

(技術資料)

# 画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステム

河田純一\*1・石崎圭人\*1・松嶋幸平\*1・小向航平\*2・吉本達也\*3 (博士(工学))

## Compact Portable Welding Robot System with Vision Sensor

Junichi KAWATA・Keito ISHIZAKI・Kohei MATSUSHIMA・Kohei KOMUKAI・Dr. Tatsuya YOSHIMOTO

### 要旨

溶接分野では、溶接工不足の問題や生産性向上ニーズの高まりを受け、溶接ロボットの適用拡大が進んでいる。いっぽう、ロボット溶接適用が難しい高難度溶接に対しては、画像センサを用いた研究が検討されている。本稿では、画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステムを用いて横向初層裏波溶接の自動化に取り組んだ内容を報告する。本システムは、画像センサを小型可搬型溶接ロボットに搭載することで溶接自動化を実現している。初層溶接においては、溶融池特徴点を認識しウイーピング制御に反映させることで、ルートギャップ変化追従・溶接線做いを実現する自動溶接技術となっている。2層目以降は、初層で取得した開先情報を元に積層条件を更新し、最終層までの自動溶接を実現する。

### Abstract

The use of welding robots in the welding field is on the rise, driven by a shortage of skilled welders and the growing demand for higher productivity. Concurrently, research involving vision sensors is being explored to address complex welding tasks that are difficult to handle with traditional robotic systems. This paper presents our work on automating horizontal first-layer penetration welding using a compact, portable robotic welding system equipped with a vision sensor. The system achieves welding automation by integrating a vision sensor with a portable robot. During first-layer welding, the system automatically tracks variations in the root gap and follows the welding path by identifying key features of the molten pool, adjusting the weaving motion as needed. From the second layer onward, the system updates the build-up parameters based on groove information acquired during the first layer, enabling fully automated welding through to the final layer.

### 検索用キーワード

画像センサ, 小型可搬型溶接ロボット, AI画像認識, 溶融池監視, 現場横向溶接, 自動化

まえがき=溶接は、製造業を中心としたものづくりに欠かせない技術の一つであるが、少子高齢化や若年層の入職率低下に伴い、溶接工不足が大きな社会課題となっている。とくに裏波溶接は熟練の技量が求められ、自動化が困難な溶接である。

そこで当社は、溶融池映像中の特徴量についてディープラーニング（以下、AI）を用いた画像センサ（以下、カメラ）により認識し、適切に制御することで、ルートギャップ（以下、RG）変化に追従する適正な裏波溶接技術や溶接中の外乱などで発生する異常を検知する技術を開発してきた<sup>1)~7)</sup>。

本稿では、これらの技術を小型可搬型ロボットへ搭載した画像センサシステム〔呼称：AIWelder<sup>TM</sup>注1)〕搭載ARCMAN<sup>TM</sup>注2) PORTABLE（以下、本システム）〕について紹介する。また、高難度溶接の例として、横向継手を想定し、セラミック裏当て材を用いた横向初層裏波溶接の自動化を検討した内容を報告する。

## 1. 本システムの概要

本システムのハード構成を図1に示す。小型可搬型

溶接ロボットのトーチ部に画像センサを搭載している。カメラが取得した溶融池映像データを推論制御用コンピュータ（以下、PC）に取り込み、リアルタイムで特徴点を抽出し、制御補正量を演算する。その制御補正量をロボットコントローラへ送信し、補正指示値に基づきあらかじめ構築した運棒制御データベースを参照し、ロボット動作を制御し溶接が実行される。

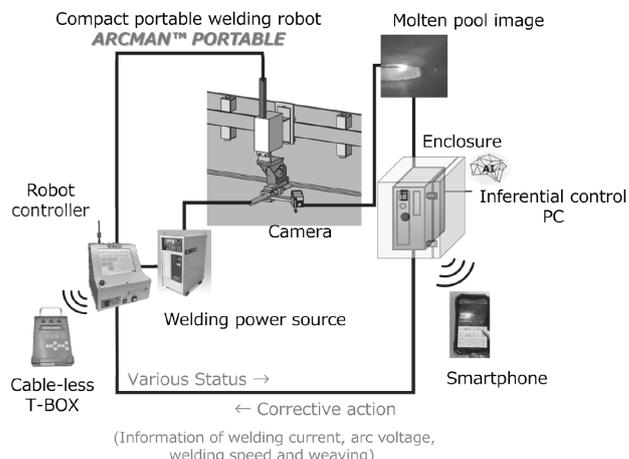


図1 本システムのハード構成  
Fig.1 System hardware configuration

脚注1), 2) AIWelder, および, ARCMANは当社の登録商標である。

\*1 溶接事業部門 技術センター \*2 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部 \*3 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

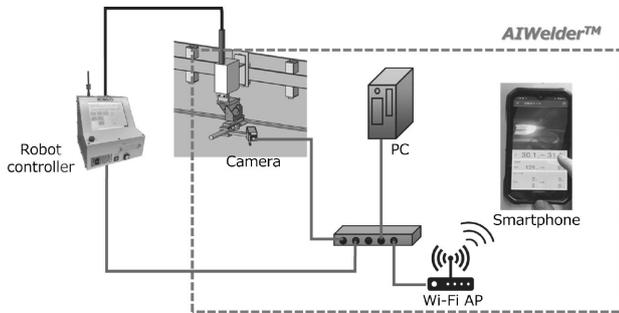


図2 AIWelder™の概要  
Fig.2 AIWelder™ overview

### 1.1 AIWelder™

本システムでは、カメラで溶融池映像を撮影しPCでその映像をもとにAI認識を行い、ロボットの制御を行う。同時に、撮影した映像と溶接情報をAndroid<sup>注3)</sup>スマートフォン上に表示する。このカメラ・PC・スマートフォンの構成をAIWelder™と呼称する。図2にAIWelder™の構成を示す。

高品質な溶接施工において重要となるのは、溶融池の形状に合わせて運棒を変化させることである。AIWelder™では溶融池を見る眼をカメラで、溶融池形状を解釈する頭脳をAIで、その溶融池に適した運棒をPCが制御することで、熟練溶接工に類似した溶接を可能とした。

まず眼となるカメラは、通常カラーカメラで溶融池を撮影すると、アーク光の光量が強力であるため取得映像が白飛びするか、光量を絞すぎた場合、溶融池形状が分からないかのどちらかになってしまう。そこで、明るさの異なる複数フレームを結合したHDR (High Dynamic Range) 技術を使用することで、鮮明な溶融池映像を撮影できるようにした。

つぎに頭脳となるAIの詳細は4.1節で述べるが、AIに様々な溶融池映像を学習させることで、溶融池映像からRGの推定のみならず、溶接速度やワイヤ狙い位置の調整も可能とした。

そしてPCは、溶融池映像を取得してAI画像認識モデルによる演算を実行し、ロボット制御に必要な補正量を算出してコントローラに送信している。同時に、コントローラから溶接電流・アーク電圧・溶接速度などの各種ステータスを取得することで、施工記録の作成を行う。パスごとにこれらの各種ステータスや、AIの認識結果をもとにした溶接異常有無をレポート形式で記録している。あわせて、溶融池映像を動画形式で保存している。さらに、最終パスの溶接完了時には、全パスの施工記録をまとめた最終施工レポートの作成を行っている。このレポートを使用することで、施工記録の管理が容易となる。

### 1.2 基本的制御

ロボット溶接における溶接位置の一般的な制御方法として、溶接中に計測した溶接電流から開先とワイヤ先端の位置関係を検出し、この検出結果を使用してワイヤ先

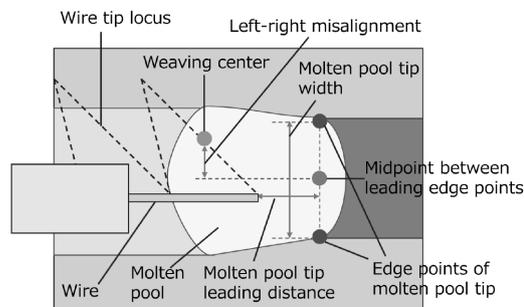


図3 溶融池の計測  
Fig.3 Measurement of molten pool

端を開先に追従させる方法（アークセンサ）が挙げられる<sup>8), 9)</sup>。

この方法に対し、本システムにおける溶接制御では、PCから受け取った溶融池映像の特徴点座標情報から、開先とワイヤ先端の位置関係を直接算出し、ワイヤ先端位置の制御を行っている。溶融池先端の両端位置からRG相当量となる「溶融池先端幅」、ワイヤ先端と溶融池先端の両端位置との位置関係である「左右ずれ量」、さらに、ワイヤ先端から溶融池先端までの長さ「溶融池先端距離」を計測している（図3）。これらを計測した後、溶融池先端幅に応じて、ウィービング幅、基準溶接速度、溶接電流・アーク電圧、ウィービングの傾き角度などの溶接条件を常に変化させている。つまり、これにより、RGごとに最適な溶接条件で溶接が行える。また、溶融池先端距離に応じた溶接速度の微調整や、左右ずれ量に応じた溶接位置の微調整を実施している（4.2節参照）。

## 2. 市場ニーズと対象継手

本システムについて、国際ウエルディングショーでのアンケートやお客様へのヒアリングを重ね、市場ニーズを調査した。その結果、多くの企業にとって熟練溶接工不足が近い将来の大きな課題となると認識していること、および、本システムの溶接姿勢としては下向・横方向への適用ニーズが高いことが判明した。とくにセラミック裏当て材を使用する横方向姿勢での初層裏波溶接はRGが長手方向に変動していることが多く、かつ、溶接難度も高いため自動化できていないことなどを把握した。なお、具体的に本システムの適用が想定される構造物としては、橋梁（きょうりょう）分野における鋼橋主塔部の横方向継手や造船分野における船側外板の横方向継手などがあることを見出している。

## 3. 施工法コンセプト

図4に示すように、本システムの施工法コンセプトは三つの主要な構成要素から成り立っている。

一つ目の構成要素は「溶接前のセンシングについて開始点近傍の1点センシングのみで完了する点」である。通常の小型可搬型溶接ロボットでは、多点センシング動作を基本としており、溶接長が数mにおよぶ溶接線では数十点のセンシングが必要となることもある。いっぽう、本システムでは上記のセンシング動作により得られるRGや溶接線などの情報を、カメラを用いることで溶

脚注3) Androidの商標はGoogle LLCの所有物である。

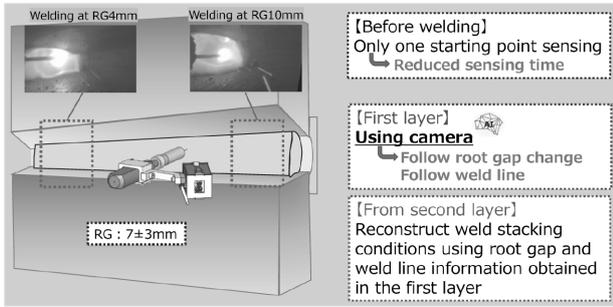


図4 溶接施工コンセプト  
Fig.4 Welding method concepts

接中に取得することができる。よって、溶接前のセンシングはスタート位置の1点のみとすることができ、センシング時間を大幅に削減できる。

二つ目の構成要素は「初層溶接時はカメラからAI画像認識モデルによって取得した情報を元にRGや溶接線倣いを実行する点」である。通常の多点センシングによる溶接では、センシング間の開先情報は取得できないため両点の線形補間などにより計算された情報に基づいて溶接が実行される。いっぽう、カメラを用いることで、初層の全ての溶接線領域に対してRGや溶接線情報をオンタイムで取得し、運棒制御することができる。結果、熟練工による緻密な半自動溶接に近い施工となり、溶接品質向上に寄与する。

三つ目の構成要素は「2層目以降の溶接については初層で得たRG情報などを反映して積層要領を再構成する点」である。本機能により、初層から最終層までの自動溶接を実現する。本機能の詳細は4.3節で説明する。

#### 4. 必要な要素技術

本章では、本システムに必要な要素技術を「AI画像認識」、「運棒制御構築」、「積層条件更新機能」、「異常検知機能」、「専用溶接材料」の五つに分けて紹介する。

3章にて述べた、主要構成要素との関係性は以下のとおりである。『1点センシング』は、『初層溶接時のRGや溶接線倣い』が実現することで同時に実現可能となっているといえる。その『初層溶接時のRGや溶接線倣い』は、「AI画像認識」と「運棒制御」に加えて「異常検知機能」と「専用溶接材料」の各技術から実現している。いっぽうで、『2層目以降の積層要領再構成』は、「積層条件更新機能」技術にて実現しているといえる。

##### 4.1 AI画像認識

RGの変化や溶接線に追従してロボットを制御するために、本システムではAIによる画像認識を用いて溶融池映像上の特徴点認識を行っている。認識させたいうえで制御に用いている特徴点は、ワイヤ先端・溶融池先端上・溶融池先端下の3点である（図5参照）。

これらの特徴点からRGに相当する溶融池先端幅や溶接線に相当する溶融池先端中心、適切な溶接速度を決めるための溶融池先端距離を算出する。一般的に、ある入力データから何らかの数値を予測したい場合は数値を出力可能な回帰モデルを用いる。溶融池認識においては画像データを入力として各特徴点の座標値を予測するモデ

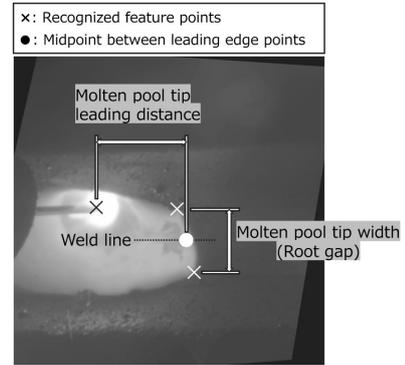


図5 AIが認識する特徴点  
Fig.5 Feature points recognized by AI

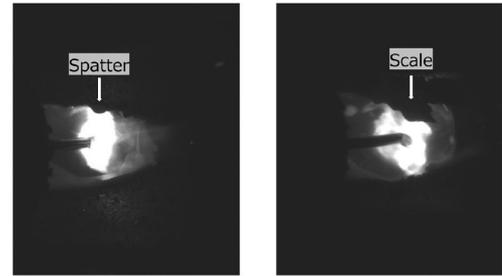


図6 開先内のスパッタやスケールの例  
Fig.6 Example of spatter and scale in groove

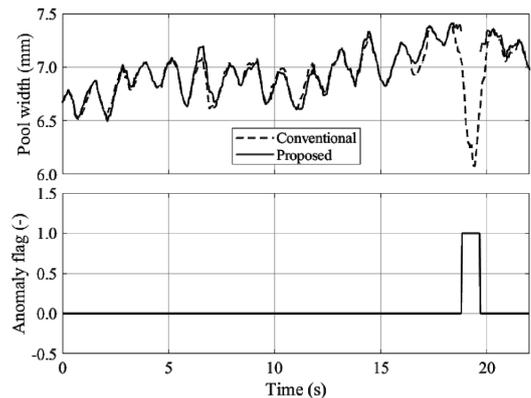


図7 異常検知フィルタによるフィルタリング結果  
Fig.7 Filtering results by anomaly detection filter

ルを構築する方法が考えられるが、本システムでは特徴点が存在する確率マップを出力するAIモデルを使用している。確率マップでは予測結果の信頼性を考慮することが可能となり、信頼性の高い予測結果のみを使用することで、安定した制御を行うことができる。

以上で述べたモデルに対して様々な条件の画像データを約2万3千枚用いて学習させることで、高精度で安定した特徴点認識を実現している。

しかし、高精度な認識率を実現できたとしても、図6に示すように大粒のスパッタや開先に存在するスケールが溶融池の一部に覆いかぶさるような状況で起きる認識ミスは完全には防げない。誤った位置を特徴点として認識した場合、溶融池先端幅などロボット制御に利用される数値が異常な値となり、ロボットの追従性低下を引き起こす可能性がある。そこで溶融池先端幅などの数値を常にモニタリングし、Hampel識別子に基づく異常検知フィルタによりフィルタリングを行っている。図7は、

算出した溶融池先端幅の時系列データにおいて、一般的なローパスフィルタの一種である移動平均フィルタと提案手法を比較した図である。提案手法では認識ミスによる値の急な乱れを除去（無視）できていることが分かる。異常が起きた場合は、異常が起きる直前の値をホールドし、異常状態から回復すると通常の制御を再開する仕組みとなっており、これにより認識異常を引き起こすような外乱に対して頑健なシステムとなっている。

#### 4.2 運棒制御

4.1節で述べたAI画像認識モデルによって認識する特徴点を用いて制御される初層溶接における運棒の各種制御指針を三つ紹介する。

一つ目は、「斜め振り運棒・端停止条件」である。本プロセスでは初層溶接時の架橋性を向上させるため、斜め振り運棒を採用している。溶融池映像より算出された溶融池先端幅を元に運棒制御データベースより、斜め振り運棒における角度・幅・上端/下端時の端停止条件（時間・溶接電流・アーク電圧のオフセット値）を制御している。本制御によりRGごとの適正な運棒軌跡を実現している。

二つ目は、「溶接速度」である。溶融池先端幅をもとに運棒制御データベースより溶接速度を制御している。同時に、溶融池先端距離を算出し、基準値より変動する場合は上記速度に対して増減制御を加えている。本制御により溶融池先端とワイヤ先端の距離を一定に保ち続けることで、安定した裏波形状の確保、および、突き抜けの防止を実現している。

三つ目は、「溶接線倣い」である。ワイヤ先端を監視し、溶融池先端幅の中央にウィービング中心が位置するように制御している。本制御により、溶接線がロボットの走行軸に対して傾いている、もしくは、蛇行しているような状態であっても追従可能な溶接を実現している。

#### 4.3 積層条件更新機能

初層の溶接は、4.1節に示したように、AI画像認識モデルによる計測値を使用して溶接を制御することで、開先形状の変化に合わせた溶接が可能である。

いっぽう、2層目以降の溶接ではAI画像認識モデルによる特徴点を用いた計測をしていない。2層目以降は、初層の計測結果を使用して溶接位置・溶接速度を制御し、自動溶接を実現している。初層の溶接開始の段階で、基準となる積層条件（基準積層条件）を作成する。この基準積層条件は、事前に設定したパラメータの値や、センシングで検出した開先形状から自動で作成される。基準積層条件作成後に初層を溶接する。この初層溶接時は、4.2節に示した制御により溶接を実行する。初層溶接中は、一定距離溶接するごとに、またRGもしくは開先中心位置が一定値以上変化するごとに、それぞれの位置における開先両端の位置を記録する（図8）。2層目以降は、この初層溶接時に記録された開先両端位置に合わせて、狙い位置、溶接速度を基準積層条件の値をもとに調整し、開先全体の盛高さが一定となるように溶接する（図9）。この制御により、変化のある開先の多層盛り溶接の自動化を実現している。

#### 4.4 異常検知機能

これまで初層片面裏波の自動溶接および初層の開先情報を2層目以降の溶接へ反映し、積層条件を再構成する技術について述べた。しかし、実適用時は、管理範囲外の開先形状・状態や、外乱による溶接トラブルの発生も考えられる。本システムではカメラで溶融池状態をモニタリングしており、例えば溶融池先端幅がRGの管理範囲を超えた場合などの異常が確認されると溶接を停止、あるいは端末（スマートフォン）へ警告を通知する機能を有する。

#### 4.5 専用溶接材料

本システムは高難度溶接である横向姿勢での初層溶接において、RG4~10mmの裏波を安定して確保することが必要であるため、とくに広い側のRGにおける架橋性を有することが課題となる。そのほか、融合不良低減・耐割れ性向上などの溶接欠陥の抑制を課題として、専用ワイヤの開発に取り組んだ。

一般的軟鋼フラックス入りワイヤ（以下、FCW）の成分系をベースとし、熱力学的平衡状態予測ソフトによるシミュレーション、および、スラグ流動性の実測評価を行い、溶接金属成分とスラグ形成成分の調整を実施した。その結果、RG4~10mmにおいて架橋性が問題なく、良好な裏波形状を形成するワイヤ成分系を抽出した。併せて、表ビード形状がフラットに付きやすい成分系とすることで、スラグ除去しきれずに残ってしまうことによる2層目溶接時の融合不良発生を抑制することができている。また、本成分系は、溶融池先端が垂れにくい特性を有している。その結果、溶融池先端距離を安定させることが可能となり、AI画像認識モデルを活用した運棒制御の安定に寄与している。一般的軟鋼FCWと専用FCWにおける比較結果を図10に示す。そのほか、高温割れ感受性および低温割れ感受性の各組成式における元素の影響を考慮し、耐割れ性に有害とされる元素の低減を図り、適正化した。これら各種検討により、専用ワイヤの開発を完了させた。

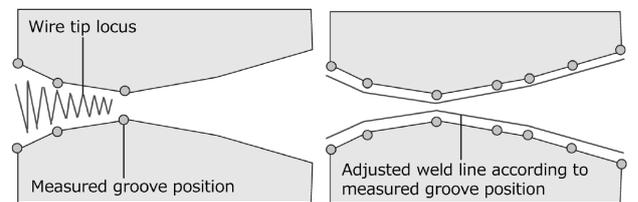


図8 初層のプロセス  
Fig.8 Process of first layer

図9 2層目以降のプロセス  
Fig.9 Process from second layer

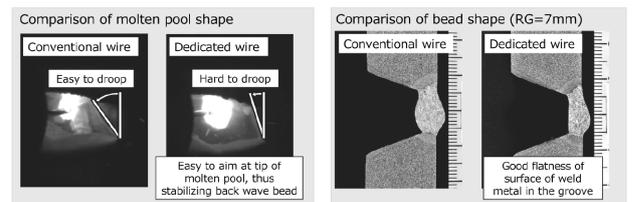


図10 従来FCWと専用FCWの比較  
Fig.10 Comparison of conventional and dedicated FCW

表 1 溶接継手条件一覧

Table 1 List of welding conditions for joint

Base metal groove shape	Single bevel groove 35°
Welding position	Horizontal
Root gap (mm)	4⇒10 Taper shape
Welding line	5 mm upward displacement from rail parallel height
Shielding gas	100%CO <sub>2</sub>
Wire extension (mm)	21
Backing material	Ceramic

Using wire	Layer-Path	Welding current (A)	Arc voltage (V)
Dedicated wire φ1.2 mm	1-1	170-180	22.5-23.5
	2-2,2-3	280	31
	3-4~	260	29
	(Final layer)	240	27
	(Final path)	220	26

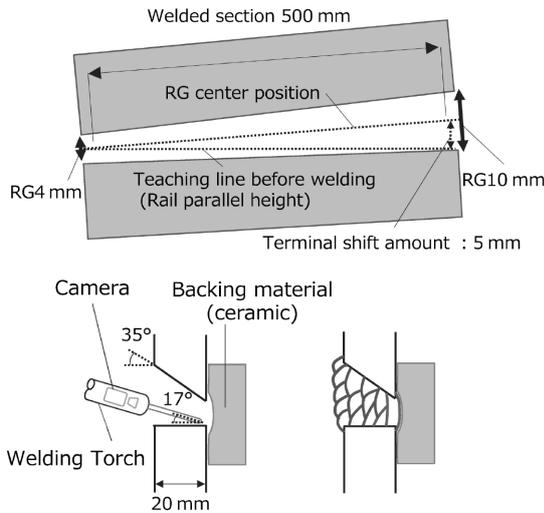


図 11 試験板形状および層パス条件

Fig.11 Test plate shape and layer pass conditions

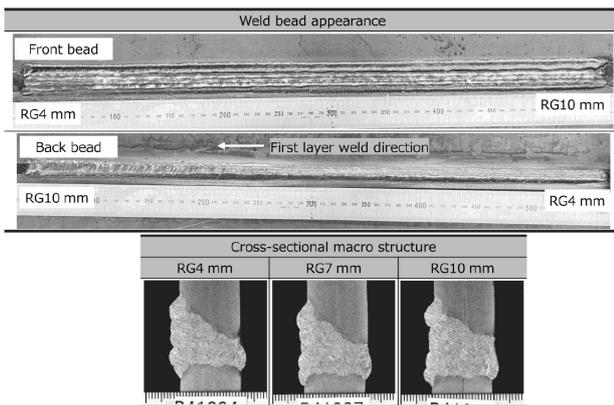


図 12 溶接継手のビード外観と断面マクロ

Fig.12 Bead appearance and cross-sectional macro structure in welded joint

表 2 溶接継手の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of welded joint

Tensile properties*1			Notch toughness*1
0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	Absorbed energy (J) @0°C
615	667	24	49, 63, 65 Avg.59

\*1 Tensile test specimen: round tensile specimen, Dia.=10.0 mm, G.L.=50 mm  
Impact test specimen: 10 x 10 mm square shape, 2 mm Vnotch based on AWS B4.0

## 5. 継手試験

本システムを用いて溶接を実施した結果を以下に示す。溶接条件は表 1, および, 図 11 に示すとおりである。母材は SM490A (JIS G 3106) を使用した。RG は 4 mm から 10 mm までテーパ状に広がる形状とし, 溶接線はロボットのレール (走行軸) に対して終端で 5 mm ずらして設置した (傾斜勾配: 1.0% に相当)。

溶接後のビード外観, 断面マクロを 図 12 に示す。RG に追従して溶接速度およびビード幅が変化しており, 溶接線倣いも実行できていることを確認した。ビード外観は表裏ともに良好であり, 各 RG での断面マクロも良好な溶込み形状であった。超音波探傷試験も実施しており, きずなしの結果であった。なお, 超音波探傷試験は JIS Z 3060 (2015) の規格に準拠して実施しており, 探傷感度は RB-41B 標準穴からのエコーを H 線に合わせ, 検出レベルは L 線とした。また, 本試験と同じ形状の溶接試験体を作製し, 機械的性質を確認した結果を表 2 に示す。機械的性質の値について問題ないことを確認した。以上の結果から, 本システムによる初層から最終パスまでの自動溶接施工が可能であることを確認した。

むすび = これまで, 溶接工不足という社会課題に対し, 熟練の技量が求められる片面裏波溶接の自動化に取り組んできた。本稿では, 横向姿勢への適用を目指し, カメラ, および, AI 画像認識モデルを用いて溶接運棒を適切に制御することで, RG 変化や溶接線に追従し, 適正な裏波ビードを形成する溶接技術, さらには溶接における外乱などで発生した異常を検知する技術を紹介した。

当社は, 変革 (KOBELCO-X) を通じたサステナビリティ経営の強化を掲げており, AX~GX の七つの「X」を設定して「魅力ある企業への変革」を推進している。本稿で紹介した技術も, これら「X」のかけ算により創出され, お客様の困りごとを解決できる溶接ソリューションであると言える。今後, 開発技術の実用化を推進し, 溶接工不足という社会課題解決への貢献を図って行く。

## 参考文献

- 1) 芦田 強ほか. 溶接全国大会講演概要. 2017, 第101集, p.450-451.
- 2) 芦田 強ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.63-66.
- 3) 尾崎圭太ほか. 溶接全国大会講演概要. 2020, 第107集, p.236-237.
- 4) 岡本 陽ほか. 溶接技術. 2021年2月号, p.48-53.
- 5) 岡本 陽. WE-COMマガジン. 2021年10月, Vol.42 (2) [https://www-itjwes.or.jp/we-com/bn/vol\\_42/sec\\_1/1-2/1-1.jsp](https://www-itjwes.or.jp/we-com/bn/vol_42/sec_1/1-2/1-1.jsp) (参照2025-06-03).
- 6) 尾崎圭太ほか. 溶接学会論文集. 2021, 第39巻, 第4号, p.309-321.
- 7) 吉本達也ほか. 溶接全国大会講演概要. 2023, 第112集, p.40-41.
- 8) 杉谷祐司. 溶接学会誌. 2000, Vol.69, No.2, p.140-144.
- 9) 重吉正之ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, pp.12-16.