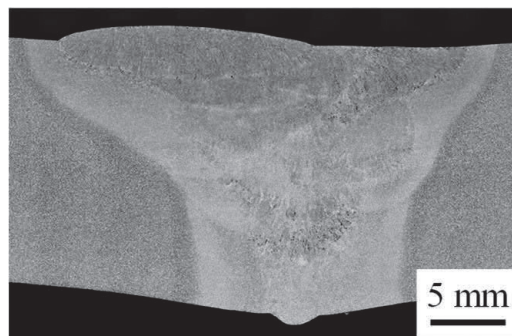


キーホールTIGを用いたバックングレス裏波溶接および積層溶接技術の開発



阿部 洋平 ①
藤本 貴大 ②
谷 和彦 ③
林 興平 ③

要旨

バックングレス裏波溶接は突合せ継手に対し、裏当て材を用いず、初層で溶接部の裏面側にビード形成した後、残りを積層する溶接法で、完全溶込み溶接が要求される突合せ継手に対して有効な技術である。しかしながら、溶接欠陥を防止するため、溶接中に変化するギャップに応じて入熱と溶接材料の送給量を適正に制御する必要があり、溶接士に高い技能が要求されるため自動化を進めている。本開発では想定される各欠陥を防止する適正な溶接条件の範囲を明らかにし、溶接中の開先変動に対応可能な自動バックングレス裏波溶接および積層溶接技術を確立した。また、水圧鉄管の製造への適用を目的として実証試験を行い、開発技術により十分な溶接品質と工程削減効果が得られることを示した。

キーワード

バックングレス裏波溶接，自動溶接，TIG，キーホール溶接

1. 緒言

バックングレス裏波溶接¹⁾は突合せ継手に対し、裏当て材を用いず初層で溶接部裏面側にビード形成した後、残りを積層する溶接法で、完全溶込み溶接が要求される突合せ継手に対して有効な技術である。当社での適用例の一つに発電所の水圧鉄管が挙げられる。水圧鉄管の製造工程は図1.1に示すように平板を曲げて加工し、長手を溶接して管状にした後、周溶接により複数個つなぎ合わせて製作される。このとき、バックングレス裏波溶接は片面から施工が可能である。施工条件が適正であれば図1.2 (a) のように安定した裏波ビードが得られる。しかし、溶融した金属の量や入熱が過剰になると、図1.2 (b) のように溶融池が裏面側に垂れる欠陥（溶落ち）が生じやすい。逆に、溶融金属量が少ないと図1.2 (c) のように継手がつながらない欠陥（ブリッジ不良）が生じる。また、溶接入熱が小さいと図1.2 (d) のように溶接部の裏面側まで十分に溶融できない欠陥（溶込み不良）が生じる。これらの欠陥を防ぐには、溶接する板同士の間隔（ギャップ）の変化に応じて入熱と溶接材料（溶接ワイヤ）の送給量を適正に制御する必要があり、溶接士に高い技能

が要求される。そこで、バックングレス裏波溶接を避け、図1.3に示すように両側開先と呼ばれる溝を設け、BP（Back weld pass）側を溶接後、FP（Finishing pass）側をガウジングし積層溶接する方法が多く用いられるが、本方法は工程が多く、コストが増加する。そのため、溶接士の技能に依存しないバックングレス裏波溶接の自動化が求められている。

近年ではTIG電極をより冷却し、アークの集向性を高めたキーホールTIG溶接法²⁾が開発されている。従来のTIGと比較して、高い入熱密度を得られ、キーホールといわれる貫通孔を形成できる。この結果、深溶込みかつ局所的な溶融が可能で、過剰に溶融池を形成しないため、溶落ちが生じにくい。また、非消耗電極式¹⁾の溶接法であるため、溶接電流と溶接材料（溶接ワイヤ）の送給速度を独立して制御でき、入熱量と溶融金属量を制御しやすく、裏波溶接に適している。

本開発では水圧鉄管への自動バックングレス裏波溶接の適用を目的とし、キーホールTIGを用いた初層の



図1.1 水圧鉄管の製造工程

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 社会インフラ事業本部 堺工場 生産技術部

バックングレス裏波溶接と二層目以後の積層溶接技術を確立した。また、実証試験体を用いて開発した技術の有効性を示した。

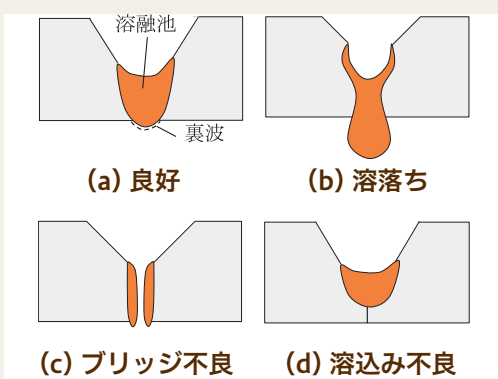


図1.2 バックングレス裏波溶接

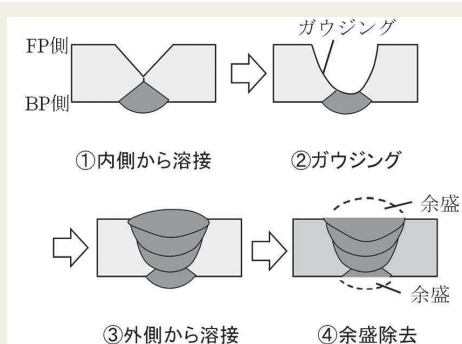


図1.3 両側からの完全溶込み溶接

2. バックングレス裏波溶接技術の開発

2.1 適正な裏波溶接の条件

図1.2に示した通り、良好な裏波溶接部を得るには、溶接中に発生するギャップに対し、溶接欠陥を防止する適正な範囲から溶接条件を選定する必要がある。ここで、対象とした継手の開先形状を図2.1に示す。開先角度 80° 、ルートフェイス 2 mm のV開先とした。加工と組立誤差によるギャップ変化量は $0\sim 2\text{ mm}$ を想定した。本開発では、本形状に対し各欠陥の発生を判断するモデルを考案し、その実用性を検証した。

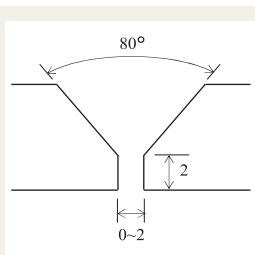


図2.1 開先形状

2.2 溶落ち判定モデル

裏波溶接中の溶融池にかかる力のバランスを図2.2に示す。バックングレス裏波溶接時には、溶融池は重力とプラズマ気流をはじめとしたアークによる力（アーク力）によって押し下げられる。一方で、溶融池は表裏面にかかる表面張力と、（バックシールド等で圧力が加わっている場合は）内圧によって保持される。

2.3 ブリッジ判定モデル

ブリッジした溶融池が液膜であると仮定し、表面自

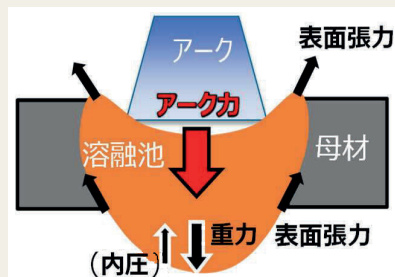


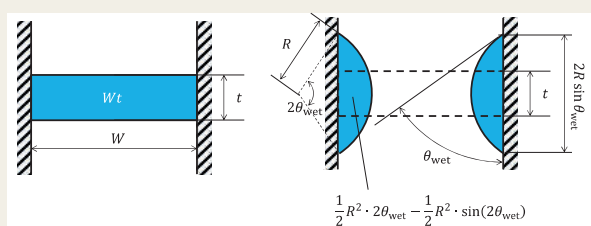
図2.2 溶融池のバランスモデル

由エネルギー³⁾を用いて溶融池の分離を判定するモデルを考案した。モデルの概要を図2.3に示す。ブリッジした溶融池を幅 $W\text{ [m]}$ の2平面間に存在する厚み $t\text{ [m]}$ の二次元液膜（図2.3 (a)）と仮定する。溶融池がブリッジしない場合、液膜が曲率半径 $R\text{ [m]}$ の2液滴に分離する（図2.3 (b)）とすると、それぞれの状態での表面自由エネルギー $F_{fs,(a)}$ および $F_{fs,(b)}$ [J/m] は以下の式で表される。

$$F_{fs,(a)} = 2W \cdot \gamma_L + 2t \cdot \gamma_{LS} + \alpha_{B(a)} \quad (2.1)$$

$$F_{fs,(b)} = 2 \cdot 2R \theta_{wet} \cdot \gamma_L + 2 \cdot 2R \sin \theta_{wet} \cdot \gamma_{LS} - 2(2R \sin \theta_{wet} - t) \cdot \gamma_S + t \cdot W_{LL} - 2 \cdot (2R \sin \theta_{wet} - t) \cdot W_{LS} + \alpha_b \quad (2.2)$$

ここで、 γ_L 、 γ_S 、 γ_{LS} ：液体、固体、固液界面の表面張力係数 [N/m]、 W_{LL} ：液体同士の付着による仕事 [N/m]、 W_{LS} ：固液界面の付着による仕事 [N/m]、 θ_{wet} ：固液界面のぬれ角 [rad]、 α_a 、 α_b ：フィッティングパラメータ [N] である。 $F_{fs,(a)} > F_{fs,(b)}$ のとき、液膜が分離した方が安定する、すなわちブリッジ不良と判定した。



(a) 分離しない(正常) (b) 分離する(ブリッジ不良)

図2.3 ブリッジ判定モデル

2.4 溶込み不良判定モデル

溶込み不良が生じるのは、厚さ 2 mm のルートフェイスを完全に溶融できない場合である。そこで、熱伝導方程式^{4), 5)}を用いて、 2 mm のルートフェイスを十分溶融できるかどうか（すなわち、溶込みが得られるかどうか）判定するモデルを考案した。アークを移動点熱源、準定常状態と仮定した場合、無限平板の任意の位置での母材温度 $T_{Base}(x,y,z)\text{ [K]}$ は、点熱源位置を原点、板厚方向を z 軸として以下の式で表される。

$$T_{\text{base}}(x, y, z) = T_0 + \eta \frac{Q}{2\pi\lambda} e^{-\frac{vy}{2k}} \quad (2.3)$$

$$\cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - 2nt_b)^2}} e^{-\frac{v\sqrt{x^2 + y^2 + (z - 2nt_b)^2}}{2k}} \right\}$$

ここで、 T_0 ：初期温度 [K]、 η ：熱効率、 Q ：入熱量 [W]、 λ ：熱伝導率 [W/m/K]、 v ：溶接速度 [m/s]、 t_b ：板厚 [m]、 k ：熱拡散率 [m²/s] である。温度分布 $T_{\text{base}}(x, y, z)$ を用いてルートフェイス裏面の温度を推定し、その温度が融点以下の場合は、溶込み不良と判定した。

2.5 モデルの検証

ルートギャップ0～2 mmで溶接電流を変化させたときの判定結果を図2.4に示す。緑の領域がモデルにより良好な溶接が可能と判断した条件範囲を示し、赤が溶落ち、水色がブリッジ不良、青が溶込み不良と判定される領域を示している。ルートギャップ0 mmの場合には良好な条件範囲は広いが、2 mmでは裕度が狭くなり、2 mmを超えると施工は難しいことを示している。また、判定結果の検証のため、実際に溶接を実施した結果もプロットした。○が良好、△がブリッジ不良、□が溶込み不良である。良好、ブリッジ不良、溶込み不良となる判定と実際の結果も一致しており、各欠陥を判定するモデルの精度は十分であると考えられる。

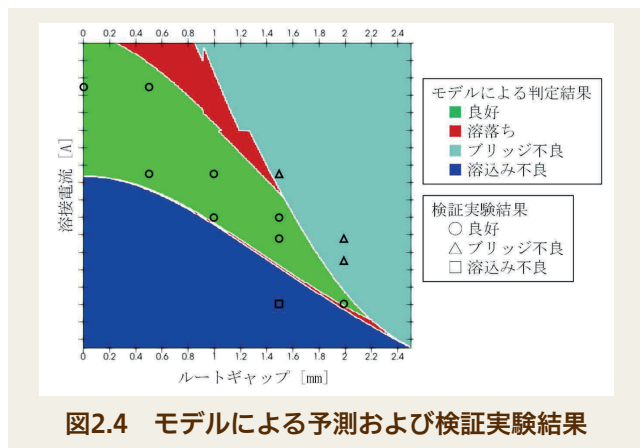


図2.4 モデルによる予測および検証実験結果

3. 積層溶接技術の開発

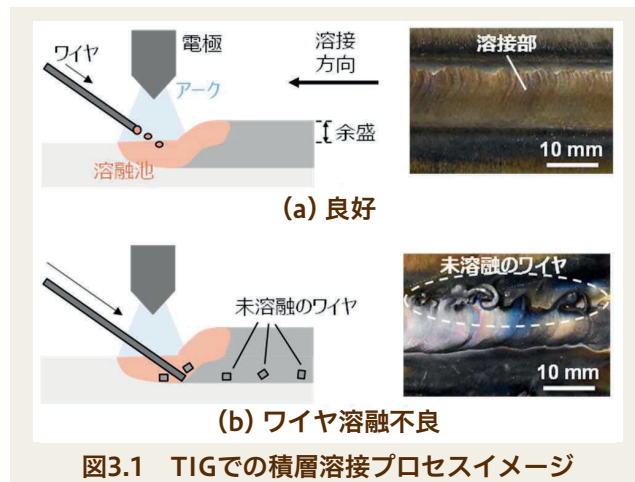
3.1 適正な積層溶接の条件

良好な積層溶接部を得るためには、溶接中に変化する開先幅に対し、溶接欠陥を防止できる適正な範囲から溶接条件を選定する必要がある。積層溶接では以下の溶接欠陥を対象とし、それぞれの判定モデルを考案し、その実用性を検証した。

① 溶接ワイヤの溶融不良

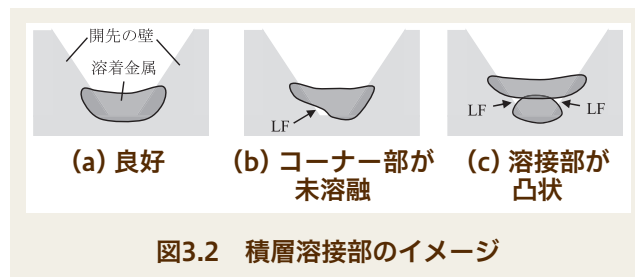
TIGは図3.1(a)に示すように外部から溶接ワイヤ（以下、ワイヤ）を送給し、熱源によって溶融させ積層溶接する。このとき、熱源の溶融能力を超える速度でワ

イヤを送給すると、凝固後の溶接金属内にワイヤが未溶融のまま偏析する⁶⁾（図3.1 (b)）。そこで、熱伝導論を用いて、溶接時の入熱に対して適正なワイヤ送給速度を推定するモデルを考案し、検証した。



② 融合不良

積層溶接では、溶接時の入熱で開先壁を加熱し、溶融する必要がある（図3.2 (a)）。一般に、開先底のコーナー部は熱が拡散しやすい⁷⁾などの理由から溶融しにくく、融合不良（Lack of fusion: LF）が生じやすい（図3.2 (b)）。また、開先底を溶融できた場合でも、積層後の溶着金属表面が開先壁を十分に加熱できず、凸形状となった場合、次パスでこの凸部を溶融できず融合不良となることがある（図3.2 (c)）。本開発では凸形状の溶接ビードも融合不良として扱い、これらを防止するために必要な溶接条件を判定するモデルを考案した。



3.2 ワイヤ溶融不良の判定

3.2.1 ワイヤ限界速度 v_w 推定モデル

考案した推定モデルを図3.3に示す。簡単のため、ワイヤはアーク直下で溶融池内に送給されると仮定した。ワイヤの送給方向をx方向、溶融池との接点を原点 $x=0$ [mm] とすると、溶融池内に送給されたワイヤは周囲の雰囲気（アークと溶融池）から加熱されながら溶融池底へ進む。この時、ワイヤ温度 T_{wire} は熱伝導方程式を用いて以下の式で表現できる⁸⁾。

$$T_{\text{wire}}(x) = T_0 + \left(T_{\text{melt}} - T_0 - \frac{4h\Delta T L_{\text{limit}}}{\rho c d v_w} \right) \frac{e^{\frac{v_w x}{k}} - 1}{e^{\frac{v_w L_{\text{limit}}}{k}} - 1} + \frac{4h\Delta T}{\rho c v_w d} x \quad (3.1)$$

ここで、 T_0 :初期温度[K]、 v_w :ワイヤ送給速度[m/s]、 ρ :密度[kg/m³]、 c :比熱[J/kg・K]、 λ :熱伝導率[W/m・K]、 k :熱拡散率[m²/s]、 h :周囲の雰囲気とワイヤ間の熱伝達率[W/m²・K]、 ΔT :アーク、溶融池とワイヤ間の温度差[K]、 d :ワイヤ直径[m]である。

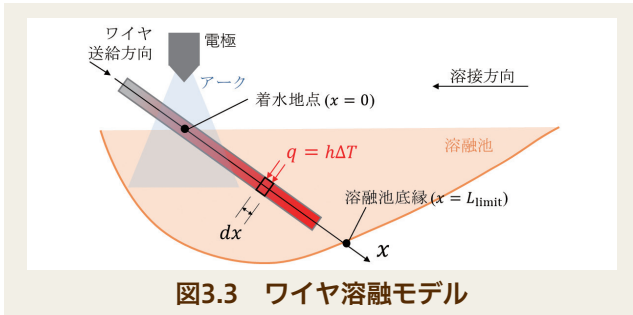


図3.3 ワイヤ溶融モデル

L_{limit} は溶融池底縁までの距離であるが、これは2.4節同様、熱伝導方程式^{4), 5)}を用いて溶融池形状を推定することで求めた。図3.4に示すように、アークを移動点熱源、熱源位置とワイヤの着水地点が同じと仮定し、熱源位置を原点(0, 0, 0)、準定常状態としたとき、熱反射を無視すると $L_{\text{limit}}=(X_{\text{limit}}, 0, Z_{\text{limit}})$ は以下の式で表される^{4), 5)}。

$$T_{\text{melt}} = \frac{\eta IV}{2\pi\lambda L_{\text{limit}}} e^{\frac{v(X_{\text{limit}}+L_{\text{limit}})}{2k}} \quad (3.2)$$

ここで、 T_{melt} [K]:鉄の融点、 η :熱効率、 I :溶接電流[A]、 V :電圧[V]、 v :溶接速度[m/s]である。一方、ワイヤが熱源位置で溶融池に着水すると仮定した場合、ワイヤ送給角 θ_w [°]を用いて、幾何学的に以下の関係式が成り立つ。

$$Z_{\text{limit}} = -\tan\theta_w \times X_{\text{limit}} \quad (3.3)$$

(3.2) 式と (3.3) 式を連立させることで L_{limit} を推定した。

(3.1) 式において、 $x=L_{\text{limit}}$ [mm]に到達するまでにワイヤ温度 $T_{\text{wire}} \geq T_{\text{melt}}$ ならワイヤは溶融する。一方、

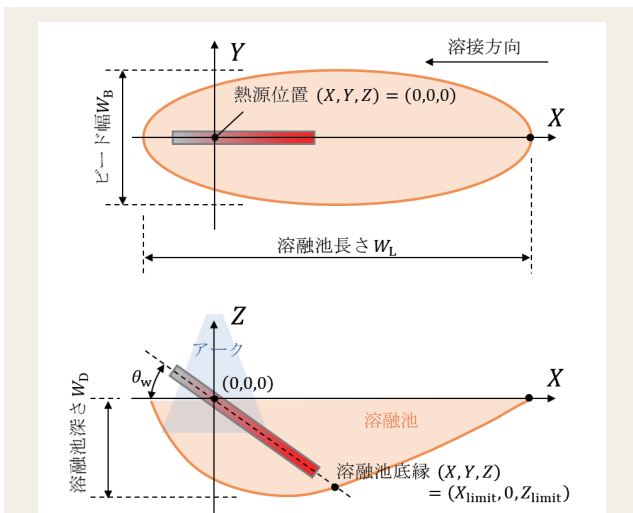


図3.4 溶融池形状の解析モデル

$T_{\text{wire}} < T_{\text{melt}}$ の場合、ワイヤは溶融せず溶融池の底に接触しワイヤは一部が溶け残る、すなわちワイヤ溶融不良と判定し、 $T_{\text{wire}}=T_{\text{melt}}$ となるワイヤ限界速度 v_w を推定した。

3.2.2 モデルの検証

溶接速度120 mm/min、ワイヤ送給角20°での各溶接電流での限界ワイヤ送給速度の推定結果を図3.5に示す。検証のため、溶接電流260 A、330 A、360 Aでそれぞれ積層溶接実験を行い、各電流での限界ワイヤ送給速度を計測した結果も図中に示している。260 Aでは約0.3 m/min程度の差があるが、330 A、360 Aでは予測値と実験値はほぼ一致し、実用に十分な精度と考える。

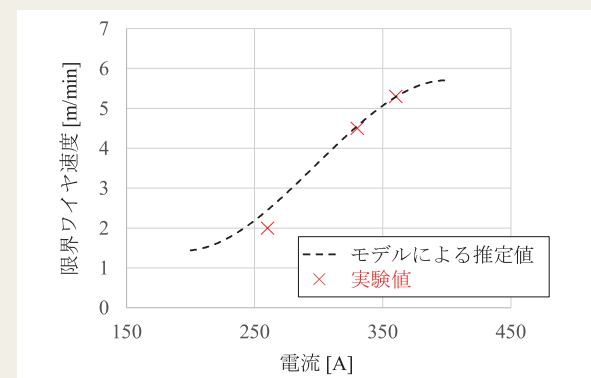


図3.5 モデルの検証結果

3.3 融合不良判定モデル

3.3.1 モデルの概要

著者らはこれまでにサブマージアーク溶接 (SAW) の積層において、溶接入熱 Q [kJ/mm]、ビード幅 W_B [mm]、溶着断面積 A_R [mm²]、およびトーチと開先壁間距離 L [mm]を基に、開先の壁への入熱 H_G [kJ/mm・mm]と開先コーナーまでの距離の二乗 r^2 [mm²]を以下の式で算出し融合不良判定モデルを考案している⁹⁾。

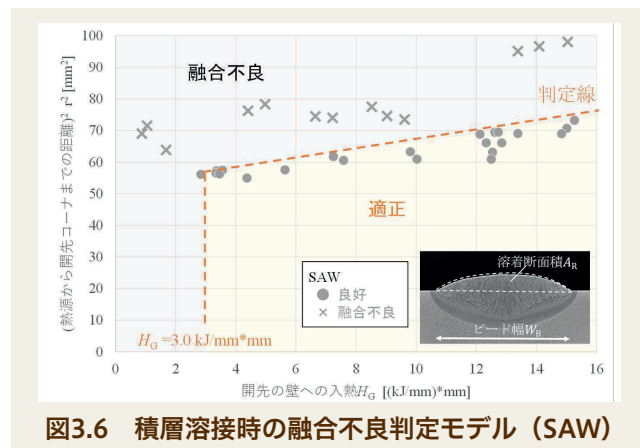
$$H_G = Q/2 \left(W_B/2 - L \right) \quad (3.4)$$

$$r^2 = L^2 + \left(A_R/2L \right)^2 \quad (3.5)$$

判定モデルを図3.6に示す。判定線より右下の領域の条件では融合不良のない積層溶接が可能であることが明らかとなっている⁹⁾。このモデルはSAWを対象としたものであるが、判定に必要なパラメータは溶接入熱 Q 、ビード幅 W_B 、溶着断面積 A_R 、トーチ-開先壁間距離 L と一般化されており、他の溶接プロセスへの適用が期待できる。本開発では本モデルをTIGへ適用するための検証実験を実施した。

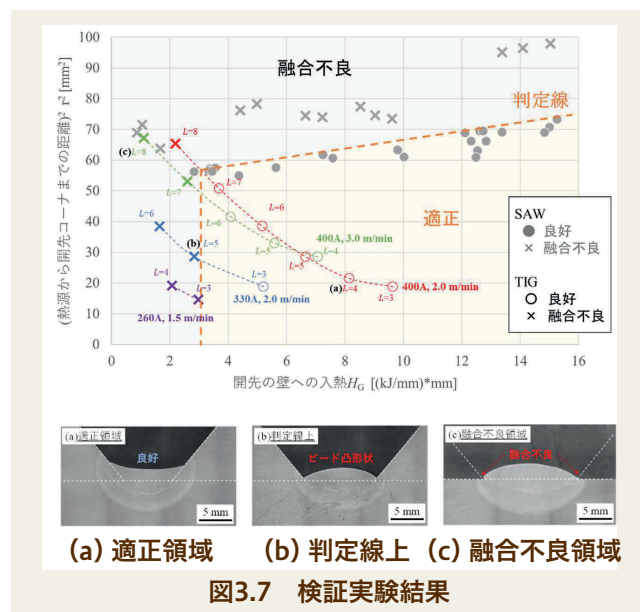
3.3.2 判定モデルの検証実験

開先角度を80°とし、開先底幅 W_G を6~16 mmで変化させたV開先試験体に対しTIG積層溶接実験を実



施した。溶接条件は、溶接速度を120 mm/minに固定し、溶接電流を260～400 A、ワイヤ送給速度を1.5～3 m/minの範囲で組み合わせた4パターンとした。トーチの狙い位置は開先中心とした。

実験結果を融合不良判定モデル上にプロットしたものを図3.7に示す。各条件で開先幅が広がる（ L が大きくなる）につれ、 H_G は減少し、 r^2 が増加するため、プロットはモデル上の左上に位置する。モデル上の判定線より右下の図3.7 (a) 適正領域ではTIGでも良好な溶接部が得られた。図3.7 (b) 判定線上の条件では開先壁は溶融するもののビードは凸形状になり融合不良と判定した。さらに左上の図3.7 (c) 融合不良領域の条件では開先壁が完全に溶融せず融合不良となった。以上より、TIGの検証実験結果と融合不良判定モデルの予測はほぼ一致しており、本モデルはTIGへ応用可能と考える。

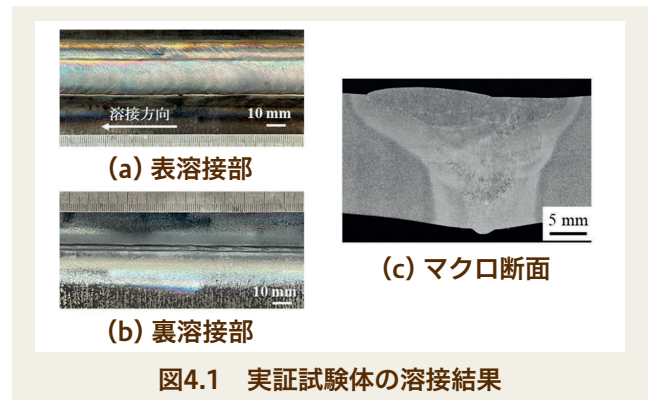


4. 実証試験体の製作と開発効果

4.1 実証試験体の製作結果

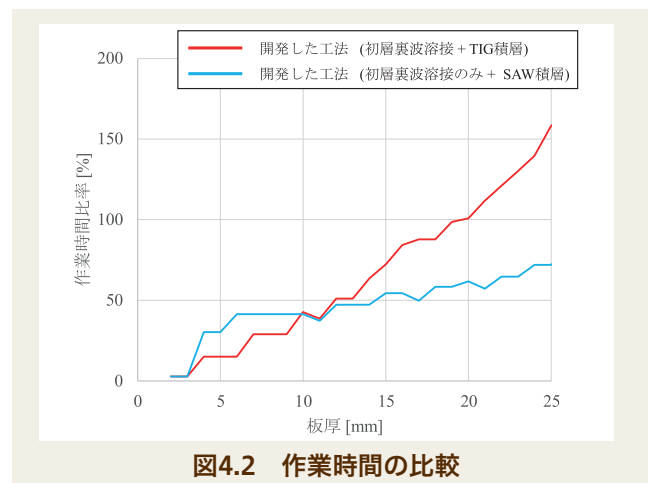
長さ1000 mm×幅100 mm×板厚 16 mmの試験体（材質：SM490A）を製作した。開先角度は80°、ルートフェイスは2 mm、ルートギャップは0 mmとした。

溶接ビード外観および溶接部横断面マクロ試験結果を図4.1に示す。板厚16 mmを9パスで積層し、表裏面共に一様で良好なビード外観が得られた。マクロ試験の結果、溶接部に欠陥は見られず良好な結果となった。また、溶接後の磁粉探傷試験（MT）では、ビード表面全線で欠陥の指示はなかった。放射線透過試験（RT）でも全線で欠陥指示はなく、JIS規格分類で1類に分類される良好な溶接部が得られた。



4.2 開発効果の試算結果

当社の水圧鉄管製造において、従来の施工方法（両面SAW）の作業時間を基準（100%）とし、開発した施工法（初層裏波溶接＋TIG積層溶接）の作業時間を比較した結果を図4.2に示す。作業時間は溶接時間、ガウジング時間、仕上げ（余盛の研削作業）時間の総計とした。開発した施工法（赤線）ではガウジングの必要がないため、板厚10 mm以下では作業時間50%以下、15 mm以下で約70%以下と大幅な短縮が期待できる。板厚が厚くなるにつれ、作業時間の差は小さくなるが、これはTIGの積層効率 SAWに劣るためである。それでもなお、水圧鉄管で多く用いられる板厚20 mm以下では作業時間の削減効果が期待でき、品質も安定するため開発効果は十分といえる。より厚板に適用する際は、初層をTIG裏波溶接し、残りをSAWで積層する（青線）ことで高い効果が期待できる。



5. 結 言

本開発ではキーホールTIGを用いたバックングレス裏波溶接および積層溶接技術の自動化を目的とし、溶接中に変動するギャップや開先幅に応じて溶接欠陥を判定するモデルを考案し、その精度を検証した。最後に実証試験体で溶接を行い、開発した技術で十分な溶接品質と作業時間削減効果が得られることを示した。

バックングレス裏波溶接技術は鋼構造物の製造高効率化に有効なプロセスの一つである。今後は水圧鉄管をはじめとする様々な製品へ本技術の適用を進めていく。

参考文献

- 1) (社)溶接学会編：“新版 溶接・接合技術特論”，(2005)
- 2) 和田ら：“キーホール溶接向け「サンアーク® DS-TIG アドバンス溶接トーチ」の開発”，太陽日酸技報，No.39，(2020)
- 3) 三刀：“接着の基礎”，溶接学会誌，Vol. 81，No.6，(2012)
- 4) 安藤：“アークを移動点熱源と仮定した場合の溶融池の温度および保有熱量について計算考察”，溶接学会誌，Vol.36，No.3，(1967)，pp.252-260

- 5) 黄地：“溶接アークプロセスの物理(1)溶接の熱伝導”，溶接学会誌，Vol.63，No.4，(1994)，pp.264-268
- 6) 山崎：“揺動レーザを用いた厚板突合せ狭開先溶接現象の解明とその施工システム開発に関する研究”，博士論文，大阪大学大学院工学研究科，(2015)
- 7) 寺崎ら：“冷却時間 $t_8/5$ の推定式の提案”，溶接学会論文集，Vol.6，No.2，(1988)，pp.301-305
- 8) 平田：“溶接アークプロセスの物理 [Ⅲ]—電極ワイヤの溶融速度と温度分布—”溶接学会誌，Vo.63，No.7，(1994)，pp.484-488
- 9) 阿部：“デジタル波形制御電源を用いたサブマージアーク溶接現象の解明と極狭開先溶接技術に関する研究”，博士論文，大阪大学大学院工学研究科，(2021)

文責者

カナデビア株式会社 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@kanadevia.com

Development of Backingless Penetration Bead Welding and Multi-layer Welding Techniques Using Keyhole TIG

Abstract

Backingless penetration bead welding does not use backing material for butt joints; rather, after the weld bead is formed on the back side of the welded area in the first layer, the rest is then layered over the top. This method is an effective technique for butt joints that require full penetration welds. However, to prevent weld defects, the amount of heat input and the feeding rate of welding consumables must be appropriately controlled according to the root gap, which changes during the welding process. As this requires advanced welding skills, the process is increasingly being automated. In this development, we clarified the scope of the appropriate welding conditions that can be assumed to prevent defects, and established automatic penetration bead welding and multi-layer welding techniques that adapts groove variations during welding. In addition, we conducted a demonstration test with the goal of applying this to the manufacture of penstocks, and demonstrated that the developed technology can achieve sufficient welding quality and reduce the number of processes.

Author

Yohei Abe (Kanadevia Corporation, E-mail : y-abe@kanadevia.com)