁰⁾。本FCWは高強度と高靱性も両立しており海洋構造物等で使用拡大が期待されている。

最近の研究では、2.0～2.4mm程度で新しく設計した細径シームレスFCWを活用した高能率SAW溶接法も検討されている¹¹⁾。図6に示すように、FCW中のCaF₂量を調整することにより、溶接金属中の酸素量を低減させ、-40℃での衝撃性能を改善することに成功している。また、FCWのフラックス充填率を高めることでソリッドワイヤに比較して約25%溶着速度が向上している（図7）。

2.3.2 耐熱鋼用溶接材料

低合金耐熱鋼（耐クリープCr-Mo鋼）は高温環境における機械的性質や耐食性、耐酸化性が優れていることから、石油

精製リアクタや火力発電ボイラ分野で使用されている。近年、使用条件の高温・高圧化が進んでおり、信頼性の高い鋼材・溶接材料（被覆アーク溶接棒、SAW、TIGなど）の開発・実用化が進められてきた。特に、石油精製リアクタ用では、鋼材同様に高温・高圧水素環境下での耐水素侵食性が要求されるため、2.25%Cr-1%Mo系にVを0.25%以上添加することで3%Cr-1%Mo鋼溶接金属と同等の性能を確保している。また、表3及び4に示すようにC量、Mn量、Nb量などの成分を調整することにより、クリープ破断強度、衝撃特性、耐遅れ割れ性を両立させた。信頼性の高い溶接材料として実用化されている¹²⁾。

一方、火力発電用では9～12%Crの高Cr耐熱鋼鋼材が用いられ、鋼材同様にクリープ破断強度と衝撃特性が要求される。これらは相反する特性であり、溶接材料の開発においては重要な課題である。クリープ破断強度は、V、Nb、Wなどの元素を添加して確保し、衝撃特性は、 δ -フェライトの残留を抑制することにより、実用レベルを確保している。

2.3.3 耐酸鋼板用溶接材料

火力発電、ごみ焼却プラントなどの排煙装置においては、

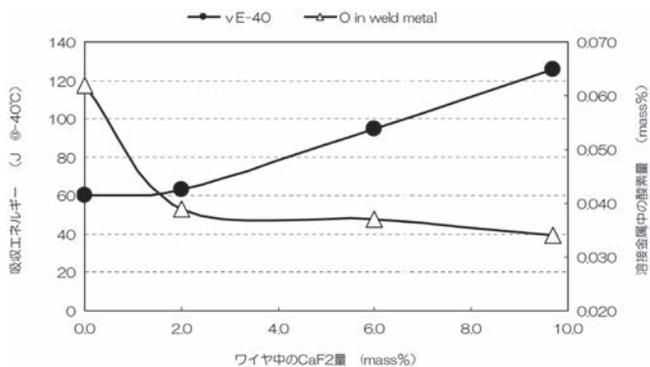


図6 ワイヤ中のCaF₂量と溶接金属中の酸素量及び衝撃性能の関係¹¹⁾

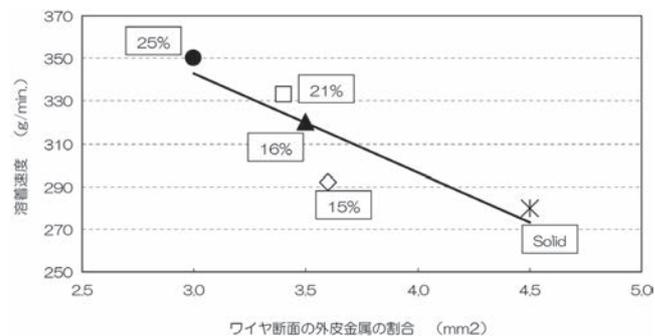


図7 ワイヤ断面の外皮金属割合と溶着速度の関係¹¹⁾

表3 2.25%Cr-1%Mo-V鋼用溶接材料の溶接金属の機械的性質

溶接材料	0.2% YS(MPa)	TS (MPa)	EL (%)	RA (%)	vE _{-18°C²} (Avg-J)	CRT ^{*3} (h)
被覆アーク 溶接棒	517	634	24	73	147	1 403
	520	636	24	72	140	1 650
TIG	568	677	25	69	300	1 229
SAW	533	639	26	71	142	1 493
	518	634	27	72	130	2 111

*1 PWHT:705°C for 26hrs

*2 PWHT:705°C for 7hrs

*3 Creep rupture time (test condition : 538°C for 207MPa)

硫酸・塩酸の露点腐食に対して耐食性を有した鋼板が使用される。このような鋼板の溶接材料も鋼板以上の耐食性を有し、かつ優れた溶接施工性を維持することが必要である。特に、全姿勢用のFCWは実用性が高く、表5に示すように鋼種によりCu、Cr、Sbなどの元素を最適の組み合わせで添加することにより十分な耐食性を維持している¹³⁾。

2.4 極厚板溶接施工法

エレクトロガス溶接は、1パスで高能率な立向上進溶接が可能な施工法であり、造船、橋梁、タンク、建築・鉄骨などの市場で使用されている。至近では、輸送効率向上のためにコンテナ船が大型化する傾向にあり、ハッチコーミング部の板厚が80mm程度まで増加する傾向にある。従来の1電極エ

レクトロガスアーク溶接法では、溶接施工能率が低下するだけでなく、溶接入熱が過大となるため溶接金属の性能も低下する。そこで、極厚板を高能率で高品質に溶接する2電極エレクトロガス溶接法が開発され実用化されている¹⁴⁾。

図8に、本溶接法の概要を示す。従来の1電極法装置に1電極を加えるという比較的簡単な改良で済み、専用ワイヤを1、2極に適用することで溶接金属の性能も改善している。尚、専用ワイヤとしてはFCWもしくはソリッドワイヤが用いられ、また、ルート側の電極(第2電極)をオシレートするタイプとしないタイプの2通りの施工法がある。図9に示すように2電極化することにより、1電極比で溶接速度が約2倍になっていることがわかる。

図10に板厚80mmでの断面マクロ組織を、表6に溶接金属

表4 2.25%Cr-1%Mo-V鋼用溶接材料の溶接金属の化学成分 (mass%)

溶接材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Sn	Sb	As	X bar* (ppm)	J-Facor**
被覆アーク溶接棒	0.08	0.32	1.16	0.004	0.001	2.41	1.02	0.28	0.018	Tr.	Tr	Tr	<6	<89
TIG	0.11	0.14	0.42	0.006	0.007	2.38	1.06	0.25	0.025	Tr	Tr	Tr	<8	<45
SAW	0.08	0.14	1.09	0.004	0.004	2.50	1.03	0.33	0.014	Tr	Tr	Tr	<6	<74

*X bar = (10P+5Sb+4Sn+As)/100 **J-Facor = (Si+Mn) * (P+Sn) × 10⁴

表5 耐酸鋼板用FCWの全溶着金属の化学成分 (mass%)¹³⁾

	成分系	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Sb
FCW	Cu-Sb系	0.05	0.60	1.41	0.012	0.013	0.39	—	0.10
	Cu-Cr系	0.04	0.38	0.81	0.016	0.013	0.35	0.74	—

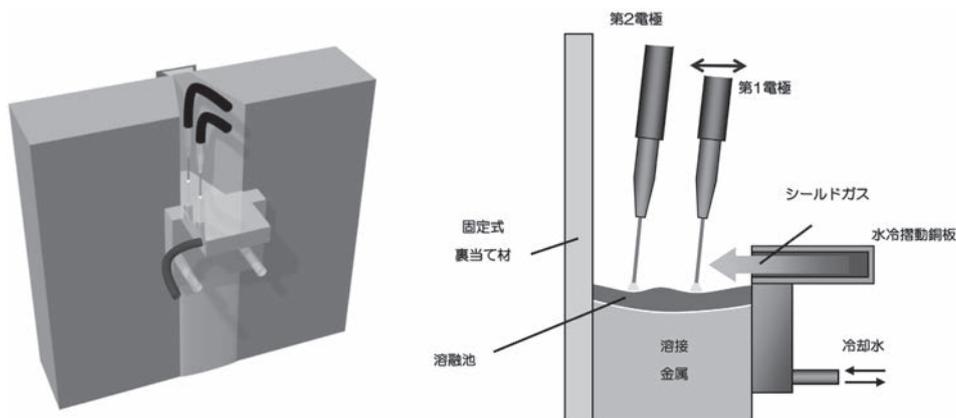


図8 2電極エレクトロガス溶接法の概要

の機械的性能を示す。板厚80mmの溶接においても良好な溶込みと、機械的性能が確保できている。

2.5 低スパッタ・低ヒューム溶接

炭酸ガスアーク溶接法のスパッタ発生現象に関する研究は、1960年代から始まり、高速度写真観察と解析によって種々のスパッタ発生形態が提案^{15,16)}された。1980年代には、観察機器の進歩とともに、更に多くの研究者によって詳細にスパッタ発生現象が観察された。具体的には、低炭素化によ

るガス放出低減、適正量のTi添加、C、Si、Mn、Tiの適正化、摺動接点の安定化と銅めっきの効果、アルカリ金属添加などである。しかしながら、混合ガスを用いたMAG溶接法と比較して炭酸ガスのスパッタ発生量は、特に高電流において圧倒的に多く、改善が待たれていた。

2.5.1 低スパッタを実現する溶接施工法

最近炭酸ガスシールド溶接で、高電流域でのソリッドワイヤのスパッタ及びヒューム発生量を劇的に低減する技術が開発されている¹⁷⁾。図11に示すように、化学成分を調整し専用に伸線したソリッドワイヤとデジタル波形制御電源を用いる

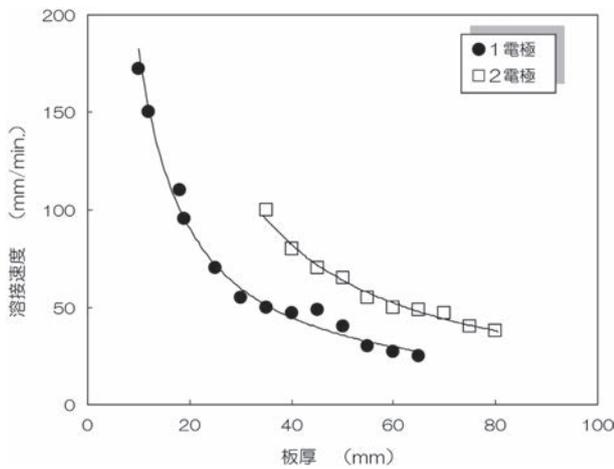


図9 1電極と2電極エレクトロガス溶接法の溶接速度比較

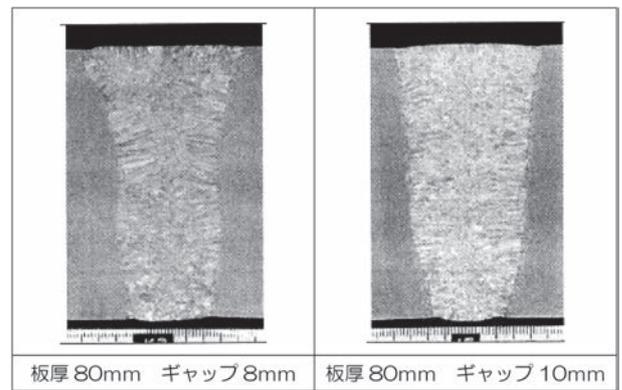


図10 板厚80mmの溶接マクロ組織

表6 溶接金属の引張試験結果 (板厚：80mm)

ギャップ (mm)	入熱量(kJ/mm)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ(MPa)	伸び(%)	吸収エネルギー (J)	
					-40℃	-20℃
8	55.1	521	635	24	92	116
10	63.0	474	622	24	52	91

* 試験片採取位置：溶接金属中央、板厚中央

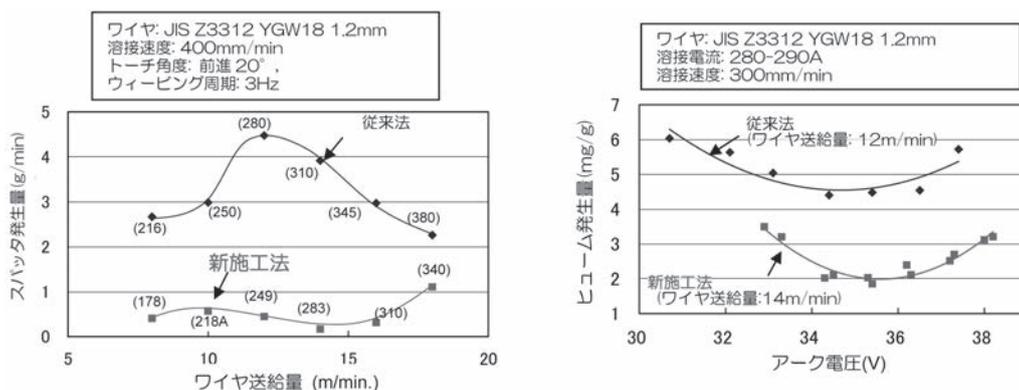


図11 炭酸ガスパルス溶接法によるスパッタ及びヒューム発生量

ことで、従来法に比較してスパッタ発生量を1/10程度まで低下し、ヒューム発生量を適正電圧条件で1/2に低減することが可能となっている。

また、溶接後に鋼板に付着するスパッタ量も大幅に低減している(図12)。さらに波形制御電源を用いることで、図13に示すようにワイヤの溶融効率率は約17%も向上し、溶接は高能率化している。

本技術は、デジタル制御電源を用いて溶滴移行を規則的にする波形を作り出すことで、スパッタとヒュームの発生量を低減させている。溶滴の観察画像をデジタル化し、微小時間での溶滴の運動とデジタル制御波形を完全同期させ、観察結果を制御にフィードバックすることで、ウイーピング等の外乱に対しても非常に安定して溶滴が離脱する技術が開発されている(図14)。

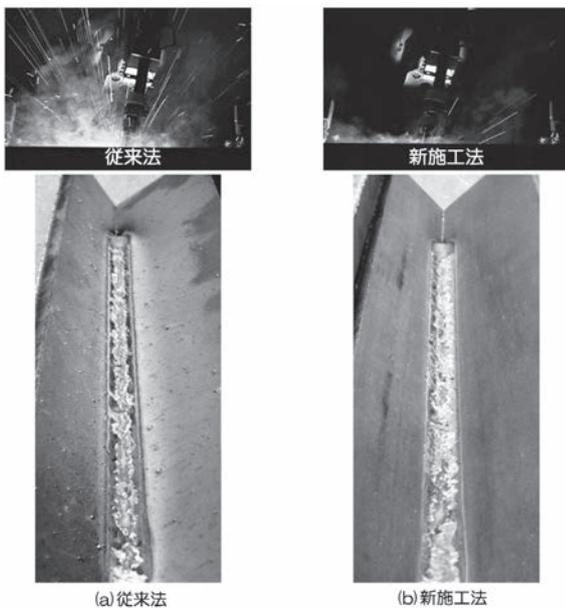


図12 スパッタ発生状況(ワイヤ送給量: 15m/min)

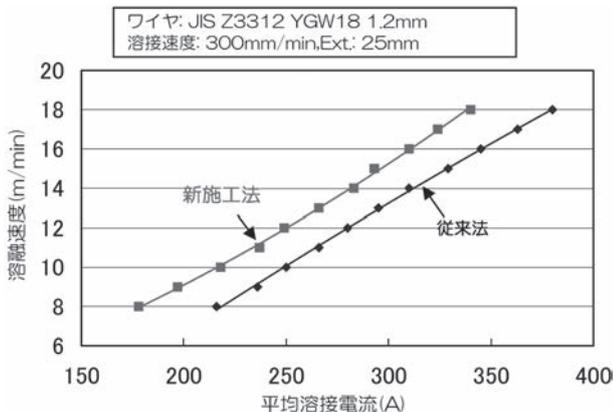


図13 炭酸ガスパルス溶接法の溶融速度

溶滴はグロービュールで移行し、アークの集中性も変わらないことから、図15に示すように従来の炭酸ガスアーク溶接と同様な溶込み形状であり、多層溶接を行っても溶接欠陥は発生し難い特長もある。

この技術は建設機械分野で実用化されている。Ar-CO₂混合ガスシールド溶接から100%炭酸ガスシールド溶接に変更できることから、トータルでのコストダウンに寄与している。今後、建築・鉄骨分野も含め、適用拡大が期待される技術である。

2.5.2 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術

同じく炭酸ガスシールド溶接において、ワイヤの化学成分を変更し、通常は逆極性(ワイヤプラス)である溶接条件を、正極性(ワイヤマイナス)とすることで劇的にスパッタ及びヒュームを低減する技術も開発されている¹⁸⁾。ソリッドワイヤ中に330~450ppmのREM (Rare Earth Metal: 希土類金属)を添加し、ワイヤ正極(DCEN)で溶接すると、250A~380Aの高電流域で溶滴がスプレー化する現象を利用している。REMを添加することで、ワイヤ先端に陰極点が集積し、円錐形状のアークが形成される結果、安定した微細なスプレー移行が実現される(図16)。このREM添加ソリッドワイヤは、炭酸ガスにおいても混合ガスレベルまでスパッタの発生量が低減し(図17)、同時にヒュームの発生量も低減する画期的な技術である。

この技術は、従来の溶接電源を用いた低スパッタ・低ヒュームの溶接であるため、適用しやすいという利点もあり、造船用の厚板の狭開先片面溶接で実用化され、能率改善¹⁹⁾に寄与し始めている。今後は造船のみならず建築・鉄骨等への適用拡大が期待^{20,21)}されている。

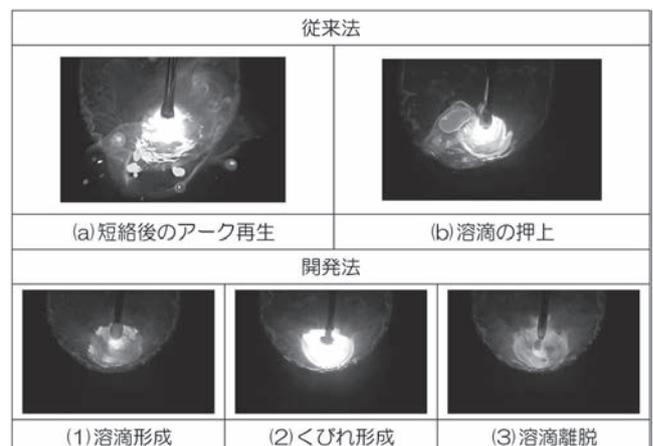


図14 従来法と開発法の溶滴移行の比較

3 おわりに

溶接材料の世界市場は、本号テクノ・スコープにも記載される通り日本市場の20倍弱の規模があり、需要が伸びると考えられる国や地域では、被覆アーク溶接棒の比率が高い。ワイヤの使用量は確実に増えることが予測される。

国内で成すべき事は、最先端のアーク溶接技術の開発に邁進し、世界に向けて材料と施工法等溶接技術の発信源となることであろう。

中厚板の溶接分野では、溶接品質の確保が重要である。例えば、造船分野では、耐食性塗装鋼板を溶接した場合に発生する気孔欠陥の更なる低減のニーズが高い。新塗装基準 (PSPS = Performance Standard for Protective Coatings) に対応した溶接材料は、耐食性、作業性、機械的性能を考慮した溶接材料の設計が求められている。塗装性や疲労強度の改善に向けた溶接ビード表面形状に関する研究も重要であろう。また、海洋構造物、タンク、化学プラントなどの分野では、鋼板の高強度化と高靱性化に対応するために溶接組織の更なる制御が必要である。高速化・大入熱化は溶接部品質の劣化につながり、凝固過程も含めた冶金的理解と対策が必要になる。また、耐熱鋼などで極微量元素の制御も含めた溶接材料の化学組成制御は未知なる領域であり、研究課題も多い。

次に、溶接環境の改善もますます重要になるであろう。特に、スパッタやヒュームの絶対量の低減に加え、ヒュームの低毒化が最も重要な要求の一つである。具体的にはMnやCrの低減である。また、最近の基礎研究によると、高電流域において、FCWはソリッドワイヤに比較して、溶滴移行が各段に安定性するという系統的な調査が報告されている^{22,23)}。低スパッタ化のみならず、高能率化を同時に確立できる技術であり今後の実用化に向けた取り組みが期待される。

最後に高効率化によるトータルコストダウンの提案である。例えば、建設機械や建築・鉄骨分野には溶接効率の向上が至上命題であり、単位時間当たりどれだけ溶かせるか、さらに高溶着のアークプロセスが24時間維持できるかがコスト競争力のキーになる。連続溶接性の向上、無停止溶接の実現は材料のみならず、装置や制御も含め提案する必要がある。

参考文献

- 1) 中野利彦, 鈴木励一: 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, 神戸製鋼技報, 58 (2008) 1, 57-63.
- 2) 定廣健次, 曾賀光郎, 松村浩史, 高田篤人: 鉄骨柱大組立2アーク溶接ロボットシステム, 神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 76-80.

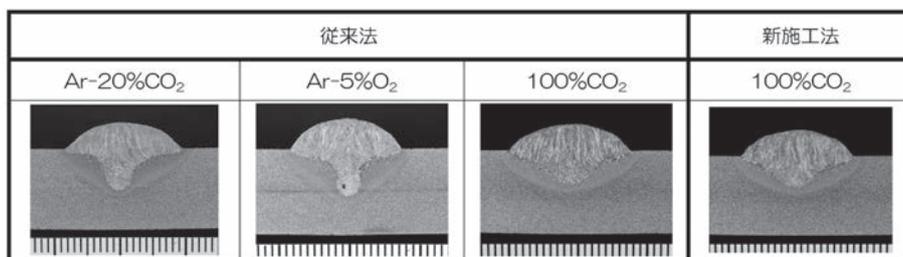
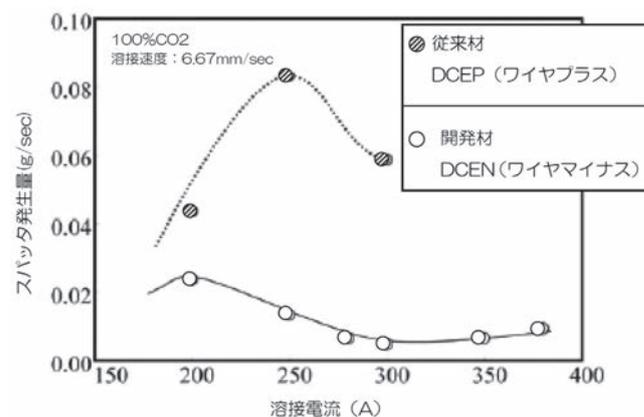


図15 溶け込み形状の比較 (ワイヤ送給速度共通13.2m/min)



- 3) 菅哲男：炭酸ガスアーク溶接用フラックス入りワイヤのヒューム発生現象, 溶接学会論文集, 3 (1985) 2, 269-276.
- 4) 伊藤和彦, 長岡茂雄, 橋本哲哉, 黒川剛志：造船向け高品質CO₂溶接用フラックス入りワイヤ, 神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 15-19.
- 5) 伊藤和彦, 長岡茂雄, 有田大：厚板の高エネルギー水平すみ肉溶接用フラックス入りワイヤとその施工法, 神戸製鋼技報, 58 (2008) 1, 64-68.
- 6) T.Kasuya, R.Shimura and Y.Totsuka : Annealing flux cored wires and the reduction of diffusible hydrogen, IIW (2009) , Doc.No XII-1708-09.
- 7) R.Shimura, H.Nagasaki, Y.Totsuka and S.Nakamura : Development of Seamless flux cored wire for high tensile strength steel, IIW (2011) , Doc.No XII-2033-11.
- 8) 菊田米男：非金属介在物の水素トラップ効果に対する検討, 溶接学会論文集, 3 (1985) 3, 490-497.
- 9) 鈴木正道：9%Ni鋼溶接用フラックス入りワイヤ, 神戸製鋼技報, 59 (2009) 1, 111-115.
- 10) 日高武史, 末永和之, 岡崎喜臣, 石田斉：高強度鋼用フラックス入りワイヤによる溶接金属の組織・靱性に及ぼす酸化物の影響 (第2報) 全姿勢溶接用FCWの検討, 溶接学会全国大会講演概要, (2008) , 237.
- 11) 中澤博志, 辻典親, 大山繁男：低温用鋼サブマージアーク溶接用シームレスフラックス入りワイヤおよび熔融型フラックスの開発 (第1報), 溶接学会全国大会講演概要, 84 (2009) , 225-226.
- 12) 山下賢, 丸山敏治：低合金耐熱鋼用溶接材料の高強度化の動向, 神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 34-37.
- 13) 高橋将：S-TEN®鋼用溶接材料について, Newびいど, (2011) 33, 12.
- 14) 長岡茂雄, 橋本哲哉, 横田泰之, 岸本卓也：高エネルギーCO₂溶接施工法「高速水平すみ肉溶接法」および「2電極エレクトロガスアーク溶接法」, 神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 20-24.
- 15) 安藤弘平, 山本利雄：炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタについて (第1報), 溶接学会誌, 31 (1962) 3, 218-222.
- 16) 阿草一男, 山内信幸：ガスシールドアーク溶接現象に及ぼす微量元素の影響に関する日本の研究の現状, 電極ワイヤ中の微量元素の影響, 溶接学会誌, 50 (1981) 11, 1059-1065.
- 17) K.Yamazaki, R.Suzuki, H.Shimizu and F.Koshiishi : Spatter and Fume Reduction in CO₂ Gas Shielded Arc Welding by Regulated Globular Transfer, IIW (2010) , Doc.No. XII-1993-10.
- 18) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則：炭酸ガスアーク溶接現象に及ぼすワイヤへのREM添加の影響, 溶接学会論文集, 26 (2008) 1, 37-41.
- 19) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一：極低スパッタCO₂アーク溶接技術「J-STAR Welding」の開発, JFE技報, (2007) 16, 50-53.
- 20) 石井匠, 中川郷司, 片岡時彦, 池田倫正：REM添加ワイヤを用いた高エネルギーCO₂アーク溶接技術の建築鉄骨への適用 (第1報), 溶接学会全国大会講演概要, 80 (2007) , 43-44.
- 21) 石井匠, 中川郷司, 片岡時彦, 池田倫正：REM添加ワイヤを用いた高エネルギーCO₂アーク溶接技術の建築鉄骨への適用 (第2報), 溶接学会全国大会講演概要, 80 (2007) , 45-46.
- 22) 袁倚旻：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 (2011) , SW-3374-11.
- 23) 袁倚旻, 山崎圭, 鈴木励一：ローテーティングアークを防止できる大電流マグ溶接プロセスの開発, 溶接学会全国大会講演概要, 87 (2010) , 70-71.

(2011年12月5日受付)