

(技術資料)

厚板の高能率水平すみ肉溶接用フラックス入りワイヤとその施工法

Flux Cored Wires and Welding Process for Thick Plate in Horizontal Fillet Welding with High Efficiency



伊藤和彦*
Kazuhiko ITO



長岡茂雄*
Shigeo NAGAOKA



有田 大*
Hiroshi ARITA

Flux cored wires (FCW) for horizontal fillet welding are being used in many shipbuilding yards where thick plates are applied mainly. That is because the ratio of fillet welding exceeds 70% of all welding joints. In welding reality, there are many types of demand from end-users, such as welding properties and high efficiency in the welding process. In this report, various types of FCW and their welding process developed by Kobe Steel are explained and also a newly developed welding process called “New TOP process” is especially described.

まえばき = 厚板の代表的ユーザである造船および橋梁の分野では、ガスシールド溶接用フラックス入りワイヤ（以下、FCW (flux cored wire) という) による溶接施工が製造工程上、重要な位置を占めている。特に、FCW が最も多く使われている造船の溶接施工では、溶接長全体の 70 ~ 80% が水平すみ肉溶接であることから、高速溶接による高能率性、溶接継手部の外観および形状、耐気孔性などの特性向上に加え、スパッタ発生量低減などの溶接作業性向上を狙った水平すみ肉溶接用の FCW や溶接施工法が開発されてきた¹⁾。

本稿では、これまでに当社が開発した水平すみ肉溶接用 FCW や溶接施工法についてまとめるとともに、最近開発された新たな施工法である 3 電極溶接施工法について従来の施工法と比較しながら紹介する。

1. 水平すみ肉溶接の現状

現在、造船および橋梁分野で使用されている水平すみ肉溶接専用の FCW を表 1 に示す。種々の鋼板に対して水平すみ肉溶接に適した FCW が開発されており、それぞれ高速溶接性、耐気孔性、大脚長性などの特長を有している。したがって、使用にあたっては、ユーザの要求に応じて適切な FCW が選択される。例えば、厚さ 30 ~ 40mm 程度のスラブロンジ材 (490MPa 級) の溶接施工のように、比較的厚板のすみ肉溶接の場合は 7 ~ 8mm 以上の安定した脚長が要求されるため、1 パスでの大脚長溶接に適した DW-200 を選択することが一般的である。また、20m 以上の溶接長を複数の装置で溶接する、いわゆるパネルラインでは、溶接施工能率を上げるために高

表 1 水平すみ肉用 FCW の種類とその特長の比較

Table 1 Various types of FCW for horizontal fillet welding and comparison of its characteristics

Applicable plate	Brand name	Porosity resistance	Bead contour	Welding speed	Leg length	Weldability	Shipping approval	Others
Mild Steel / 490MPa class steel	MX-Z200	Good	Good	Good	Good	Good	Up to Grade (0)	-
	MX-200S	Better	Good	Better	Good	Fair	Up to Grade (0)	-
	MX-200H	Better	Good	Much Better	Good	Good	Up to Grade (- 20)	Available with TOP process
	DW-200	Fair	Better	Fair	Better	Good	Up to Grade (- 20)	-
	DW-50BF	Fair	Better	Fair	Better	Good	-	-
590MPa class steel	MX-60F	Good	Good	Good	Good	Good	-	-
	DW-60BF	Fair	Better	Fair	Better	Good	-	-
Weather proof steel	MX-50W	Good	Good	Good	Good	Good	-	-
	MX-60W	Good	Good	Good	Good	Good	-	-
	DW-50WBF	Fair	Better	Fair	Better	Good	-	-
Low temperature service steel	DW-60WBF	Fair	Better	Fair	Better	Good	-	-
	MX-55LF	Good	Good	Good	Good	Good	Up to Grade (- 40)	-

* 溶接カンパニー 技術開発部

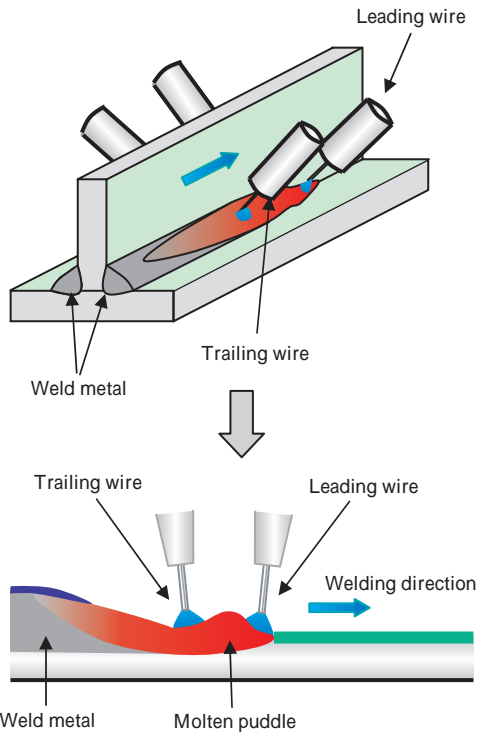


図1 TOP法の概念図

Fig. 1 Schematic of TOP process (Twin Tandem One Pool process)

速溶接性に優れる MX-200H を選択することが多い。

最近の造船分野では、建造量の増加あるいは船体の大型化にともない、建造効率を向上させるため、溶接作業の高能率化に寄与する FCW あるいは溶接施工法の開発が求められている。表1で示した FCW の中では、現在、MX-200H が最も高速で水平すみ肉溶接が可能なワイヤであり、Twin-Tandem-One Pool法(以下、TOP法という)と呼ばれる溶接施工法との組合せで最高 1.5m/min の溶接が実用化されている。TOP法の概要を図1に示す。TOP法は、立板の両側にそれぞれ二つの電極を配置し、2電極で一つの溶融プールを形成して溶接する施工法である。立板の両側にそれぞれ一つの電極を配置するツインシングル溶接法(最高約 0.8m/min)と比較して約2倍の高速溶接が実現できる。また、造船の水平すみ肉溶接で鋼板表面に塗布されたプライマの燃焼ガスによって発生する気孔欠陥(ピット、ウォームホールなど)に関し、TOP法はツインシングル溶接法と比較して耐気孔性にも優れている²⁾。

2.3 電極溶接施工法(新TOP法)

2.1 概要

現行のTOP法でさらに高速化を図るには、溶着金属量を増加する必要があり、溶接時の電流の増加が必要となる。しかし、先行極の電流値が500Aを超えると、先行および後行極の極性がともに直流・電極プラス(DC-EP)であるため、溶接電流による磁界の影響で2電極間でのいわゆる“アーク干渉”が激しくなる(図2)。これにより、溶接中の溶融プール形状の変動が大きくなり、溶融プール形状や溶込み深さが不安定となって、溶接後のビード外観および形状の不良、耐気孔性の劣化、さらには、溶接中のスパッタ量増大といった問題も引きこされる。

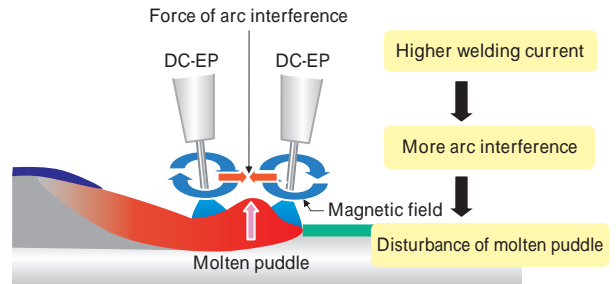


図2 高電流時におけるアーク干渉

Fig. 2 Phenomenon of arc interference with higher welding current

また、溶接電流の増加に伴い、鋼板形状、アース位置などの影響による磁気吹きが助長されることも²⁾、溶融プール形状の安定を劣化させる一因となる。

当社では、このような課題を解決するため、TOP法の2電極間に直流・電極マイナス(DC-EN)のワイヤを挿入した3電極溶接施工法(以下、新TOP法という)を開発した。さらに、専用FCWとしてMX-200HS($\phi 1.6$ mm, JIS Z 3313 YFW-C50DM), 挿入ワイヤとしてMG-1HS($\phi 1.2$ mm)およびMX-1HS($\phi 1.2$ mm)を開発した。図3に新TOP法の概要および基本的なトーチ配置、ワイヤ突出し長さなどを示す。新TOP法は、前述の如く、TOP法における先行および後行極の中間に第3電極としてDC-ENのワイヤを挿入する溶接施工法である。挿入されるワイヤは、先行および後行極とは逆の極性であり、また、アークが発生しないように制御された電源を用いて通電加熱される。したがって、挿入ワイヤから発生する磁界の向きは先行および後行極から発生する磁界の向きと逆になるため、先行および後行極によって発生するアーク干渉、磁気吹きを緩和することが可能となり、溶融プール形状の安定性が向上する(図4)。また、アークが発生していない挿入ワイヤによって溶融プールが冷却され、粘度が上昇することも溶融プール形状の変動低減に寄与する(図5)。したがって、新TOP法で高電流にて高速溶接(例えば溶接速度 2.0m/min)を実施した場合、溶融プール形状の変動が低減され、図6に示すようにTOP法と比較して良好なビード外観・形状および耐気孔性が実現される。

2.2 挿入ワイヤの作用

挿入ワイヤによる溶融プール表面高さの変動低減効果を評価するため、溶接時の後行極のアーク電圧変動を測定した結果を図7に示す。図7より、TOP法と比較して新TOP法におけるアーク電圧変動の振幅が小さいことがわかる。これは、挿入ワイヤによりアーク干渉や磁気吹きが緩和され、溶接中の溶融プール形状の変動が低減した結果、溶融プール表面とワイヤ間のアーク長の変動が低減するためである。図8に溶接速度 1.8, 2.0, 2.2m/minにおけるTOP法および新TOP法のアーク電圧変動幅を示す。一般に、溶接速度が大きくなるほど溶融プール形状は不安定となるが、新TOP法では2.2m/minにおいてもTOP法の1.8m/minに比べアーク電圧変動幅が3%程度小さくなっている。

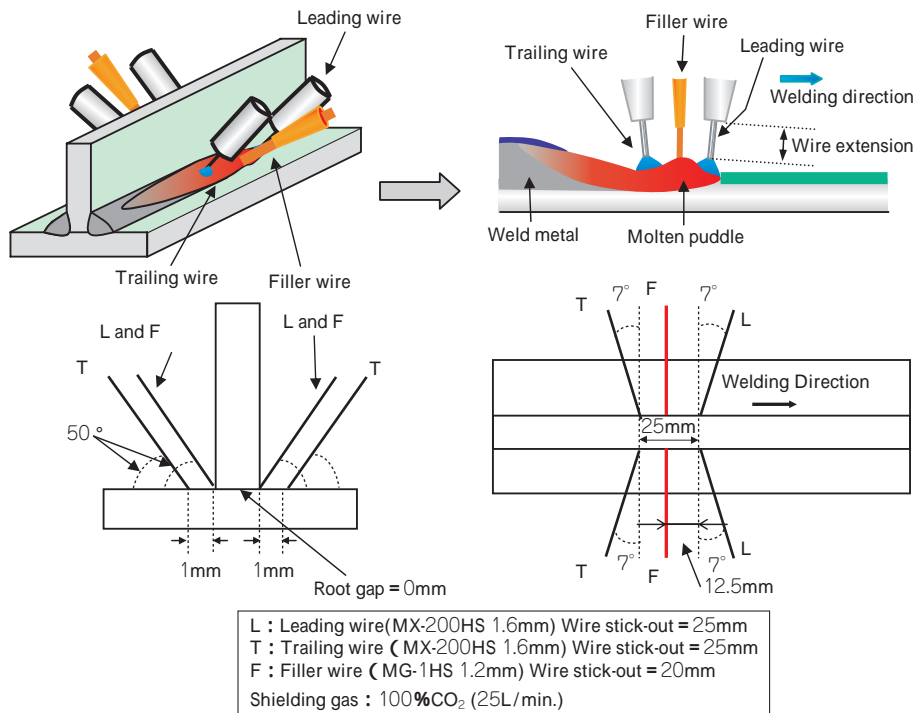


図3 新TOP法の概略図とその電極配置

Fig. 3 Schematic of New TOP process and its location of torches

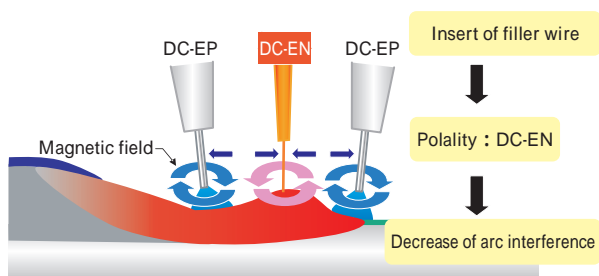


図4 新TOP法における挿入ワイヤの効果

Fig. 4 Effect of filler wire in New TOP process

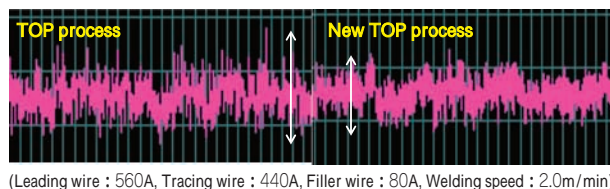
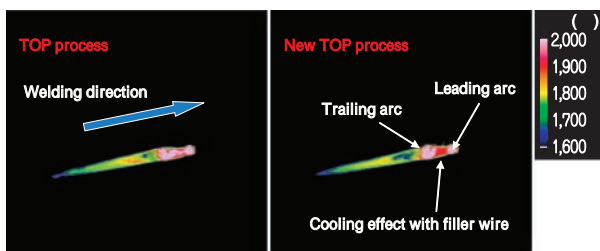


図7 TOP法及び新TOP法におけるアーク電圧変動測定結果

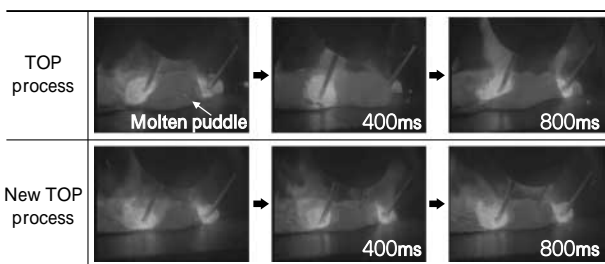
Fig. 7 Results of fluctuation of arc voltage with TOP process and New TOP process



(Leading wire : 560A, Tracing wire : 440A, Filler wire : 80A, Welding speed : 2.0m/min)

図5 挿入ワイヤ添加による溶融プールの温度変化

Fig. 5 Change of temperature at molten puddle by adding of the filler wire



(L : 560A, T : 440A, F : 80A ; Welding speed : 2.0m/min ; Base metal surface : inorganic zinc primer)

図6 溶融プールの安定性の比較 (ハイスピードカメラで撮影 ; 360Hz)

Fig. 6 Comparison of stability of molten puddle (captured by high speed video ; 360Hz)

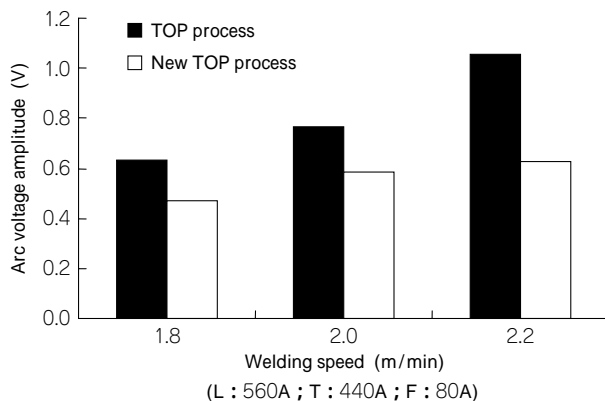


図8 アーク電圧変動幅に及ぼす溶接速度の影響

Fig. 8 Effect of welding speed on arc voltage amplitude

2.3 溶接施工条件

図9に新TOP法における溶接速度と脚長の適正範囲を示す。適正な溶接速度は1.2~2.2m/min、脚長は4.5~7.5mmである。図10に溶接速度2.0m/minにおけるビード外観および形状の一例を示す。溶接中の溶融プール形状およびアーク長の安定化により、溶融プール幅変動が小さくなり、母材が安定して溶融されるため、溶接ビード幅や母材とのなじみ性、溶込み深さが安定していることがわかる。

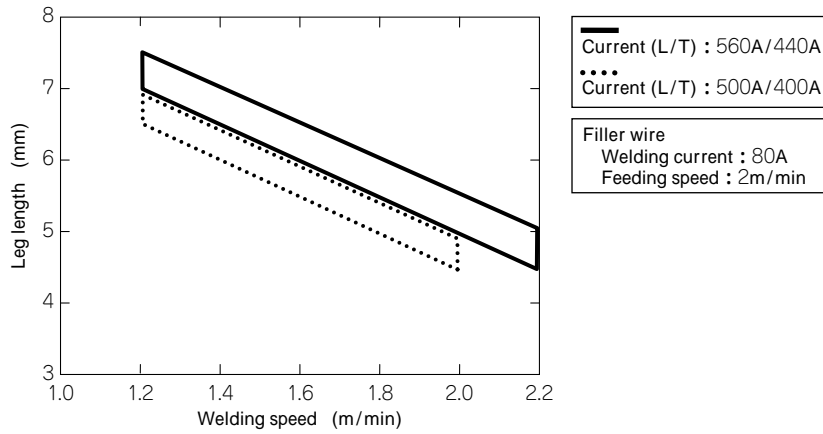


図9 新 TOP 法における溶接速度と脚長の関係
Fig. 9 Leg length as function of welding speed

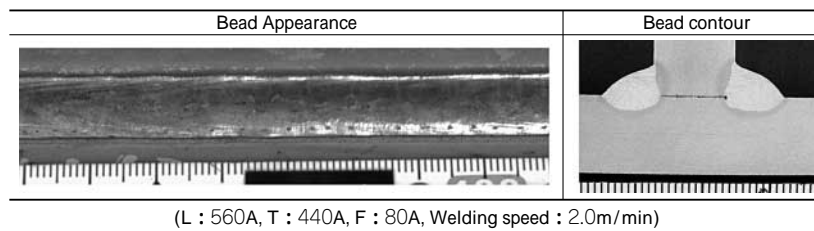


図10 New TOP 法のビード外観および形状一例
Fig.10 Typical bead appearance and contour with New TOP process

3. 新 TOP 法の特徴

3.1 磁気吹きに対する安定性

実施工において、溶接速度あるいは溶接電流が増加すると溶融プール形状の時間変動はアース位置の影響を敏感に受ける。そこで、表2に示すようにアース位置を立板スタート側、立板エンド側、および下板中心の3箇所に变化させて溶接試験を行い、TOP法および新TOP法でのアース位置の溶接性に及ぼす影響を調べた。図11にそれぞれのアース位置における後行極のアーク電圧変動幅を示す。いずれの条件においても、新TOP法の電圧変動幅の方が小さく、溶融プール形状(表面高さ)が安定していることがわかる。

図12にアース接続位置を立板スタートのみとした場合のビード外観を示す。TOP法と比較して新TOP法の方が、溶融プール形状が安定することから、ビード幅の安定した良好な外観が得られる。

3.2 耐気孔性

溶接時のプライマ燃焼ガスに起因する気孔欠陥の発生量を評価した。

図13に耐気孔性試験に使用した供試鋼板の概要を示す。試験板にJIS G3106 SM490A(厚さ12mm)を使用し、試験板表面には膜厚 $15 \pm 5 \mu\text{m}$ で管理された無機ジंकプライマを塗布している。立板端面は機械加工により平滑化し、下板との密着性を向上させ、ガスが放出されにくい条件(ピットが発生しやすい条件)とした。また、溶接速度は1.6, 1.8, 2.0m/minとした。なお、従来のTOP法では、適用範囲を超えた高速溶接のため良好な溶接ビードが得られず、1.6m/minのみの比較試験とした。

評価項目はピット発生数およびウォームホール発生率とし、ビード表面における溶接方向の直径が1.5mm以下

表2 アース接続位置

Table 2 Connected point of grounding cable

Connected point	Connected	Insulated	Insulated
Start of web plate	Connected	Insulated	Insulated
End of web plate	Insulated	Connected	Insulated
Center of flange plate	Insulated	Insulated	Connected

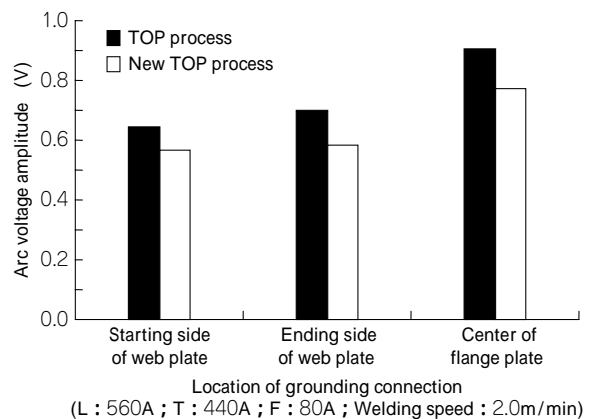


図11 アーク電圧変動幅に対するアース位置の影響

Fig.11 Effect of grounding location on arc voltage amplitude

の欠陥をピットとし、それ以上に線上に伸びた欠陥をウォームホールとした。ピット発生数は試験体両側のビードにおける個数の合計とした。また、ウォームホール発生率に関しては、試験体片側ずつにおいて次式で計算し得られた値を平均した値とした。

$$\frac{d(\text{mm})}{600(\text{mm})} \times 100(\%)$$

d はビード表面に出た個々のウォームホールにおける溶接方向の長さである。なお、ピット発生数およびウォームホール発生率はいずれも繰返し数3回の平均で評価し

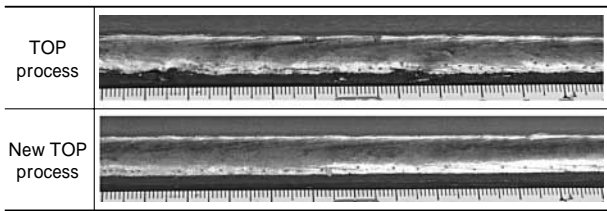


図12 ビード外観に対する施工法の影響
Fig.12 Comparison of welding processes in terms of bead appearance

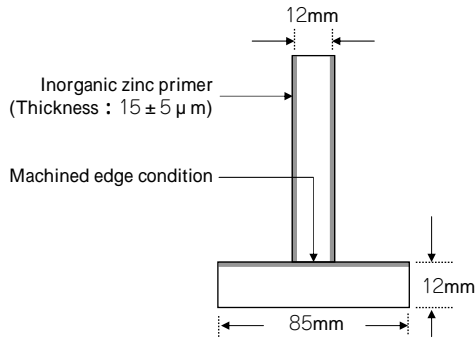
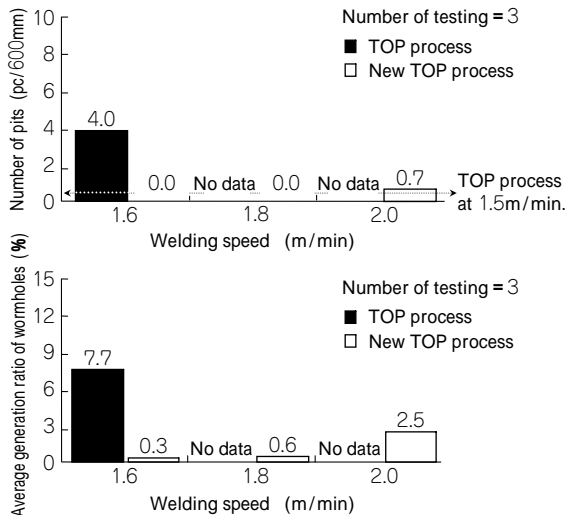


図13 耐気孔性試験の供試鋼板
Fig.13 Testing plate for the property of porosity resistance



(L : 560A, T : 440A, F : 80A, Base metal surface : Inorganic zinc primer 15 ± 5μm)

図14 耐気孔性試験結果
Fig.14 Results of testing porosity resistance

た。結果を図14に示す。溶接速度が増加するに従い、耐気孔性は劣化傾向ではあるが、1.6m/minでは、従来TOP法に比較すると大幅に改善されていることがわかる。これは、1.6m/minは、従来TOP法の限界速度(1.5m/min)を越えた条件であるため、溶融プール形状の変動が大きく、溶融金属やスラグの対流が不規則となった結果、耐気孔性が大きく劣化したと考えられる。一方、従来のTOP法で安定した溶融プールとなる限界速度である1.5m/minでのピット発生数³⁾を同図に示すが、この値と比較しても新TOP法でのピット発生数は2.0m/minの条件下でもなお同程度であり、良好な耐気孔性を有しているといえる。

4. 新TOP法専用ワイヤ「MX-200HS」

ここでは、新TOP法専用設計されたFCWである

表3 ワイヤ諸元
Table 3 Description of MX-200HS

Type of wire	Flux cored wire with straight CO ₂
Applicable plate	Mild steel and 490MPa class high tensile steel
Current polarity	DC-EP
Applicable code	JIS Z3313 YFW-C50DM/AWS A5.20 E70T-1C
Shipping approval	NK, AB, LR, NV, BV, GL
Diameter	φ 1.6mm

表4 200HSによる溶着金属の機械的性質および化学成分の一例
Table 4 Typical mechanical properties and chemical composition of undiluted weld metal with MX-200HS

Tensile property			Impact property		Chemical composition (mass %)				
0.2%OS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	√E ₀ (J)	√E ₋₂₀ (J)	C	Si	Mn	P	S
520	580	25	92	70	0.05	0.60	1.71	0.009	0.009

* 1) According to JIS Z3313

* 2) Welding current-Arc voltage:320A - 32V, Pass sequence:6layers and 12passes, Pre-heating : Room temperature, Interpass temperature : 150 ± 5

“MX-200HS”について説明する。“MX-200HS”は高溶着効率を実現しており、比較的低い電流で多くの溶着量を得ることができる⁴⁾。また、超高速溶接において良好なビード形状、外観および耐気孔性を実現している。さらに、脱酸剤や造さい剤などのフラックス組成を調整し、スパッタ発生量やヒューム発生量を大幅に低減している。

表3に“MX-200HS”の諸元を、表4に溶着金属の機械的性質および化学成分をそれぞれ示す。“MX-200HS”の溶着金属の機械的性質は、軟鋼および490MPa級高張力鋼用としては十分な性能を有している。

また、専用の挿入ワイヤである“MG-1HS”および“MX-1HS”はともにφ1.2mmであり、合金成分、量などを変更することにより溶融プールの粘性を調整し、溶融プール形状の変動が最小化するように設計されている。

むすび= 当社はこれまで、造船分野を中心に数多くの水平すみ肉溶接専用のFCWや溶接施工法を開発、実用化してきた。今回新たに、溶接速度が2.0m/minの高速水平すみ肉溶接においても溶融プールが安定し、アーク干渉および磁気吹きの影響が現れにくい新TOP法を開発した。新TOP法は、このような特長により、造船などにおける水平すみ肉溶接のさらなる高速化および溶接部の高品質化に大いに貢献する溶接施工法である。現在、複数の大手造船所への導入に向けて取組みを行っている。

厚板溶接構造物において占める割合の多い水平すみ肉溶接に関し、今後も自動化、省力化および高能率化などは極めて重要であり、当社としてもFCWおよび溶接施工法の開発を継続したい。

参考文献

- 1) 長岡茂雄ほか：溶接だより技術がいで、Vol.41(2001)。
- 2) 菅 哲男ほか：(社)溶接学会第143回溶接法研究委員会資料、No. SW-2254-93(1993)。
- 3) 末永和之ほか：溶接学会全国大会講演概要第53集、(Sep. 1993) p.40。
- 4) 長岡茂雄ほか：R&D 神戸製鋼技報、Vol.54, No.2(2004) p.21。