

# 狭開先ガスシールドアーク溶接技術

## Narrow Gap Gas Metal Arc (GMA) Welding Technologies

村山 雅智 MURAYAMA Masatoshi JFE エンジニアリング 産業機械本部 重工センター 主幹  
尾座本大輔 OZAMOTO Daisuke JFE エンジニアリング 鋼構造本部 津製作所 計画室  
大江 謙介 OOE Kensuke JFE エンジニアリング 産業機械本部 重工センター 計画室

### 要旨

NKK (現 JFE エンジニアリング) 独自の狭開先溶接法として 1980 年代に開発した高速回転アーク法の最近の実施状況を紹介します。エンジン架構の狭開先溶接では、開先幅変動対応を目的に溶接速度の適応制御機能を開発し、自動溶接後の余盛調整作業を不要化した。また、1 人 2 台操作の無監視タンデム工法も採用することにより、リードタイムを従来の半分以下に短縮した。さらに、狭開先溶接のさらなる革新を目的に開発した反転円弧ウィーピング機能により、タービン部材の傾斜継手にも適用範囲を拡大するとともに、開先幅を現状の 13 mm から 8 mm 程度に低減できる見通しを得た。

### Abstract:

This paper describes the latest implementation status of the narrow gap welding process by the high speed rotating arc method developed by JFE Engineering in 1980s. In case of the engine crankcases, adaptive control function of the welding speed corresponding to the variation of the groove width has been newly developed. Tandem welding system by one operator without watching the two equipment has been also employed, shortening the welding lead-time to less than half that of the conventional method. Furthermore, for innovation of the narrow gap welding, another oscillation pattern of the welding torch by the circular weaving has been added to the conventional equipment. In case of the turbine members, application range has been expanded to be able to apply to the inclined narrow gap joints, and it was confirmed that the groove width could be decreased from the conventional 13 mm to about 8 mm.

## 1. はじめに

板厚が 50~100 mm を超えるような極厚鋼板の溶接では、開先断面積の大幅な縮減が図れる I 形狭開先継手の採用が有効であり、1980 年代よりさまざまな狭開先溶接方法が開発・実用化されてきた。この I 形狭開先継手は、溶着量の大幅な減少により厚板になるほど溶接時間を短縮できるだけでなく、溶接入熱低減による低ひずみ化や再熱による靱性改善効果が得られるため、種々の大型重要構造物に広く適用されている。NKK (現 JFE エンジニアリング) においても「高速回転アーク式狭開先溶接方法」を独自開発し、1980 年代より自社製品への適用や外販を行ってきた。その後も、さらなる高能率化や自動化レベルの向上を目的に、アークセンサによる溶接速度の適応制御機能の開発や新たな揺動パターンの追加による適用拡大を進めてきた。

本報告では、高速回転アーク狭開先溶接法の概要と最新の実用化状況を紹介するとともに、反転円弧ウィーピング機能の追加による溶込み形状の改善や開先幅変動対応性の向上、傾斜継手などへの適用拡大、さらなる狭開先化への取り組み状況について報告する。

## 2. 高速回転アーク狭開先溶接法

### 2.1 狭開先溶接法の歴史と種類

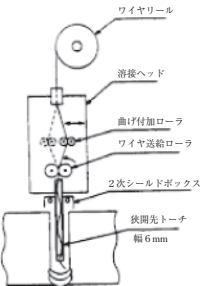
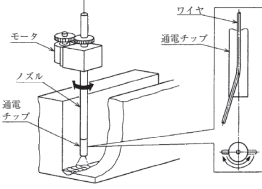
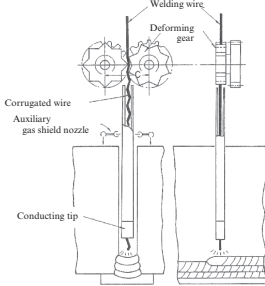
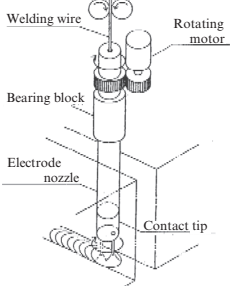
狭開先溶接 (Narrow gap welding) は米国の Battelle 研究所で 1963 年に開発され、各国で多くの研究開発が行なわれたが、実用化は日本が最も熱心であり、1980 年代にさまざまな狭開先溶接法がわが国で一斉に開花した感があると言われている。狭開先溶接の定義にはさまざまな解釈があるが、「板厚 30 mm 以上の厚板を、板厚に比して小さな間隙 (板厚 200 mm までは約 20 mm 以下、それ以上は約 30 mm 以下) で開先を対向させ、機械化または自動化したアーク溶接方法」という当時の専門委員会の定義が一般的である<sup>1)</sup>。

狭開先溶接プロセスは多岐に渡っており、開発当初は GMAW (ガスシールドアーク溶接) が主流であったが、その後もサブマージアーク溶接やティグ溶接などのさまざまな溶接プロセスにおいて開発が進められた。また、溶接姿勢も最初は下向溶接が主流であったが、横向や立向姿勢での狭開先溶接プロセスも数多く開発されている<sup>2)</sup>。

最も適用例が多い下向姿勢の GMAW による主な狭開先溶接方法を、表 1 (1999 年の溶接学会誌からの引用) に示す。方式 (a) と (c) は、いずれもワイヤに曲がりグセを与えることにより、狭開先内でアークを揺動させているが、曲がり

表1 狭開先ガスシールドアーク溶接装置の例<sup>3)</sup>

Table 1 Examples of narrow gap gas metal arc (GMA) welding equipments

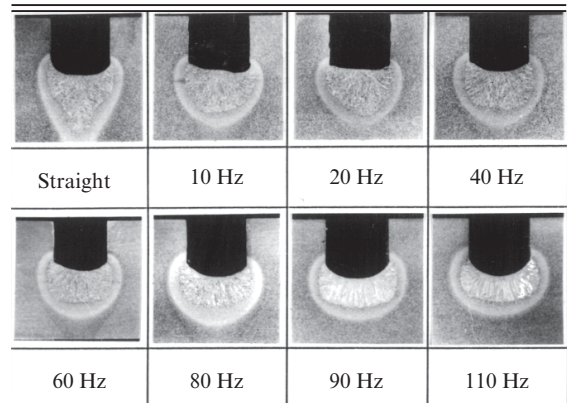
方式	(a) 波状ワイヤ	(b) 曲がりチップ	(c) 屈曲チップ	(d) 高速回転アーク
装置の原理				
開先幅	開先幅：9 mm (8~14) トーチ：6 mm <i>t</i> -35 mm <i>w</i>	16 (15~20) mm ノズル：φ8 mm	11~13 mm トーチ：8 mm <i>t</i> -65 mm <i>w</i>	12~18 mm ノズル：φ8 mm
標準溶接条件	ワイヤ径：1.2 mm アーク電流：240 A, Pulsed 溶接速度：210 mm/min ガス：20% CO <sub>2</sub> -Ar	1.2 mm 110~180 A, Pulsed 150~180 mm/min 20% CO <sub>2</sub> -Ar	1.2 mm 260~270 A, Pulsed 210 mm/min 20% CO <sub>2</sub> -Ar	1.2 mm 300~350 A 220~300 mm/min 20% CO <sub>2</sub> -Ar
アーク周波数	0.5~1.5 Hz 振幅調整容易	0.2~0.6 Hz 振幅調整容易	4~15 Hz ワイヤ屈曲幅：2~4 mm	最大 150 Hz 回転直径：7.6 mm
特徴	・真横方向に低速でオシレイト。	・細密な制御で熟練作業者の動作再現。前進角か後退角。	・シンプルかつ再現性の高いオシレイト機構。	・アーク電圧を利用した開先倣いが容易。

グセ付加機構の違いにより揺動周波数は (c) の方が高くできる。一方、方式 (b) と (d) は、いずれも通電チップを偏芯させて電極を廻すことによりアークを揺動させているが、揺動周波数は方式 (d) が格段に速く、アークセンサによる開先自動ならい機能が特長となっている。この方式 (d) が、当社が独自に開発した高速回転アーク狭開先溶接法<sup>4)</sup>である。

### 2.2 高速回転アーク溶接法の特徴

本法の回転機構の原理を、表1の (d) を用いて説明する。溶接ワイヤは電極ノズルの中心に送給され、通電チップの偏芯孔によって所定の偏芯量が与えられる。電極ノズルはベアリングで支持され、電動モータにより同一方向に高速回転される。したがって、溶接ワイヤとその先端のアークはチップ孔の偏芯量に対応した直径で高速回転する。アークの高速回転は、アークの熱や圧力を分散させるため、ビード形成現象に顕著な改善効果を与える。

狭開先溶接ビード形状に及ぼすアーク回転速度の影響を図1に示す。溶接ワイヤは1.2 mm ソリッドワイヤ、シールドガスは20% CO<sub>2</sub>-Ar、溶接電流は300 A、回転直径は8 mm である。回転なしの場合は、マグ溶接特有の中央集中型の溶込みとなっているが、アークを回転させると分散型の幅広の溶込み形状となり、側壁への溶込みが増加している。また、ビード表面も湾曲して、多層溶接に適した形状となっている。アークの回転によるビード形状の改善効果は40 Hz 以上で顕著となっているため、回転速度の標準は50 Hz としている。また、アークの高速回転はアークセンサの検出能



1.2 mm solid wire, 20% CO<sub>2</sub>-Ar, Welding current: 300 A  
Rotating diameter: 8 mm, Welding speed : 250 mm/min

図1 ビード形状に及ぼす回転速度の影響

Fig. 1 Influence of the rotating speed on the bead shape

力や応答性を飛躍的に向上するため、良好な開先自動ならい制御が得られる。したがって、トーチの狙い位置は常に開先中央に保持され、左右均等の安定した側壁の溶込みが得られる。

### 2.3 高速回転アーク溶接法の適用例

高速回転アーク狭開先溶接法の主な適用例とビード断面の一例を写真1に示す。当社における主な適用対象は、(a) のピストンシリンダーのような重機械部品や (b) の鉄骨BOX柱<sup>5)</sup>のような鉄骨・橋梁製品であり、板厚の最大適用実績は275 mm である。また、特殊な用途として、(c) に示

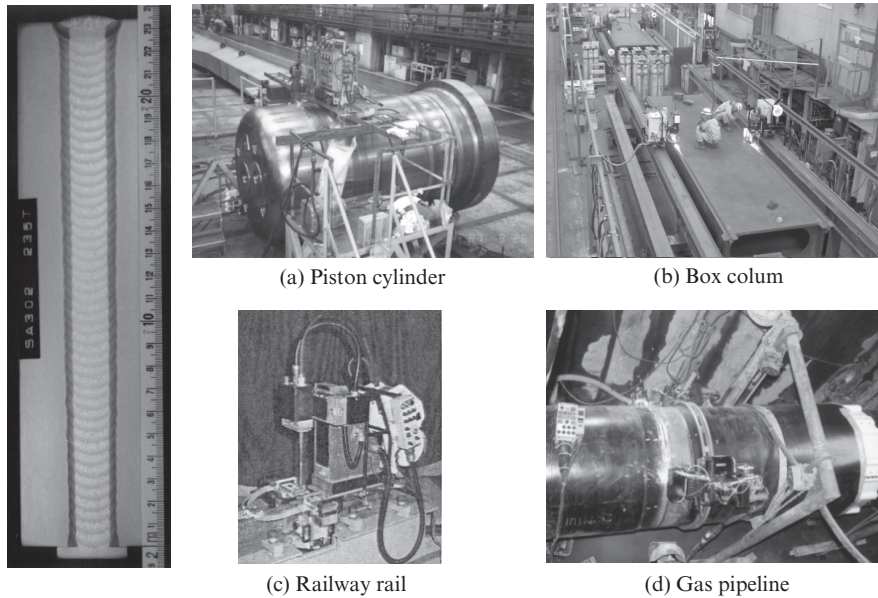


写真1 高速回転アーク狭開先溶接の適用例

Photo 1 Applications of the High Speed Rotating Arc welding process

す鉄道レールのエンクローズ溶接<sup>6)</sup>や(d)に示すガス導管の円周溶接<sup>7)</sup>などに適用された実績がある。

### 3. 最近の実用化状況

#### 3.1 開先幅変動への対応機能

高速回転アーク狭開先自動溶接装置では、1980年代の開発当初はアナログ基板を用いており、アークセンサ演算もオペアンプで行なっていたが、現在はすべてシーケンス制御化し、溶接条件や制御定数の設定も調整つまみ方式からタッチパネルに進化してきた。これに伴い、溶接自動化機能の向上や溶接機の操作性改善も図ってきた。本節では、その一例として、アークセンサによる溶接速度（溶着量）の適応制御機能について概説する。

実製品の狭開先継手幅は均一ではなく、溶接位置に応じ

て変動している。これは、開先加工や組立の誤差だけでなく、継手の拘束度が溶接線全長で均一でないため、収縮量が場所により変動するためである。写真2に、板厚140mm、全長約5mのエンジン架構における溶着ビード外観の一例を示す。溶着ビード高さは最大で15mm以上変動しており、自動溶接の後に煩雑な余盛調整作業を行なう必要があった。

そこで、アークセンサによるトーチ高さ制御の結果から、溶着ビード高さの変動を検出し、それが均一となるように溶接速度をインプロセスで自動調整する機能を追加した。実工事における最終パス溶接前のビード外観を写真3に示すが、溶接線全長にわたりビード高さがほぼ均一に制御されていることが分かる。溶着ビード高さの検出結果はタッチパネルで確認できるようになっており、最終パス直前のビード高さ変動は±1mm以内に抑えられていることを確認している。この溶接速度の適応制御機能、すなわち開先幅変動対

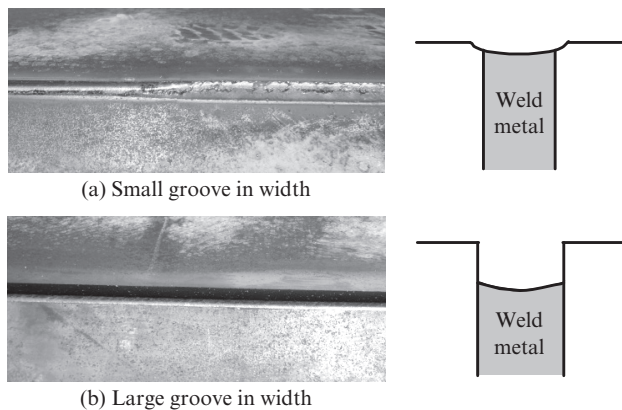


写真2 溶着ビード高さ変動の一例

Photo 2 Weld bead variation without the welding speed control



写真3 溶接速度適応制御結果の一例

Photo 3 Adaptive control of the welding speed

応機能の追加により、本溶接後の煩雑な余盛高さ調整作業が不要化されるとともに溶接品質の安定化が図られた。

### 3.2 タンデム1人2台操作化

アークセンサによる溶接線自動ならい制御と溶接速度の適応制御を行なっているため、オペレータは溶接開始直後にアークを確認するだけで、それ以降は基本的に無監視で施工している。そこで、1台のワークに対し1人のオペレータで2台の狭開先溶接機を操作するタンデム工法を採用した。写真4にタンデム施工状況の一例を示す。先行機と後行機は若干の車間距離を設けて同方向に走行しており、スラグ除去後、溶接方向を反転して、逆の順序で次層のタンデム溶接を行なっている。タンデム工法の採用により、単位時間あたりの積層パス数は約1.75倍となり、溶接能率が大幅に向上した。

### 3.3 さらに狭開先化への要求

前述の制御装置のデジタル化による操作性向上、溶接速度の適応制御による余盛調整溶接の不要化、タンデム化による能率向上により、エンジン架構部材1台当たりの溶接



写真4 タンデム狭開先自動溶接の状況

Photo 4 Tandem narrow gap welding of the engine crankcase

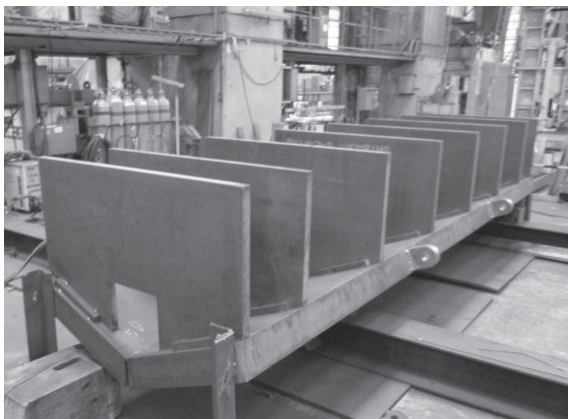


写真5 狭開先継手の変形拘束板

Photo 5 Distortion restrained members of the narrow gap joint

リードタイムは従来の半分以下に短縮された。また、プロセスの改良後は溶接欠陥も発生していないため、これ以上の能率向上に対する現場からの要求は強くないが、溶接変形を抑制したいというニーズは根強く残っている。写真5に、エンジン架構部材の変形拘束板の外観を示す。30パス以上の狭開先溶接による角変形を抑制するために8枚もの拘束板を取り付けているが、この取り付けおよび取り外しの工数は、本溶接工数以上となっており、溶接変形抑制の観点から現状13mmとしている開先幅のさらなる削減が求められている。

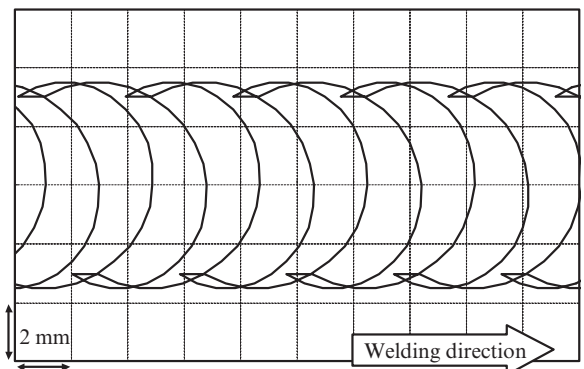
## 4. 狭開先 GMA 溶接法の革新検討

### 4.1 反転円弧ウィービング工法の概要

現状の高速回転アーク式狭開先溶接では、アーク回転直径を溶接中に変更することができないため、開先幅が規定よりも小さくなるとアークが側壁に這い上がり溶接が不安定になるなど、開先幅変動に対する裕度が大きくないという課題があった。また、実質のウィービングパラメータは回転速度だけなので、開先幅方向の入熱分布をコントロールすることはできなかった。そこで、溶接装置はそのまま、トーチの回転方向を一方方向の連続回転から反転円弧ウィービングに変更することにより、開先幅方向の入熱分布を制御することを試みた。

図2に、反転円弧ウィービングの揺動条件とトーチ軌跡の一例を示す。この揺動条件は、狭開先コーナー部の溶込み確保を重視したものであり、旋回中心は溶接進行方向の前方、旋回角度は $\pm 120^\circ$ 、端部停止時間は各0.2s、揺動周波数は1.2 Hz (旋回速度は $1080^\circ \text{ s}^{-1}$ )として、開先コーナー部への入熱増加を図っている。

図3に、初層溶接における溶込み形状の従来法との比較を示す。従来の高速回転アーク溶接における開先コーナー部の溶込みは小さいが、反転円弧ウィービング法では、開



Weaving angle:  $\pm 120^\circ$ , End stopping time: 0.2 s  
Weaving frequency: 1.2 Hz, Welding speed: 250 mm/s

図2 反転円弧ウィービング軌跡の一例

Fig. 2 Example of the trajectory in the circular weaving

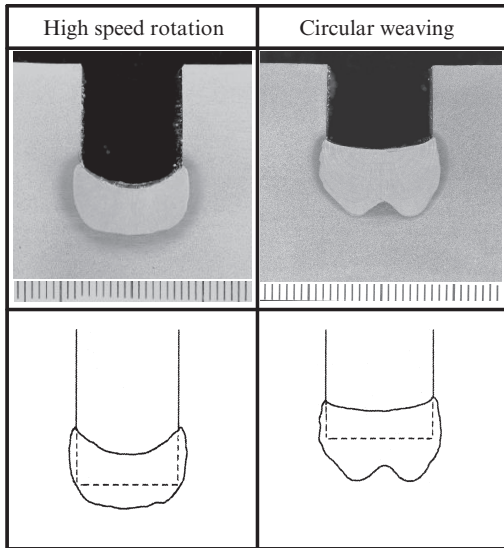


図3 ウィーピング方式によるビード形状の比較

Fig. 3 Comparison of the bead shape by torch weaving method

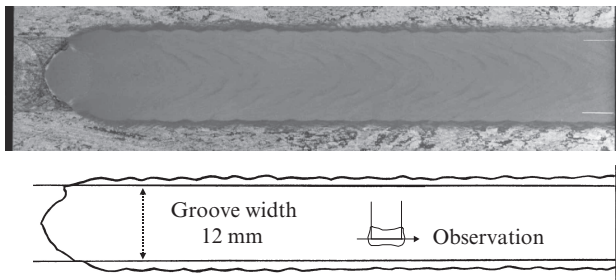


図4 反転円弧揺動における溶込み幅の観察結果

Fig. 4 Observation of the penetration width

先コーナー部の溶込み深さが増加し、双子山のような溶込み形状となっていることが分かる。また、開先底部における水平断面の溶込み形状を図4に示すが、開先幅方向の溶込みがトーチ軌跡に対応して揺動と同じ周期で波状に小さく変動していることが分かる。揺動周期が長すぎると揺動ピッチ間で溶込み不足が発生する恐れがあるので、反転円弧ウィーピングにおける揺動ピッチ（揺動1回当りの溶接進行距離）は5 mm 以下となるように揺動条件を設定している。

#### 4.2 傾斜継手への適用

反転円弧ウィーピングでは、揺動パラメータを左右非対称に設定することが可能なため、傾斜継手などの左右非対称継手への対応性も向上する。写真6にタービンダイヤフラムの15°傾斜狭開先継手への適用状況を示す。従来の高速回転アーク法では、傾斜下側の開先コーナー部の溶込みが浅くなり、融合不良が発生しやすかったが、反転円弧ウィーピング法では揺動条件を左右非対称として溶込み形状の改善を図ることにより、実施工にて安定な溶接品質が得られることを確認している。

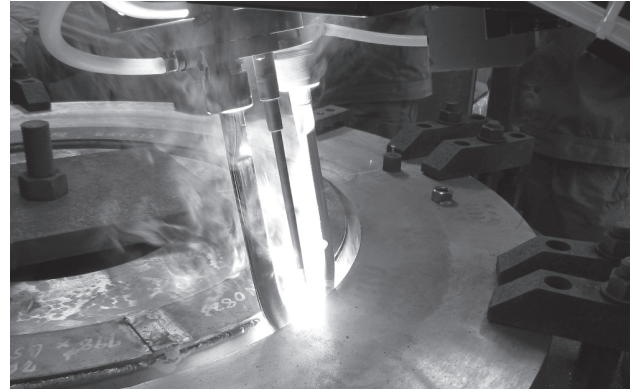


写真6 傾斜狭開先継手への適用状況

Photo 6 Application to the inclined narrow gap joints

#### 4.3 さらに狭開先化への取り組み

前述のタービンダイヤフラムの狭開先継手は、一方は極厚の炭素鋼であるが、片方は板厚6 mm程度の薄肉ステンレス鋼である。したがって、I形狭開先溶接であっても薄肉ステンレス鋼の溶接変形は大きく、さらなる小入熱化が求められていた。そこで、現状13 mmある開先幅の縮減について検討した。ティグ溶接では細幅のタングステン電極を用いて、5~6 mmの超狭開先溶接法が開発されているが、GMAWでは通電チップは消耗品であるため、市販の細径チップでの挿入限界と思われる開先幅8 mmを目標とした。

幅8 mmの狭開先溶接実験結果の一例を写真7に示すが、反転円弧ウィーピング法により良好な溶接結果が得られた。実製品と異なり、本試験片では拘束が弱いので、溶接収縮により側板が弓なりに変形している。そのため、狭開先継手の開先幅は、積層パスの進行により変動する。従来の高速回転アーク法では、揺動幅（回転直径）は固定であるが、反転円弧ウィーピング法では開先幅変動に応じて揺動幅を微調整することが可能であるため、開先幅変動に対する許容範囲が拡大した。なお、揺動幅の微調整方法は2通りの方式を併用しており、揺動幅を小さくする場合は、円弧揺動の旋回角度を減少させ、大きくする場合は、円弧揺動と同

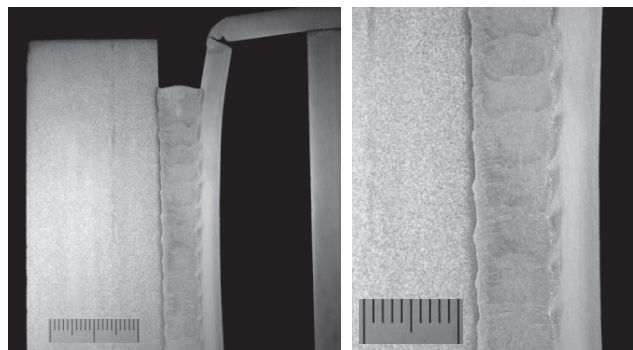


写真7 8 mm 狭開先溶接の一例

Photo 7 An example of 8 mm narrow gap welding

期して溶接トーチ横行軸の直線反復揺動を行なうようにしている。

#### 4.4 J-STAR® 溶接との組合せ

従来の狭開先溶接では、炭酸ガスシールドではスパッタが発生しやすいため、表1に示すように、溶滴移行がスプレーとなるマグガス（20% CO<sub>2</sub>-Ar）が採用されていた。一方、JFE スチールが開発したJ-STAR® 溶接<sup>8)</sup>では、炭酸ガスシールドでもスプレー移行になるため、スパッタが微小で少ないという特長を有している。

そこで、J-STAR® ワイヤによる狭開先溶接性を調査した。従来の高速回転アーク法では、J-STAR® ワイヤを用いても狭開先側壁方向への溶込みに有意差は認められなかったが、反転円弧ウィーピング法では溶込み深さの増加が確認された。

開先幅 8 mm の円弧ウィーピング溶接における溶込み形状の比較を写真8に示す。溶接電流・溶着ビード高さを一定として開先幅を減少させると、溶接速度を速くする必要があるため、溶接入熱は減少する。そのため、従来のマグ溶接では開先コーナー部の溶込みがギリギリとなっているが、J-STAR® 炭酸ガス溶接では十分な溶込みが得られていることが分かる。これは、J-STAR® 特有の強い溶融池対流やCO<sub>2</sub>ガスの解離熱による効果と思われる。また、高速回転アーク法では揺動速度が速すぎて、アーク直下に溶融池の窪みは形成されないが、揺動周波数が数ヘルツの反転円弧ウィーピング溶接では、溶融池に窪みが形成されるため、J-STAR® による溶込み深さの改善効果が顕著に現れたためと推察している。

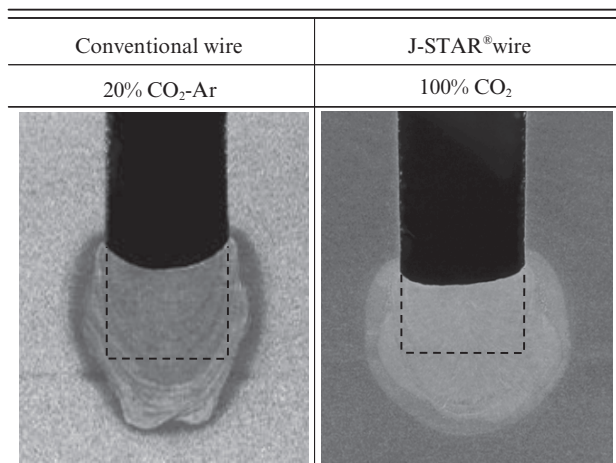


写真8 J-STAR® 狭開先溶接の溶込み比較  
Photo 8 Comparison of the penetration shapes

## 5. おわりに

当社独自の狭開先溶接法である高速回転アーク法の特長や適用例を説明するとともに、最近の実用化状況として、新たに開発した開先幅変動に対する溶接速度の適応制御機能や1人2台操作によるタンデム工法の適用状況を紹介した。また、さらなる狭開先化や傾斜継手対応など狭開先溶接の革新を目的に取り組んでいる反転円弧ウィーピング法に関する検討状況を報告した。以下に要点を列記する。

- (1) 開先幅変動への対応を目的に、アークセンサによる溶着量の適応制御機能を開発し、本溶接後の煩雑な余盛高さ調整作業の排除と溶接品質の安定化を図った。
- (2) さらに1人2台操作のタンデム工法も採用することにより、エンジン架構部材の溶接リードタイムを従来の半分以上に短縮した。
- (3) 現状の狭開先溶接装置に、新たに反転円弧ウィーピング機能を追加し、15°傾斜継手などの左右非対称継手にも適用範囲を広げるとともに、現状13 mmの開先幅を8 mm程度まで低減できる見通しを得た。

#### 参考文献

- 1) 溶接学会溶接法研究委員会編. ナロウギャップ溶接（狭開先溶接日本における現状）溶接法ガイドブック1. 1984, p. 13-24.
- 2) 波多野 怜, 飯島 史郎, 馬淵 洋三郎, 釜口 泰宏, 河野 隆之. 全姿勢対応狭開先 MAG 溶接法の開発. 三菱重工技報. 1995, vol. 32, no. 6, p. 379-382.
- 3) 堀勝 義, 羽田 光明. レビュー&トレンド狭開先アーク溶接. 溶接学会誌. 1999, vol. 68, no. 3, p. 179-198.
- 4) 杉谷 祐司, 小林 征夫, 村山 雅智. 高速回転アーク自動溶接法の開発と適用. 溶接技術. 1990-02, p. 92-98.
- 5) 岩田 真治, 村山 雅智, 小島 裕二. 極厚ボックス柱角継手への高速回転アーク狭開先溶接の適用. JFE 技報. 2008-08, no. 21, p. 15-19.
- 6) 杉谷 祐司, 西泰 彦, 上田 正博, 小島 裕二. ポータブルレール溶接ロボットの開発. NKK 技報. 1992, no. 138, p. 56-62.
- 7) 杉谷 祐司, 小林 征夫, 村山 雅智. パイプライン高速自動溶接システムの開発. 配管技術. 1992-09, p. 58-64.
- 8) 片岡 時彦, 池田 倫正, 安田 功一. 極低スパッタ CO<sub>2</sub> アーク溶接技術「J-STAR® Welding」の開発. JFE 技報. 2007-06, no. 16, p. 50-53.



村山 雅智



尾座本 大輔



大江 謙介