

フラックスコアードアーク溶接 (FCAW) の化学プラント設備への適用制限

住友化学工業(株) 生産技術センター

星加貴久
森久和

Application Limits of Flux Cored Arc Welding to Chemical Processing Plants

Sumitomo Chemical Co., Ltd.

Process & Production Technology Center
Takahisa HOSHIKA
Hisakazu MORI

High efficiency of Flux Cored Arc Welding (FCAW) extends its application to the every joint of the steel facilities and constructions due to economical benefit. Recently, some inconveniences such as low Charpy impact energy, cracking in bending test of FCAW joints were experienced and a distinguished creep ductility loss for Type 304H was reported. Metallurgical examination revealed that high density of oxide inclusion in weld metal of FCAW resulted in a relatively inferior mechanical properties compared with other welding process. Welding test results are reviewed and the characteristics with application limits depended on welding conditions of FCAW are discussed.

はじめに

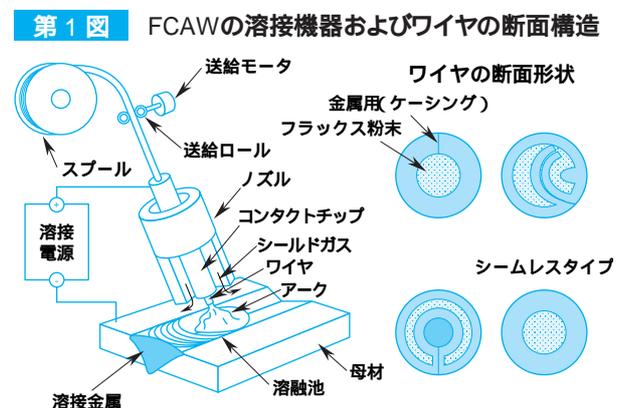
フラックス入りワイヤを使用するガスシールドアーク溶接法(以下FCAW; Flux Cored Arc Welding)は、従来から多用されてきた被覆アーク溶接(以下SMAW; Shielded Metal Arc Welding)に比較して、溶接施工に要する時間やコストを大幅に低減できるため、構造物や貯槽、圧力容器に適用が拡大されてきている。当社においてもFCAWを適用する機器が多くなっているが、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギーが他の溶接方法による継手と比較して低いこと、オーステナイト系ステンレス鋼の曲げ試験においても破断する事例があり化学プラントを構成する重要な機器に使用する溶接方法としては許容し難い問題点がいくつか顕在化している。また550 を超える温度で使用されている308系のFCAW継手の高温延性が非常に低いことが指摘されているが、スラグの剥離性を改善するためにフラックスに添加されている Bi_2O_3 に起因するBiが高温で粒界偏析して悪影響することが判明している^{1)~10)}。現在では、高温用途用にBiフリーのワイヤ¹¹⁾が開発・実用化されており、この問題は一応の解決をみている。

以上のような経緯から、低温あるいは高温で使用

される設備、あるいは動的な応力が作用する設備、等について、FCAW継手の適用規制を明確にするため、代表的なステンレス鋼と炭素鋼について機械的性質を基礎的に調査した。また炭素鋼については機械的性質に及ぼす溶接後熱処理の影響についても検討した。

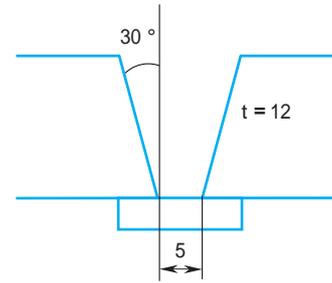
FCAWについて

FCAWの溶接機器ならびにワイヤの断面構造を第1図¹²⁾に示す。ワイヤがスプールから一定速度で供給さ



れる半自動溶接、あるいはトーチの運棒も自動化した全自動溶接も実用化されている。FCAW の利点は、溶接速度が速く高能率、また安価なCO₂をシールドガスとして利用できるため経済的であることのほかに、全姿勢での溶接施工ができることや、スラグ剥離性が良好な点が挙げられる。しかしその反面、溶接スピードが速いがために溶込み不良が発生しやすいことや、溶着金属中の高酸素に起因した清浄度の低下、低靱性などの問題点も報告されている¹⁾²⁾⁴⁾¹³⁾⁻¹⁷⁾。フラックスの成分系は2種に大別される。スラグ形成材のチタニア、シリケートやアーク安定剤のジルコニア等を含有したスラグ系では一般的に溶着金属表面が平滑でビード形状が良好である。他方、溶着金属の一部となる金属粉末をフラックスに含有させたメタル系ではスラグの発生量が少なく、溶着効率もスラグ系よりも高いので、連続多層溶接に適している。シールドガスには、100% CO₂が多用されるが、スパッタの発生が抑制できる80% Ar + 20% CO₂等も使用される。

第2図 試験片の開先形状



FCAW 溶接継手の評価試験

1. 供試材

オーステナイト系ステンレス鋼および炭素鋼の代表としてSUS304鋼およびSM400B鋼を選定し、板厚12mmの板材を使用して第2図に示す開先形状の溶接継手試験片を作成した。使用した母材および溶接材料のミルシートに記載されている化学成分と引張性質を第1表に示し、今回実施した各溶接条件を第2表にま

第1表 供試材の化学成分および引張り性質(ミルシート)

材料区分	JIS	板厚・径 mm	化学成分(mass%)								引張り性質			備考	
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	σ_B N/mm ²	$\sigma_{y,p}$ N/mm ²	%			
母材	SUS304	SUS304	12	0.05	0.52	0.92	0.033	0.003	8.1	18.11	647	288	61		
	SM400B	SM400B	12	0.10	0.23	0.96	0.011	0.005	-	-	455	371	27		
		SM400B	12	0.12	0.21	1.00	0.020	0.005	-	-	440	311	29	溶接後熱処理用	
溶接棒 ワイヤ	ステンレス鋼 SUS304	FCAW	YF308C	1.2	0.03	0.67	1.40	0.023	0.008	9.75	19.62	-	-	-	
		TIG	Y308	2.4	0.047	0.37	1.76	0.022	0.002	9.79	19.91	-	-	-	
		MIG	Y308	1.2	0.056	0.37	1.83	0.022	0.001	9.6	20.02	-	-	-	
		SMAW	D308-16	3,2,4	0.065	0.46	1.30	0.029	0.002	9.42	19.59	623	-	50	
	炭素鋼 SM400B	FCAW	YFW-C50DR	1.2	0.05	0.54	1.49	0.017	0.010	-	-	564	513	28	溶接後熱処理 共用
		TIG	YGT50	2,4,3,2	0.10	0.72	1.38	0.009	0.018	0.02	0.02	-	-	-	
		MAG	YGW11	1.2	0.03	0.72	1.58	0.01	0.014	-	-	-	-	-	
		SMAW	D5016	4,5	0.08	0.63	0.93	0.01	0.004	0.02	0.04	581	520	32	
	SMAW	D5016	4,5	0.08	0.68	0.95	0.011	0.004	0.01	0.03	569	497	32	溶接後熱処理用	

第2表 各種溶接試験片の溶接条件

母材	溶接方法	シールドガス	溶接材料	層数	パス数	入熱(KJ / cm)	
						初層	2層目以降
SUS304	FCAW	CO ₂	YF308C	5	5	12.8	17.0 ~ 25.4
	TIG	Ar	Y308	9	13	11.2	13.4 ~ 19.8
	MIG	Ar + 2%O ₂	Y308LSi	3	4	13.8	15.6 ~ 19.2
	SMAW	-	D308-16	5	5	14.6	16.7 ~ 31.2
SM400B	FCAW-1	CO ₂	YFW-C50DR	4	6	19	11.8 ~ 30.4
	TIG	Ar	YGT50	9	15	12.3	11.8 ~ 31.0
	MAG	CO ₂	YGW11	4	6	15.5	11.0 ~ 25.3
	SMAW-1	-	D5016	4	6	11.8	26.7 ~ 38.8
SM400B (溶接後熱処理用)	FCAW-2	CO ₂	YFW-C50DR	4	6	14.0	10.4 ~ 15.3
	SMAW-2	-	D5016	4	6	30.7	17.2 ~ 32.5

第3表 評価試験項目

評価項目	母材の種類		試験片の採取方法, 試験方法
	ステンレス鋼	炭素鋼	
	SUS304	SM400B	
酸素分析			溶着金属よりブロック採取後ガス分析
介在物量測定			溶着金属断面中央を500倍にて画像処理
機械試験	引張り試験		継手引張り; JIS Z3121 1号試験片
	曲げ試験		継手曲げ; JIS Z3122試験片
	衝撃試験		溶着金属部の衝撃試験; JIS Z3128, JIS Z2202 4号試験片 板厚方向にノッチ(溶接金属中央)
溶接後熱処理 前後の機械試験	引張り試験	-	継手引張り; JIS Z3121 1号試験片 全溶着金属引張り; JIS Z3111 A2号試験片
	衝撃試験	-	継手の衝撃試験; JIS Z3128, JIS Z2202 板厚方向にノッチ(溶接金属中央)

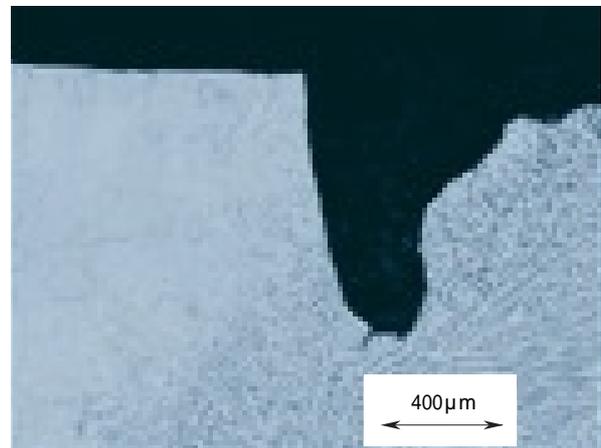
とめて示す。FCAW 継手との比較を実施するために、化学プラントで多くの溶接施工実績のあるTIG(Tungsten Inert Gas Welding)およびSMAWによる溶接試験片を作成した。またSUS304鋼については、MIG(Metal Inert Gas Welding)炭素鋼については、MIGがJISに規定されていないため、最近使用実績の多いソリッドワイヤを使用したCO₂ガスシールドのMAG(Metal Active Gas)溶接を採用した。SUS304鋼のFCAW溶接条件は、代表的な1条件について実施したが、SM400B鋼については入熱量の影響を調査するため、高入熱(30KJ/cm)および低入熱(15KJ/cm)の2条件を準備した。さらにSM400B鋼について、溶接後熱処理(以下PWHT)の影響を調査するために、低入熱条件のFCAW継手を対象にPWHT前後の試験材を準備した。PWHT条件の温度条件については、JISB8270に基づき、加熱保持温度を630、保持時間を2時間、加熱・冷却速度は60~78 /hrとした。またSMAW継手についても同様にPWHT前後の試験材を準備した。

2. 実験方法

今回実施した評価項目と試験方法を第3表にまとめて示す。溶着金属中の酸素量は、溶着金属の中央部から5mm角の試験片を切り出した試験片を不活性ガス融解法で分析した。また溶着金属の中央部から光学顕微鏡観察試料を採取し、単位面積当りの球状介在物個数と、その面積率を画像解析装置(Mitani Corp. Salt)を使用して測定した。

継手部の機械的性質を調査するために、引張り試験、曲げ試験、シャルピー衝撃試験を実施した。引張り試験はJIS Z3121に規定されている1号試験片、曲げ試験はJIS Z3122に規定されている試験片を使用し、余盛りを母材と面一になるまで研削した。ここでSUS304鋼のFCAWおよびMIGの試験片には、第3

第3図 溶込み不良部の断面ミクロ組織 (SUS304鋼FCAW溶接試験片)



図に示す様に約1mm深さの溶込み不良が溝状に存在したため、溶込み不良部を残した試験片と完全に研削除去した試験片について比較調査した。SM400B鋼については、いずれの溶接継手にも溶込み不良欠陥は認められなかった。シャルピー衝撃試験片はJIS Z2202に規定されている4号試験片を使用し、ノッチを溶着金属の中央位置に板厚方向に加工した。

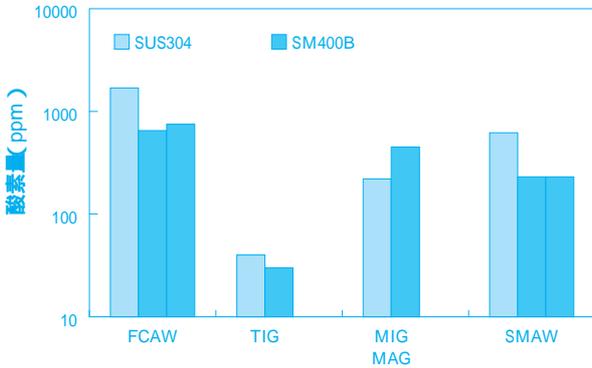
またPWHTの影響を調査するために、FCAWおよびSMAW溶接継手試験片についてPWHT前後の引張り性質をJIS Z3111に規定されているA2号試験片を溶着金属部から採取し調査した。またPWHT前後のシャルピー衝撃性質を調査するため、溶着金属の中央位置に板厚方向に加工したノッチを有するJIS Z2202に規定されている4号試験片を使用した。

3. 実験結果

(1) 溶着金属の酸素量

各溶接継手の溶着金属中の酸素量を第4図に示す。SUS304鋼のFCAW溶着金属中の酸素量は1690ppm

第4図 溶着金属に含まれる酸素量の測定結果



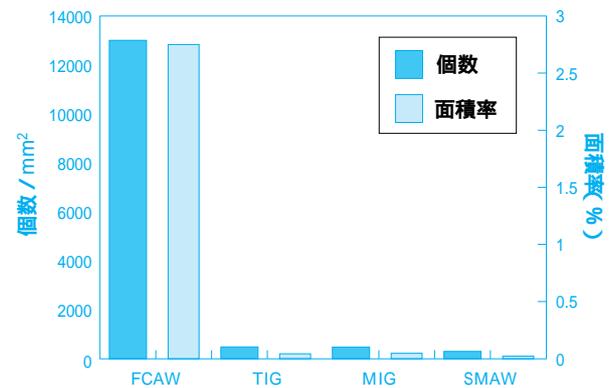
を示し、他の溶接継手(TIG ; 40ppm , MIG ; 220ppm , SMAW ; 620ppm)の溶着金属中の酸素量に比較して極めて高い傾向を示す。一方、SM400B 鋼については、FCAW の酸素量は700ppm 前後であり、SUS304 鋼の溶着金属の酸素量に比較すると低い値であったが、TIG の30ppm、SMAW の230ppm、MAG の450ppm と比較すると最も高い。SUS304 鋼およびSM400B 鋼ともに、FCAW 溶着金属が高酸素を含有することが確認された。

(2) 溶着金属の介在物量

各溶接継手の溶着金属の断面を光学顕微鏡で観察した結果を第5図に示す。SUS304 鋼のFCAW 溶着金属には直径が1 ~ 50 μ mの球状介在物が多数認められるが、TIG あるいはMIG の溶着金属には1 ~ 3 μ m、SMAW の溶着金属には1 ~ 5 μ mの球状介在物が少量認められる。またSM400B 鋼のFCAW 溶着金属には

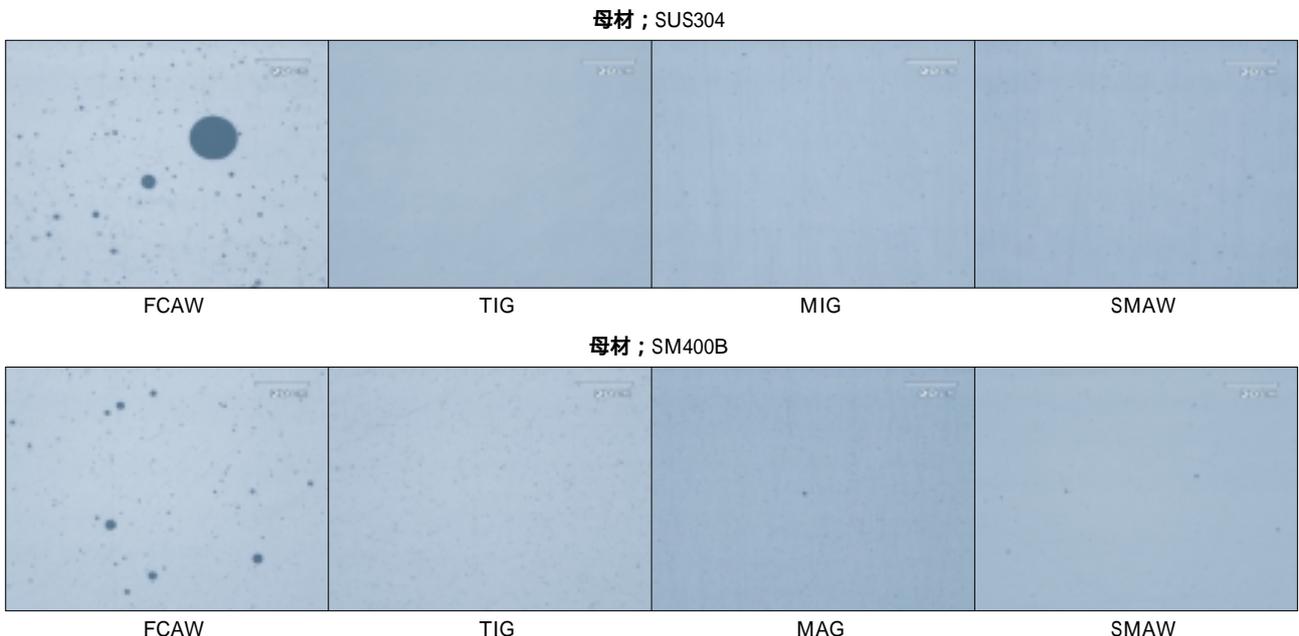
SUS304 鋼のそれと比較して小径であるが、1 ~ 20 μ mの球状介在物が多数認められ、SM400B 鋼のTIG あるいはMAG では1 ~ 5 μ m、SMAW では1 ~ 10 μ mの球状介在物に比較すると大型である。第6図にSUS304 鋼について、各溶接継手の溶着金属に認められる球状介在物の単位面積あたりの個数および面積率を測定した結果を示すが、FCAW 溶着金属には13,000 個 / mm²、面積率では2.7 %の球状介在物が存在しており、他の溶接方法と比較して極端に多い。

第6図 SUS304鋼溶着金属の球状介在物の個数および面積率

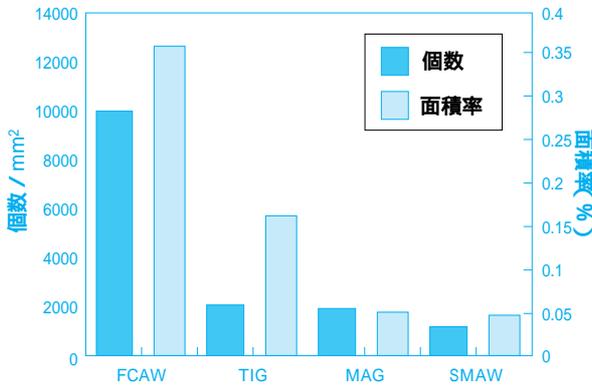


一方、SM400B 鋼のFCAW 溶着金属に認められる球状介在物数、面積率は第7図に示すように10,000 個 / mm²、0.36%であり、他の溶接方法と比較すると、SUS304 鋼と同様にFCAW 溶着金属の介在物量が最も多いが、SUS304 鋼のFCAW 溶着金属に認め

第5図 各溶接試験片溶着金属の断面拡大写真



第7図 SM400B鋼溶着金属の球状介在物の個数および面積率



られる球状介在物と比較すると直径が小さい傾向が認められる。

(3) 機械試験

引張り試験

第4表にSUS304鋼、SM400B鋼の引張り試験結果を示す。SUS304鋼のFCAW継手の引張り強度は564N/mm²であり、他の溶接方法の継手強度と比較して10%程度低い。なおFCAW継手試験片については、前述した溶込み不良部を起点として溶着金属部を伝播し破断した。しかし、FCAW継手と同様の溶込み不良が残存するMIG継手の引張り試験では、溶込

第4表 溶接継手の引張り試験の結果

鋼種	溶接方法	^B N/mm ²	* %	破断位置	備考
SUS304	FCAW	564	28	溶着金属	溶込み不良あり(深さ約1mm)
	TIG	600	61	溶着金属	溶込み不良なし
	MIG	638	58	溶着金属	溶込み不良あり(深さ約1mm)
	SMAW	625	60	溶着金属	溶込み不良なし
SB400B	FCAW	495	25	母材	溶込み不良なし
	TIG	474	22	母材	溶込み不良なし
	MAG	484	24	母材	溶込み不良なし
	SMAW	483	26	母材	溶込み不良なし

SUS304 ^B 規格値；Min.520N/mm²

*参考値 GL = 溶着金属最大幅 + 溶着金属最大幅 × 0.2

み不良部からのき裂の発生は認められず、他の溶接継手と同様に溶着金属の中央部で破断した。一方、SM400B鋼の場合には、いずれの試験片も溶着金属部に顕著な変形が認められず母材部で破断が発生した。各継手の引張り試験結果は、SUS304鋼、SM400B鋼ともにJIS Z3040に規定されている溶接施工法確認試験の要求を満足した。

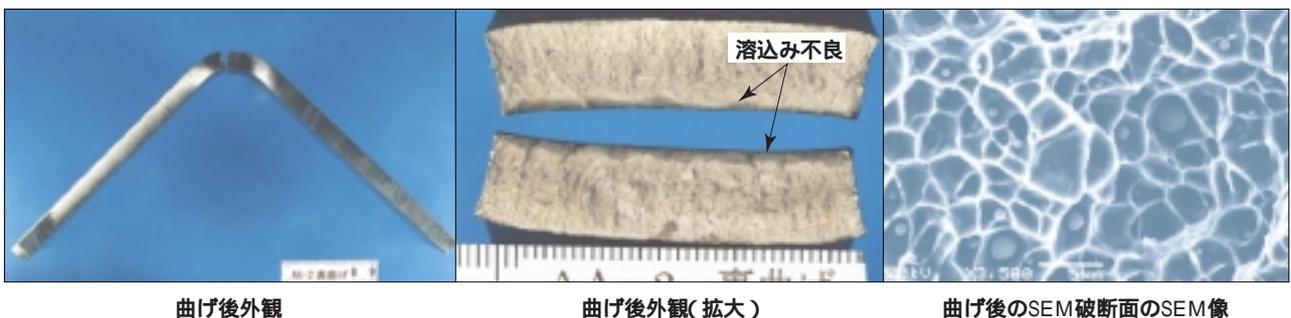
曲げ試験

SUS304鋼について継手の曲げ試験結果を第5表に示す。FCAW継手の溶込み不良を残した試験片については、裏曲げ試験時の曲げ角度が約30°の時に鈍い音が発生し、約90°に達した時に試験片が完全に破断した。破断状況は第8図に示すように、溶込み不良を起点とし、き裂が溶着金属部を伝播した。その破面を走査型電子顕微鏡(SEM)を使用して観察した結果、全面にディンプルが認められた。一方、同様の溶込み不良が残存した試験片を使用したMIG継手の曲げ試験では、溶込み不良を起点としたき裂の発生も認められず良好である。次に、溶込み不良などの表面欠陥による応力集中の影響を調査するため、FCAW継手の溶込み不良部を完全に削除した試験片を使用した曲げ試験では、割れの発生は認められなかった。一方、MIG継手については溶込み不良を残し、かつ外面の余盛も残した応力集中の非常に厳しい条件でも割れは発生しなかった。このことからFCAW溶接継手はMIG溶接継手に比較し、表面に存在する溶接欠陥の影響を受けやすいと判断される。

第5表 SUS304鋼溶接継手の曲げ試験結果

溶接方法	表曲げ	裏曲げ	備考
FCAW	割れなし	割れ発生	溶込み不良あり(深さ約1mm)
	-	割れなし	表面欠陥をフライス盤で完全除去
TIG	割れなし	割れなし	溶込み不良なし
MIG	割れなし	割れなし	溶込み不良あり(深さ約1mm)
	-	割れなし	溶込み不良あり(深さ約1mm)+余盛
SMAW	割れなし	割れなし	溶込み不良なし

第8図 SUS304鋼FCAW溶接継手の裏曲げ試験後の状況



曲げ後外観

曲げ後外観(拡大)

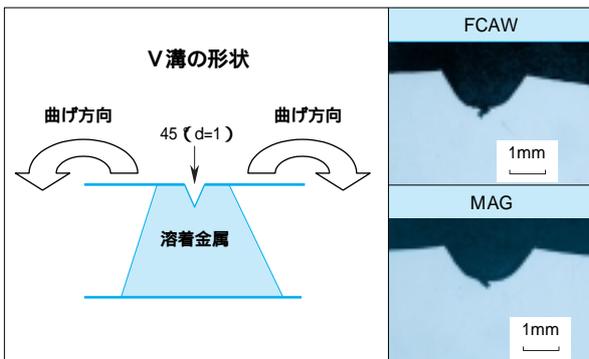
曲げ後のSEM破断面のSEM像

SM400B 鋼について継手の曲げ試験の結果を第 6 表に示すが、FCAW 継手においても他の溶接継手と同様に割れは発生しなかった。次に、表面欠陥が曲げ試験に与える影響を調査するために、第 9 図に示すように平滑に仕上げた試験片の裏面ビードの中央に、先端 R が 0.25mm を有する深さ 1mm の V ノッチ溝を加工した試験片を作成した。曲げ試験結果を第 6 表に併記するが、破断に至った試験片は認められず、またノッチ底から発生したき裂深さも、SMAW が 0.1mm、FCAW および MAG が 0.2mm、TIG では 0.8mm 程度の微細なき裂が認められたが、溶接法の影響は顕著に認められない。

第 6 表 SM400B 鋼溶接継手の曲げ試験結果

溶接方法	表面欠陥なし		表面欠陥 (D=1mm V溝)
	表曲げ	裏曲げ	裏曲げ
FCAW	割れなし	割れなし	割れ発生 (深さ ; 0.2mm)
TIG	割れなし	割れなし	割れ発生 (深さ ; 0.8mm)
MAG	割れなし	割れなし	割れ発生 (深さ ; 0.2mm)
SMAW	割れなし	割れなし	割れ発生 (深さ ; 0.1mm)

第 9 図 V 溝入り曲げ試験片および試験後の断面状況 (SM400B)

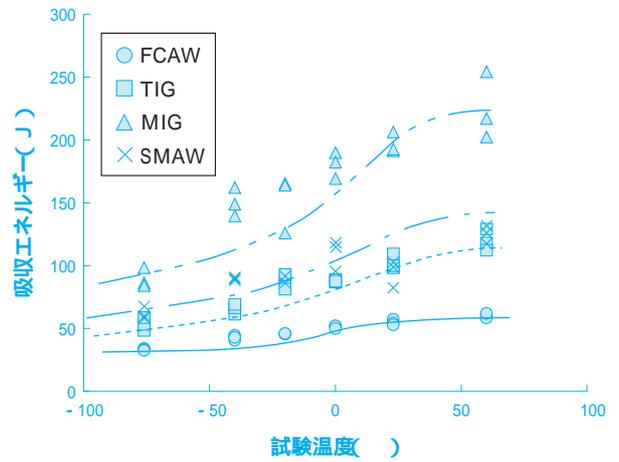


衝撃試験 (シャルピー衝撃試験)

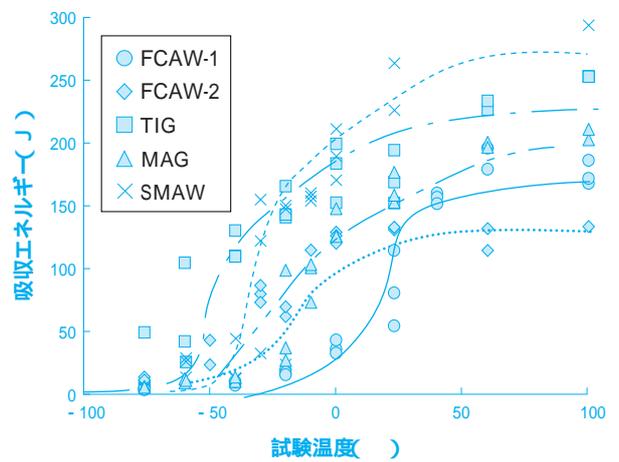
SUS304 鋼の各溶着金属部のシャルピー衝撃試験結果を第 10 図に示す。上部棚エネルギーは、MIG が約 220J、TIG および SMAW では約 100J を示したのに対し、FCAW では約 60J であった。また、下部棚エネルギーについては、MIG が約 80J、TIG および SMAW では約 60J を示したのに対して、FCAW では約 30J である。FCAW 溶着金属のシャルピー吸収エネルギーが極めて低いことが判明した。

SM400B 鋼の各溶着金属部のシャルピー衝撃試験結果を第 11 図に示す。上部棚エネルギーは、SMAW が約 270J、TIG が約 240J、および MAG では 200J を示しているのに対し、FCAW では高入熱材 (FCAW-1) が約 160J、低入熱材 (FCAW-2) は約 130J である。

第 10 図 SUS304 鋼の溶着金属シャルピー衝撃試験結果



第 11 図 SM400B 鋼の溶着金属のシャルピー衝撃試験結果



SUS304 鋼と同様に FCAW のシャルピー吸収エネルギーが低い。また、0 における TIG、MAG、SMAW の吸収エネルギーは全て 120J 以上を示したのに対し、FCAW 溶着金属では 40J 強のエネルギーしか有しない場合が認められる。つまり、各溶接継手のエネルギー遷移温度 v_{TE} については、TIG では - 42 、SMAW では - 24 および MAG では - 3 であるが、FCAW の低入熱材 (FCAW-2) では - 37 に対し高入熱材 (FCAW-1) では 23 を示し、FCAW の場合に v_{TE} が室温になる場合が確認された。

(4) 溶接後熱処理の影響

引張り試験

FCAW および SMAW の同一試験材について、溶着金属部の引張り試験を PWHT 前後について比較調査した結果を第 7 表に示す。FCAW、SMAW とともに PWHT の実施により、若干の強度の低下および伸びの増加が認められるが、溶接方法による顕著な差は認められない。

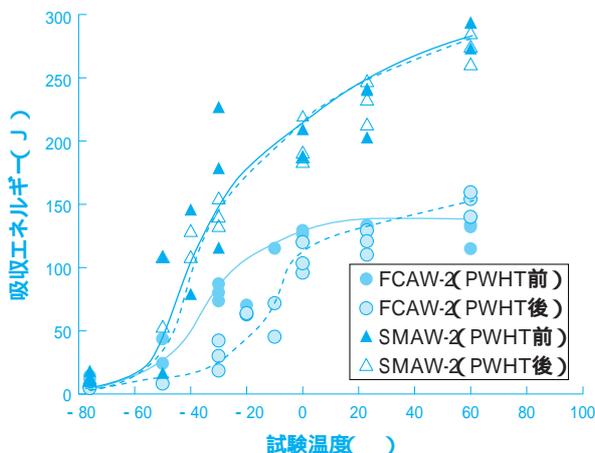
第7表 SM400B鋼溶接部のPWHT前後における引張り試験の結果

試験片の形状	溶接方法	溶接後熟処理	σ_B N/mm ²	%	破断位置
全溶着金属 引張り	FCAW-2	未実施	580	31.7	GL内
		630 × 2hr	565	33.3	GL内
	SMAW-2	未実施	568	33.3	GL内
		630 × 2hr	527	35.4	GL内

衝撃試験(シャルピー衝撃試験)

第12図にPWHT前後に実施したシャルピー衝撃試験の結果を示す。FCAWについては低入熱材を使用したため、溶接のままの状態での vTE が -37 であるのに対し、PWHT後では -10 まで vTE の上昇が認められた。また、上部棚エネルギーについてはPWHTによる変化は顕著に認められない。一方、SMAWについては、PWHT前後の衝撃特性に差異は認められない。

第12図 SM400B鋼溶着金属のPWHTによるシャルピー吸収エネルギーの変化



考察

1. FCAW 溶着金属の酸素量, 介在物量

FCAWのシールドガスにはCO₂あるいはAr + CO₂の混合ガスが用いられるが、CO₂はアーク熱でCOとOに解離し、解離したOはフラックス・鋼中に含まれるFeよりも酸化ポテンシャルの高い脱酸成分(Si, Mn, 等)と化合してSiO₂やMnO等の酸化物が多く生成する¹⁸⁾。シールドガスとして100% CO₂を使用した場合に、ステンレス鋼溶着金属の酸素量は600 ~ 1450ppmという高い値が報告されている¹⁾²⁾⁴⁾⁶⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。また同様に、炭素鋼溶着金属の酸素量は500 ~ 600ppmという値が示されている¹³⁾¹⁴⁾。今回の分析結果もFCAW 溶着金属の酸素量は、SUS304鋼では

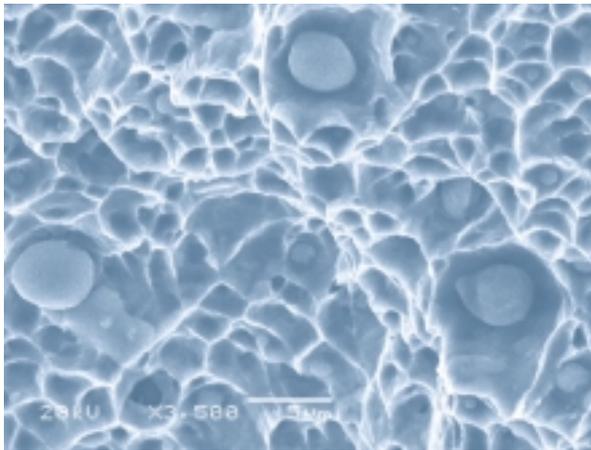
1690ppm、SM400B鋼については700ppmを示し、他の溶接方法による溶着金属中の酸素量に比較して高い傾向を示した。

ここで、溶着金属の介在物の個数はSUS304鋼FCAWが13,000個/mm²、SM400B鋼FCAWが10,000個/mm²と同程度であったが、面積率を比較すると、SUS304鋼FCAWが2.7%、SM400B鋼FCAWが0.36%であり、SUS304鋼FCAWのほうが極端に高い面積率を示した。神谷ら¹⁷⁾のSUS304鋼MIG溶接材の検討結果では、溶着金属の酸素濃度が500ppmに達するまでは、介在物の個数、径ともに増加するが、それ以上の酸素量では個数は変化せず、径が大きくなることを報告している。今回調査したSUS304鋼FCAW溶着金属の酸素量は1690ppmであるため、上記の介在物の個数が変化せず、径が大きくなる限界濃度を超過しているため、介在物の径が大きく成長したと考えられる。一方、SM400B鋼FCAW溶着金属については、介在物の個数が変化せず、径が大きくなる限界濃度まで達していないため、介在物の個数はSUS304鋼の場合と同様に多いが、顕著な径の粗大化までに至っていないと推定される。

2. SUS304鋼FCAW 溶着金属部の低靱性・低延性

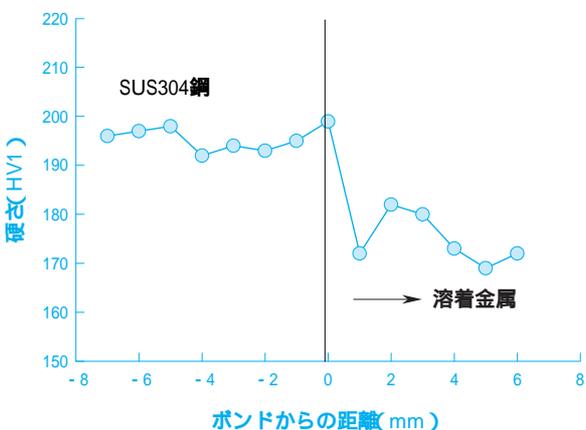
各溶接方法による溶着金属部のシャルピー衝撃試験の結果、FCAW溶着金属が最も低い吸収エネルギーを示した。神谷ら¹⁷⁾のSUS304鋼MIG溶接材を使用した実験では、溶着金属の靱性に及ぼす酸化物の体積率(酸素含有量)、フェライト量、デンドライト間隔、等について検討されたが、溶着金属のシャルピー吸収エネルギー、あるいは延性き裂発生時のJ積分値; Jin値に及ぼす因子として酸化物の体積率の影響が最も大きいことが報告された。Jin値は、き裂の発生特性として、またシャルピー吸収エネルギーはき裂伝播のエネルギーも含む破壊靱性値と解釈され、また両者のひずみ速度も異なるが、いずれも酸化物の体積率の増加に伴って減少する¹⁷⁾。今回得られたFCAW溶着金属の0におけるシャルピー衝撃試験後の破断面のSEM観察像を第13図に示す。球状酸化物からキャビティーが発生し、それらが合体してディンプルを形成している。また曲げ試験で発生した破断面にも、第8図に示したように同様のディンプルが観察され、シャルピー衝撃試験と同様の破壊形態である。TIG、MIGあるいはSMAW溶着金属に比較して、FCAW溶着金属では介在物が大きくまた多量に存在するため、隣接する介在物間の距離も短いと考えられる。従って、塑性変形を受けた場合に介在物とマトリックスの界面を起点としたキャビティーが容易に発生し、き裂がマトリックスを伝播するエネルギーも小さいと考えられる。

第 13 図 FCAW 溶着金属部のシャルピー衝撃試験後の破面観察 (試験温度; 0)



次に、溝状の溶込み不良が存在する試験片を使用した裏曲げ試験の結果では、SUS304 鋼の FCAW 継手試験片に破断が発生した。SUS304 鋼の FCAW 継手部の硬さ分布を測定した結果を第 14 図に示すが、溶着金属の硬さは約 170HV を示し、母材の硬さ約 195HV に比較して低い。丸山ら¹⁹⁾によると局部的に曲げ試験片に軟質部が存在する場合には、軟質部のみに曲げ変形歪が集中するため、 $R = 2t$ の曲げ半径で曲げ試験を実施すると、30% を超える歪みが発生すると言われているため、溶着金属の硬さが母材部に比較して低い場合の曲げ試験では厳しい試験条件となる。さらに、今回得られた FCAW 継手の引張り強度は $564\text{N}/\text{mm}^2$ であり、他の溶接方法で作成された試験片の強度よりも 10% 程度低い。この値は、308 系 FCAW 溶着金属の引張り強度の実績として報告¹⁹⁾されている $560 \sim 604\text{N}/\text{mm}^2$ (Ave. $577\text{N}/\text{mm}^2$ $N = 27$) あるいは溶接材料のカタログ値²⁰⁾に記載されている FCAW 溶着金属の引張り強度 ($570\text{N}/\text{mm}^2$) に合致している。従って FCAW の継手強度は、同じ 308 系他溶接方法のものと比較して最も低い傾向を示

第 14 図 FCAW 溶接継手の断面硬さ測定結果

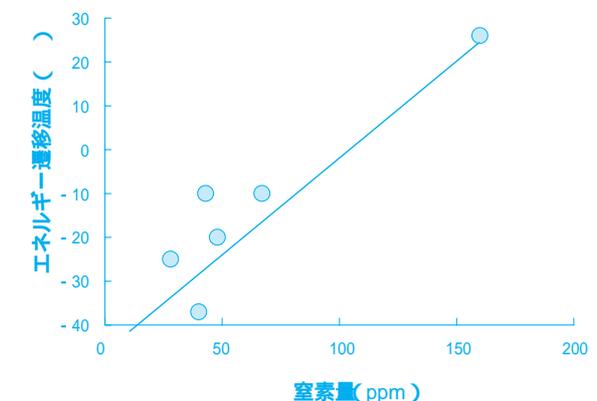


し、上述した曲げ試験片の軟質部への歪集中も大きいと考えられる。しかし、溶込み不良を完全に除去した試験片を使用した曲げ試験では割れの発生が認められないことから FCAW 継手の場合には切欠き感受性が強いと考えられる。従って、構造的応力集中部、あるいは形状不連続部 (例えば溶込み不良、アンダーカット、オーバーラップ、等の溶接欠陥など) を形成しないように設計・施工の管理が必要である。

3. 炭素鋼 FCAW 溶着金属部の低靱性

SM400B 鋼溶着金属部のシャルピー衝撃試験結果、SUS304 鋼と同様に FCAW の衝撃特性は他の溶接方法の衝撃特性に比較して劣っていることが確認された。SM400B 鋼についても、低靱性の原因として球状酸化物の量が主に影響していると考えられるが、佐藤ら²¹⁾の、炭素鋼ソリッドワイヤ MAG 溶接についての検討では、金属組織的な影響として、酸素量が多い場合には微細な酸化物がオーステナイト粒径の成長を抑制する (ピン留め効果) が指摘されている。酸素量が多い溶着金属では、旧オーステナイト粒径が小さく、フェライトの核生成サイトである粒界面積が増加するため、粒界のフェライトが多くかつ粗大になることが報告されている。また、谷垣²²⁾、あるいは立川ら²³⁾は、屋外での風等の影響によって、シールド不足が生じた場合には、溶着金属中の窒素が増加し、吸収エネルギーが低下することが報告されている。今回の実験で得られた FCAW 溶着金属の窒素量が 160ppm の場合には、 v_{TE} が 23 を示し、窒素量が 40ppm の場合には、 v_{TE} が -37 を示した。このデータと過去に材料設備技術グループで経験した炭素鋼 FCAW 溶着金属の v_{TE} を溶着金属中の窒素量で整理した結果を第 15 図に示すが、溶着金属中の窒素量が高くなると v_{TE} が高くなる傾向がある。炭素鋼の FCAW 溶着金属のシャルピー衝撃特性については、溶着金属に含まれる酸素量以外に金属組織、微量成分、等の副

第 15 図 炭素鋼 FCAW 溶着金属のエネルギー遷移温度に対する窒素量の影響



次的要因の影響も考慮する必要があると考えられる。

4. 溶接後熱処理による炭素鋼 FCAW 溶着金属部の 靱性低下

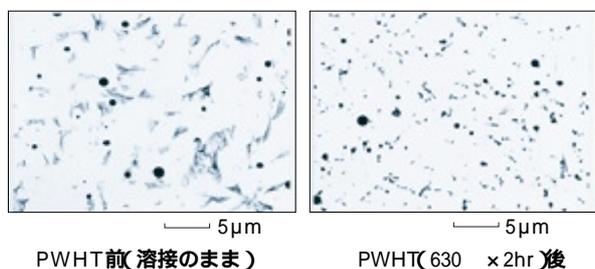
JIS B8270 には、炭素鋼(P1 グレード)の肉厚が 38.1mm 以上の場合には、PWHT の実施が規定されているため、機械的性質におよぼす PWHT(630 × 2 時間)の影響を FCAW および SMAW 継手について調査した。SMAW については、PWHT 前後のシャルピー衝撃特性に変化は認められないが、FCAW については、PWHT 後に vTE が約 30 上昇した。PWHT 前後の組織変化を調査するために、電子顕微鏡を使用して抽出レプリカ法により炭化物、等の析出形態を観察した結果を第 16 図に示す。PWHT を実施していない場合には粒内に針状 Fe_3C が認められるが、PWHT 後には粒内および粒界に粒状 Fe_3C が認められた。また、いずれも粒内には球状の Mn - Ti 系の酸化物が認められる。次に、FCAW 溶着金属の化学成分を SMAW と比較して分析した結果を第 8 表に示すが、FCAW 溶着金属には、Mn, P, S, Ti, B が多く含有されている。今回使用した FCAW の溶接ワイヤのフラックスにはチタニアが添加されているため、FCAW 溶着金属には Ti が 610ppm 含有されている。一方 SMAW の場合には、フラックスが炭酸カルシウム主体のため、溶着金属の Ti は 220ppm と低い値である。また FCAW 溶着金属には B が多く含まれ(29ppm)、SMAW には殆ど含まれない(1ppm 以下)ことが確認された。Ti の影響については、TiC が固溶する 1200 程度の高温焼入れ材では、焼き戻し脆化が発生するという報告がある²⁴⁾。また B については、 Fe_2B 、等などの析出による脆化が発生すると言われている²⁵⁾。SM400B 鋼の FCAW 溶着金属のシャルピー衝撃特性

が PWHT の影響により劣化する現象については、組織変化と微量成分が影響していると思われる。

FCAW 継手の溶接欠陥防止方法と適用規制

今回調査した結果を第 9 表にまとめて示すが、ステンレス鋼、炭素鋼ともに FCAW 継手の溶着金属は高酸素のため球状酸化物が多く、シャルピー吸収エネルギーが低いことや、引張試験や曲げ試験の際に表面の溝状欠陥の影響を大きく受けるという問題が確認された。すなわち、FCAW 継手の機械的強度、靱性は、重要な機器を構成する継手に要求される性能の下限近傍に位置する場合があります。溶込み不良等の溶接欠陥が存在する場合には静的および動的な負荷が作用すると破壊に対する抵抗性が、その他の溶接方法と比較し低くなる傾向が認められる。従って、第 10 表²⁶⁾に示す表面欠陥の発生を防止する対策の徹底が必要となる。裏当て金を使用する場合には、十分な溶込みを確保するために後退法を適用すること。さらに運棒方向と反対方向に溶融池が押し上げられるので、ワイヤを溶融池の先端に持ってくる必要がある。また完全溶込みを確保するため、開先形状については、ルート面をとらず、自由なウイーピングが可能となるようにルートギャップは広め(5mm 以上)にとることが必要である。他方、裏当て金を使用しない場合には、裏はつり(両面溶接)を実施すること。この場合も、ルート面高さが高いと完全溶込みが得られにくいことから、ルート面は出来るだけ低いほうが良い。その他にも、溶着金属の酸素量を増加させる因子であるシールドガス組成、アーク電圧、開先の清浄度、等についても厳密な溶接施工条件の管理が必要である^{15) 17)}。

第 16 図 SM400B 鋼 FCAW 溶着金属の PWHT 前後の組織観察



第 9 表 試験結果の要約

	ステンレス鋼(SUS304)	炭素鋼(SM400B)
成分	高酸素	高酸素
組織	介在物(球状酸化物)が多い	介在物(球状酸化物)が多い
引張性質	低強度 低延性(切欠きが存在する場合)	異常なし
曲げ性質	切欠きの影響を受け低下	異常なし
衝撃性質	吸収エネルギーが低い	吸収エネルギーが低い エネルギー遷移温度が高い
溶接後熱処理(PWHT)	(N/A)	PWHTによりエネルギー遷移温度が上昇

第 8 表 SM400B 鋼溶着金属部の化学成分分析結果

区分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	B	Zr	Sn	O	N
FCAW-2	0.049	0.51	1.39	0.019	0.007	0.01	0.03	0.04	0.01	0.02	0.061	0.010	0.0029	0.003	0.009	0.075	0.004
SMAW-2	0.087	0.51	0.85	0.013	0.003	0.01	0.02	0.03	<0.01	0.01	0.022	0.002	<0.0001	0.002	0.007	0.023	0.009

第 10 表 表面欠陥の発生防止対策²⁶⁾

区分	内容
裏当て金を使用する場合	1) 前進法では溶込みが浅いので、後退法で施工する。
	2) ワイヤを溶融池の先端に持ってくる。
	3) ルート面を取らない。
	4) ルート幅内でウイーピングが可能となるように、ルートギャップは5mm以上とする。
裏当て金を使用しない場合	1) 裏はつりを実施する(両側溶接とする)。はつり面には欠陥がないことを確認する。
	2) ルート面はできるだけ低くする。

第 11 表 FCAWの適用が可能な条件

項目	内容
材質	炭素鋼(JIS規格あるいはASME QW422に規定されるP-No.1相当鋼)およびSUS304, 304L, 316, 316L鋼(UNS No.S30400, S30403, S31600, S31603)とし、低合金鋼および高温/耐食用途の特殊ステンレス鋼は除く。
設計温度	0 以上。 (但し、BiフリーのFCAWワイヤが使用できない場合には500 以下とする)
肉厚	炭素鋼の場合は38mm以下。ステンレス鋼の場合は19mm以下。
溶接後熱処理	応力除去焼鈍、溶体化熱処理を実施しない。
施工	屋外での溶接施工を実施しない。

今回調査して確認された結果と日本溶接協会 化学機械溶接研究委員会 FCAW 小委員会が報告している適用指針項目¹⁾とから、第 11 表に示す FCAW 継手を適用可能とする暫定基準を制定した。

FCAW が適用できる材質については、炭素鋼および通常ステンレス鋼(SUS304, 304L, 316, 316L)とした。低合金鋼や耐食用途の特殊ステンレス鋼については、FCAW 継手の諸性能が明らかになっていないため、適用を規制した。また FCAW 継手の耐食性については、JIS G0580 で規定されている『ステンレス鋼の電化学的再活性化率測定』において FCAW 溶着金属部の耐食性が TIG 溶着金属部に比べて劣る例¹⁾が報告されている。設計温度については、高入熱溶接条件の炭素鋼 FCAW 溶着金属の一部にシャルピー衝撃特性の v_{TE} が室温であるものが認められたが、溶接施工管理を十分実施することにより 0 以上を適用可とした。適用肉厚については、炭素鋼が溶接後の応力除去焼鈍が規定されない 38mm 以下、ステンレス鋼については当社の実績から 19mm 以下とした。また溶接後の応力除去焼鈍や固溶化熱処理などの熱処理については、今回の炭素鋼の試験によっても確認されたように靱性低下を示す例が認められたため、溶接後熱処理が必要な場合には FCAW を適用しないことにした。また、屋外では十分なガスシールドが確保できない可能性があると考えられるため、屋内溶接のみを適用可とした。

おわりに

最近、化学プラントの溶接施工においても使用例

が増加してきている FCAW について代表的なステンレス鋼と炭素鋼の継手性能を調査し、FCAW の適用規制を検討した。今後は、低合金鋼および特殊ステンレス鋼まで適用材質を拡大し、疲労特性を含めた機械的性質、各種環境における耐食性の調査を進め、FCAW 継手の適用可能範囲を見極める必要がある。

引用文献

- 1) 日本溶接協会 化学機械溶接研究委員会 FCAW 小委員会：FCAW を用いたステンレス鋼溶接部の高温損傷解析と適用指針(2000)
- 2) 日本溶接協会 化学機械溶接研究委員会：化学機械の溶接に関するシンポジウム 1 - 3(2000)
- 3) 相原 常男：ティグ・マグ溶接材料の現状について、配管と装置, 39-3, 13 - 19(1999)
- 4) 小川 恒司：ステンレス鋼フラックス入りワイヤ溶接金属の高温性能の調査, 溶接技術, 2, 129 - 134 (2002)
- 5) 結城 正弘：308 系 FCAW 溶接金属部の高温特性, 溶接学会誌, 66-3, 5(1997)
- 6) 西本 和俊, 森 裕章, 岡崎 司, 松永 泰三：恒温保持過程における溶接金属の組織変化, 溶接学会論文集, 18-3, 412 - 421(2000)
- 7) 西本 和俊, 森 裕章, 岡崎 司, 田中 智大：ノッチ付き試験片を用いた定荷重引張試験による再熱割れ感受性評価, 溶接学会論文集, 18-1, 87 - 94 (2000)
- 8) 岡崎 司, 西本 和俊, 森 裕章：溶接金属における再

- 熱割れの特徴, 溶接学会論文集, 18-1, 59 - 67 (2000)
- 9) 西本 和俊, 森 裕章, 岡崎 司, 松永 泰三: 定歪速度引張試験による溶接金属の高温延性の評価, 溶接学会論文集, 18-1, 78 - 86(2000)
- 10) 岡崎 司, 西本 和俊, 森 裕章: クリーブ破断試験による溶接金属の高温延性の評価, 溶接学会論文集, 18-1, 66 - 77(2000)
- 11) 細井 宏一: ステップアップのための溶接材料, 溶接技術, 2, 69 - 75(1999)
- 12) 溶接学会編: 溶接接合技術, 産報出版, 45(1993)
- 13) 鎌田 政男, 青木俊夫: 知って得をする溶接材料の選択, 溶接技術, 2, 72 - 78(1998)
- 14) 佐藤 嘉洋, 富田 健司, 桑名 武: Ar-O₂, Ar-CO₂ およびCO₂-O₂ 雰囲気における鋼溶接金属部の酸素吸収について: 溶接学会論文集, 10-3, 68 - 74 (1992)
- 15) 桑名 武, 佐藤 嘉弘, 金田 創太郎: Fe-Cr 溶接金属の酸素吸収および酸化物系介在物について, 溶接学会論文集, 10-3, 81 - 86(1992)
- 16) 岡崎 司: ステンレス鋼およびNi 合金溶接部における溶接欠陥について, 材料と環境討論会, 46th, 363 - 366(1999)
- 17) 神谷 修, 藤田 春彦, 圃城 敏男, 菊池 靖志: SUS304MIG 溶接金属中の酸素と破壊靱性に関する研究, 溶接学会論文集, 3-3, 138 - 145(1985)
- 18) 溶接学会編: 溶接接合技術, 産報出版, 151(1993)
- 19) 丸山 敏治: FCAW を用いたJIS ステンレス鋼技量認定試験における曲げ性能不良の件, 2000 年12月溶接技術検定委員会資料
- 20) 神戸製鋼所, 神鋼溶接総合カタログ(1999)
- 21) 佐藤 嘉弘, 早川 直哉, 桑名 武: Ar-CO₂-O₂ 雰囲気における鋼溶接金属の機械的性質について, 溶接学会論文集 10-3, 106 - 112(1992)
- 22) 谷垣 尚: 新しいセルフシールドアーク溶接, 溶接技術, 2, 117 - 122(2002)
- 23) 立川 克美, 武藤 明義, 松見 明彦, 高野倉 正三, 細谷 昌裕: 溶接入熱と機械的強度の関係, 先進技術講演会・合同研究発表会(2002)
- 24) 日本學術振興会製鋼第19委員会: 鉄鋼と合金元素, 465(1966)
- 25) 長谷川 正義: ボロン鋼の電子顕微鏡組織, 鉄と鋼, 9, 68 - 69(1955)
- 26) 山下 雅弘: フラックス入りワイヤを使用したステンレス鋼の裏当て金ありの溶接について, 2000 年12月溶接技術検定委員会資料

PROFILE



星加 貴久
Takahisa HOSHIKA
住友化学工業株式会社
生産技術センター



森 久和
Hisakazu MORI
住友化学工業株式会社
生産技術センター
主席研究員