

アーク溶接の材料・プロセス・機器の最先端

The Forefront of Arc Welding Consumables, Processes and Systems

(株) 神戸製鋼所
溶接事業部門
技術センター長
清水弘之
Hiroyuki Shimizu

(株) ダイヘン
溶接機事業部
研究開発部 部長
恵良哲生
Tetsuo Era

1 はじめに

図1に世界における鋼材¹⁾と溶接材料²⁾の需要状況を示す。中国の鋼材需要沈静化に伴い全世界の鋼材需要量は、近年15億トン/年となっている。世界的には鋼材需要量に0.4%、日本では0.3%を乗じた数量が溶接材料需要量となる。鋼材需要の沈静化に伴い世界の溶接材料需要量も600万トンを超えてきている。図2に日本における溶接材料の生産量推移³⁾を示す。バブル期(1991年)には、40万トン/年を超えた日本の溶接材料需要量も、足元では30万トン/年を下回っている。被覆アーク溶接棒(SMAW)に替わり、まず自動車や鉄骨業界においてソリッドワイヤの需要が急激に伸び、1988年にはソリッドワイヤが溶接材料構成比率のトップとなった。次にフラックス入りワイヤ(以下FCW)の需要量が漸増し、1985年に実用化された直径1.2mmを中心とした細径FCWは、造船業界などの強い要望にも後押しされて、確実に比率が伸びている。高能率な溶接施工には、突出し部でのジュール発熱が有効に利用でき、溶融効率と連続操業性に優れる細径ワイヤに勝る溶接材料はなく、ソリッドワイヤとFCWが溶接材料の中心的役割を担っている。

パワーエレクトロニクスの発展と共に溶接電源も進歩し、最近ではデジタル制御されたインバーター電源が主流となっている。演算時間も20nsに達し、アーク溶接の殆どの現象が制御しようと思えば制御出来るようになってきている。高性能化した電源、送給装置とロボットを協調制御し、更に新しい溶接材料を組合せることでアーク溶接はとどまることなく進歩している。

2 最近の溶接材料と溶接プロセス

2.1 ソリッドワイヤ

ソリッドワイヤは、溶接材料の国内総生産量に占める割合が最も高く、建築鉄骨、自動車、造船などの分野で幅広く用いられている。溶接ロボットを中心に早くから自動溶接が進んでおり、自動溶接に対応したソリッドワイヤのニーズが高まっている。

2.1.1 希土類添加ソリッドワイヤ

溶滴を細粒化し規則正しく移行させることでヒュームやスパッタの発生量は減らすことが出来る。これまでCO₂をシー

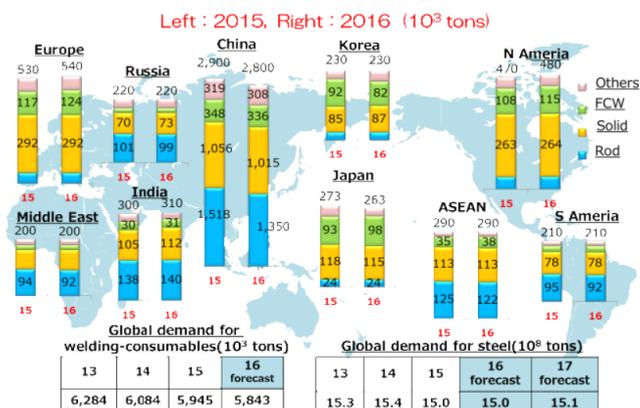


図1 鋼材、溶材および国・地域別溶材需要量

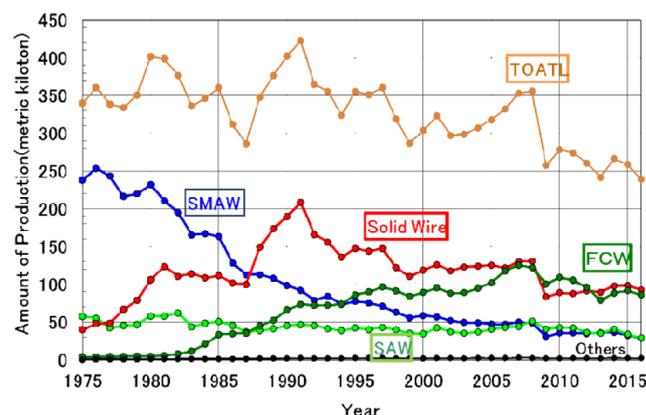


図2 日本における溶接材料の生産量推移

ルドガスに用いると、溶滴の細粒化は困難であった。片岡らは⁴⁶⁾この常識を打ち破る新しいソリッドワイヤ組成を発見している。希土類元素を微量添加したソリッドワイヤをCO₂シールドで正極性にて溶接すると、溶滴は細粒化しスプレー移行することを見出した。希土類元素が、溶滴の形成と移行を安定化し、従来のマグ溶接と比較しても高電流でスパッタが少なく、アークプラズマの指向性が強く、深い溶込みが得られる。厚鋼板の狭開先溶接に本ワイヤは使用されている。

2.1.2 建築鉄骨用ソリッドワイヤ

建築鉄骨用溶接ロボットは、溶接部材の板厚や形状を入力すると、センシングによって溶接箇所を検知することにより溶接電流・電圧・速度を決定し溶接を開始する。溶接が完了するまでの間、溶接中に発生するスラグの除去やノズルに付着したスパッタの清掃など、ほとんどすべての作業を自動で行う。すなわち、部材をセットして溶接を開始すると、溶接が完了するまでオペレータ介入の必要がなく、夜間の無人運転さえも可能となっている。このロボット溶接に最適化されたソリッドワイヤが開発されている⁷⁻⁹⁾。ロボット溶接用ソリッドワイヤに求められる特性は、健全な溶接継手が得られることはもちろん、自動溶接を妨げないことである。阻害要因として、スラグ堆積による除去作業やアークスタートの失敗である。ソリッドワイヤの成分を最適化することにより、図3に示すようにスラグ剥離性を改善することが出来る。建築鉄骨では高い溶融効率と深い溶け込みが求められるために高電流溶接となることが多い。チップとワイヤの摺動接点でジュール発熱し、微小な溶融・凝固が生じ『融着』という現象を発生しやすい。ロボット溶接用ソリッドワイヤには融着を防止する工夫がされている。溶接ロボット用ソリッドワイヤは、国内の建築構造物で主に使用されるYP325、YP355、YP385鋼に対し、強度別に準備されている。最近では建物の大型化によって、更に強度が高いYP440鋼用のソリッドワイヤも開発されている。

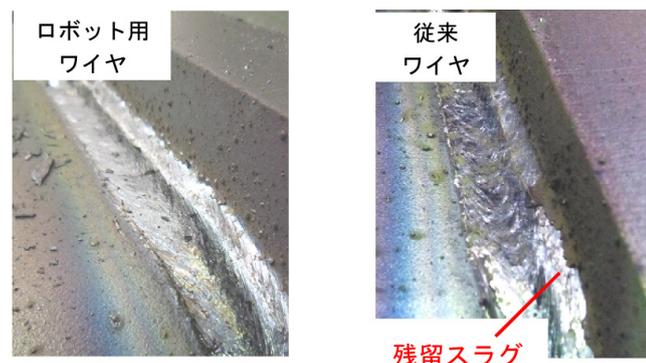


図3 ロボット用と従来ワイヤのビード外観比較

2.1.3 自動車用ソリッドワイヤ

CO₂排出量の削減の為に、自動車の車体軽量化は有効な手段の一つである。高強度鋼板の適用も進んでおり、ボディ骨格や各パーツ、シート用フレームにはギガPaクラスの超高張力鋼板が採用され始めている。超高張力鋼板になるとスポット溶接やレーザー溶接でも強度不足となることが知られている^{10,11)}。アーク溶接はスポット溶接やレーザー溶接と異なり、ワイヤに合金元素を添加することで溶接金属の機械的性能を調整でき、継手強度の制御が容易である。1180MPa級以下の超高張力鋼板に対応したソリッドワイヤが開発されており¹²⁾、CrやMoといった焼き入れ性を向上する元素が添加される。図4は抵抗スポット溶接法と同じく点溶接としてアーク溶接を用いる、いわゆるアークスポット溶接法を用いて、JIS Z 3137 十字引張強さ (CTS) に及ばず鋼板の強度、炭素当量、溶接法および溶接材料の影響を調査した結果である。抵抗スポット溶接法は、鋼板の強度と炭素当量が上昇するにつれてCTSが低下する。一方、アークスポット溶接法は、抵抗スポット溶接法ほど鋼板強度・炭素当量の影響は受けない。

2.2 フラックス入りワイヤ (FCW)

FCWは炭素鋼～低合金鋼～高合金鋼まで、幅広い品種がある。フラックスを活用することで重力場においても高能率な全姿勢溶接が可能となっている。更なる大溶着化、高速化や溶接品質も重要な課題となっている。近年は、溶接材料だけでなく、新たな溶接プロセスと溶接材料を組み合わせることで、能率と品質を向上させる技術が開発されている。一例として大電流溶接法¹³⁻¹⁵⁾を紹介する。

建設機械などの中・厚板分野では、品質安定化のため、半自動溶接から溶接ロボットへの移行が進んでいる。操作性の観点から1電極による高溶着化による高能率化が求められている。炭素鋼細径ソリッドワイヤを用いた大電流溶接で

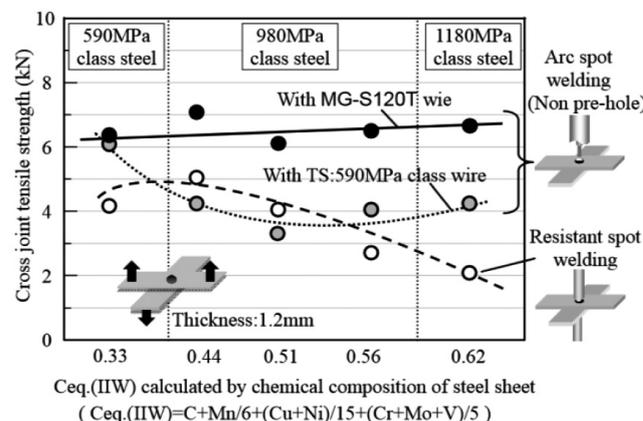


図4 十字引張強度に及ばず鋼板強度、炭素量、溶接法、溶接材料の影響

は、ワイヤ溶融速度が150g/min (溶接電流450A) を超えると溶滴は不安定な移行となり、スパッタ発生量が急激に増加する。ワイヤ突出し部がアーク発生点に到達する前にジュール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。この課題を解決するために、500A以上の大電流でも溶接が可能な専用のメタル系FCWが開発されている。ソリッドワイヤと異なり、FCW内部のフラックスに溶接電流がほとんど流れずフラックスは固体で柱状を維持する。ワイヤ先端溶融部は回転せず移行が可能であり、ワイヤ溶融速度が200g/minを超える領域においても安定した溶滴移行と低スパッタを維持する。図5に従来法とのスパッタ発生量の比較を示す。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ている。表1に専用ワイヤにおける溶着金属の化学成分と機械的性質の一例を示す。

2.3 サブマージアーク溶接 (SAW) 材料

サブマージアーク溶接材料が全溶接材料に占める割合は、10%と大きくはないが常に一定の割合を維持している¹⁶⁾。サブマージアーク溶接は厚板を高能率で溶接する非常に優れた溶接方法であり、他の溶接方法では代替できない。

片面SAWは、造船などで大板を裏返すことなく片側から高能率で溶接する施工方法である。厚板における高溶着性、溶融スラグの吹上抑制あるいは表ビード形状の安定化を目的

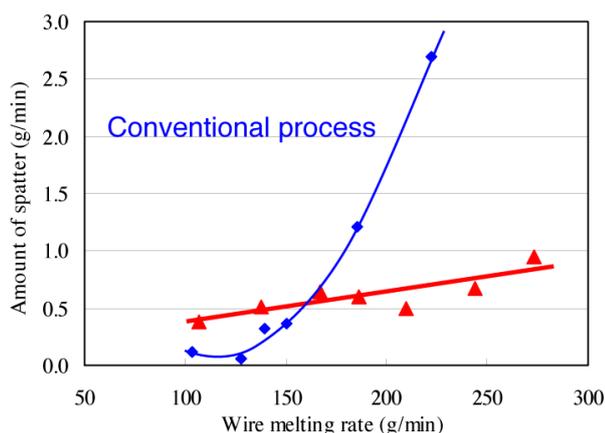


図5 大電流溶接法におけるスパッタ発生量の比較

に¹⁷⁾、片面SAWでは鉄粉を含有したフラックスが広く適用されている。この鉄粉が原因で表ビードに写真1に示す微小な鉄粒、凸部が発生する。

最近では、船体の長寿命化や保守の容易化を目的に、全船舶の二重船側部を対象に船体の防食効果を高めるため、一定範囲内での塗装膜厚の確保が求められている。塗装性を阻害する表面欠陥、例えば溶接時に付着するスパッタやビード表面汚れの除去がIMOの新塗装基準¹⁸⁾に定められている。塗装基準の改定に伴い、表ビード表面に付着した鉄粒を除去しなくてはならず、グラインダーなどの作業が増えることから、鉄粒が付着しない溶接材料のニーズがあった。図6のようにフラックス中の鉄粉が溶融スラグ中で溶融・凝集して大きな鉄粒を形成して沈降し、ビード表面に付着して鉄粒になると推定した。フラックス組成を調整し、スラグ粘度を制御し鉄粉が溶融スラグ中で凝集し難くした。写真2にビード外観を示すが、高溶着性、溶融スラグの吹上抑制と表ビード形状の安定性を維持しつつ、鉄粒が付着し難いフラックス¹⁹⁾が開発されている。

片面SAWは多電極を用いた高能率な優れた溶接方法であるが、実用化されてから現在にいたるまで解決できていない課題がある。溶接金属の熱収縮により鋼板が回転変形し、溶接の終端部に凝固割が発生してしまうのである。図7に示す変形挙動により終端は割れる。先行する第1電極がタブ板に乗り上げた直後に大きく変形し、凝固直前の終端溶接部は開口する方向に引っ張られて、割れるのである。

最近、節点数が10⁴を超えるような大規模解析に有効な理



写真1 ビード表面に発生する鉄粒

表1 大電流溶接法専用メタル系FCWにおける溶着金属の化学成分と機械的性質例 (mass%)

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

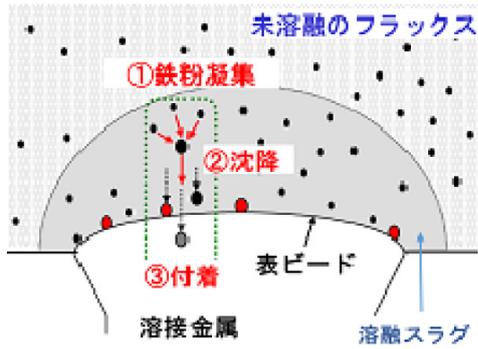


図6 鉄粒発生メカニズム (推定)

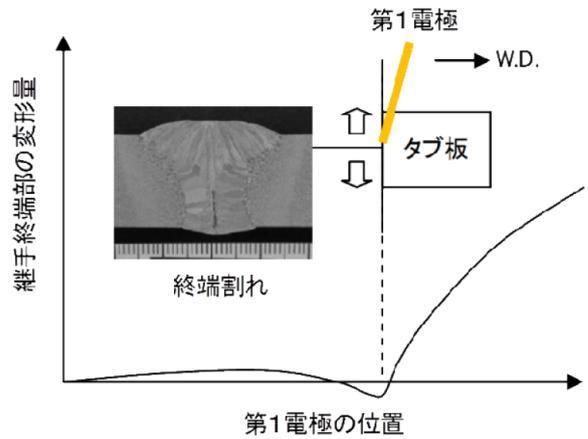


図7 溶接継手終端部の変形挙動



写真2 開発フラックスを用いた溶接ビード外観例

想化陽解法FEM が開発され、実ワークを想定した大規模構造物のシミュレーションが可能となっている²⁰⁾。このシミュレーション解析技術を用いた片面SAWの凝固割れの解析によって、各種溶接施工パラメータをBTR (凝固脆性温度域) 塑性ひずみ増分で比較した結果と実溶接での測定結果から、図8のような割れ発生のクライテリアが得られている。溶接施工条件の調整で終端部の変形量を抑制し、終端割れを防止できる可能性が示唆される²¹⁾。造船の大板溶接が更に効率化する技術であり実用化が期待されている。

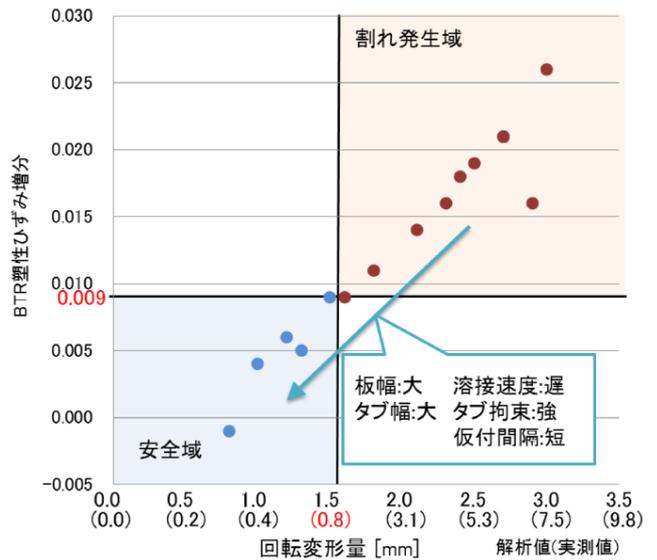


図8 割れ発生のクライテリア

2.4 高張力鋼用の溶接材料とプロセス

鋼構造物の大型化・軽量化のために鉄鋼材料 (高張力鋼) の更なる高強度化が進んでいる。図9に、各産業分野における高張力鋼の適用状況を示す²²⁾。現在、溶接構造用鋼として最も強度の高い引張強さ (以下HT) 950MPa級鋼は、水圧鉄管 (ペンストック) を中心に実用に供されている。HT780MPa級鋼は、ジャッキアップリグ (海洋構造物)、球形タンク (貯槽) などで適用されている。高張力鋼の適用とともに構造物の信頼性・安全性に対しての要求が高まり、特に寒冷地での稼働が多い海洋構造物を中心に、低温じん性のさらなる向上が要求されている。

2.4.1 YS690MPa級鋼用高じん性FCW²³⁾

ジャッキアップリグなどで多く適用されるYS690MPa級

鋼に対応し、全姿勢用高じん性FCWが開発されている。図10に溶接金属中の酸化物個数密度とシャルピー衝撃試験における上部棚エネルギー (vE-Shelf) の関係、図11にベイナイト粒径と延性-ぜい性遷移温度 (FATT) の関係を示すが、高張力鋼用FCWの溶接金属においては、酸化物の個数密度を抑えつつ粒内ベイナイト変態を促進させて組織を微細化することで良好なじん性を得られることが分かる。開発材ではこれらの技術を適用することで、図12に示すとおり全面にわたり粒内ベイナイトが認められ、非常に微細な組織が形成されている。また、開発材を用いて作製した継手溶接金属の引張・シャルピー衝撃試験結果を表2に示すが、溶接金属強度はYS690MPa級の要求値を満足し、組織の微細化によりシャルピー衝撃試験の延性-ぜい性遷移温度は-60℃以下となっており、吸収エネルギーの低下が抑制されている。

2.4.2 HT610MPa級鋼用PWHT対応高じん性FCW²⁴⁾

球形タンクや海洋構造物向けを含む压力容器などの建造では、溶接部の応力除去などを目的に溶接後熱処理（以下PWHT）が行われる。全姿勢での溶接が可能なチタニア系FCWによる溶接金属では、不純物元素であるNb、Vの低減によるPWHT後の炭化物形成・析出硬化の抑制が、脆化抑制の一手段と考えられている²⁵⁾。しかし、HT610MPa級鋼用以

上のチタニア系FCWによる溶接金属では、これら不純物元素の低減だけでは十分なじん性を得ることが難しく、実用化に至っていない。さらなる脆化抑制策として、図13に示すとおり旧 γ 粒界のPWHT後の炭化物サイズの低減が見出された。また、図14では溶接金属中のNi量（Low Ni： $<1\%$ 、High Ni： $\approx 2.5\%$ ）によって、旧 γ 粒界の炭化物サイズを極小化させるための適正なCr量が異なることが分かる。これはセメントイト生成量の差異によるものと推定されている。HT610MPa級鋼用FCWによる溶接金属の機械的性質を表3に示すが、 -40°C のシャルピー衝撃試験においてPWHT後の脆化を抑制することが出来ている。

構造物	PWHT	分野	代表的な鋼材の種類	使用鋼材のハイテン化 (上段：引張強さ、下段：降伏強さ, MPa)									
				400	490	550	590	690	780	950	>950		
				235	325	355	385	420	440	460	500	550	630
フレーム系		建築	軟鋼・細粒鋼	SN490 TMC P385 東京スカイツリー(YP400, 500, 630, YS630) BOX柱(SA440)									
		橋梁	軟鋼・細粒鋼 耐候性鋼	東京ゲートブリッジ 明石海峡大橋 (SBHS500) (予熱低産780N)									
		造船	軟鋼・細粒鋼	コンテナ船(EH36, EH40, EH47)									
		海洋構造物	軟鋼・細粒鋼	Hull(YS355 420 460 500 550) Rack & Chord (YP690)									
ベッセル系	有/無	压力容器 ボイラー	耐熱鋼	SA387Gr.22 Cl.2 SA543B Cl.1									
		タンク	軟鋼・細粒鋼 低温用鋼	(SPV490) 球形タンク(H7780) SLA235 SLA325 SLA365 SL9N590(9%Ni)									
		ラインパイプ ベニストック	軟鋼・細粒鋼	ラインパイプ X52 65 70 80 100 120 ベニストック 540 610 690 780 850									

図9 各産業分野での高張力鋼の使用状況²²⁾

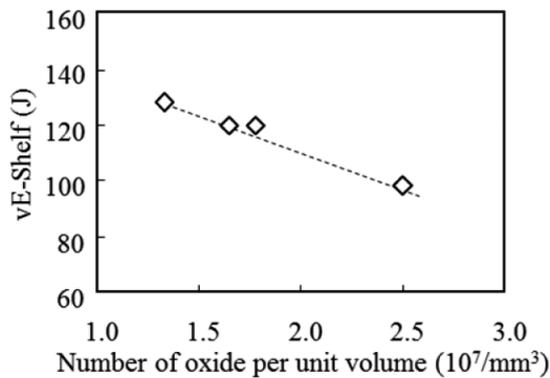


図10 酸化物個数密度と上部棚エネルギー (vE-Shelf) の関係²³⁾

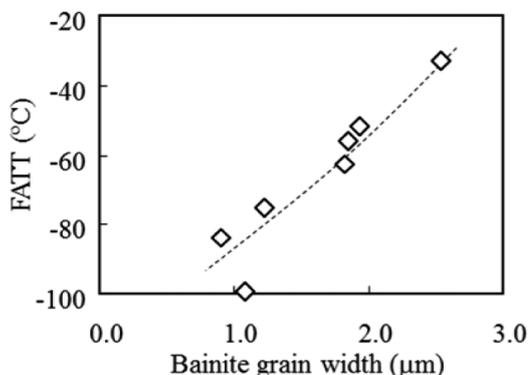


図11 ベイナイト粒径と延性-ぜい性遷移温度の関²³⁾

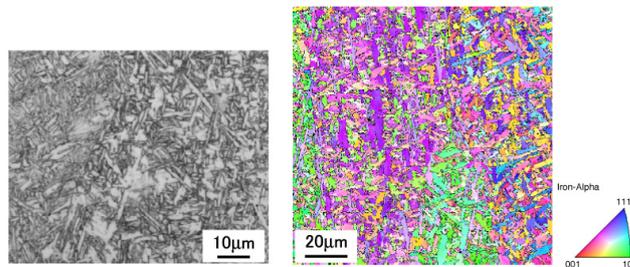


図12 YS690MPa級鋼用FCWの溶接金属ミクロ組織写真およびEBSD方位マップ²³⁾

表2 YS690MPa級鋼用FCWの継手溶接金属の機械的性質²³⁾

Plate thickness	Welding position	Heat input (kJ/mm)	Location ^{*3}	Tensile properties ^{*1}			Notch toughness ^{*2}			
				0.2%YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy: J (Brittle fracture: %)			FATT (°C)
							-60°C	-40°C	-20°C	
50mm	Horizontal (2G)	0.9	F	784	825	20	67 (14)	74 (6)	75 (4)	<-60
			B	818	848	22	66 (14)	73 (9)	77 (7)	<-60
	Vertical upward (3G)	1.7	F	736	811	23	52 (39)	68 (32)	79 (22)	<-60
			B	738	817	24	62 (29)	72 (22)	83 (18)	<-60

*1 JIS Z 3111 No.A2 specimen (dia.=6.0mm, G.L.=24mm)

*2 Charpy impact test specimen: 10mm x 10mm, 2mm V-notch

*3 F: 7mm from 2nd side surface, B: 7mm from 1st side surface

2.4.3 水素低減プロセス^{26,27)}

ガスシールドアーク溶接における溶接ワイヤに起因する水素源として、(1) 表面潤滑剤と (2) FCWのフラックス水分がある。これら水素源が溶接ワイヤから溶接金属に侵入する量を減らすために、拡散性水素低減プロセス（以下、低水素プロセスと呼ぶ）が開発されている。低水素プロセスは、図15に示すような、コンタクトチップとシールドノズルの間に設けられた吸引ノズルから、シールドガスの一部を吸引する2重ノズル式トーチシステムを用いて行う溶接法である。溶接ワイヤがコンタクトチップと母材間で溶接電流によるジュール発熱によって加熱されることで、熱エネルギーによってワイヤから水素源が遊離する。低水素プロセスで、ワイヤから遊離された水素源を多く含むガスをノズルにより吸引することにより、アーク雰囲気中に溶接ワイヤから侵入する水素量を低減し、溶接金属が吸収する水素量を低減する機構であ

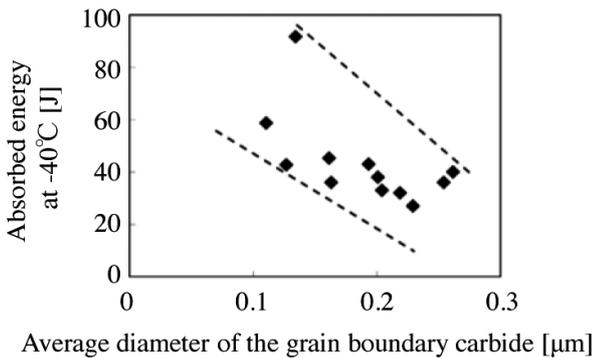


図13 PWHT後の粒界炭化物平均粒径と-40°C吸収エネルギーの関係²⁴⁾

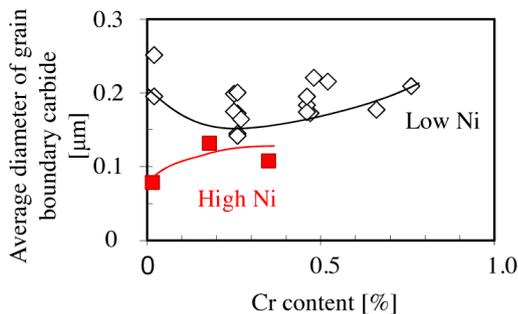


図14 Cr量とPWHT後の粒界炭化物平均粒径の関係²⁴⁾

表3 HT610MPa級鋼用FCWによる溶接金属の機械的性質 (PWHT: 620°C、8時間)²⁴⁾

Weld Metal	TS (MPa)		vE-40°C (J)	
	AW	PWHT	AW	PWHT
Low Ni	681	656	111	92
High Ni	708	663	102	103

る。溶接ワイヤに起因する水素源2因子それぞれに対して、低水素プロセスの有効性が確認されており、適用される溶接ワイヤの種類によっては、溶接ワイヤに依存することなく水素を制御できる可能性が期待される。

2.5 高合金鋼用溶接材料

近年ステンレス鋼およびNi基合金の各種工業分野での需要が拡大し、耐食性、強度、低温特性、高温特性など様々な性能に対する要求も高度化している。それに伴いステンレス鋼およびNi基合金用の溶接材料や施工における高品質化、高能率化、コスト削減などが求められている。

2.5.1 二相ステンレス鋼用溶接材料

二相ステンレス鋼は低温靱性に優れたオーステナイト系ステンレスの長所と耐SCC性に優れたフェライト系ステンレスの長所を有し、高強度の特徴を持ち、実用化が始まってから30年以上の歴史を持つ²⁸⁾。近年22% Cr系のスタンダード二相ステンレス鋼の他、高強度かつSUS304と同程度の耐食性を有しながら低コスト化を実現した省合金リーン二相ステンレス鋼や合金量を増加させた25% Cr系のスーパー二相ステンレス鋼も開発、実用化されている。図16に各種ステンレス鋼の耐孔食指数PRE (Pitting Resistance Equivalent) と耐孔食性相対比較を示す。PRE値は化学成分により金属の耐孔食性を表す指数であり、近年では代表的なもので $PRE = \% Cr + 3.3\% Mo + 16\% N$ がある。これらの鋼種に対応する溶接材料規格が制定され、アメリカ石油協会APIから溶接施工に関する推奨ガイドライン²⁹⁾が発行されている。日本溶接協会においても推奨ガイドラインの作成が進められている³⁰⁾。また、様々な鋼種の開発実用化に伴い、溶接材料メーカーで各鋼種

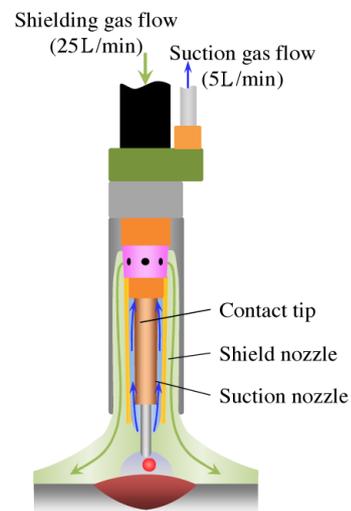


図15 低水素プロセスの溶接トーチ構造²⁷⁾

に対応した溶接材料の開発が進められている³¹⁾。表4に2相ステンレス鋼用溶接材料の性能一例を示す。従来FCWについては他の施工法と比較して、低温靱性が低いことが問題となっていたが、酸素量の低減により靱性改善が図られている(図17)³²⁾他、近年では結晶粒径を微細化することで低温靱性を改良する特許技術³³⁾が開示されており、実用化が期待される。

2.5.2 Ni基合金用溶接材料～700℃級 先進超々臨界発電技術への取り組み

Ni基合金は優れた耐食性、耐熱性に加え、強度、低温靱性に優れた材料として、化学工業や油井管、原子力プラントなど様々な分野で適用されている。近年、天然ガスや石炭などの化石燃料による発電用一次エネルギー需要が高まる一方で、地球温暖化抑制の観点から、より熱効率を向上させ、CO₂排出量削減を目指す取り組みが進められている。先進超々臨界発電技術(A-USC、Advanced Ultra Super Critical Steam Condition)の開発もその取り組みの一つである。A-USCでは熱効率を向上させるため、タービン入口における蒸気温度を

従来比で約100℃高めた700℃級での運用を目指し、日本国内の研究所、ボイラメーカー、タービンメーカーなどが一体となって取り組んでいる。この中で高温特性、加工性などに優れた様々なNi基合金材料とこれに適した溶接材料などの技術開発が進められている。表5に開発評価中のA-USC用Ni基合金候補材料一例を示す。

HR6W、HR35、Alloy617は加工性に優れ主蒸気管や再熱蒸気管などの厚肉大径管と過熱器などの小径伝熱管への適用が検討されている。Alloy263、Alloy740、USC141は耐熱性に優れ過熱器などの最高温部への適用が検討されている。蒸気タービンロータの候補材としてFENIX-700はAlloy706をベースとする改良材で10トンを超える大型ロータ部材用として検討されている。LTES700Rは12% Cr鋼との溶接を前提とし、線膨張係数が低めとなるように設計されている。TOSIX-IIはAlloy617をベースとし、Cr、Al、Ti量を最適化することで優れた高温クリープ性能を有している³⁴⁻³⁶⁾。

2.6 低合金耐熱鋼用溶接材料

Mo鋼やCr-Mo鋼、Cr-Mo-V鋼と呼ばれる低合金耐熱鋼

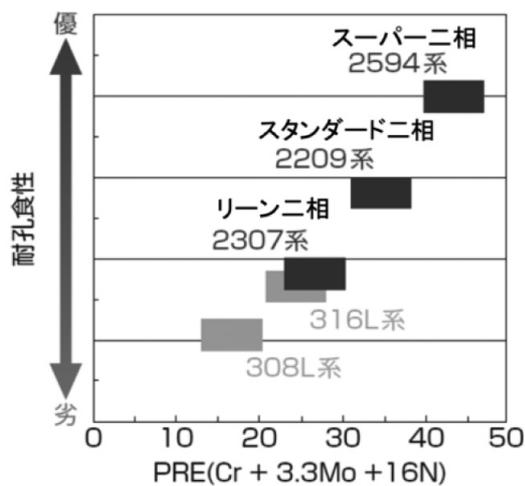


図16 PREと耐孔食性の関係

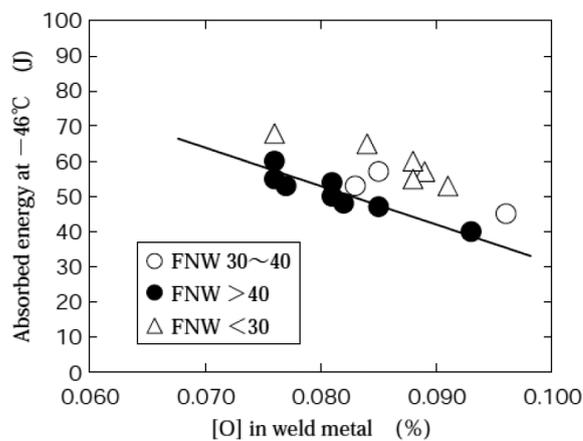


図17 二相ステンレス鋼溶接金属の衝撃値と酸素の関係

表4 2相ステンレス鋼用溶接材料の化学成分および機械的性質一例

成分系	溶接材料	全溶着金属化学成分 (mass%)							PRE	機械的性質			
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	吸収エネルギー (0℃, J)
リーン	SMAW	0.025	0.60	0.80	8.9	24.3	0.40	0.12	27.5	597	771	26	34 (-40)
	FCW	0.026	0.45	1.26	7.9	24.6	0.03	0.15	27.1	571	750	29	38
	GTAW	0.024	0.33	0.50	7.2	22.9	0.02	0.13	25.0	548	729	29	177 (-40)
スタンダード	SMAW	0.028	0.54	1.14	8.8	23.1	3.34	0.15	36.5	667	845	29	72 (-50℃)
	FCW	0.026	0.56	0.76	9.2	23.5	3.43	0.14	35.6	630	815	28	60 (-40℃)
	GTAW	0.008	0.39	1.67	8.7	22.7	3.10	0.16	35.5	598	773	39	270
スーパー	SMAW	0.034	0.55	0.66	9.3	25.4	3.86	0.24	43.3	750	935	28	40 (-50℃)
	FCW	0.031	0.50	1.18	9.5	25.9	3.87	0.25	42.0	714	896	28	38 (-40℃)
	GTAW	0.016	0.43	0.51	9.2	25.0	3.91	0.27	42.0	646	859	38	171 (-50℃)

は、高温環境における機械的性質や耐食性に優れていることから、火力発電ボイラや石油精製反応容器などの高温で使用される圧力容器や配管に使用されている。これらの分野では、高効率化のニーズから、機器使用条件の高温・高圧化が検討されたことで、機器の大型化・厚肉化が進んでいる。機器の軽量化のために材料の高強度化が望まれ、これに対応するべく鋼材及び溶接材料の開発・実用化が進められている。

石油精製反応容器の中で、重油水素化分解・脱硫リアクタは約400-450℃の高温、約15-20MPaの高圧下で使用され、材料としては2.25Cr-1Mo、2.25Cr-1Mo-V、3Cr-1Mo-V鋼などが実用化されている。近年では、高温でのクリープ特性と耐水素素侵食性に優れた2.25Cr-1Mo-V鋼の適用が増加し、その溶接材料の研究開発も盛んに行われた^{37,38)}。圧力容器製造時には、残留応力と拡散性水素除去などを目的としたPost Weld Heat Treatment (以下 PWHT) が施されるため、2.25Cr-1Mo-V

鋼用溶接材料開発では、PWHTによる炭化物析出や不純物偏析の状態を把握し、制御する技術が求められる。最近では、3D-AP (3次元アトムプローブ) によって原子の分布状態を可視化することで、PWHT後の旧オーステナイト粒界の炭化物と不純物の存在状態が明らかにされている³⁹⁾。

図18に3D-APによる解析結果を示すが、図中では旧オーステナイト粒界や M_7C_3 とマトリックスの境界へのPの偏析が確認されるが、VC周辺にはPが偏析せずにVC中にPが含まれる様子が確認されている。そのため、VCの析出量を増やし、その中にPを取り込むことで、不純物を無害化し、焼戻し脆化特性を改善する手法が提案されている。また、2008年に、欧州で2.25Cr-1Mo-V鋼製圧力容器において「SR割れ」もしくは「再熱割れ」と呼ばれる熱処理中に発生する割れが多発し、その原因が究明された⁴⁰⁾。SR割れは1980年代から広く研究されており^{41,42)}、炭化物析出による粒内と粒界の強度バ

表5 開発評価中のA-USC用Ni基合金候補材料一例

適用部位	候補材料名	組成
ボイラ	HR6W	45Ni-23Cr-7W
	HR35	50Ni-30Cr-4W-Ti
	Alloy617	Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al
	Alloy263	Ni-20Cr-20Co-6Mo-2Ti-Al
	Alloy740	Ni-25Cr-20Co-2Nb-2Ti-Al
	USC141	Ni-20Cr-10Mo-2Ti-Al
蒸気タービンロータ	FENIX-700	42Ni-16Cr-2Nb-2Ti-Al
	LTES700R	Ni-12Cr-6Mo-7W-Ti-2Al
	TOS1X-II	Ni-23Cr-13Co-9Mo-Ti-Al-Nb

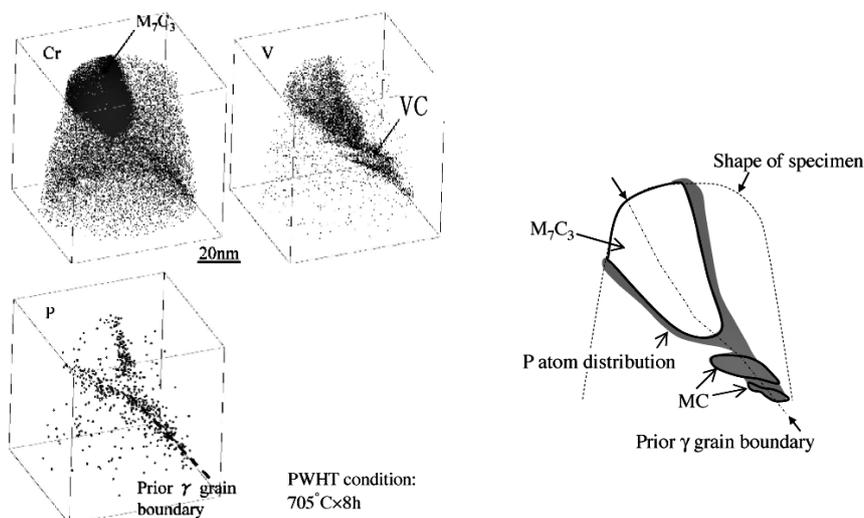


図18 3D-APによる旧オーステナイト粒界近傍原子分布解析結果³⁹⁾

ランスや不純物の粒界偏析による粒界脆化が複雑に関係し発生していると言われているが、未だに明確な防止方法は確立されていない。欧州のSR割れに関しては、不純物による粒界脆化が原因と結論付けられており、SR割れ感受性評価方法として、Gleeble™試験機を用いた高温低歪速度引張試験での高温延性や $K\text{-factor} = \text{Pb} + \text{Bi} + 0.03\text{Sb}$ (ppm) といった指標による不純物規制が提案されている。図19にK-factorを変化させた際の高温低歪速度引張試験結果を示すが、K-factor = 2.3ppmの極微量の不純物の影響によって、高温での伸びや絞りが急激に低下していることが確認できる⁴³⁾。SR割れを防ぐためにはK-factor < 1.5ppmに制御する方法が提案されているが⁴⁰⁾、評価式にみられるように、各元素で1ppm未満の分析精度が要求される。しかし、1ppm未満での分析精度を保証できる分析技術が確立されていないことから、IIW

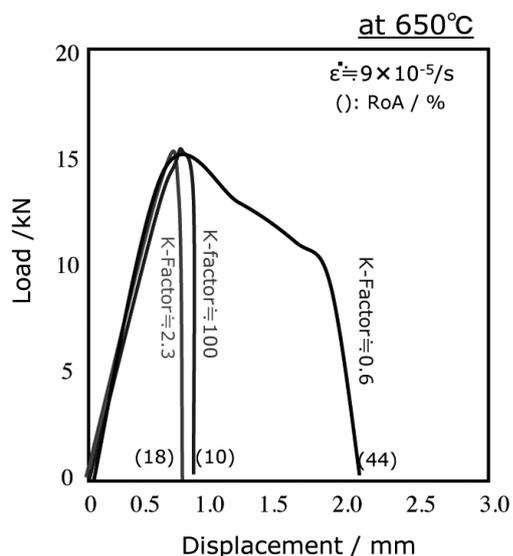


図19 K-factorと高温低歪速度引張試験における高温延性の関係

では、ラウンドロビンをテストを実施し、分析方法による分析精度の検証を行っている⁴⁴⁾。

3 溶接電源と溶接ロボット

溶接電源の出力制御方式が、サイリスタからインバータへと進化し、スイッチング周波数の高速化による出力波形の高速応答、小型軽量化、及び省エネルギー化が進み、溶接品質が飛躍的に向上した⁴⁵⁾。一方、熟練溶接士が不足することが懸念されており、自動化による溶接品質の向上も積極的に進められている。特に溶接ロボットによる高速溶接化においては、自動化による品質向上も去ることながら、高速溶接時の低スパッタ化が課題になる。また、厚板溶接におけるコストダウンにおいても、従来に無い高能率溶接法の実現が求められている。最近の産業機器のデジタル化は目覚ましく、溶接機器の世界においてもデジタル化が積極的に進められおり、その始まりは1990年台後半に遡ることができる。図20に1996年に開発されたデジタルインバータ溶接電源を第一世代とし、その後の演算素子の高性能化に伴い4つの世代に分類した一例を示す。

第一世代の演算素子には16ビットマイコンが採用されており、演算周期は100 μs、その処理能力を第2世代以降と比較するため1としている。演算素子がDSP (Digital Signal Processor)、FPGA (Field Programable Gate Array)、及びASIC (Application Specific Integrated Circuit) と進化するに従い演算速度が高速化され、処理能力も向上している。現在は第四世代であり、溶接制御専用のVLSI (Very Large Scale Integrated Circuit) であるWelbee (Welding Best Electronic Engine) チップが開発され、高速演算性能と高い処理能力が実現されている。Welbeeチップを搭載したデジタル電源

	第一世代	第二世代	第三世代	第四世代
	1996 - 2000	2001 -	2008 -	2010 -
外観				
演算素子	16bit CPU	32bit CPU / DSP	FPGA	ASIC
演算速度	100 μs	25 μs	1 μs	20 ns
処理容量	1	4	16	64

図20 デジタルインバータ溶接機の開発と変遷

Welbeeインバータシリーズは、高精度・高過渡応答な出力波形制御法の実現による高品質溶接の実現のみならず、メンテナンス性・耐久性の向上、溶接機のIT化による品質管理と拡張性、溶接モードのライブラリ化、及び環境配慮機能など多岐に渡る機能・性能を実現している⁴⁶⁾。溶接モードのライブラリ化とは、デジタル制御化により各種溶接材料に最適化した出力特性を自由に実現することができること、また、メモリー容量が豊富となったことで、1台の溶接電源で多種多様な溶接法を標準で搭載できるようになったことを意味している。

現在、産業界では、高齢化に伴う人材不足や生産効率向上への対応として、多くの分野にて自動機やロボットが用いられている。アーク溶接分野でも早くは1980年頃より、ロボットが用いられており、特に最近の自動車ラインではほぼ全ての溶接工程をロボットもしくは自動機が行うまでに普及している。また、建設機械・鉄骨・橋梁の中厚板分野においても、その溶接品質の高さと連続溶接性により生産効率を大幅に向上できる設備としてロボットシステムは必要不可欠なものとなっている。

アーク溶接ロボットには「高速動作」、「停止精度」、「制限時間」や「直線性精度」などの性能向上が求められており、ロボットメーカー各社はこれらの向上を図るべく、日々開発を行っている。最近のアーク溶接ロボットは、図21のようにアーム上部にはみ出ているトーチやコンジットケーブルを機械アーム本体に内蔵した「ケーブル内蔵型マニピュレータ」が主流となってきており、機械の構造自体が複雑になってき

ている。このためマニピュレータの機械設計には、3D CADは当然のこと、他に様々な解析ツールを用い、機械性能そのものの向上のみならず、試作→製品化までの開発サイクルの短縮を実現している。(図22、23) マニピュレータの制御技術に関しては、高速化・高精度化への要求に答えるべく、PID制御をベースにした制御から図24に示すモデルベース制御が主流になってきている。モデルベース制御では、マニピュレータのアーム慣性やモータ慣性を初めとして、摩擦力や減速機のねじれ量などのパラメータをシステム同定により求めることが非常に重要であり、各社とも各々のモデルを元にマニピュレータの動特性向上に努めている。

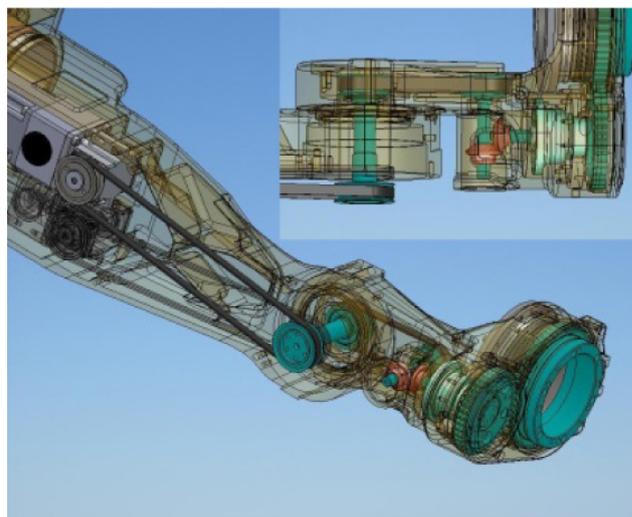


図22 3D・CADを用いた設計



図21 ケーブル内蔵型マニピュレータ

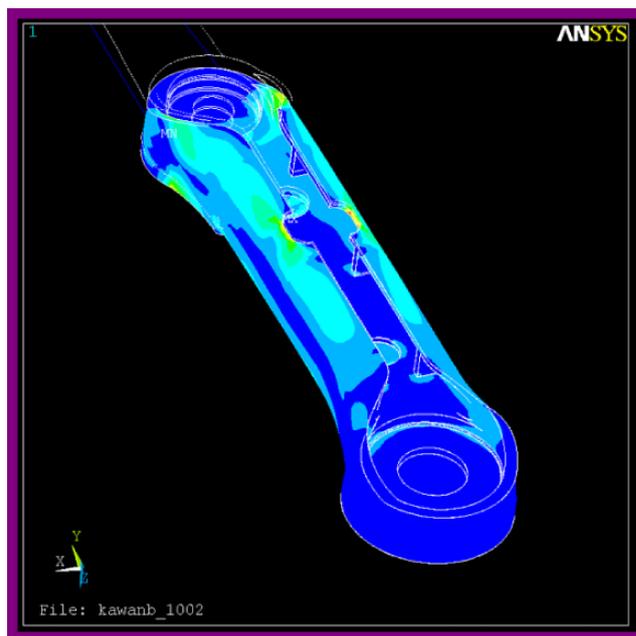


図23 フレーム剛性解析例

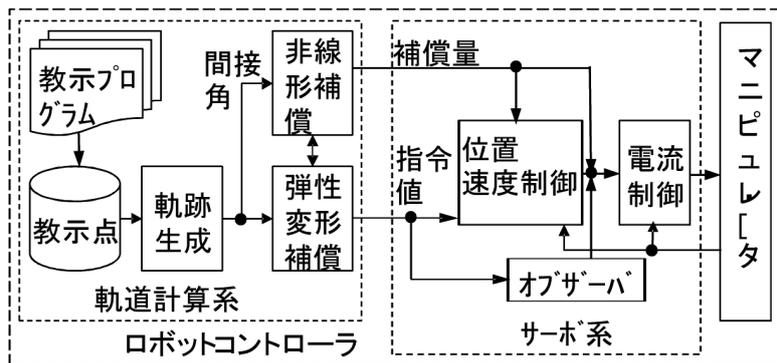


図24 モデルベース制御例ブロック図

4 電源、ワイヤ送給およびロボット制御による新しい溶接プロセス

ロボットによる高速溶接の実現には、単位長さ辺りの溶着量を維持するため出力電流を上げざるを得ない。高速溶接における究極の低スパッタ性能の実現には、グロービュール移行となる中電流域での更なる低スパッタ化が課題となる。ワイヤ送給制御を組み合わせることで短絡開放時のスパッタを抑制する手法⁴⁷⁾が1973年には提案されていたが、商用電源としてこの技術が実現されたのは21世紀に入ってからであり、デジタル電源の制御性能が送給制御を含めて高性能化した結果である。しかし、高速溶接時に必要な中電流域での母材入熱が低く、シールドガスにCO₂を用いても溶込みが浅いことから、板厚2.0~4.5 mm程度の自動車足回り部品の低スパッタ高速溶接に不向きである。そこで、中電流域でのワイヤ送給速度を略一定に制御し、深い溶込みを可能とする電流波形制御法を確立することで、板厚適用範囲を広げた低スパッタ高速溶接法がシンクロフィード溶接システム⁴⁸⁾が提案されている。シールドガスにCO₂ガス、ワイヤ径1.2 mmのソリッドワイヤを用いて、シンクロフィード溶接を行い1分あたりのスパッタ発生量を測定した結果、100Aから300Aの電流域においてスパッタ発生量は0.04から0.07g/分である。0.1g/分を下回ると概ね線香花火と同程度のスパッタ発生量であり、十分な低スパッタ性能を実現している。図25は、3.2mmのSPCCを用いて重ね隅肉とT字の隅肉溶接を行った結果であり、十分な溶込みを実現している。

CO₂ガスアーク溶接法は、溶接能率が高くガスが安価であるため、建築鉄骨、造船などの幅広い分野で使用されている。しかし、溶接時の中～高電流域においては、溶滴移行が不規則かつ不安定となり、スパッタやヒュームが発生しやすい。新開発したCO₂ガスアーク溶接法REGARC™は、特殊な電流波形制御により規則化された溶滴移行を実現し、極低スパッタ化、低ヒューム化を可能にした溶接プロセスである。

	ビード外観	マクロ断面
3.2mm Lap joint 300A 22.5V 100cm/min		
3.2mm T-fillet joint 250A 23.0V 50cm/min		

図25 シンクロフィード溶接法による炭酸ガス溶接例

中～高電流域のCO₂ガス中のアークは、ガスの熱解離時の吸熱反応による熱的ピンチ力で緊縮し、溶滴下部に集中する特徴がある。溶滴は、アークによる反力で強く押し上げられながら成長し、重力などの離脱力が上回るタイミングで移行する。また、アーク反力が強い為、左右にふらつきやすく、極めて不安定な挙動を示す。この複雑かつ不安定な溶滴移行によって、溶接中に飛散する金属粒(スパッタ)が著しく増加し、溶接品質を低下させる。図26は高速度カメラによるスパッタ発生挙動の観察結果を示す。(a)は、短絡後の再アーク時に発生するスパッタである。アーク反力で成長した溶滴が溶融池に吸収されずに短絡し、再アーク時の反力で移行途中の溶滴あるいは溶融池の一部が吹き飛ばされてスパッタになる。(b)は、ワイヤ先端の溶滴が、アーク反力で押し上げられ離脱するスパッタである。CO₂ガスアーク溶接で最も特徴的なスパッタであり、離脱した溶滴が回転しながら飛散するため、非常に大粒となる。その他にも、溶滴離脱後のワイヤに残留する融液が飛散したスパッタも存在する。溶滴がワイヤ先端から離脱した直後、ワイヤ側に残留した融液が高電流アークにさらされ、蒸発の反発力で飛散する。図27に、CO₂ガスアーク溶接における溶滴移行周波数の比較を示

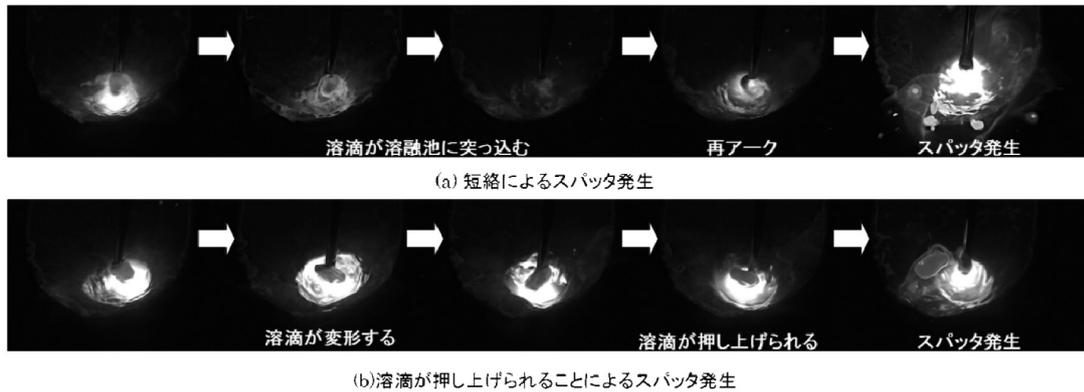


図26 通常の炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生現象

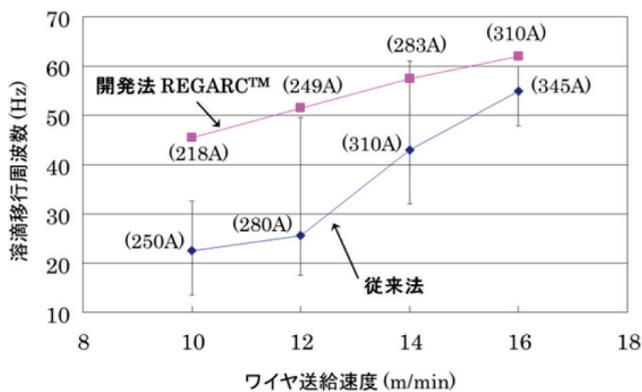


図27 溶滴移行周波数の比較

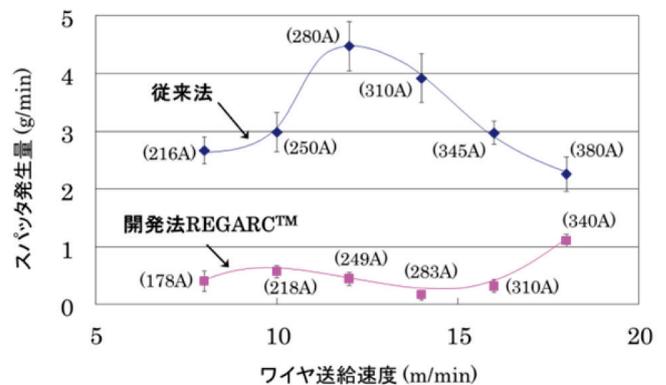


図28 スパッタ発生量の比較

す。REGARC™は、従来法と比較し、溶滴移行周波数が高く、かつばらつきが非常に小さいことがわかる。本結果は、過大な溶滴を抑制し、規則的に移行させていることを示す。図28に、CO₂ガスアーク溶接におけるスパッタ発生量を示す。REGARCは、ワイヤ送給速度12~16m/minの範囲で、スパッタの発生量を約10分の1まで低減している。

5 おわりに

炭素鋼用の溶接材料をソリッドワイヤ、フラックス入りワイヤ、サブマージ用の形態別に整理した。溶接部の冶金学的検討に加えて、溶接プロセスへの取組み、高能率化・高品質化を目指している開発の最前線をご理解頂けたと思う。ユーザーニーズは溶接ロボットシステムや専用機を用いた溶接の自動化である。ワイヤやフラックスの商品形態は維持しつつ自動溶接に適した溶接材料へ進化している。高張力鋼用溶接材料は、溶接部の強靱化に取組みが強められている。課題は溶接金属中の酸素と水素の制御であり、フラックス組成に加えて新たな溶接プロセスの開発も進んでいる。高合金鋼、

低合金鋼は構造物の耐食性、耐熱性、低温特性と機械的特性を満足すべく新たな合金組成への挑戦が続けられている。近い将来、エネルギー市場への投資が再開される時には新たな溶接材料が市場を席巻することを期待したい。高張力鋼、高合金鋼、低合金鋼の溶接においても高能率・高品質を目指した自動溶接へのニーズは強い。人に代わって溶接する手段としてロボットの開発は進んだが、電源制御と溶接材料を組合せることで人には出来ない人を超えた高品質な溶接が実現している。産業界全体でIoT、AIが進む中で溶接ロボットには更なる進化が期待できる。

参考文献

- 1) World Steel Association, (2016)
- 2) 新報ウエルディング Mart, (2017)
- 3) 日本溶接材料工業会, 統計委員会, (2016)
- 4) 片岡時彦, 中川郷司, 石井匠: JFE技報, (2007) 18, 41.
- 5) 角博幸, 片岡時彦, 木谷靖: JFE技報, (2014) 34, 44.
- 6) 角博幸: 溶接学会誌, 85 (2016) 2, 194.
- 7) 松村浩史, 松本剛郎, 中込忠男, 竹内直紀, 中山繁: 鉄構

- 技術, 30 (2017) 346, 59.
- 8) 中野利彦, 鈴木励一: 神戸製鋼技報, 58 (2008) 1, 57.
 - 9) 栗山良平, 鈴木励一: 神戸製鋼技報, 63 (2013) 1, 37.
 - 10) 古迫誠司, 宮崎康信, 濱谷秀樹, 秋庭義明: 溶接学会論文集, 33 (2015) 2, 133.
 - 11) 千葉晃司: 溶接技術, 63 (2015) 2, 76.
 - 12) 鈴木励一, 宮田実: 神戸製鋼技報, 66 (2017) 2, 63.
 - 13) 辻勝之: 溶接技術, 60 (2012), 112.
 - 14) 辻勝之: (株) 神戸製鋼所ホームページ, 溶接だより 技術がいで技術レポート, 52 (2012), http://www.boudayorigijutsugaido.com/gaido/catalog/techreport/pageview.html#page_num=450
 - 15) 辻勝之, 小川亮, 山崎圭, 袁倚旻: R & D 神戸製鋼技報, 63 (2013) 1, 48.
 - 16) 日本鉄鋼協会: ふえらむ, 17 (2012) 1, 4.
 - 17) 坂口修一, 山口忠政, 中野善文: 川崎製鉄技報, 26 (1994) 4, 163.
 - 18) 山口欣弥: 溶接学会誌, 81 (2012) 6, 531.
 - 19) 杉山大輔, 幸村正晴, 村西良昌, 堀口元宏, 島本正樹, 佐々木誉史: 溶接学会全国大会講演概要, 95 (2014), 94.
 - 20) 生島一樹, 柴原正和, 伊藤真介, 正岡孝治: 溶接構造シンポジウム2009講演論文集, (2009), 509.
 - 21) 今智史, 柴原正和, 河原充, 生島一樹, 幸村正晴, 杉山大輔, 山下泰生: 溶接構造シンポジウム2014講演論文集, (2014), 247.
 - 22) 川崎浩之, 村田義明: 日本鋼構造協会誌, 19 (2014), 34.
 - 23) 北川良彦, 川崎浩之: 神戸製鋼所技報, 63 (2013), 20.
 - 24) 高和真名, 名古秀徳, 岡崎喜臣: 溶接学会全国大会講演概要集, 99 (2016), 210.
 - 25) T.Suga, K.Ikemoto, M.Konishi and K.Hosoi: IIW Doc. XII-1492-97, (1997)
 - 26) 川邊直輝, 丸山徳治, 山崎圭, 鈴木励一: 溶接学会全国大会講演概要, 96 (2015), 172.
 - 27) 迎井直樹, 丸山徳治, 鈴木励一: 溶接学会全国大会講演概要, 98 (2016), 186.
 - 28) 渡邊博久: 溶接学会誌, 80 (2011), 2.
 - 29) API 582 Welding Guidelines For The Chemical, Oil And Gas Industries
 - 30) 日本溶接協会: 化学機械溶接研究委員会二相ステンレス鋼溶接小委員会 (略称: DSS小委員会) について, <http://www.jwes.or.jp/mt/kenkyu/cp/archives/06topics/>
 - 31) 行方飛史, 水本学, 井上裕滋, 及川雄介: 溶接学会全国大会講演概要, 93 (2013), 313.
 - 32) 渡邊博久, 丸山敏治, 松下行伸: 神戸製鋼技報, 54 (2004) 2, 47.
 - 33) 新日鐵住金ステンレス (株): 特開2017-13118, (2017)
 - 34) 福田雅文: スマートプロセス学会誌, 3 (2014) 2, 78.
 - 35) 齋藤英治, 松野成之, 田中恵三, 西本慎, 山本隆一, 今野晋也: 三菱重工技報, 52 (2015) 2, 36.
 - 36) 久保貴博, 宮下重和, 根本邦義, 吉岡洋明, 高橋武雄, 今井潔: 動力エネルギー技術の最前線講演論文集, シンポジウム, 16 (2011), 465.
 - 37) 夏目松吾, 後藤明信, 重松辰彦: 日本金属学会会報, 30, (1991) 5, 439.
 - 38) 塚本進: 溶接学会全国大会講演概要, 64 (1999), 224.
 - 39) G.Taniguchi: Welding in the World, 59 (2015) 6, 785.
 - 40) C.Chauvy: ASME PVP2009-78144, (2009)
 - 41) 伊藤慶典, 中西睦夫: 溶接学会誌, 40 (1971) 12, 1261.
 - 42) 中川武: 第146回溶接冶金研究委員会資料, WM-1611-96, (1996)
 - 43) 坂田幹宏: 第208回溶接冶金研究委員会資料, WM-2235-12, (2012)
 - 44) D.J.Kotecki: IIW, Document II-1941-15 (II-E-685a-15), (2015)
 - 45) 上山智之: 溶接学会誌, 78 (2009) 8, 693.
 - 46) 恵良哲生: 溶接学会誌, 82 (2010) 6, 562.
 - 47) 清原裕次: 溶接学会全国大会講演概要, 12 (1973), 294.
 - 48) 恵良哲生: 溶接学会誌, 84 (2015) 4, 234.

(2018年6月6日受付)