

(技術資料)

# 高能率CO<sub>2</sub>溶接施工法『TRIFARC™』および『横向自動溶接方法』

## High-efficiency MAG Welding Process "TRIFARC™" and "Horizontal Welding Process"



古川尚英\*1

Naohide FURUKAWA

Nowadays, shipbuilding industry requires a highly efficient, high quality welding process to comply with revised rules for ship structure and a new rule established for protective coatings. This article introduces new technology for a highly efficient, high quality horizontal fillet welding processes and Kobe Steel's approach to the automatic horizontal welding process, both the processes much demanded in the shipbuilding industry.

まえがき＝フラックス入りワイヤの主要消費ユーザである造船分野では、90年代より船殻の2重構造化による構造部材の大幅な増加や、近年の共通構造規則（Common Structural Rules）の改訂に伴うT型ロンジなどの補強部材の増加により、すみ肉溶接が大幅に増加している。溶接工程の高能率化については、すみ肉溶接部の溶接時間の低減が効果的であり、水平すみ肉溶接部の高速化に対する要求が強くなっている。一方で品質面でも新塗装基準（Performance Standard for Protecting Coating）が改訂されるなど、溶接品質についてもより厳格に規制されるようになった。溶接速度の高速化と溶接品質の両立という技術課題に対し、当社は高速溶接施工法『TRIFARC™<sup>注1)</sup>』を開発し、国内造船所やビルトアップロンジ製作メーカーでの適用が拡大している。

また外業での船殻横シーム部の自動溶接化は、長年溶接施工法の確立が望まれているものの、開先精度や自動機のルール敷設、防風対策、最適溶接材料の選定などが課題となり実用化に至っていない。当社ではこの技術課題に取り組むにあたり、横向溶接に最適な溶接材料とは何かを追求し、横向溶接重視型フラックス入りワイヤ『FAMILIARC™<sup>注2)</sup> MX-50H』を開発した。

本報では上記技術に関し、開発以降のエンドユーザーへの導入実例を交えて紹介する。

### 1. 新高速水平すみ肉溶接施工法『TRIFARC』

#### 1.1 従来技術の課題

造船分野で使用される鋼板は保管時の発錆を防止する目的で一次防錆剤（プライマ）が塗布されていることが

多いが、溶接時にアーク熱により燃焼した防錆剤の燃焼ガスが原因となり、溶接後のビード表面に気孔欠陥を生じる。この課題を解決する従来の高速溶接法としては2電極法がある<sup>1)</sup>。2電極法は先行極と後行極の極間距離を25～30mmとし、一つの溶融池を形成することで燃焼ガスの放出を促進し、高速溶接を可能とする技術である。しかし、その適用溶接速度範囲は1.5m/minが上限であった。すなわち、それ以上の速度領域では脚長サイズとのバランスからワイヤ送給量を増加する必要があるため電流値を500A程度まで上げなければならず、高電流を伴う2電極溶接法（極性タイプは共に直流プラス；DC-EP）では、先行極は後行極、後行極は先行極に形成される磁界の影響を受け、溶融池に内向きの電磁力が作用し溶融池が盛り上がった状態で高速溶接を行うこととなり、結果溶融池が乱れて溶接ビードの形状不良や耐気孔性の劣化を招いていたためである。

#### 1.2 TRIFARCの特長

前述の技術課題に対し、当社では3電極高速水平すみ肉溶接施工法『TRIFARC』を開発した。TRIFARCのトーチ配置を図1に示す。TRIFARCは従来の2電極法の極間にアークを発生させず通電加熱されたフィラワイヤを挿入し、かつフィラワイヤのワイヤ極性を直流マイナス（DC-EN）とすることを特徴とする。フィラワイヤをアークを発生させずに固体のまま溶融池に挿入することで、溶融池が冷却され粘度が増加すると共に、表面張力の影響により溶融池の揺動を抑制する効果が得られる。さらに、ワイヤ極性を先行極、後行極とは逆の極性とすることで、2電極間に形成される磁界干渉の影響を小さくし、溶融池に作用する電磁力の影響を緩和する狙いがある。これらの作用により高速溶接においても溶融池の挙動を安定にすることができる（図2）。TRIFARCにおけ

脚注1) TRIFARCは当社の商標である。

脚注2) FAMILIARC (FAMILIARC™) は当社の商標である。

\*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

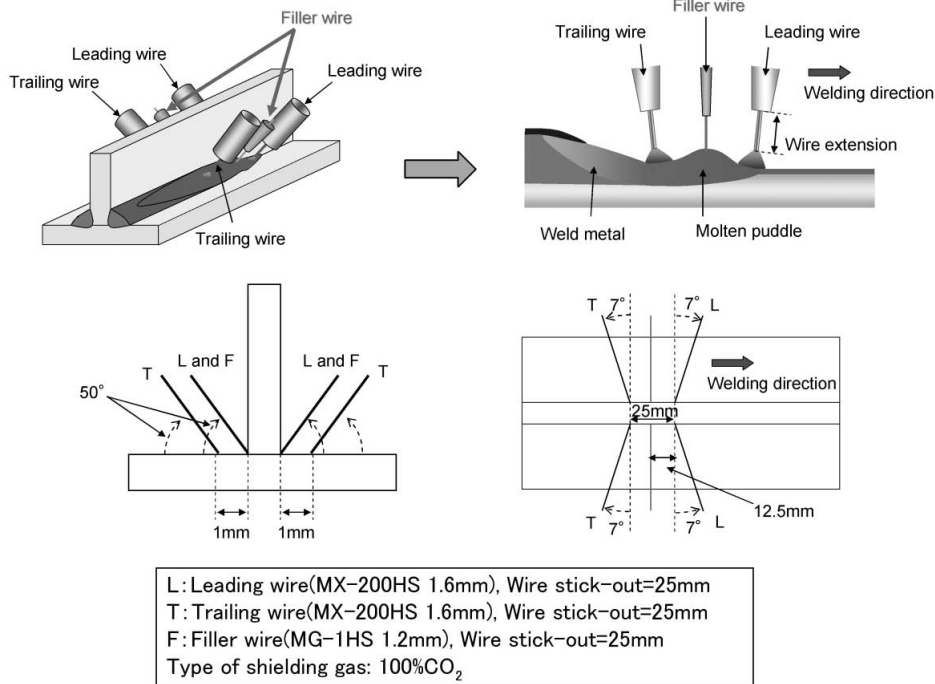


図1 TRIFARCの概要とトーチ配置  
 Fig. 1 Schematic of TRIFARC and its location of electrodes

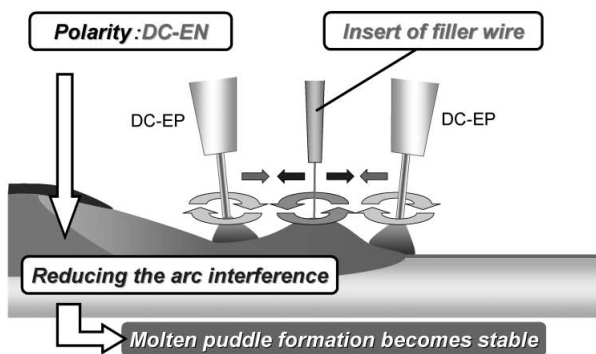


図2 TRIFARCにおける挿入ワイヤの効果  
 Fig. 2 Effect of insert filler wire in TRIFARC

る先行極，後行極には要求される脚長サイズに対し，溶接速度2.0m/minまでの速度領域でも安定した溶接ビード，耐気孔性が得られるよう溶着速度，スラグ流動性を調整したMX-200HS（1.6mm JIS Z3313 T49J0T1-0CA-U）が，またフィラワイヤには添加する合金元素と添加量を変更することで溶融池の粘性を調整したMG-1HS（1.2mm）が適用される。

### 1.3 従来2電極法との比較

TRIFARCと従来の2電極法の溶融池の安定性を評価するため，ハイスピードビデオによる溶融池観察（図3）および後行極のアーク電圧変動の測定（図4）を実施した。TRIFARCでは先行極，後行極間に形成される溶融池が安定し，さらに後行極のアーク電圧の変動幅が小さくなっている。図5にTRIFARC，2電極法を用いて溶接速度2.0m/minで溶接したビード外観，および断面マクロ組織を示す。2電極法に比べて良好なビード外観，形状，耐気孔性が得られている。また，それぞれの溶接施工法による耐気孔性を評価した<sup>2)</sup>。供試鋼板には，造船所において汎用的に使用される無機ジंक一次防錆塗料をショットプラスト後に15±5μm塗布した鋼板を使用し，

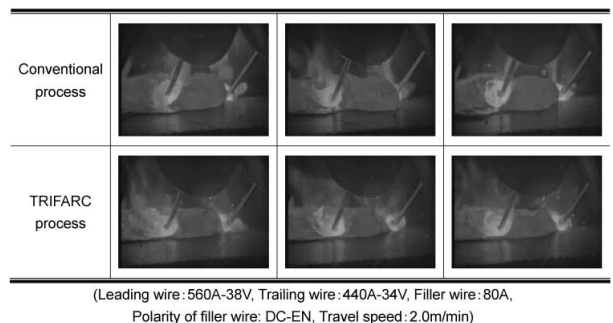


図3 ハイスピードビデオによる従来法とTRIFARCの溶融池挙動観察  
 Fig. 3 Behavior of molten puddle between conventional processes and TRIFARC observed by a high-speed video system

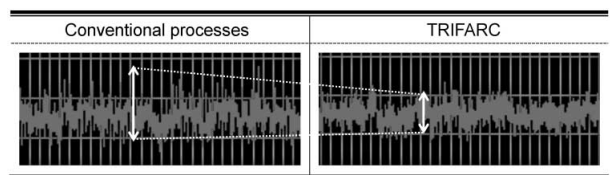


図4 従来法とTRIFARCにおけるアーク電圧変動測定結果  
 Fig. 4 Fluctuation of arc voltage between conventional processes and TRIFARC

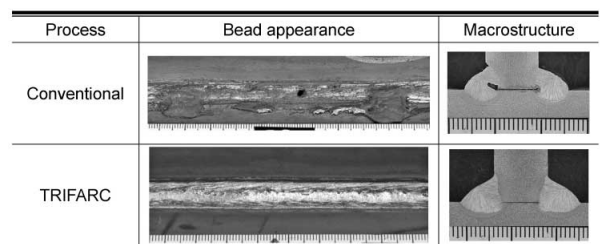


図5 ビード外観と断面マクロ組織の比較  
 Fig. 5 Comparison of bead appearance and cross sectional macrostructure

立板端面は機械加工により平滑化し下板との密閉性を高めることで、より燃焼ガスが放出されにくい（より気孔欠陥が発生しやすい）条件で実施した（図6）。評価時の溶接速度は1.6, 1.8, 2.0m/minとしたが、2電極法の推奨適用範囲より高速領域での評価であるため、2電極法は1.6m/minのデータのみと比較試験とした。評価項目はピット発生数および表面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以下の欠陥をピット、それ以上に線状に伸びた欠陥を表面ウォームホールとした。表面ウォームホール発生率は次式により算出した値である。

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

ここでdはビード表面に生じたウォームホールの合計長さである。ピット、表面ウォームホール発生率は共に繰返し数3回の平均で評価した。試験結果を図7に示す。溶接速度の増加に伴い気孔欠陥は増える傾向にあるが、1.6m/minで比較した場合、TRIFARCでは2電極法に比べて大幅に改善されている。同図に2電極法の適用速度範囲である1.5m/minでのピット発生数を示す。TRIFARCでは、溶接速度2.0m/minにおいてもなお2電極法1.5m/minと同程度の結果であり、良好な耐気孔性を有している。

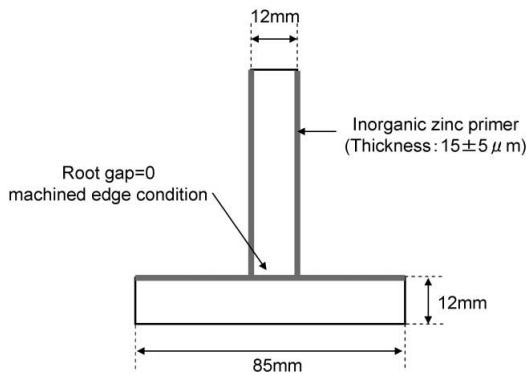
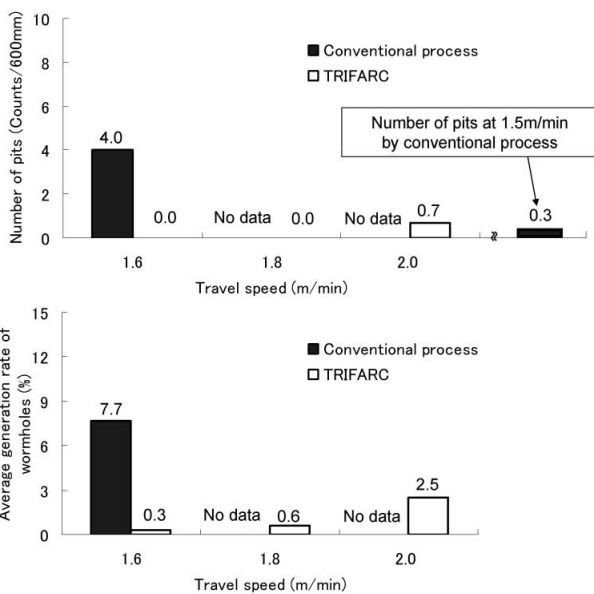


図6 耐気孔性評価試験の供試鋼板  
Fig. 6 Specimens for porosity resistance evaluation



(Leading wire: 560A-38V, Trailing wire: 440A-34V, Filler wire: 80A, Base metal surface: inorganic zinc primer 15 ± 5 μm)

図7 耐気孔性試験結果  
Fig. 7 Results of porosity resistance testing

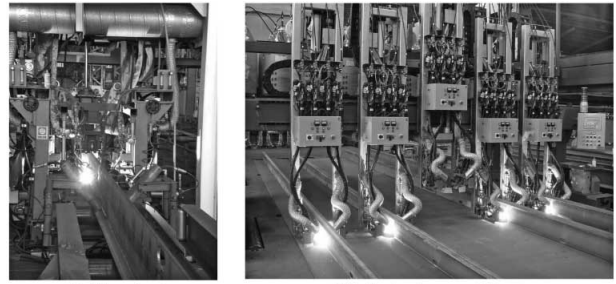


図8 住友重機械マリンエンジニアリング(株)におけるTRIFARC導入ライン

Fig. 8 Operation of TRIFARC at Sumitomo Heavy Industries Marine Engineering Co., Ltd

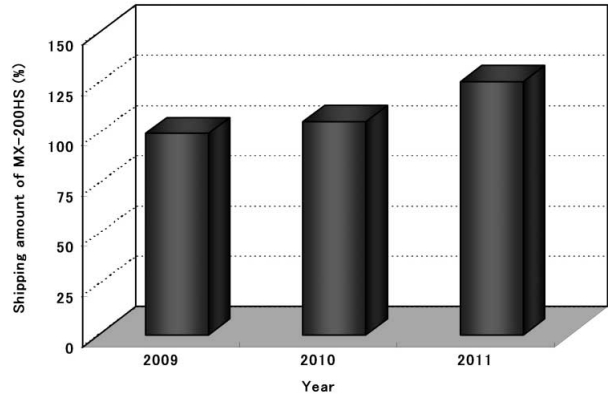


図9 2009~2011年までのMX-200HS出荷量推移  
Fig. 9 Shipping amount of MX-200HS through 2009~2011 with the amount for 2010 being 100

る。

#### 1.4 市場への導入状況

造船分野においてTRIFARCが適用される設備には船殻の補強部材となるロンジの製作ラインおよびそれらロンジを単板に溶接するパネルラインとがある。それぞれの装置外観を図8に示す。

TRIFARCは住友重機械マリンエンジニアリング(株)のビルトアップラインに導入されて以来、本溶接施工法の高効率性が評価されて、その後新設のパネルラインにも適用された。その後も溶接学会や国際会議<sup>3)~5)</sup>などで紹介されるなど本技術の認知度は向上し、現在に至るまでに国内大手造船所やビルトアップロンジ製作メーカーに本溶接施工法を導入して頂いている。図9にTRIFARCに採用されるMX-200HSの2009~2011年の出荷量推移を2009年のデータを100として示す。2009年以降、出荷量は増加傾向にあり、納入した各社から高速溶接化による能率向上だけではなく、耐気孔性の向上に伴う手直し工程の短縮という点でも高い評価を頂いており、今後もさらなる適用拡大が期待できる溶接施工法である。

## 2. 横向自動溶接方法

### 2.1 横向溶接の現状

外業での船殻横シーム部の溶接には、片側あるいは両側に開先加工を行ったのち、全姿勢用フラックス入りワイヤにて多層盛り溶接を行うのが一般的である。長年、横向施工の自動溶接化に対して強い要望があるものの、開先精度の管理や自動機の走行レール敷設が必要である

こと、暴風対策や最適ワイヤの選定などに課題があり、なかなか自動化には至っていない。そのような技術課題を一つずつ解決してゆくべく、まずは横向溶接に最適な溶接材料の開発に着手した。全姿勢用フラックス入りワイヤは、スラグ量が多いため単位時間あたりの溶着量が小さく、自動化の最大メリットである高能率化を妨げる可能性がある。また、開先内部でのスラグ剥離性が悪く、スラグ除去作業に時間を要するだけでなく、スラグ巻き込みなどの溶接欠陥が生じやすい。さらに全姿勢用フラックス入りワイヤはスラグ量を増やすことで立向上進溶接における熔融金属の垂れを抑制する効果があるが、横向溶接におけるビード形状は、スラグ量よりもスラグの凝固温度の影響を受けやすい。そのため溶接後のビードが垂れ気味となり、外観の美しさを損なっていた。溶接前準備においても、最終層における溶接ビード垂れを懸念し表当て材を用いるケースも多く、余分なコストと時間を要していた。

## 2.2 横向溶接重視型フラックス入りワイヤMX-50Hの開発

全姿勢用フラックス入りワイヤが横向溶接において抱える課題（溶着速度、開先内でのスラグ剥離性、溶接ビードの垂れによる外観不良）に鑑みて開発されたのが『MX-50H』である。MX-50Hと当社全姿勢用フラックス入りワイヤDW-100の溶着速度比較を図10に示す。いずれの電流域においてもMX-50Hの方が、溶着速度が速く、平均で7%程度向上している。開先内でのスラグ剥離性、最終層での溶接ビード垂れに関しては、全姿勢用フラックス入りワイヤのスラグ主成分となるチタン酸化物より高い融点をもつスラグ成分系を用いることで、スラグ量を増加させることなく熔融金属を押さえ込み、溶接ビード垂れを抑制している。全姿勢用フラックス入りワイヤ並みの大幅なスラグ量の増加を伴わない設計に加えその他のスラグ成分を調整することにより、横向溶接における開先内でのスラグ剥離性に優れたフラックス入りワイヤとなっている。図11にMX-50HとDW-100との横向溶接後のビード外観比較を示す。全姿勢用フラックス入りワイヤでは最終層の溶接ビードが垂れ気味となりやすい溶接電流域（ワイヤ径1.2mm：270～300A）でも、溶接ビード垂れの少ない美しい外観が得られていることが分かる。また当社で模擬した横向溶接継手試験では、MX-50Hの使用によりDW-100と比べておよそ13%のアーキタイム短縮を確認した。実施工での適用を考慮した場合、開先内のスラグ除去作業に要する時間も低減されるためさらなる能率向上が期待される。MX-50Hは、横

向溶接において全姿勢用フラックス入りワイヤが抱える課題を克服し、自動溶接および半自動溶接での高能率化に貢献できるフラックス入りワイヤである。MX-50Hのワイヤ諸元および溶着金属の機械的性質の一例を表1、表2に示す。

## 2.3 大脚長水平すみ肉溶接用としての多様性

横向溶接を重視して開発されたMX-50Hは、発生量が少なく、かつ高融点のスラグ特性に加え、高溶着速度であるため、大脚長水平すみ肉溶接用としても適用可能であり、多様性に富んだフラックス入りワイヤともなっている。近年、造船分野では、共通構造規則の改訂により使用鋼板の厚板化に伴うすみ肉の大脚長化が求められて

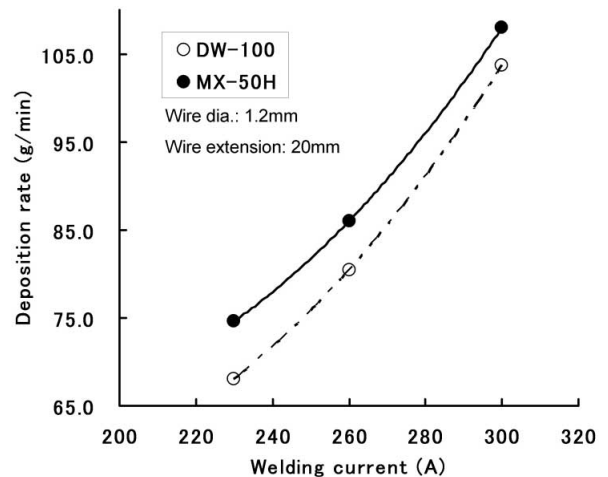
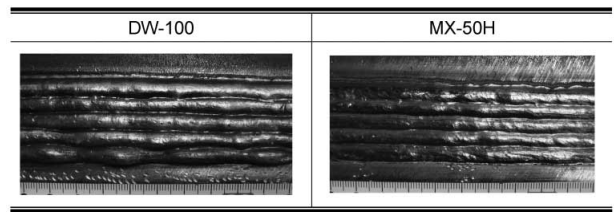


図10 溶着速度比較

Fig.10 Comparison of deposition rate



(Welding current at final layer: 280A, Wire dia.: 1.2mm)

図11 横向溶接における溶接ビード外観（半自動）

Fig.11 Bead appearance welded by semi-automatic horizontal welding process

表1 MX-50Hのワイヤ諸元

Table 1 Description of MX-50H wire

Type of wire	Flux cored wire with straight CO <sub>2</sub>
Applicable plate	Mild steel and 490MPa high tensile steel
Current polarity	DC-EP
Shipping approval	NK(KSW52G, KAW52G), LR(2Y)
Diameter	1.2mm: Horizontal, Horizontal fillet
	1.4mm: Horizontal fillet

表2 MX-50Hによる溶着金属の機械的性質および化学成分の一例

Table 2 Typical mechanical properties and chemical compositions of metal deposited with MX-50H

Tensile properties				Absorbed energy		Chemical compositions (mass%)				
0.2%OS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	RA (%)	vE0°C (J)	vE+20°C (J)	C	Si	Mn	P	S
507	592	26	65	67	82	0.04	0.65	1.85	0.014	0.006

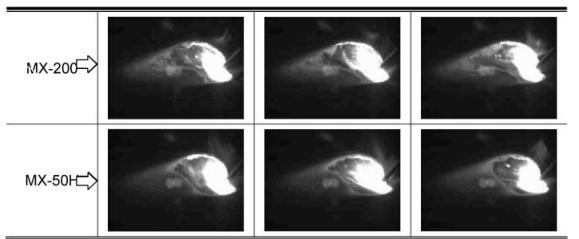
\*1) According to JIS Z3313

\*2) Welding current: 270A, Pass sequences: 12passes-6layers,  
Pre-heating temp.: Room temp., Inter-pass temp.: 150±10°C

いる。従来の水平すみ肉用フラックス入りワイヤの1パス溶接での適用脚長範囲は4.0~7.5mmである。それ以上の脚長を得ようとする、溶接速度低下に伴う過大な溶接熱の影響により、溶接金属が下脚側へ偏肉したオーバラップ形状となり、その結果、指定の脚長を満足しないことがあった。そのため、従来の溶接施工法で8mm以上の脚長を溶接する場合は2パス以上の溶接を実施する必要があり、能率面から1パス溶接で大脚長を得ることが可能なフラックス入りワイヤの開発が望まれていた。MX-50Hは最大の特徴ともいえる高融点タイプのスラグ特性によって、溶融金属の凝固過程において下脚側へ偏肉する溶接金属をスラグで押さえ込み、最大脚長9mmの溶接を可能にした(図12、図13)。

## 2.4 市場への導入状況

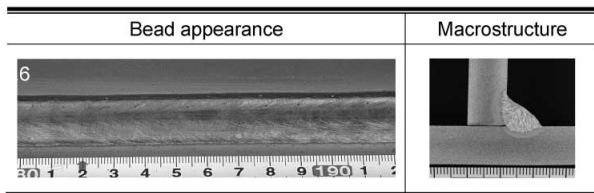
MX-50Hを開発して以降、国内数社で導入して頂いている。横向溶接においてはスラグ剥離性を含む優れた溶接作業性に加え、従来ワイヤからの高能率化が評価され、水平すみ肉溶接においては大脚長性と光沢あるビード外観が評価されている。図14に2010年以降のMX-50Hの出荷量推移を2010年のデータを100として示す。横向



(Welding current and arc voltage: 300A-33V, Travel speed: 0.3m/min, Wire diameter: 1.2mm)

図12 スラグ凝固状況の比較 (ワイヤ径1.2mm)

Fig.12 Comparison of slag solidification between MX-200 and MX-50H



(Welding current and arc voltage: 300A-33V, Travel speed: 0.25m/min, Wire diameter: 1.2mm)

図13 MX-50Hによる大脚長溶接の一例

Fig.13 Property of MX-50H for horizontal fillet welding

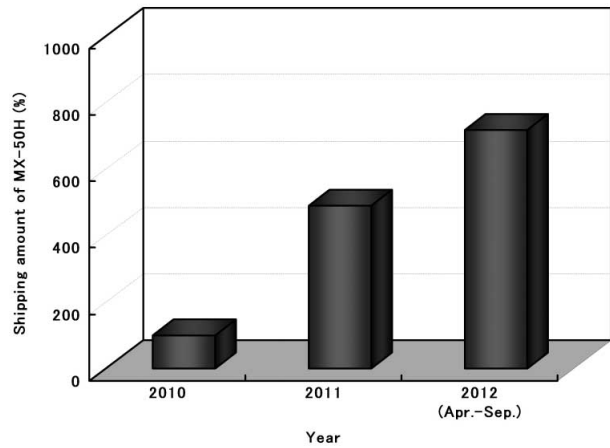


図14 2010~2012年現在までのMX-50H出荷量推移

Fig.14 Shipping amount of MX-50H through 2010~2012 with the amount for 2010 being 100

溶接については、溶接施工法としてまだまだ解決すべき課題も多く、定着に至っているユーザは少ないが、今後、横向自動溶接の施工法確立に向けた取組を継続し、高能率・高品質化に貢献したいと考える。

むすび=当社では、これまで造船分野が求めるトレンドを把握し、フラックス入りワイヤや溶接施工法を開発してきた。TRIFARCは船殻の構造部材の増加およびT型ロンジなどの補強部材の製作数増加に対応し、高能率かつ高品質を有し、最高溶接速度2.0m/minを達成した画期的な溶接施工法である。溶接総合企業として施工法開発、電源開発、専用溶接材料開発などを一体化して技術提案を行える当社の強みが発揮できた一例といえる。

横向自動溶接化に向けては、スラグ特性を調整して横向および水平すみ肉溶接における大脚長性に優れたMX-50Hを開発し、エンドユーザでの高能率化に貢献している。溶接施工法としてなお解決すべき課題が残るものの、今後も当社の強みを活かし施工法確立に向けた取組を継続したい。

## 参考文献

- 1) 菅 哲男ほか. R&D神戸製鋼技報. 1995, Vol.45, No.1, p.60.
- 2) 長岡茂雄. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.1, p.67-68.
- 3) H. Arita et al. IIW Doc.XII-1896-06.
- 4) H. Arita et al. Welding in the world IIW-1877-07.
- 5) Y. Yokota et al. IIW Doc.XII-1969-09.