

2¹/₄Cr-1Mo鋼を対象とした 極狭開先サブマージーク溶接技術の開発



阿部	洋平	①
藤本	貴大	②
中谷	光良	③
中野	真克	④
安部	正光	⑤
小林	優一	⑥
田中	学	⑦
茂田	正哉	⑧

要旨

大型鋼構造物の製造において、溶接工程の高効率化は、生産性を高めるために必要である。開先角度をほぼ0°とし、初層から最終層までを一層一パスで施工する極狭開先サブマージーク溶接は溶接効率の大幅な改善が期待できるプロセスである。しかしながら、極狭開先溶接は通常の開先溶接と比較して、融合不良やスラグ巻込みといった溶接欠陥が生じやすく、実用化された例は少ない。そこで当社は、そのような溶接欠陥が生じない極狭開先溶接技術を開発することにした。

まず、デジタル波形制御電源を用いて、欠陥の生じない溶接条件範囲を明らかにし、次に、統計モデルと最適化手法を用いて、インプロセスで溶接条件を自動選定するプログラムを開発した。最後に、溶接品質を確認するため、圧力容器の一般的な材質である板厚120 mmの厚板試験体(2¹/₄Cr-1Mo鋼)に対し開発した技術を適用した。その結果、十分な品質が得られ、実用化できることが分かった。

キーワード

サブマージーク溶接, 極狭開先溶接, 融合不良防止, 最適化手法

1. 緒言

サブマージーク溶接(Submerged arc welding : SAW)は高い溶着効率、溶接品質から、圧力容器などの大型鋼構造物の突合せ溶接に多く用いられている。厚板や極厚板に対するSAWでは、融合不良(Lack of fusion : LF)などの溶接欠陥防止のため開先角度を30°程度まで広くするのが一般的である(図1(a))。しかし、開先角度が広がると開先断面積が大きくなり、積層に多大な時間を要する。

大型鋼構造物の製造において、溶接工程の高効率化は製品の競争力強化のために不可欠な課題である。これを解決するプロセスに狭開先溶接が挙げられる。開先角度を1~3°とした狭開先SAWでは、開先断面積が小さくなり、溶接時間を短縮できる(図1(b))。狭開先SAW

技術はこれまでいくつか研究開発が行われてきた^{1)~9)}。近年ではさらなる効率化のため、開先角度をほぼ0°とし、初層から最終層までを一層一パスで施工する極狭開先SAW(図1(c))の研究も進められている^{10) 11)}。

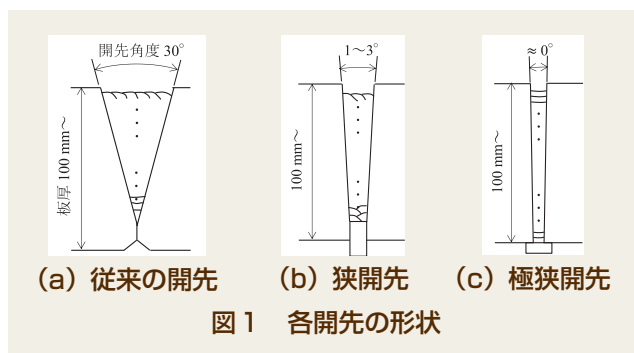


図1 各開先の形状

2. 開発背景

一層一パス施工では1パスで両側の開先壁を熔融させる必要があるが、開先底のコーナー部は熱が拡散しやすい¹²⁾ため熔融しにくく、融合不良が生じやすい。また、融合不良により溶接金属と開先壁間に隙間が生じた場合、溶接後に固着したスラグが十分に除去できずスラグ

① 開発本部 技術研究所 基盤技術研究センター 博士(工学)

② 開発本部 技術研究所 基盤技術研究センター

③ 機械・インフラ事業本部 開発センター 博士(工学)

④ 脱炭素化事業本部 開発センター

⑤ 脱炭素化事業本部 開発センター 博士(工学)

⑥ 脱炭素化事業本部 プロセス機器ビジネスユニット

⑦ 大阪大学 理事・副学長

⑧ 東北大学 大学院工学研究科 教授

巻込みの原因となる。極狭開先SAW実用化のためには、溶接中に刻々と変化する開先幅に応じて融合不良を防止するよう溶接条件を制御する必要がある。しかしながら、従来の可動鉄心形SAW電源では溶接条件をインプロセス制御することは難しく、極狭開先SAWはいくつか事例はあるものの、実用化は進んでいない。

近年ではデジタル波形制御が可能なSAW電源の開発が進み¹³⁾¹⁴⁾、従来の可動鉄心形と比較して自動化が容易になりつつある。また、溶接電流や溶接速度だけでなく、**図2**に示すように、極性比率（以下、棒マイナスの比率をEN比と呼称する）、周波数、トーチ間の位相差（タンデム溶接の場合）など出力波形をより精密に制御できる。同一の溶接条件でEN比を0.0から1.0まで変化させてビードオンプレート溶接したときの溶着断面積、ビード幅への影響を**図3**に示す。EN比が高くなるにつれビード幅は狭くなり、溶着断面積が増加する。このように、デジタル波形制御電源では、上記パラメータによる溶接部形状のインプロセス制御が可能となり、極狭開先SAWにおいて融合不良の防止が期待できる。

デジタル波形制御電源を用いることで、溶接条件の精密な制御が可能となる一方、EN比や位相差など、新たな溶接パラメータが追加され、溶接条件の選定はこれまで以上に複雑になる。さらに、現在のSAW施工は属人的であり、融合不良を防止できる適正な溶接条件は十分に解明されていない。また、大型鋼構造物では、加工や組立誤差によりルート幅が変化したり、台車の位置ずれにより溶接トーチの狙い位置が変化する。これらの変化に対し、複雑化した溶接パラメータの組合せから最適な条件を選定するのは容易ではない。

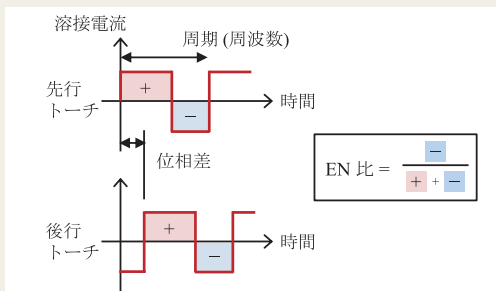


図2 デジタル波形制御電源の概要

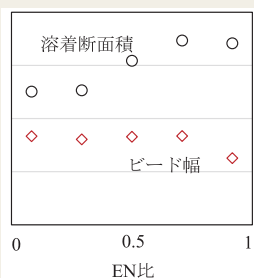


図3 EN比と溶着断面積、ビード幅の関係

本開発で、デジタル波形制御電源を用いた極狭開先SAW実用化のため、溶接中のルート幅やトーチ狙い位

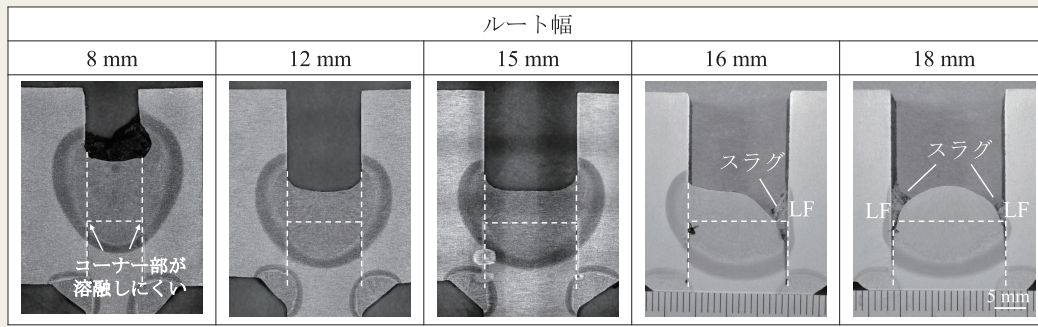
置が変化しても融合不良の生じない溶接条件範囲を明らかにした。また、統計モデルと最適化手法を用いて、その範囲内から溶接条件を自動選定するプログラムを極狭開先SAW技術に適用し、板厚120 mmの厚板試験体で、その効果を実証した。

3. 融合不良の防止手法

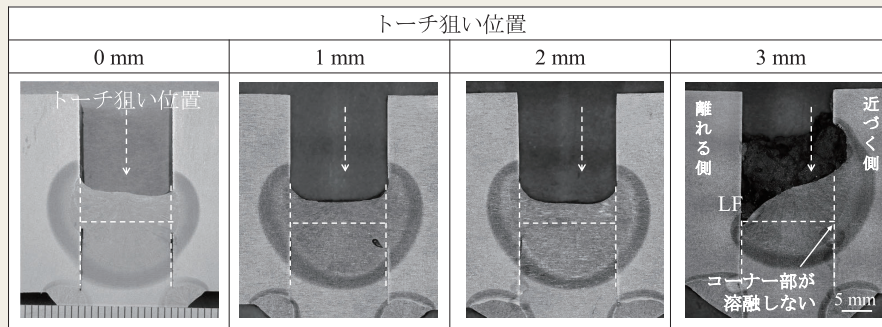
3.1 ルート幅、トーチ狙い位置と融合不良の関係

同一条件（EN比0.50、溶接電流600 A、電圧33 V、溶接速度30 cm/min）で、ルート幅を8~18 mmと変化した溶接部横断面マクロ試験結果を**図4 (a)**に示す。トーチ狙い位置は開先の中心とした。ルート幅8 mmでは融合不良は生じないが開先底のコーナー部はほとんど溶融しなかった。ルート幅12~15 mmではコーナー部も十分に溶融し、良好な溶接部となった。ルート幅16 mmでは片側の開先壁は溶融するが、反対側は溶融せず融合不良が生じた。ルート幅18 mmでは両側の壁面が溶融せず融合不良となった。同様の条件で、ルート幅14 mmの試験体に対し、トーチ狙い位置を開先中心から片側0~3 mmと変化した溶接部横断面マクロ試験結果を**図4 (b)**に示す。狙いずれ方向は図中の開先中心から右側である。トーチ狙い位置1~2 mmでは溶接部形状が狙いずれ方向（右側）に偏るが、融合不良は生じなかった。トーチ狙い位置3 mmではトーチが離れた側の開先壁は溶融せず、融合不良が生じた。一方、トーチが近づいた側では開先壁は溶融するが、開先底のコーナー部は溶融しなかった。

ルート幅およびトーチ狙い位置を**図5 (a)**に示すようにトーチ-開先壁間距離 L で表現する（例えばルート幅14 mm、トーチ狙いずれ0 mmでは $L = 7$ mm）。2章で述べたように、極狭開先溶接の融合不良は開先底のコーナー部で生じやすい。すなわち、コーナー部を幅広く溶融するほど融合不良は生じにくいといえる。そこで、**図4**の結果を L とコーナー部の溶融幅 W_G で整理したものを**図5 (b)**に示す。プロットは左右の開先壁それぞれで計測したものである。凡例は融合不良なし（○）、融合不良（×）を示す。コーナー部の溶融幅は $L = 5$ mm付近で極大となり、 L が大きくなると溶融幅は減少し、 $L \geq 8$ mmでは融合不良が生じる。これは熱源であるアークと開先壁までの距離が遠くなり、開先壁を十分に加熱できないためである。一方、アークと開先壁の距離が近い $L = 4$ mmでも溶融幅は減少すると考えられる。極狭開先の溶融池は、**図6 (a)**に示すように、アーク力によって溶融池を下向きに押し下げる力と、重力によって生じる溶融金属の位置ヘッドが釣り合う状態で形成されると考えられる。 L がある程度大きく、開先内で溶融金属量が大きくない条件では、アーク力と位置ヘッドは開先底付近で釣り合う。一方、**図6 (b)**に示すように、 L が小さく溶融金属が高くなる条件では、アーク力と位置ヘッドが開先底より高い位置で釣り合う。その結果、熱源であるアークの直下まで溶融金属が先行¹⁵⁾し、アークと開先底のコーナー部の距離が遠くなり十分に加熱できず、溶融幅が減少する。

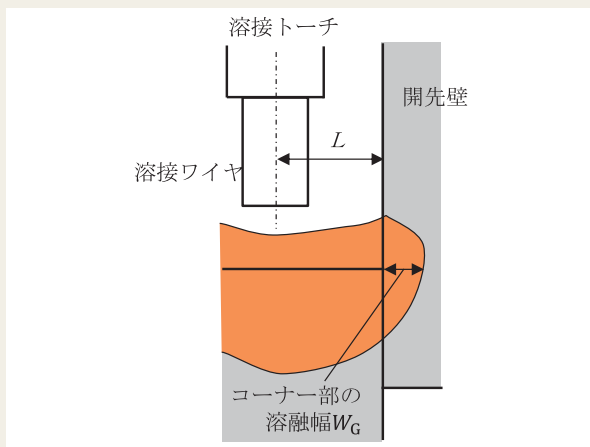


(a) ルート幅の影響

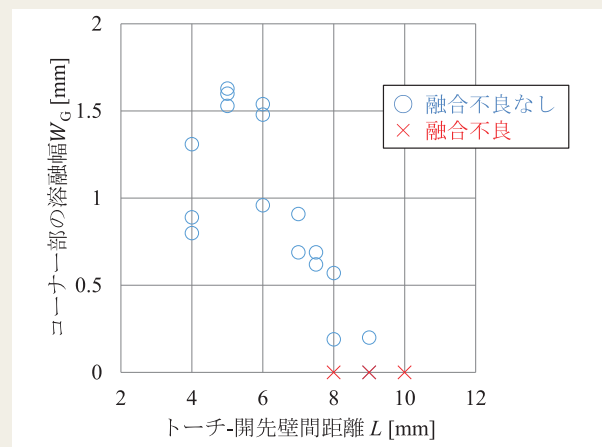


(b) トーチ狙い位置の影響

図4 ルート幅、トーチ狙い位置と融合不良の関係

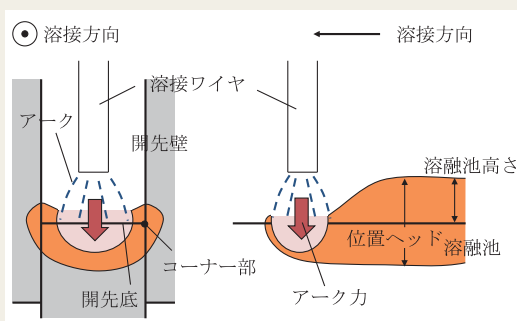


(a) トーチ-開先壁間距離 L の定義

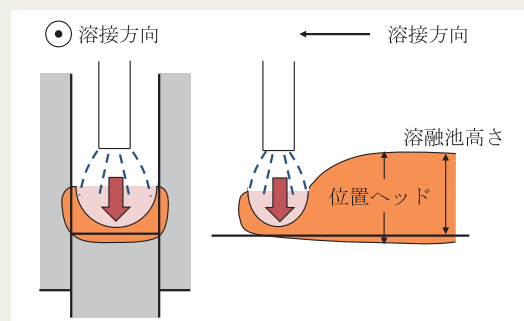


(b) L とコーナ部の溶融幅 W_G の関係

図5 トーチ-開先壁間距離 L とコーナ部の溶融幅 W_G の関係



(a) 良好な溶接の場合



(b) 溶融金属が高くなる場合

図6 極狭開先の溶接イメージ

3.2 融合不良判定モデル 前節では極狭開先で溶接実験を行い、同一条件でのトーチ開先壁間距離 L と融合不良(コーナー部の溶融幅)の関係を示した。しかし、様々な溶接条件でこれらの関係を示すには、非常に多くの実験を実施する必要があり、現実的ではない。そこで、ビードオンプレート溶接の実験結果から極狭開先での融合不良を判定するモデルを開発した。

融合不良判定モデルでは、ビードオンプレート溶接時の入熱量 Q [kJ/mm]、ビード幅 W_B 、溶着断面積 A_R 、トーチ開先壁間距離 L を用いて以下のパラメータを算出した。

$$H_G = Q/2 (W_B/2 - L) \quad (1)$$

$$r^2 = (A_R/2L)^2 + L^2 \quad (2)$$

H_G は開先壁への入熱、 r はアークから開先底のコーナー部までの距離を表す。 Q 、 W_B 、 A_R を変化させた14条件でビードオンプレート溶接と極狭開先溶接を行った。ビードオンプレート溶接で得られた Q 、 W_B 、 A_R から H_G 、 r^2 を算出し、極狭開先溶接から融合不良を判定した結果を図7に示す。凡例はそれぞれ、融合不良なし(○)、片側で融合不良(◇)、両側で融合不良(×)を示す。横軸 H_G が大きいほど開先壁への入熱量が大きく、縦軸 r^2 が大きいほど熱源と開先底のコーナー部が遠い。図7において $r^2=70$ mm²で比較すると、 $H_G=0.8$ kJ/mm・mmの条件では両側で融合不良となるが、 $H_G=12.5$ kJ/mm・mm以上の条件では融合不良は生じなかった。つまり、 H_G が大きいほど融合不良が生じにくい。また、 $H_G=10$ kJ/mm・mmで比較すると、 $r^2=75$ mm²の条件では片側で融合不良となるが、 $r^2=63$ mm²の条件では融合不良は生じなかった。 H_G により融合不良が生じない r^2 の限界値が存在する。

以上より、溶接時の L に応じて、図7の判定線から融合不良がないと判断される H_G および r^2 、すなわち、 Q 、 W_B 、 A_R の範囲を求めることができる。

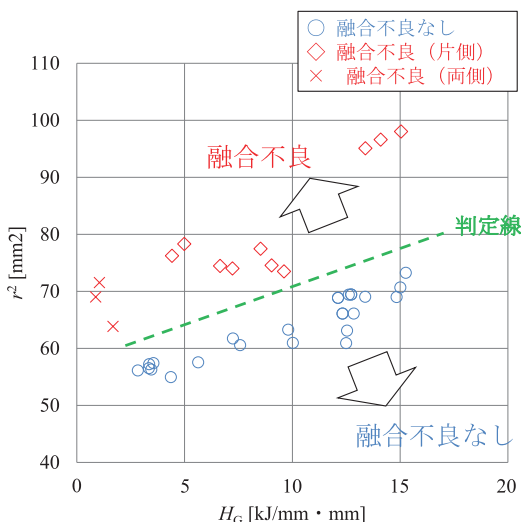


図7 融合不良判定モデル

4. 溶接条件選定プログラムの開発

4.1 プログラムの概要 前章では、ビードオンプレート溶接時の入熱量 Q 、ビード幅 W_B 、溶着断面積 A_R から極狭開先溶接時の融合不良を判定するモデルの開発について述べた。溶接中のルート幅やトーチ狙い位置(すなわち、トーチ開先壁間距離 L)に対し、適正な Q 、 W_B 、 A_R の範囲から溶接条件を適宜選定できる。そこで、実施工で広く用いられるタンデム溶接を対象とし、目的の W_B 、 A_R となる溶接条件を選定するためのプログラムを開発した¹⁶⁾。

開発したプログラムの概要を図8に示す。本プログラムは溶接部形状モデル(図8①)と最適化手法(図8②)の2種のプログラムで構成される。溶接部形状モデルは予め実験で得た学習用データ(図8③)を基に、溶接条件に対し W_B 、 A_R を予測するもので、これ単体では目的の W_B 、 A_R となる溶接条件を選定できない。そこで、最適化手法を用いて、目的の溶接部形状となる条件を選定する。選定手順を以下に示す。

1. 制約条件(入熱量 Q [kJ/mm]等)と、溶接部形状の目標値(W_B [mm]、 A_R [mm²]等)を入力する(図8④、⑤)。
2. プログラムは②最適化手法により、①溶接部形状モデル内から、溶接部形状の目的値となる条件を選定する。制約条件を入力している場合、その条件範囲内で最適化する。
3. 選定された溶接条件(EN比、溶接電流[A]、溶接速度[cm/min]等)とその条件での予測値(W_B [mm]、 A_R [mm²]等)が出力される(図8⑥、⑦)。

4.2 溶接部形状モデル 溶接部形状モデルでは、溶接条件を $\vec{x} = ^T(\text{EN比、溶接電流 [A]、溶接速度 [cm/min]、}\dots)$ としたとき得られるビード幅 W_B 、溶着断面積 A_R を以下の線形モデルで表現した。

$$\sqrt{W_B} = C_1 + {}^T\vec{C}_3 \cdot \vec{x}, \quad \sqrt{A_R} = C_2 + {}^T\vec{C}_4 \cdot \vec{x} \quad (3)$$

ここで、 C_1 、 C_2 、 $\vec{C}_3 = ^T(C_{31}, \dots, C_{3m})$ 、 $\vec{C}_4 = ^T(C_{41}, \dots, C_{4m})$ はそれぞれ係数であり、学習用データから最小二乗法によって算出される。 m は溶接条件に含まれる溶接パラメータの数である。学習用データにはビードオンプレート溶接での実験結果を用いた。組合せる溶接パラメータはEN比(先行/後行トーチ)、電流(先行/後行トーチ)、位相差、溶接速度の6種類($m=6$)とした。各パラメータを変化させ、それぞれを組合わせた計27条件で W_B 、 A_R を学習させた。

4.3 最適化手法 最適化手法には、微分不可能あるいは非凸関数なモデルでも最適化が行えるよう、導関数を用いないNelder-Mead法を用いた。また、解が局所解に陥らないよう、マルチスタート方式と遺伝的アルゴリズムを適用した。

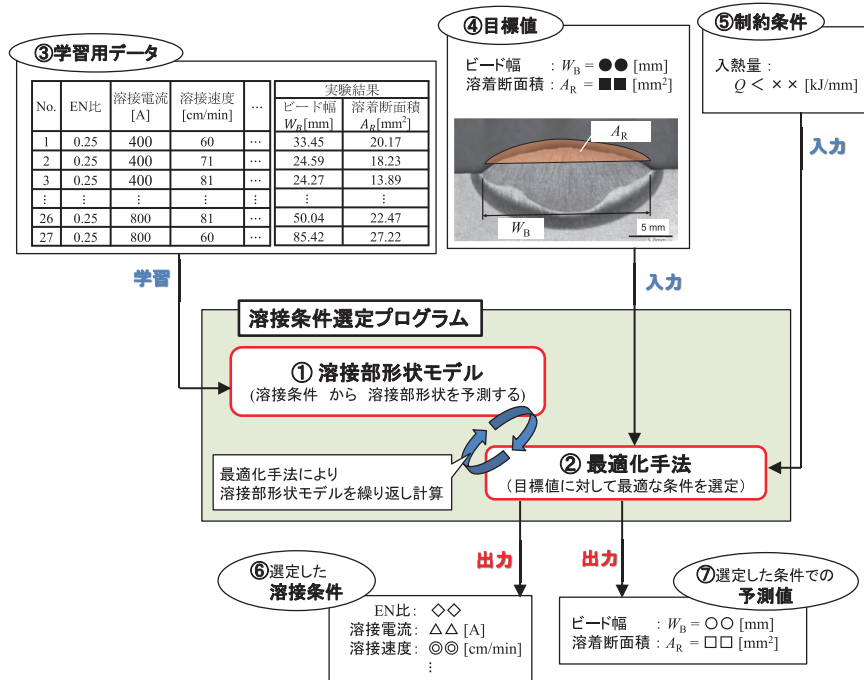


図8 開発したプログラムの概要

最適化では、溶接条件 \vec{x} の制約条件を X 、溶接結果 y の制約条件を Y 、各溶接部形状 $\theta = \{W_B, A_R\}$ の目標値を Tar_θ 、各 Tar_θ の重みを w_θ 、各 θ の予測値を y_θ^* とし、目的関数 f を以下の式で定義した。

$$f = \begin{cases} \sum_{\theta} \frac{w_{\theta} |y_{\theta}^* - Tar_{\theta}|}{\max_{\theta} - \min_{\theta}} & (\vec{x} \in X \cap \vec{y}^* \in Y) \\ \infty & (else) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 \max_{θ} 、 \min_{θ} はそれぞれ予測値 y_{θ}^* の最大値および最小値である。 f の値は各予測値 y_{θ}^* が Tar_{θ} に近づくとき小さくなるため、最適化手法を用いて最小となる溶接条件 \vec{x} を選定する。

5. 厚板試験体での実証試験

板厚120 mmの厚板試験体(材質: 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼)に対して開発した極狭開先SAW技術の実証試験を実施した。溶接条件は図7で融合不良がないと判断される範囲内から、溶接条件選定プログラムを用いて選定した。1層当りの積層高さ h の目標値が3.0 mm、かつ入熱量 Q が40 kJ/cm以内で最大となる条件とした。溶接部横断面マクロ試験結果を図9に示す。板厚120 mm(開先深さ110 mm)を29層で積層完了し、 $h=3.8$ mm程度となった。断面内に欠陥はなく、良好な溶接部が得られた。各種試験結果を表1に示す。溶接長500 mmの全線に対し、放射線透過試験(RT)および超音波探傷試験(UT)を実施した結果、いずれも無欠陥であった。また、ASME規格に準拠した各種破壊試験についても合格判定が得られた。以上の結果から、極狭開先SAW技術の溶接品質は十分であることが実証できたと考える。

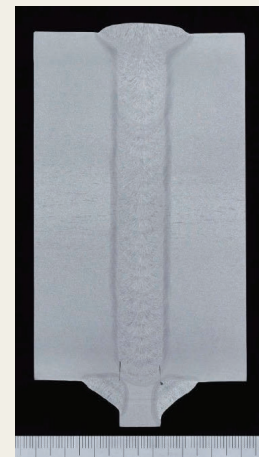


図9 実証試験体の溶接部横断面マクロ試験結果

表1 実証試験体の各種試験結果

試験項目	結果	判定
非破壊試験 (RT, UT)	指示なし	合格
シャルピー衝撃試験	106~153J (試験温度-30℃)	
引張試験	663~665 MPa	
側曲げ試験	クラック無し	
硬さ試験	最大232HV	
ステップクーリング試験	CvTr40 + 2.5 ΔCvTr40: -40.0℃	
高温引張試験	434~441 MPa (試験温度454℃)	

6. 結 言

本稿では、デジタル波形制御電源を用いた極狭開先SAW技術を実用化するため、溶接中に変動する開先幅やトーチ狙い位置に応じて融合不良を判定するモデルを開発した。また、デジタル波形制御電源を用いることで、これまで以上に複雑になる溶接パラメータに対して最適な溶接条件を選定するプログラムを開発した。最後に、厚板試験体で実証試験を行い、開発手法で十分な溶接品質が得られることを示した。

極狭開先SAW技術は大型鋼構造物製造の高効率化に有効なプロセスの一つである。今後は压力容器をはじめ、様々な製品へ本技術の適用を進めていく。

SDGsに貢献する技術

本技術は高効率な溶接法と高品質な製品を提供し、SDGs目標9「産業と技術革新の基盤をつくろう」の達成に貢献する。

参考文献

- 1) 妹島五彦, 五代友和, 河原稔ほか: 我が国におけるナローギャップ溶接の現状, 溶接学会誌, 50-11, **1981**, pp.1074-1080.
- 2) 堀勝義, 羽田光明: 狭開先アーク溶接, 溶接学会誌, 68-3, **1999**, pp.179-200.
- 3) 溶接学会溶接法研究委員会編: ナローギャップ溶接(狭開先溶接) -日本における現状- : 溶接法ガイドブックI, **1984**.
- 4) 森垣脩, 熊谷良平, 杉岡勲ほか: 1層1パス多層盛狭開先サブマージアーク溶接法: 厚鋼板のサブマージアーク溶接における狭開先化について(第1報), 溶接学会全国大会講演概要, **1979**, pp.152-153.
- 5) 森垣脩, 熊谷良平, 杉岡勲ほか: 狭開先サブマージアーク溶接法における2電極法の適用: 厚鋼板のサブマージアーク溶接における狭開先化について(第2報), 溶接学会全国大会講演概要, **1979**, pp.282-283.
- 6) 徳久正昭, 平井征夫, 西山昇: 狭開先サブマージアーク溶接法における2¹/₄%Cr-1%Mo溶接金属のじん性におよぼす微量元素の影響, 溶接学会論文集, **1985**, Vol.3, No.4, pp.107-115.
- 7) 安藤政明, 原沢秀明, 塚本光男ほか: 極厚板円筒長手継手の狭開先MIG溶接による溶接変形, 溶接学会論文集, **1984**, Vol.2, No.3, pp.502-508.
- 8) 村山雅智, 尾座本大輔, 大江謙介: 狭開先ガスシールドアーク溶接技術, JFE技報, **2014**, No.34, pp.98-103.
- 9) 野村博一, 杉谷祐司, 小林久恭: アークをセンサーとした自動ならい方法(第2報): ナローギャップ溶接への適用, 溶接学会全国大会講演概要, **1981**, pp.182-183.

- 10) Fusari, F. ; Marangoni, P. ; Musti, M. et al. : Improvements in the Welding Technology for Heavy Pressure Vessels 2¹/₄Cr 1Mo ¹/₄V Low Alloy Steels, Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, **2017**.
- 11) 安藤光, 小林和行, 飯島亨: 電流波形制御によるタンデムSAW 施工法の検討, 溶接学会全国大会講演概要, 86, **2010**, pp.146-147.
- 12) 寺崎俊夫, 秋山哲也, 石本憲司ほか: 冷却時間t₈/5の推定式の提案, 溶接学会論文集, Vol.6, No.2, **1988**, pp.301-305.
- 13) 宮田隆文: 波形制御機能付サブマージアーク溶接電源, 溶接学会誌, 77-7, **2008**, pp.635-639.
- 14) Verwaerde, L. : Wave Form Controlled Submerged Arc Welding, Proceedings of The First South-East Asia International Institute of Welding Congress, Bangkok, Thailand, 21-22 November, **2006**, pp.178-189.
- 15) 中村照美, 平岡和雄: 狭開先化に伴うアーク現象の基本的な特性把握と溶接安定化の提案, 溶接学会論文集, 19-1, **2001**, pp.44-53.
- 16) Abe, Y. ; Fujimoto, T ; Nakatani, M. et al. : Development of a Welding Condition Optimization Program for Narrow Gap SAW, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 38, **2020**, 98s-102s.

出典元

阿部洋平, 藤本貴大, 中谷光良ほか: 極狭開先サブマージアーク溶接技術の開発, 溶接学会誌, 92-2, **2023**, pp.105-110.

※本稿は出典元で発表した内容に、非破壊、破壊試験結果を追加したものである。

文責者

日立造船株式会社 開発本部 技術研究所
基盤技術研究センター 溶接グループ
阿部洋平
E-mail : y_abe@hitachizosen.co.jp

Development of Ultra-Narrow Gap Submerged Arc Welding Process for 2¹/₄Cr-1Mo Steel

Abstract

Improving the efficiency of the welding process is essential for the manufacture of large steel structures. Ultra-narrow gap submerged arc welding, performed with a nearly 0° groove angle from the first to the last layer in a single pass, is a process that can be expected to significantly improve welding efficiency. Compared to conventional narrow gap welding, however, ultra-narrow gap welding is seldom seen in practical application because of its tendency to cause weld defects such as lack of fusion and slag inclusion. Hitachi Zosen, therefore, decided to develop an ultra-narrow gap welding technique that does not cause such weld defects.

We first identified the range of welding conditions that prevents weld defects using digital welding power source, and then developed an in-process program for the automatic selection of welding conditions using multiple regression analysis and optimization method. Finally, we applied the technique we developed to a 120 mm thick test coupon of 2¹/₄Cr-1Mo steel, a material generally used in pressure vessels. The results demonstrated sufficient weld quality for the practical application of ultra-narrow gap submerged arc welding.

Authors

Yohei Abe (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : y_abe@hitachizosen.co.jp)

Takahiro Fujimoto

Mitsuyoshi Nakatani

Masakatsu Nakano

Masamitsu Abe

Yuichi Kobayashi

Manabu Tanaka

Masaya Shigeta