

(論文)

# ハイブリッドタンデムマグ溶接法

## Hybrid Tandem MAG Welding Process



袁 倚旻\*1  
Yimin YUAN

We have developed a "hybrid tandem MAG welding process" (hereinafter referred to as "HT-MAG") to improve resistance against porosity during the welding of primer coated steel plates. The HT-MAG is based on a concept in which a leading electrode allows the primer gas to be discharged while ensuring deep penetration, and a trailing electrode arranges the shape of the bead, the functions of these electrodes being separated. It has been confirmed that deep penetration can effectively be realized by reducing the torch angle of the leading electrode with respect to the horizontal plane and applying high-current low-voltage conditions. This allows the primer gas to be efficiently discharged from directly underneath the arc, advantageously reducing the porosities. This phenomenon has been directly observed in video images obtained by high-voltage X-ray transmission radiography through the molten pool. The study has also confirmed a low spatter effect, along with a low distortion effect during downward butt welding.

まえがき = 造船分野ではブロック製作期間中の防錆（ぼうせい）目的で、鋼板表面にショッププライマが塗布される。しかし、このプライマ塗布鋼板を溶接した場合、アーク熱により塗膜が熱分解し、発生したガス（以下、プライマガスという）が凝固過程で溶接金属に閉じこめられ、ブローホールやピットが生じる問題がある（図1）。

プライマ塗布鋼板の溶接における耐気孔性改善のために、1) ショッププライマ組成の調整、2) スラグ成分を調整したフラックス入りワイヤ（以下、FCWという）の開発、などの検討がこれまでに行われてきた<sup>1)~4)</sup>。しかし、いまだに解決には至っておらず、さらなる改善が求められているのが現状である。そこで当社では、溶

接方法による改善を検討し、深溶け込み特性を特長とする『ハイブリッドタンデムマグ溶接法』（以下、HT-MAGという）を開発した<sup>5)~8)</sup>。本報では、HT-MAGの気孔低減メカニズム、耐気孔性向上効果、低スパッタ効果を紹介する。最後に下向き突合せ継手での適用例も紹介する。

### 1. 従来溶接法を用いたプライマ塗布鋼板の溶接の現状

従来法であるシングル法およびタンデム法を用いて、脚長約7mmの水平すみ肉溶接を行った。溶接条件を表1に示す。溶接後、試験体に図2に示す方法により

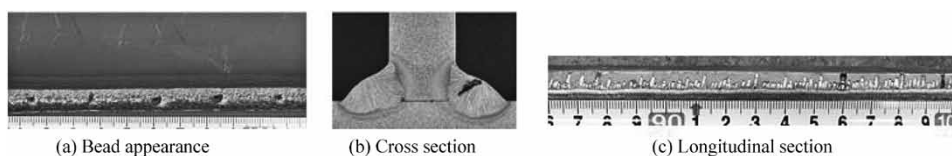


図1 ショッププライマ塗布鋼板の水平すみ肉溶接の課題  
Fig. 1 Problems of horizontal fillet welding with shop primer plate

表1 従来法の溶接条件  
Table 1 Conventional welding condition

Base metal	Carbon steel SM490A 12mm thickness (Shop primer:30μm)		
Joint type	Horizontal fillet		
Shielding gas	100%CO <sub>2</sub>		
Process	Single	Tandem	
Electrode		Leading	Trailing
Wire	FCW 1.4mm dia.	FCW 1.6mm dia.	FCW 1.6mm dia.
Tip to work distance	25mm	25mm	25mm
Torch angle θ <sub>1</sub>	45°	45°	45°
Torch angle θ <sub>2</sub>	0°	Backhand 7°	Forehand 7°
Current-Voltage	330A-34V	430A-32V	320A-30V
Welding speed	400mm/min	1000mm/min	
L-T distance		25mm	

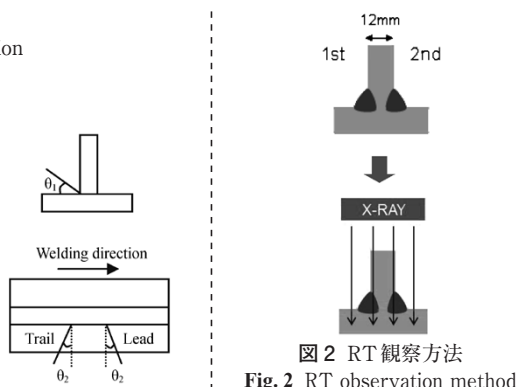


図2 RT観察方法  
Fig. 2 RT observation method

\*1 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

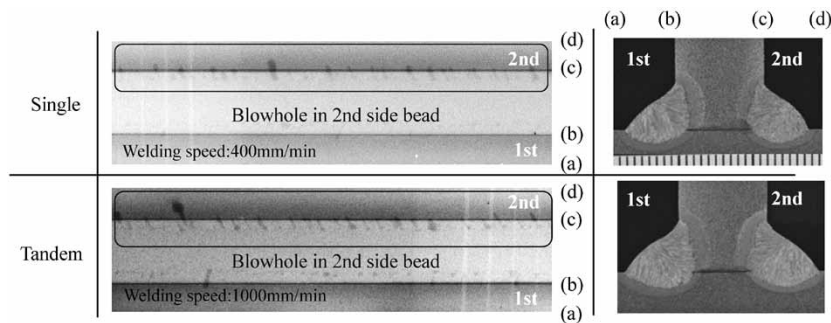


図3 従来法のRT結果と断面マクロ  
Fig. 3 RT result and penetration of conventional process

放射線透過試験（以下、RTという）を行った。従来法においてRTにより観察された気孔発生状況を図3に示す。従来法であるシングル法（溶接速度400 mm/min）およびタンデム法（溶接速度1,000 mm/min）では、すみ肉ビード内部に多量の気孔が発生している。また、その起点は立板端面と下板上面の板合わせルート部に沿って直線上に揃（そろ）っていることがわかる。さらに、1stビードによって背面からのプライマガスの放出経路が断たれるため、2ndビード側の気孔がより大きく成長している。これらの結果から、板合わせルート部からプライマガスが溶融池内部に侵入していることが示唆される。

## 2. 気孔欠陥低減方法の考案とHT-MAGの構成

### 2.1 気孔欠陥低減方法の考案

当社において過去に研究された亜鉛めっき薄鋼板の重ねすみ肉溶接では、シールドガス組成やパルス波形、溶接ワイヤ組成の調整によってアーク直下の母材を深く掘り下げることで、亜鉛ガスの大部分が溶融プール前方より放出されることが報告されている。この亜鉛めっき薄鋼板の重ねすみ肉溶接は、気孔欠陥低減の新たな手法として注目されている<sup>9)~11)</sup>。プライマ鋼板の溶接における気孔発生メカニズムも亜鉛めっき鋼板の溶接と機構的に同じと考えられる。したがって、アーク直下の母材ルート部を深く掘り下げることができれば、プライマガスを排出することができ、気孔欠陥の大幅な低減が可能と考えられる。それを実現するためには、深溶け込みを安定して得ることが重要であり、新たな溶接方法の開発を行った。

### 2.2 HT-MAGの構成と特徴

現在、造船業界で適用されている一般的なタンデム溶接法は、先行極（以下、L極という）と後行極（以下、T極という）に同一のFCWを使用しており、電極配置も前後対称的である。このような構成のタンデム溶接法の場合、溶接条件の調整だけでは前述のような耐気孔性を改善するための深溶け込み溶接を実現することは困難である。

いっぽう、これまでの研究により、タンデム溶接法において溶込み深さを支配するのはL極であることがわかっている。このため、HT-MAGではL極により深溶け込みを確保しながらプライマガスを排出し、T極によりビード形状を整えるといった両極の機能を分離するコン

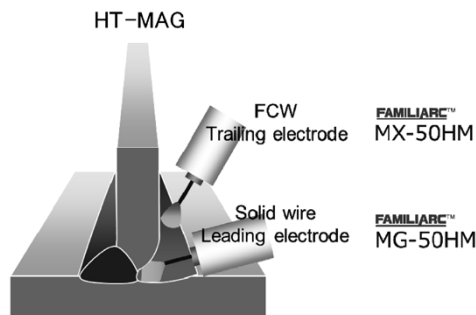


図4 HT-MAGの概要とトーチ配置  
Fig. 4 Schematic of HT-MAG and torch arrangement

セプトを考案した。このコンセプトを実現する溶接材料、最適なトーチ配置や溶接条件を以下で紹介する。

HT-MAGの構成を図4に示す。L極用には大電流の炭酸ガス溶接でも低スパッタを維持し、深溶け込み溶接を実現するワイヤ径1.6 mmのソリッドワイヤ FAMILIARC™<sup>注1)</sup> MG-50HMを開発した。また、T極用にはビード形状を改善するために成分を最適化したワイヤ径1.4 mmのスラグ系FCW FAMILIARC™ MX-50HMを開発した。

最大の特徴は、板合わせルート部に対する溶込み深さを大きくするために、L極の水平面に対するトーチ角度を20°としていることである。また、L極は埋もれアークによる深溶け込みを確保するために、高電流—低電圧の溶接条件を適用している。溶込み深さと気孔発生との関連性、そのメカニズムは次項にて述べる。

また、L極はソリッドワイヤの埋もれアーク条件で溶接するため、スラグ量が著しく少なく、凸ビードとなる。この問題を解決するため、スラグ量や成分を最適化したT極専用FCWを開発した。ビード形状を整えるため、トーチ角度は45°としている。なお、L極では400A以上の大電流で溶接するため、両極がアーク干渉しないように、極間距離は30 mmとしている。

## 3. L極溶接条件の最適化と気孔発生の可視化

### 3.1 L極トーチ角度の最適化

総溶込み深さ( $L_{Pene}$ )と未溶融部長さ( $L_{Root}$ )、脚長( $L_{Leg}$ )の定義を図5に示す。溶込み形成方向は、L極のトーチ傾斜角度によって大きく変化すると考えられる。そこで、L極のトーチ角度 $\theta_1$ のみを5°から45°まで変化させ

脚注1) FAMILIARC™ (FAMILIARC™) は当社の商標である。

て、溶込み深さとの関係を調査した(図6)。図6の結果より $\theta_1$ を $45^\circ$ から $20^\circ$ まで小さくすることで、溶込み形成方向が変化することがわかる。また、片側の溶込み深さ $L_{Pene}(F)$ は、4.5 mmから6.5 mmまで深くなることわかる。下板側へのトーチ干渉等を考慮し、L極の最適トーチ角度を $20^\circ$ にした。

### 3.2 L極溶接電流・アーク電圧の適正化

図7にL極溶接電流と溶込み深さ $L_{Pene}$ の関係を示しており、ほぼ線形関係である。L極溶接電流が350 Aで

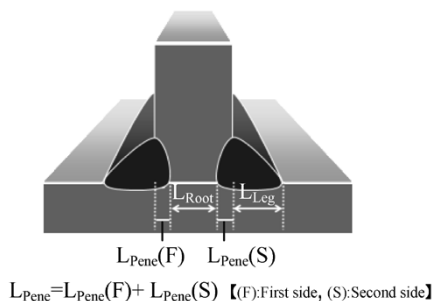


図5  $L_{Pene}$ ,  $L_{Root}$  と  $L_{Leg}$  の定義  
Fig. 5 Definition of  $L_{Pene}$ ,  $L_{Root}$  and  $L_{Leg}$

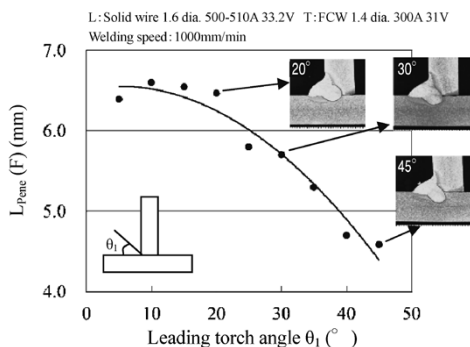


図6 L極トーチ角度と $L_{Pene}(F)$ の関係

Fig. 6 Relationship between torch angle of leading torch and  $L_{Pene}(F)$

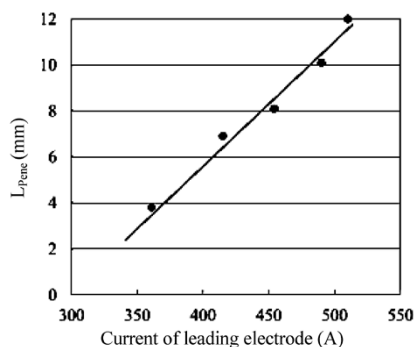


図7 L極溶接電流と溶込み深さの関係

Fig. 7 Relationship between current of leading electrode and penetration depth

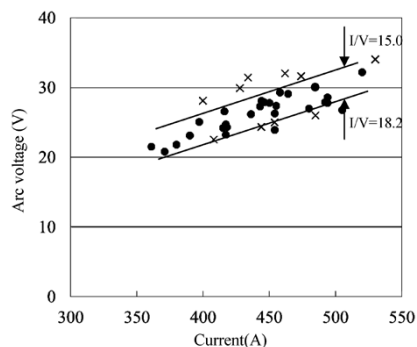


図8 L極溶接電流とアーク電圧の関係

Fig. 8 Relationship between current and arc voltage of leading electrode

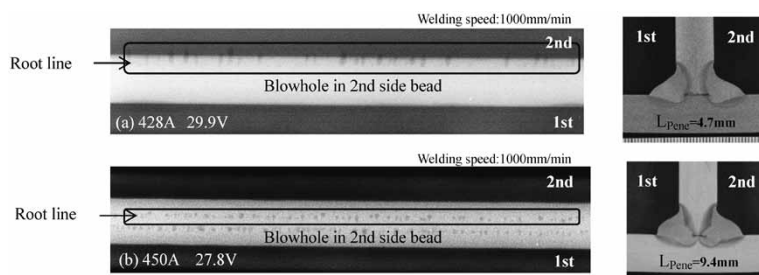


図9 RT観察結果と溶込み深さの比較

Fig. 9 Comparison of RT result and penetration depth

は多量のスパッタが発生する上、十分な溶込み深さを得ることができず、550 A以上ではアーク力およびL-T極間の湯溜(だ)まりが過大・不安定となり、正常なビード形成が困難であった。したがって、HT-MAGの適正なL極溶接電流範囲は400~530 Aである。

また、HT-MAGではL極を大電流の埋もれアークにすることが重要であり、適正な溶接電流・アーク電圧比(以下、I/Vという)領域がある。I/Vが大きいと、ワイヤが溶融プールに突っ込み過ぎた状態となり、安定した埋もれアーク溶接ができない。また、I/Vが小さいと、オープンアークとなり、低スパッタを維持できず深溶け込みが得られないため、耐気孔性も劣る。図8にL極溶接電流とアーク電圧の関係を示す。I/Vの適正範囲が15.0~18.2となることわかる。

### 3.3 溶込み深さと気孔発生量の関係

つぎに、溶接条件を変化させて溶込み深さとブローホール発生量の関係を確認した。ブローホール発生量を評価するため、脚長7 mm程度の両側水平すみ肉溶接を行い、図2に示す方法でRTを行った。また、RTフィルムから測定した溶接線100 mmあたりの気孔面積の合計値をブローホール発生量として比較した。一例として、 $L_{Pene}$ が大・小の試験体のRTフィルム写真と断面マクロ写真を図9に示す。 $L_{Pene} = 4.7$  mmの場合、ビード内部に大きく成長した多量の気孔が発生していることがわかる。いっぽう、 $L_{Pene} = 9.4$  mmの場合、気孔が生じてもルート部近くで成長が止まり、ビードの奥に残留する。

溶込み深さ $L_{Pene}$ とブローホール発生量の関係を図10に示す。溶込み深さが大きくなるとともに、ブローホール発生量も少なくなることがわかる。深溶け込みにすることで、気孔低減に有利であることが示唆される。その原因はプライマガスがアーク直下でより効率的に排出さ

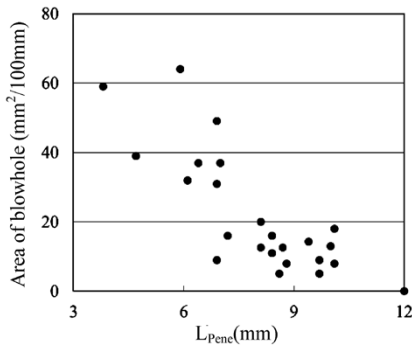


図10  $L_{Pene}$ とブローホール発生量の関係  
Fig.10 Relationship between  $L_{Pene}$  and area of blowhole

れるためと考えられる。

### 3.4 従来法とHT-MAGにおける気孔発生の可視化

上記気孔形成現象を確認すべく、高輝度X線透過型装置を用いて溶接中の溶融池内気泡の挙動を観察した。造船分野で使用するプライマ塗布鋼板のプライマ膜厚は15  $\mu\text{m}$ が標準であるが、本試験は膜厚を30  $\mu\text{m}$ による加速試験とし、かつ明瞭なX線像を得るべく、重ねすみ肉継手にて観察した(図11)。また、いずれも1stビード側を溶接し、背面からのプライマガス放出経路が断たれた状態で、逆側である2ndビード側を観察した。

従来法による溶接中の溶融池内気泡の挙動観察結果を図12に示す。アーク直下の点線は固液境界線を示しており、溶込み深さを意味している。溶融池内にブローホールが存在すると、X線像では周りよりも白く写る。板合わせルート部にて酸化したプライマガスがアーク直後の溶融池内部に侵入し、ルート部を起点に成長することによってブローホールあるいはピットが形成されていく様子が観察された。

いっぽう、図13に示すHT-MAGでは、L極のワイヤ先端が溶融池内部に埋もれ、そのアーク力によって母材が深く掘り下げられている様子が観察された。このような状態を安定・維持させると、溶融池内で気孔が成長しないことがわかった。アーク直下の溶融池厚さが減少し、プライマガスの圧力を抑え込む力が相対的に低減されて、プライマガスが溶融池前方から外へ排出される。すなわち、プライマガスが溶融池外に抜けるルートが確保されることが、溶融池内で気孔が成長しない理由と考えられる(図14)。

## 4. HT-MAGの効果

### 4.1 耐気孔性向上効果

表1に示す水平すみ肉継手(板厚12mm)で、HT-MAGにより溶接した結果を図15に示す。従来法であるタンデム法(図3)と同一溶接速度1,000mm/minにおいて、1st側、2nd側ともに気孔の発生は認められなかった。断面マクロを確認した結果、従来法であるシングル法およびタンデム法では、板合わせルート部に約7mmの未溶融部長さ $L_{Root}$ がある。これに対して、HT-MAGでは完全溶込みとなっている。

また、溶接速度あるいは板厚が増加すると、完全溶込みが達成されなくなるが、気孔欠陥は大幅に増加しない

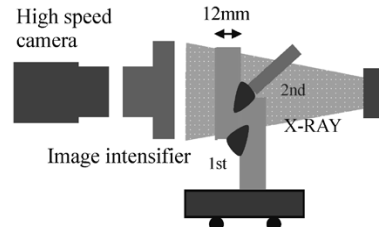
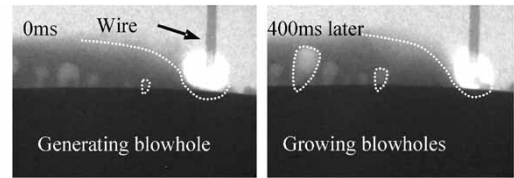


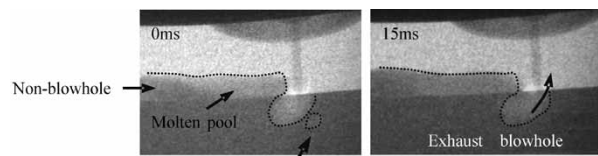
図11 X線観察方法  
Fig.11 X-ray observation method



(Leading electrode:430A-32V, Trailing electrode:320A-30V, 1000mm/min)

図12 従来法の気孔挙動観察

Fig.12 Behavior of blowhole generation in conventional process



Residual blowhole caused by 1st side bead

(Leading electrode:500A-32V, Trailing electrode:300A-31V,1000mm/min)

図13 HT-MAGの気孔挙動観察

Fig.13 Behavior of blowhole exhausting in HT-MAG

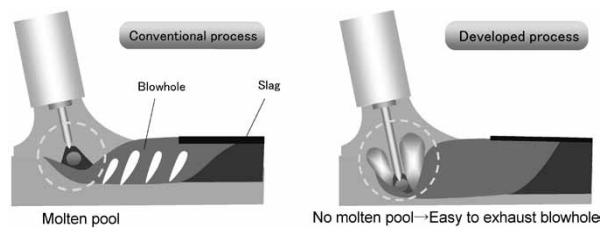


図14 気孔減少メカニズム

Fig.14 Mechanism of blowhole reduction



(Leading electrode:500A-32V, Trailing electrode:300A-31V,1000mm/min)

図15 HT-MAGのRT結果と断面マクロ

Fig.15 RT result and penetration of HT-MAG

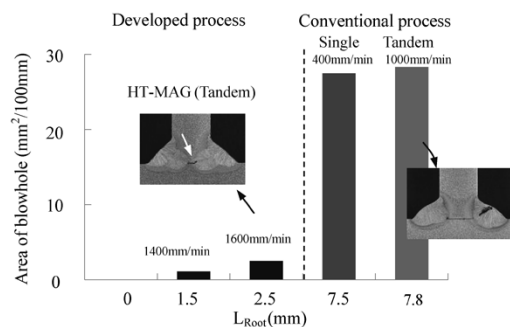


図16 ブローホール発生量の比較

Fig.16 Comparison of area of blowhole

ことを確認した(図16)。なお、断面マクロ写真でわかるように、従来法ではブローホールがビード表面近くまで大きく成長し、ビード表面をショットブラスト処理す

ると、ピットとして現れやすい。いっぽう、HT-MAGでは、気孔が生じてもルート部にとどまっているため、ピットになる問題も低減される。

#### 4.2 スパッタ低減効果

HT-MAGと従来法を用いて、下向きすみ肉溶接をした場合のスパッタ発生量を図17に示す。HT-MAGのスパッタ発生量は、従来タンデム法より66%低減される。HT-MAGがソリッドワイヤを用いた大電流の炭酸ガス溶接にも関わらずスパッタ発生量が少ない理由を調べるために、高速度カメラによる溶滴移行観察を行った。

一般的に、ソリッドワイヤの高電流炭酸ガス溶接では緊縮して高まったアーク力により押し上げられた溶滴が回転しながら周囲に飛散し、多量のスパッタになる(図18(a))。いっぽう、HT-MAGではアーク電圧を低く維持し、アーク長を著しく短くして埋もれアークにすることで、溶滴がグロービュール移行からスプレー移行に変化する(図18(b))。これは、アークが開先内に埋もれた

状態になるとワイヤ側面と開先面でアークが発生し、ワイヤ先端がシャープになって溶滴の離脱が容易になるためと考えられる。したがって、高電流炭酸ガス溶接でも深溶け込み化しつつスパッタを大幅に低減できることがわかった。

#### 5. 下向き突合せ溶接への適用

従来法であるSAW法は大入熱溶接法であるため、板厚9mmにおける中薄板の下向き突合せ溶接では、ひずみが大きい問題がある。そこで、HT-MAGの深溶け込み特性を生かした高速溶接による入熱量の低減およびひずみ低減効果を検証した。HT-MAGと従来法であるSAW法による板厚9mmのI開先の下向き両面突合せ溶接でのビード外観、断面マクロ写真、ひずみ測定の結果を図19に示す。HT-MAGの溶接速度はSAW法の約2倍であるにもかかわらず、完全溶込みとなる。また、試験体の幅方向および長手方向にてひずみを測定した結果、HT-MAGはSAW法に比べて、ひずみが最大1/5にまで低減していた。

また、従来のガスシールドアーク溶接法を用いた中厚板溶接では、開先加工を行い、多層溶接を行っている場合がある。そこで、HT-MAGの深溶け込みを生かし、開先加工をなくして施工能率を向上させることが可能かを検討した。板厚16mmI開先での両面溶接試験を行った。そのときの条件はL極溶接電流を460A、500A、溶接速度1,000mm/minとした。結果を図20に示す。試験結果より、460A以上では1パス完全溶込み溶接が可能であることがわかった。HT-MAGを用いることによ

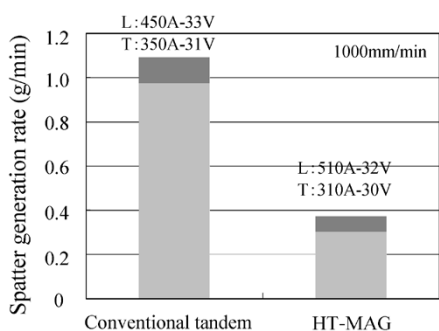


図17 スパッタ発生量の比較  
Fig.17 Comparison of spatter generation rate

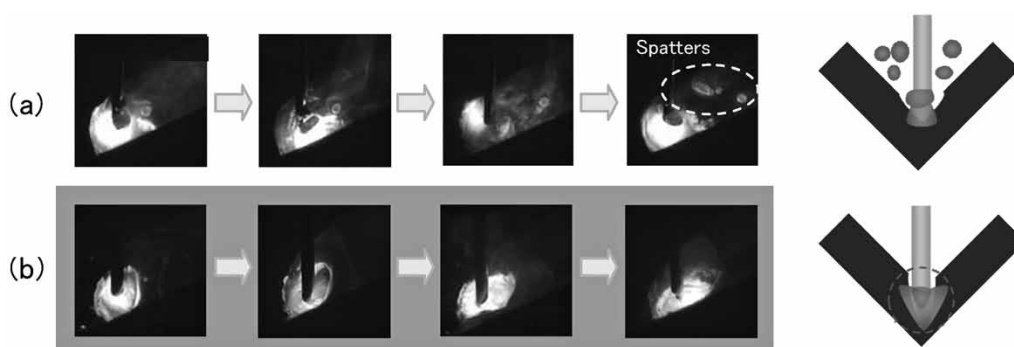


図18 溶滴移行の観察  
Fig.18 Observation of droplet transfer  
(a) Conventional CO<sub>2</sub> welding process (b) HT-MAG

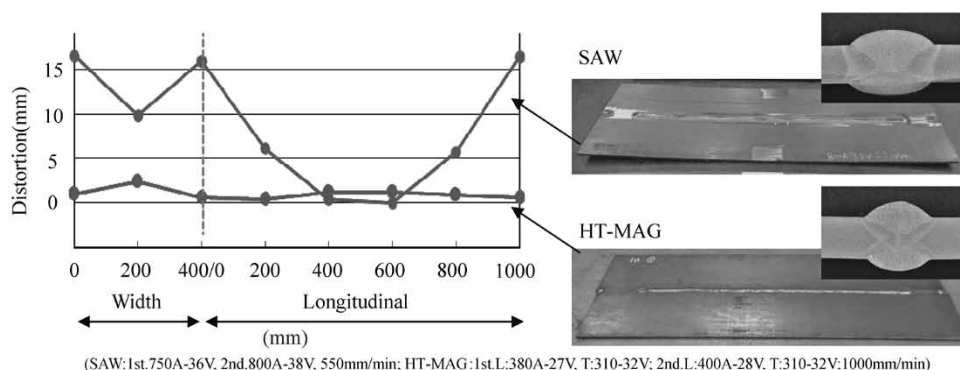


図19 I開先溶接のビード外観と断面マクロの比較(板厚9mm)  
Fig.19 Comparison of bead appearance and cross sectional macrostructure of I butt welding (Thickness: 9 mm)

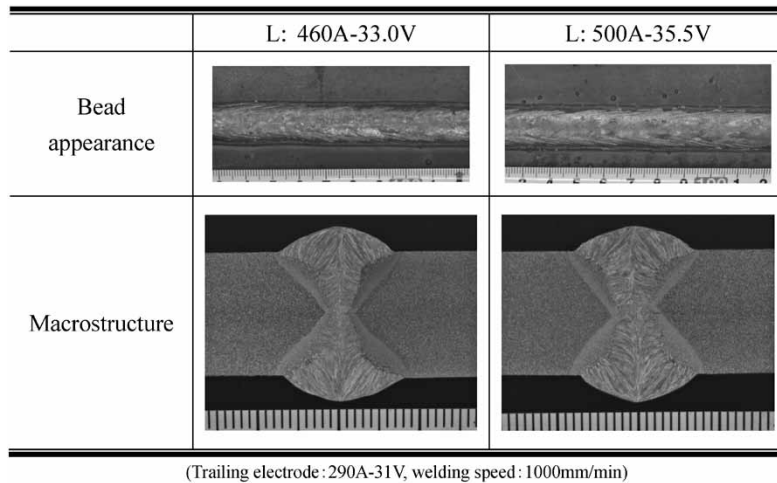


図20 I開先溶接のビード外観と断面マクロの比較 (板厚16 mm)

Fig.20 Comparison of bead appearance and cross sectional macrostructure of I butt welding (Thickness: 16 mm)

り、開先加工が不要となり、施工能率が向上する可能性が示唆された。


**むすび** = 当社ではアーク直下の排出経路の安定開口を実現するために、最適な溶接材料、トーチ配置や溶接条件の組合せを見だし、耐気孔性向上・深溶け込みを特徴とする「ハイブリッドタンデムマグ溶接法」を開発した。また、高輝度X線透過型装置を用いてこれまで十分に解明されていなかった気孔発生現象を明らかにした。

今後は実用化のための問題を解決し、実施工条件を確立していく。また、当社の強みを活かし、溶接材料、施工法を組合せた新たな溶接ソリューションを引き続き提供していく。

#### 参 考 文 献

- 1) 鎌田政男. 溶接学会誌, 1993, Vol.62, p.507.
- 2) 鎌田政男ほか. 溶接学会全国大会講演概要, 1991, Vol.48, p.78.
- 3) 真木成美ほか. 溶接学会全国大会講演概要, 1988, Vol.43, p.234.
- 4) 黒川剛志. 神戸製鋼技報, 2000, Vol.50, No.3, p.74-77.
- 5) 袁 倚旻ほか. 溶接学会全国大会講演概要, 2012, Vol.90, p.8-9.
- 6) 袁 倚旻ほか. 溶接学会全国大会講演概要, 2013, Vol.92, p.16-17.
- 7) 袁 倚旻ほか. 溶接学会全国大会講演概要, 2014, Vol.94, p.124-125.
- 8) 袁 倚旻ほか. 溶接学会溶接法研究委員会, 2014-11.
- 9) 泉谷 瞬ほか. 溶接学会全国大会講演概要, 2012, Vol.90, p.92.
- 10) 中村一生ほか. 溶接学会全国大会講演概要, 2012, Vol.90, p.94.
- 11) 泉谷 瞬ほか. 神戸製鋼技報, 2013, Vol.63, No.1, p.54-59.

PDFにて本記事をご覧の方へ

図12, 図13にある動画マーク  をクリックいただくと動画が再生されます。