

(技術資料)

高能率な大入熱サブマージアーク溶接法

Highly-efficient High Heat Input Submerged Arc Welding Process



村西良昌*1

Yoshimasa MURANISHI

With the increase in requirements for highly-efficient welding, the main welding process has been shifting from shielded metal arc welding (SMAW) to gas metal arc welding (GMAW). There has been an increasing use of flux cored wire for the GMAW process. However, there has been little change in the use of submerged arc welding (SAW) for the past several decades, mainly because of its high efficiency. This paper introduces the high-efficiency welding process that contributed to the continued demand for the SAW process. Features of welding consumables for SAW and examples of their application to shipbuilding, construction, and other fields are also introduced.

まえがき＝溶接材料の主流は、構造物の大形化や生産効率の向上などのニーズを背景に、1980年代に被覆アーク溶接棒からソリッドワイヤに、最近ではフラックス入りワイヤへとより高能率・高品質な材料へと変化している。

このような時代の流れの中にあつて、サブマージアーク溶接材料の全生産量に占める割合は10%程度と増減が小さくほぼ一定の割合で推移している¹⁾。これは、サブマージアーク溶接が高能率な施工法である優位性と、一方では設備が比較的大形となることや溶接姿勢が下向・横向に限定されるなどのマイナス面が理由と考えられる。

本稿では、サブマージアーク溶接の施工法の概要と、最大の特徴である高能率施工を有効に活用している各分野での適用事例について、一部歴史的変遷を交えながら紹介する。

1. サブマージアーク溶接の特徴

サブマージアーク溶接は、アメリカのユニオンカーバイド&カーボン社（以下、ユニオン社という）によって1933年に開発され1936年には実用化されており、国内では1950年代に輸入された装置、溶接材料で船舶の建造に適用されたのが始まりである²⁾。

サブマージアーク溶接の模式図を図1に示す。他の溶接法との違いは、フラックスとワイヤを別々に供給する点と、アーク発生点がフラックスに覆われているためアークを直接見ることができない点である。最大の長所は図2に示すとおり、高溶着な施工法であるという点であり、鉄粉を添加したフラックスや多電極化などを組み合わせることでさらに高溶着性を得ることができる。その他の長所として、溶込みが深く開先断面積を小さくすることが可能であり、さらには大気中の酸素や窒素などの混入

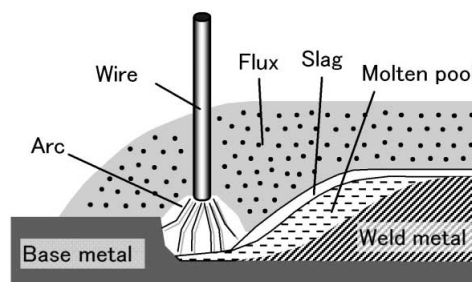


図1 サブマージアーク溶接法の模式図

Fig. 1 Schematic of submerged arc welding

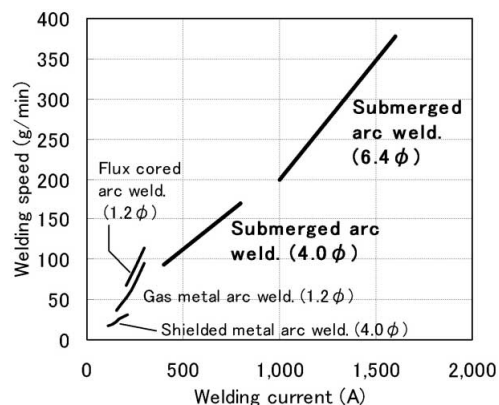


図2 各溶接法の溶着速度

Fig. 2 Welding speed of several welding process

や風の影響を受けにくいなどが挙げられる。一方、短所としては、比較的大形設備となるため、溶接長さが短い場合などはセッティングに多大の時間を要し、アーク発生率が著しく低下することや、溶接姿勢が下向、水平、横向に限定されるなどが挙げられる。また、長所の一つである溶込みが深いのが故に、溶接金属の機械的性質が鋼板成分の影響を受けやすいことも挙げられる。

*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

2. サブマージーク溶接材料の特徴

サブマージーク溶接材料は、1955年にワイヤが、1959年に溶融フラックスがユニオン社との技術提携のもと国内で生産が開始され、1962年には造船向けに我が国独自のボンドフラックスが開発、実用化されている。フラックスは図3に示す溶融フラックス (Fused Flux)、焼結フラックス (Sintered Flux)、およびボンドフラックス (Bonded Flux) の3種類に大別される。溶融フラックスおよび焼結フラックスはそれぞれ、溶解、高温焼成 (700~1,000°C) の工程があるため合金原料などの添加ができず、またフラックス組成の特徴から主に入熱が小さい溶接条件に適している。一方、ボンドフラックスは焼成温度が400~600°Cと比較的低温のため、高温で分解あるいは酸化されるような原料を添加することが可能である。そのため、大入熱での溶接作業性や溶接金属の機械的性質に優れており、高強度・高じん性化、高溶着性などの機能を持たせることができる。また、低温で焼成するためフラックス水分量は他フラックスに比較して高くなるものの、炭酸塩の添加によりアーク雰囲気が発生したCO₂ガスが水素分圧を低下させ、図4に示すように溶接金属中への水素の混入が抑制されて極低水素化が達成できる。この技術はサブマージーク溶接の高強度鋼への適用を可能にしている。

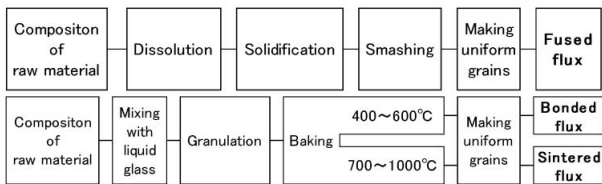


図3 各フラックスの製造工程
Fig. 3 Production process of flux

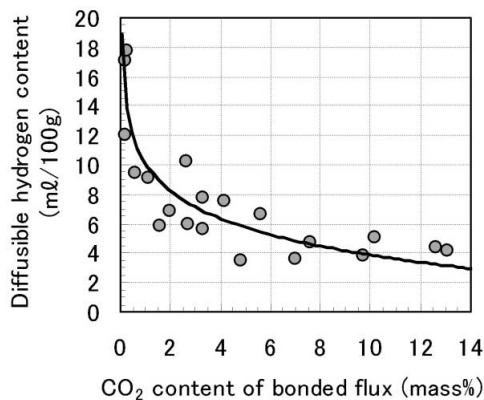


図4 ボンドフラックス中のCO₂量と溶接金属の拡散性水素量の関係
Fig. 4 Relationship between CO₂ content in bonded fluxes and diffusible hydrogen content in weld metal

3. 高能率施工法の適用事例と特徴

3.1 造船分野

3.1.1 建造の歴史とサブマージーク溶接

1950年頃にリベットによる接合からアーク溶接が本格的に採用されたことを皮切りに、1955年頃には船体平行

部の板継施工として母材の両側から1層溶接を行う両面サブマージーク溶接の適用が開始された。この施工法は両側溶接であり、板の反転作業を伴う。そのため、その後の船体の大形化が進むにつれて建屋高さの制限から反転作業が困難になったことや、反転のためのクレーン待ちなどの生産性の低下が問題となり、高能率施工法の開発ニーズが高まっていった。

このニーズに対応した施工法は広く研究され、1961年には片側から1層溶接が可能な片面自動溶接法が開発され、船体平行部の板継に適用された。その後も研究が重ねられ、当社では1964年に熱硬化性樹脂の採用とともにフラックス組成・物性を最適化した裏当てフラックスを開発した。さらには、裏当て方法の特徴からFCB[®] (Flux Copper Backing) 法、RF[®] (Resin Flux) 法と名付けられた新施工法を開発し、翌1965年には実用化に成功した。この片面サブマージーク溶接法は反転作業を省略することができる。このため、コンベアラインとの組合せによって流れ作業化が可能となったことから造船所で広く採用され、その後、日本が造船大国となる礎になった³⁾。

3.1.2 片面サブマージーク溶接の特徴

図5にFCBTM^{注1)}法とRFTM^{注2)}法の概念図を示す。FCB法は、銅板の上に裏当てフラックスを散布し、エアホースの圧力で銅板裏面と密着させる構造である。大電流を使用する厚板への適用性に優れている反面、溶接ひずみが大きい薄板への適用には裏当てフラックスの追従性の点でやや難がある。RF法は、裏当てフラックスの下に耐火フラックスを敷いてエアホースの圧力で銅板裏面と密着させる構造である。銅板裏面の段差やひずみに対する

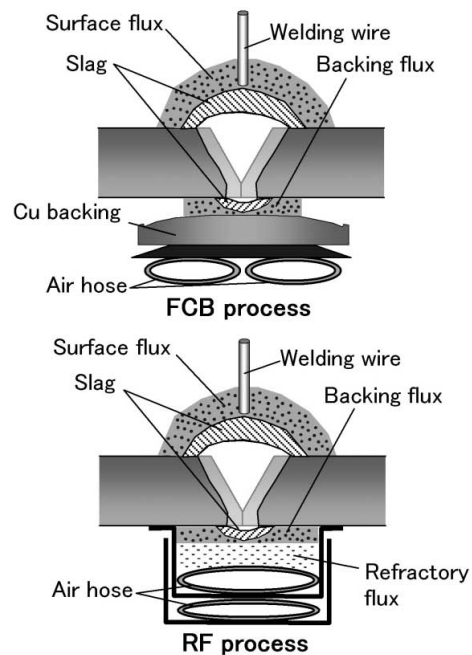


図5 FCB法、RF法の概念図
Fig. 5 Schematic of FCB process and RF process

脚注1) FCBは当社の商標である。

脚注2) RFは当社の商標である。

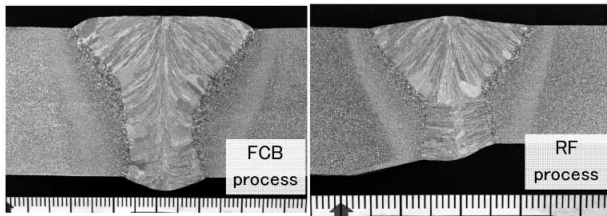


図6 FCB法(板厚35×35mm)とRF法(板厚25×20mm)による断面マクロ組織
 Fig. 6 Macro structure for FCB process (Thickness 35×35mm) and RF process (Thickness 25×20mm)



図7 片面サブマージアーク溶接装置
 Fig. 7 Equipment for one-side submerged welding

追従性に優れている反面、厚板への適用性に若干難がある。図6にはFCB法およびRF法による溶接継手の断面マクロ組織を示す。

FCB法およびRF法は、図7に示すような大形の専用装置を適用するのが一般的である。最近の装置は、溶接条件のプリセット化、タッチパネルの採用によるオペレーティングの容易化など、脱技能による溶接品質の安定化が図れる機能が具備されている。また、FCB法、RF法の両者の長所を生かす兼用装置も実用化されている。

3.1.3 溶接継手性能

大入熱施工では、母材熱影響部のじん性が問題となることがしばしばあった。1970年代後半には、低温じん性が要求されるLPG船の建造において母材熱影響部のじん性劣化が著しく、片面サブマージアーク溶接の適用が困難であった。この課題に対する溶接施工面からのアプローチでは、多電極溶接の先行電極と後行電極の距離を大きく離して溶接入熱を分散させた大極間溶接法が開発された⁴⁾。その一方で、1980年代には圧延技術の進歩などによって炭素当量の低いTMCP (Thermo Mechanical Control Process) 鋼板が開発され、一気に課題が解決された。その結果、先の大極間溶接法は一部でのみ実用化されたのとどまった。

3.1.4 船体設計の変化と対応

1) ダブルハル化対応

1989年に起きたアラスカ沖でのタンカー事故による原油流出を契機に、5,000DWT以上のタンカーにはダブルハル(二重船殻)化が義務づけられた。これがタンカー建造時の溶接工数の増加を引起こし、板継溶接のさらなる高能率化が求められることとなった。板継溶接の能率を向上させるために、フラックスの融点や粘度の調整によって高速溶接時にも良好なビード形状が得られ、かつ

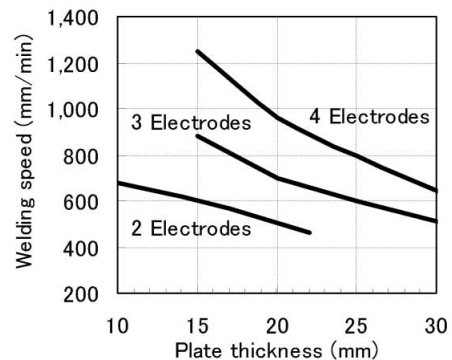


図8 多電極溶接における板厚と溶接速度の関係
 Fig. 8 Relationship between plate thickness and welding speed for multiple-electrode welding

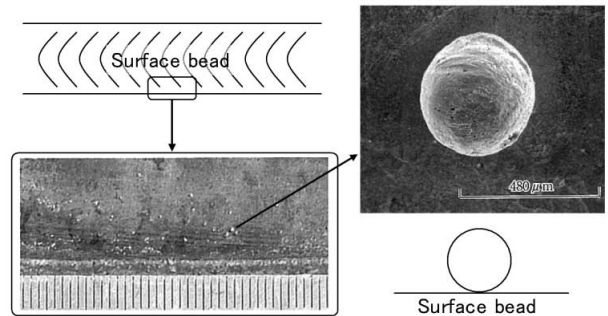


図9 ビード表面の金属粒
 Fig. 9 Metal grain on surface bead

鉄粉含有により大入熱溶接にも対応できるボンドフラックスを開発した。さらに、これを4電極のFCB法と組合せることで高速性が達成できる新たな施工法を開発した。

図8に示すとおり、4電極施工は3電極施工に比較して約1.4倍、2電極施工においては約1.8倍の溶接速度が得られる。

2) 新塗装基準 (PSPC) 対応

船体の長寿命化や保守の容易化を目的に、全船舶のバラスタックおよびバルクキャリアの二重船側部を対象に塗装基準が改訂され、塗装性を阻害するような例えば溶接時に発生するスパッタやビード表面汚れの除去実施の要件が定められている⁵⁾。

片面サブマージアーク溶接では一般的に、鉄粉を含有したボンドフラックスが適用されている。この鉄粉が原因で表面ビードに図9に示すような微小な金属粒が発生しやすいため、除去による作業工数が増加することになる。この課題に対し、鉄粉を含有しないボンドフラックスを適用すれば金属粒は発生しないがその反面、大入熱となる厚板施工においては表面ビード形状が不安定になりやすく、溶接中にガスや溶融スラグの吹上げが激しく起こって⁶⁾溶接作業を継続することが困難となる。

そこで当社は、鉄粉を含有しないボンドフラックスをベースにスラグの粘性や粒度構成、嵩密度を調整することにより、鉄粉を含有するフラックスと同等の溶接作業性を有しながら、表面に金属粒が発生しない(図10)フラックスを開発し、工数削減と溶接品質の向上に貢献している⁷⁾。

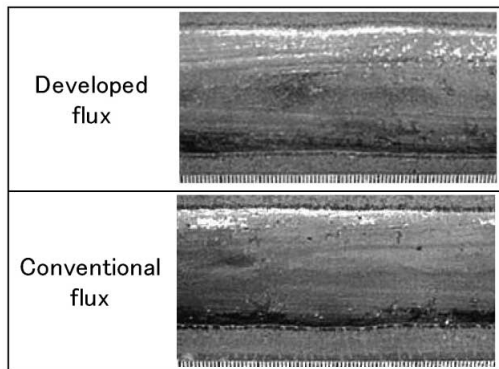


図10 ビード外観の比較
Fig.10 Comparison of bead appearances

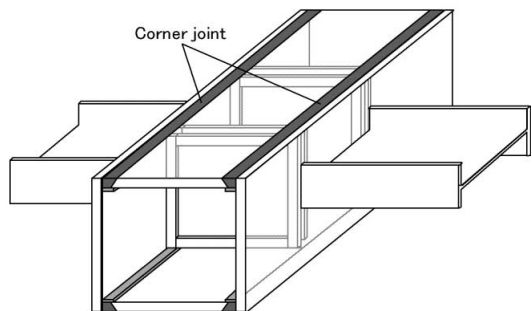


図11 四面ボックス柱の模式図
Fig.11 Schematic of box type steel columns

3.2 建築分野

3.2.1 四面ボックス柱の角溶接

1970年頃における四面ボックス柱(図11)の溶接では、最大板厚は32mm程度であり、かつ鉄骨部材に使われるのもまれであった。このため、炭酸ガスアーク溶接や溶融フラックスを用いた小入熱のサブマージアーク溶接による多層盛りで十分に賄えた。1980年頃になると、厚肉化と加工量の増加が進み、鉄粉を含有したボンドフラックスによる大入熱施工が適用され、溶接パス数の低減による高能率が検討された。しかしながら、この頃の溶接材料は諸性能を満足するものではなく、1層溶接可能な板厚は40mm以下に限定された。それを超える板厚は、炭酸ガスアーク溶接で下盛溶接した後、最終層の仕上げ層にサブマージアーク溶接を行う仕上げ溶接が一般的に採用されていた。1990年頃には、超高層化やフロアスペースの拡大に伴って鉄骨部材の厚肉化が進んだことから、それまでの混用溶接では生産性が極めて低く、高能率施工法の開発ニーズが高まっていた。

こうしたことを背景に当社は、大入熱溶接でも安定したビード形状が得られ、かつ溶接金属の機械的性質を確保できるフラックス組成と合金成分添加量の最適化、さらに耐高温割れ性を考慮した溶接施工条件の最適化により、2電極では板厚60mmまで、3電極においては80mmまで1層1パスで仕上げることが可能な高能率な溶接施工法を開発した⁸⁾。図12には、板厚55mmの2電極施工で得られた断面マクロ組織を示す。

最近では、阪神・淡路大地震において建築物に発生したぜい性破断が見つかったのを機に鉄骨構造部材のぜい

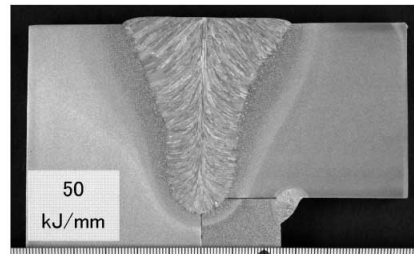


図12 角溶接部の断面マクロ組織一例
Fig.12 Typical macro structure of corner joint

Base metal	Welding consumables	Thickness (mm)	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	vE ₀ °C (J)
KCL A325-ST	US-55ST / PF-155ST	40	404	573	26	103
		60	405	552	30	120
KCL A325 Spec.			325-445	490-610	≥22	≥27
SA 440C-ST	US-60ST / PF-160ST	60	462	668	23	112
		65	454	643	23	109
SA440 Spec.			440-540	590-740	≥22	≥27

表1 高HAZじん性鋼用溶接金属の機械的性質の一例
Table 1 Typical mechanical properties of weld metals for excellent HAZ toughness steel

性破壊に関する研究が進められている。さらに、超高層建築物設計における長寿命化の観点から、柱の溶接部に対して高いじん性が要求される例が増加している。

こうした要求に対応するため、大入熱溶接においても溶接熱影響部で高いじん性が確保できる建築用鋼材が開発されている⁹⁾。そこで、新たに開発された鋼材に対応すべく、高い母材希釈率(50~60%)を考慮した溶接金属成分の設計の見直しを行った。具体的には各種合金元素(主としてNi, Mo)の適正添加により、焼入れ性を向上させた。これにより粗大な粒界フェライトを抑制し、粒内のアシキュラーフェライトを生成することでマイクロ組織を微細化し、表1に示すような高いじん性が確保できる溶接材料FAMILIARCTM注3) US-55ST/FAMILIARC PF-155ST, TRUSTARCTM注4) US-60ST/TRUSTARC PF-160STを開発した¹⁰⁾。

3.2.2 ビルドH形鋼のすみ肉溶接

建築構造物や橋梁部材におけるビルドH形鋼のすみ肉溶接には、溶込みが深いサブマージアーク溶接の特徴を生かし、下向姿勢によるウェブ板厚25mm程度まで開先を取らずに完全溶込みが確保できる2電極による1パス施工が普及している。

2010年10月から運用が開始されている羽田国際空港D滑走路橋上部ジャケットにビルドH形鋼が使われている。その設計は、航空機の繰返し荷重に対する疲労耐久性を確保するために完全溶込み溶接が求められ、さらにアンダカットや止端形状の許容値、超音波探傷時の検出レベルは一般構造物の2倍程度厳しいものが要求されていた¹¹⁾。溶接工数が多いことに加えて短工期に対応するには大入熱による1パス施工は必須であった。しかしながら、従来の溶接材料や溶接施工条件では全ての要求を満足することは困難であったことから、ボンドフラッ

脚注3) FAMILIARC (FAMILIARCTM) は当社の商標である。

脚注4) TRUSTARC (TRUSTARCTM) は当社の商標である。

クスの改良と溶接施工条件の最適化が必要となった。

大入熱溶接は溶融プールが大きく、さらにフラックス溶融量が増大するため、小入熱施工に比較して溶接金属の拡散性水素量は高くなる傾向にある。開発フラックスによる拡散性水素量は、焼成温度の最適化によるフラックスポテンシャル水分の低減と、ビード形状に悪影響を与えない程度に炭酸塩を最大量添加することにより、従来材に比較して約30%低減することに成功している。また、鋼材成分の影響を考慮し、とくに溶接金属中のC量増加に伴う微小な高温割れ発生を防止する観点から、溶接金属中のC量 $\leq 0.10\%$ が得られる成分設計とした。溶接ビード形状は、上述の開発した溶接材料をベースにワーク角度や溶接パラメータを最適化することで良好な品質を確保している¹²⁾。このことは図13に示す断面マクロ組織および表2に示す機械的性質からも確認できている。

以上の溶接材料の改良、溶接施工条件の最適化によって大きなトラブルなく実工事が完了でき、高能率かつ高品質な溶接継手の作製に大いに貢献した。

3.2.3 円形鋼管用のシーム溶接

円形鋼管は曲げ加工された鋼板を組合せ、内外両面からサブマージーク溶接施工を行って製造される。溶接施工法としては、適用鋼種および板厚によって両側からの1層もしくは多層溶接が用いられる。

最近では、東京スカイツリー最上部にあるアンテナ設置部分のゲイン塔の製作において両側からの多層溶接が適用された¹³⁾。表3には溶接施工条件を、図14には断面

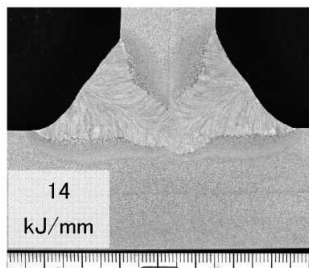


図13 すみ肉溶接の断面マクロ組織の一例
Fig.13 Typical macro structure of fillet weld

表2 溶接金属の機械的性質の一例

Table 2 Typical mechanical properties of weld metal

Web/Flange thickness mm	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	vE _{-20°C} (J)	vE _{0°C} (J)
25/32	445	557	33	72	109

表3 TRUSTARC US-80LT/TRUSTARC PF-H80AKによる溶接条件の一例

Table 3 Typical welding conditions with US-80LT/PF-H80AK

	Groove shape mm	Pass	L Electrode A	V	T Electrode A	V	Speed mm/min	Heat input kJ/mm
Inside		1	500	28	-	-	250	3.4
		2	550	30	550	32	450	4.5
		3	750	32	700	36	350	8.4
Outside		1	500	28	-	-	250	3.4
		2	600	30	-	-	250	3.0
		~10	~700	~34	-	-	~300	~5.0
		11	700	30	650	34	400	5.0
		~Last	~750	~32	~700	~36	~600	~7.0

*Preheat: $\geq 125^{\circ}\text{C}$ Interpass: $125\sim 200^{\circ}\text{C}$ Postheat: $150\sim 200^{\circ}\text{C} \times 1\sim 2\text{hr}$

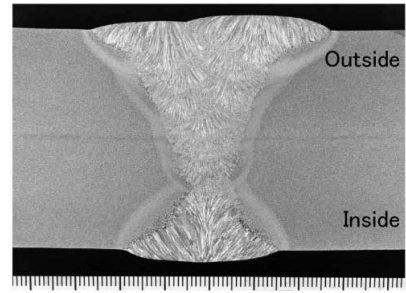


図14 断面マクロ組織の一例

Fig.14 Typical macro structure

マクロ組織の一例を示す。適用鋼種が高強度であるため、溶接金属の機械的性質を確保するための溶接入熱制限(8.0kJ/mm以下)や低温割れ防止の観点から予熱・パス間温度の管理が厳格化されている。

むすび=サブマージーク溶接は1933年に開発されてからおよそ80年が経過し、それぞれの時代のニーズに対応した溶接施工法、溶接材料が開発、実用化されることによって今もなお各分野で適用されている。この背景には、大入熱溶接に耐え得る鋼材の開発や溶接品質を大きく左右する溶接現場における開先精度などの十分な管理が大きな要因であったといえる。

溶接構造物の生産性向上手段には、溶接工数および補修などの手直し工数の削減が考えられる。両者を満足するための溶接施工法の選定では、各種施工法の特徴を十分に把握するとともに、求められる溶接継手性能なども加味することが肝要であり、本稿がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会. ふえらむ. 2012, Vol.17, No.1, p.4.
- 2) 藍田 勲. 溶接技術. 1996, Vol.44, No.9, p.135.
- 3) (社)日本造船学会編. 日本造船技術百年史. 1997, p.154.
- 4) 奥田直樹. 溶接技術. 1980, Vol.28, No.4, p.51.
- 5) 山口欣弥. 溶接学会誌. 2012, Vol.81, No.6, p.51.
- 6) 坂口修一ほか. 川崎製鉄技報. 1994, Vol.26, No.4, p.163.
- 7) 幸村正晴. 溶接だより技術がいで. 神戸製鋼所, 2002, Vol.42, No.6, p.1.
- 8) 長谷 薫ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.70.
- 9) 川野晴弥ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.2, p.110.
- 10) 猿橋清司ほか. 溶接だより技術がいで. 神戸製鋼所, 2005, Vol.45, No.1, p.1.
- 11) 木村文映. 溶接学会全国大会講演概要第88集. 2011 - 4, S25.
- 12) 村西良昌. 溶接だより技術がいで. 神戸製鋼所, 2007, Vol.47, No.1, p.1.
- 13) 山口徹雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.16.