

溶接技術競技会における溶接ビード形状の自動判定, 3Dモデルの保存ならびに3Dプリンタによる再現

Automatic judgement, storage of 3D models, and reproduction using 3D printers of weld
bead shapes at welding competitions

渡邊 彰吾 (技術統括部), 小出 鷹史 (技術統括部), 中野 正大* (九州工業大学)

Shogo WATANABE (Technology Control Department), Takafumi KOIDE (Technology Control Department),
Masahiro NAKANO* (Kyushu Institute of Technology)

溶接技術競技会では、板材の突合せ溶接を行う競技課題が多く、採点には外観判定や放射線透過試験、曲げ試験などが適用される。外観判定は判定基準にもとづき熟練の評価員が手動で行う必要がある¹⁾。また、曲げ試験を行う場合は作製した作品を保存できなくなる。そこで、作品の溶接ビード形状をレーザ変位計で計測して、計測データをプログラム処理することで外観判定を自動で行うとともに、計測データを3Dデータに変換・保存し、さらに溶接ビード形状を3Dプリンタで再現した。その結果、採点基準に従って溶接ビード形状の自動判定を行うことができた。また、実物に近いイメージが確認できる溶接ビード形状の3Dモデルとレプリカを作製することができた。

In welding competitions, many of the competition tasks involve butt welding of plates, and the scoring involves appearance judgment, radiographic examination, bending test, etc. Appearance judgment must be performed manually by an experienced evaluator based on judgment criteria. Also, if a bending test is performed, the created work cannot be saved. Therefore, we measured the weld bead shape of the work with a laser displacement meter, automatically judged the appearance by processing the measurement data with a program, converted and saved the measurement data to 3D data, and then reproduced the weld bead shape with a 3D printer. As a result, it was possible to automatically judge the weld bead shape according to the scoring criteria. In addition, it was possible to create a 3D model and replica of the weld bead shape that was close to the real thing.

1. はじめに

溶接業界では、少子高齢化や生産年齢人口の減少にともない日本の経済基盤を支える溶接技能者の不足が深刻化しつつあり、溶接の担い手の獲得が喫緊の課題になっている¹⁾。この課題を解決するためには、若年者を獲得して人材育成(技能伝承)を効果的に行うとともに、ロボット技術の活用を検討していく必要がある。

ロボット技術の活用にあたって、従来は少品種多量生産に対して産業ロボットを導入することが一般的であったが、最近では多品種少量生産にも対応できる協働ロボットが注目されている。協働ロボットは、人がロボットに直接触れて動作教示(ティーチング)を行うダイレクトティーチング、および高度なプログラム知識が不要な簡易設定ツールによって、ティーチングが容易になっている。また、センシング技術としてレーザ変位計を用いることで、対象物の形状を高精度に取得できる。しかしながら、協働ロボットやレーザ変位計を導入しても、溶接技能者のように溶接

位置を把握して、開先形状に適した溶接を行うには、膨大な課題を解決する必要がある。その第一歩として、開先形状および溶接ビード形状の自動判定技術の確立が必要である。図1に溶接ビード形状とトーチ軌道のイメージを示す。

一方、人材育成の取り組みの一つに溶接技術競技会がある。溶接技術競技会は、様々な団体が主体となって開催されており、溶接技能者の技術やモチベーションの向上、溶接の普及などに寄与している。溶接技術競技会では、被覆アーク溶接法または炭酸ガスアーク溶接法によって板材の突合せ溶接を行う競技課題が多く、採点には外観判定や放

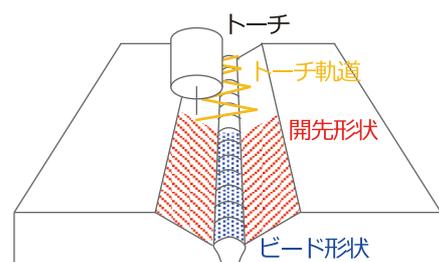


図1 溶接ビード形状とトーチ軌道のイメージ

* 九州工業大学 大学院 生命体工学研究科へ出向中

射線透過試験，曲げ試験などが適用される。図2に溶接技術競技会の作品の外観を示す。外観判定は判定基準にもとづき熟練の評価員が手動で行う必要がある¹⁾。また，曲げ試験を行う場合は作製した作品を保存できなくなる。そこで，ロボット溶接の研究過程で開発中の「開先形状と溶接ビード形状の自動判定技術」を応用して，溶接技術競技会の課題解決への取り組みを行った。作品の溶接ビード形状をレーザ変位計で計測して，計測データをプログラム処理することで外観判定を自動で行うとともに，計測データを3Dデータに変換・保存し，さらに溶接ビード形状を3Dプリンタで再現した。ここでは，これらの方法および検証結果，ならびに溶接技術競技会で実証した事例を示す。なお，溶接試験板の取違い防止のために，識別マーカのOCR処理による自動識別技術の検証も合わせて行った。

2. 実験方法

2.1 溶接試験板の作製

供試材には炭素鋼SS400の鋼板を使用した。溶接試験板は溶接技術競技会と同様の作製方法とし，板厚9mmの鋼板から幅125mmを切り出し，片面の突合せ溶接を行い作製した。溶接法は被覆アーク溶接および炭酸ガスアーク溶接，溶接試験板の長さは順に150mm，200mmとした。溶接姿勢は下向，立向，横向の3姿勢とした。

2.2 溶接ビード形状の計測

溶接試験板の溶接ビード形状をレーザ変位計で計測した。図3にレーザ変位計による計測のイメージを示す。レーザ変位計は計測方式が光切断方式，繰返し精度が1 μ mのものを使用した。レーザ変位計による計測は，溶接試験板を

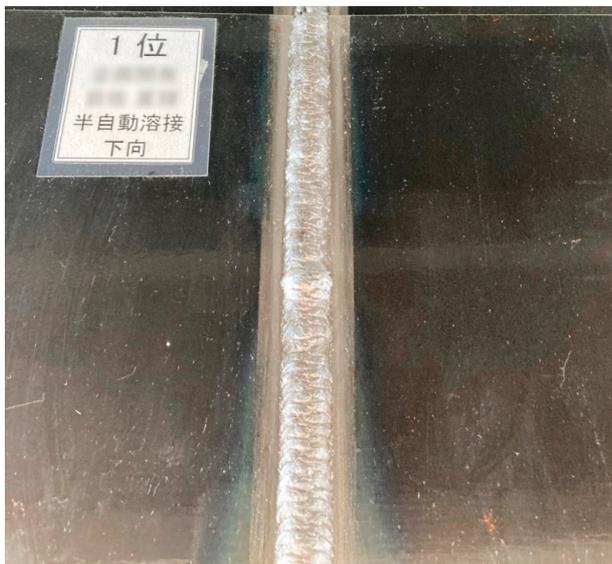


図2 溶接技術競技会の作品の外観

ステージ上に設置し，ステージを一定速度で動かすことによって行った。計測回数は表面および裏面に対して1回ずつ，計測長さは溶接試験板の長さ，計測幅は溶接ビードを中心に75mmとした。計測ピッチは0.025mm，計測値は40ピッチ間隔の4点ごとの平均値とした。

2.3 溶接試験板の自動識別

溶接試験板に識別マーカを取りつけ，レーザ変位計による計測時にOCR処理による自動識別を行った。識別マーカには溶接法，溶接試験板の番号，溶接姿勢，溶接面を表す英数字の組合せを印字した。精度の確認には，溶接試験板36枚の表面と裏面の計72枚を用いた。

2.4 溶接ビード形状の自動判定

レーザ変位計による溶接ビード形状の計測結果をプログラム処理して自動判定を行った。表1に溶接試験板の計測項目と採点基準を示す。審美性の判定は対象外とした。

溶接ビード形状の自動判定結果を検証するために，熟練の評価員による手動判定結果と比較した。比較に使用する溶接試験板は，被覆アーク溶接および炭酸ガスアーク溶接の3姿勢に対して3枚ずつの計18枚とした。

2.5 溶接ビード形状の再現

レーザ変位計で取得した溶接試験板の溶接ビード形状をもとに3Dモデルを作製し，3Dプリンタで溶接ビードのレプリカを造形した。図4に3Dモデルの作製イメージを示す。3Dモデルは，溶接試験板の表面と裏面の計測値に対してプログラムで合成処理を行うことで点群データに変換し，点群データに対してメッシュソフトで変換処理を行うことで作製した。点群データは0.1mmピッチとした。3Dプリンタの造形データは，3Dモデルをスライスソフトで変換することで作製した。3Dプリンタは造形方式が材料押出方式，位置決め精度が0.8 μ mのものを使用した。図5および6に3Dプリンタによる造形のイメージとその状況を示す。材料押出方式では，熱可塑性樹脂（フィラメント）を熱で溶かし，積層することで造形を行う。加熱されたフィラメントはノズルから線状に押出され，ノズルの移動経路

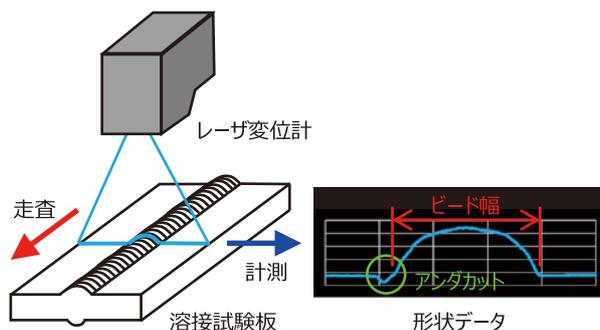


図3 レーザ変位計による計測のイメージ

表1 溶接試験板の計測項目と採点基準

位置	計測項目	採点基準			
		$\leq 5\text{deg.}$	$5\text{deg.} <$		
表面	角変形	$\leq 5\text{deg.}$	$5\text{deg.} <$		
		0	-5		
表面	ビード幅 (最大値)	$\leq 18\text{mm}$	$\leq 20\text{mm}$	$20\text{mm} <$	
		0	-2	-4	
表面	ビード高さ (平均値)	$< 0\text{mm}$	$\leq 3\text{mm}$	$\leq 4\text{mm}$	$4\text{mm} <$
裏面		-5	0	-2	-5
表面	アンダカット長さ* (合計値)	0mm	$\leq 10\text{mm}$	$\leq 30\text{mm}$	$30\text{mm} <$
裏面		0	-5	-7	-10

*深さ0.3mm以上

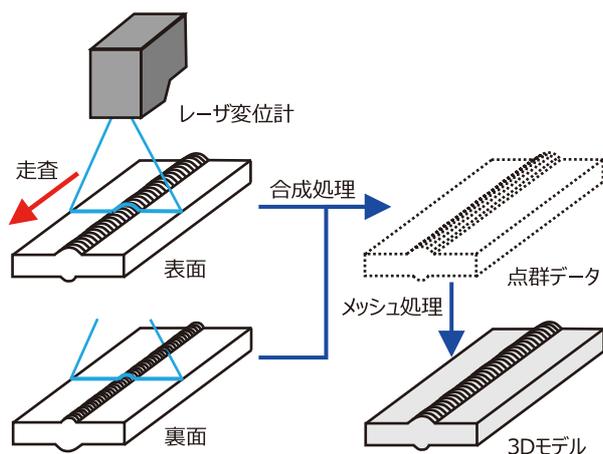


図4 3Dモデル作製のイメージ

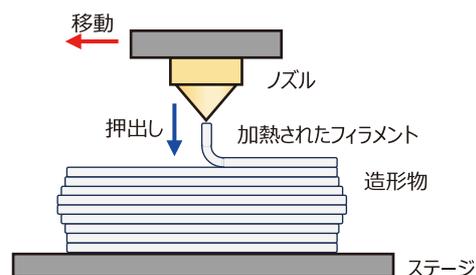


図5 3Dプリンタによる造形のイメージ

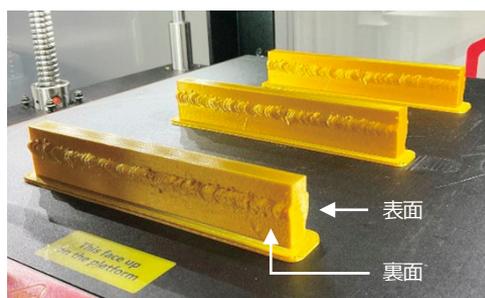


図6 3Dプリンタによる造形の状況

上に固定される。3Dプリンタのノズル径は0.4mm、積層ピッチは0.1mm、フィラメントの材質はPLAとした。

溶接ビード形状の再現精度を検証するため、レプリカのビード高さをレーザ変位計で計測し、溶接試験板の計測値と比較した。計測位置は長手方向の溶接ビード中央とした。比較に使用する溶接試験板は、被覆アーク溶接および炭酸ガスアーク溶接の3姿勢に対して1枚ずつの計6枚とした。

3. 実験結果と考察

3.1 溶接ビード形状の自動判定技術の検証

表2に溶接ビード形状の自動判定と手動判定の点数比較を示す。計測項目全体の一致率は77%であった。角変形とビード幅の一致率は順に100%、89%と比較的高かった。原因として、角変形とビード幅(最大値)は計測が容易なため、自動と手動の計測精度に差が出にくかったことが考えられる。一方、ビード高さやアンダカット長さの一致率は順に64%、72%と低く、手動判定は自動判定よりも点数が低くなる傾向がみられた。原因として、ビード高さの採点では、採点基準が平均値であることから、手動判定では正確な値を算出することが難しく、判定が厳しめに

なっていたと考えられる。アンダカット長さの採点では、自動判定はレーザ変位計により採点範囲全体のアンダカット深さを正確に計測できることから、深さ0.3mm以上の判定基準を設けて対象を選択していたが、手動判定はほとんどのアンダカットを対象にしていたことが考えられる。自動判定ではこれらを定量化できるため、より正確に判定ができ、評価員による採点誤差をなくすることができる。

レーザ変位計による自動判定のメリットとデメリットを以下に示す。

- ① 自動判定のメリット
 - ・平均値などの計測が難しい項目の定量化が可能
 - ・計測値がデータとして残るため、判定結果の検証が可能
- ② 自動判定のデメリット
 - ・レーザ変位計や周辺機器などの装置が必要
 - ・ノイズが発生する場合があるため、データの精査が必要

表2 溶接ビード形状の自動判定と手動判定の点数比較

判定方式	位置	計測項目	被覆アーク溶接									炭酸ガスアーク溶接										
			下向			立向			横向			下向			立向			横向				
			A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
自動判定	表面	角変形	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	表面	ビード幅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	表面	ビード高さ	0	0	0	0	-2	-2	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	裏面		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	表面	アンダカット	0	0	0	0	0	0	0	-5	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	裏面		0	0	0	0	0	0	0	-5	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
手動判定	表面	角変形	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	表面	ビード幅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	表面	ビード高さ	0	0	-2	0	0	-5	-5	0	-5	-2	0	-2	0	-2	-2	-2	-2	0	0	0
	裏面		0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0
	表面	アンダカット	-5	-5	-5	-5	-5	-5	0	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	裏面		0	-5	-5	-5	0	0	0	-5	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※ ■ :低い ■ :高い

3.2 溶接ビード形状の再現技術の検証

3.2.1 溶接ビード形状の3Dモデル作製

図7に溶接試験板の3Dモデルを示す。3Dモデルは回転や拡大をすることができ、実物に近いイメージで溶接ビード形状を確認することができた。なお、溶接ビード形状の大きな変化やレーザ変位計の計測時に発生したノイズによりメッシュソフトの変換処理が一部行えず、データが欠損する場合がある。対策として、レーザ変位計の計測環境やメッシュソフトの設定を改善すること、点群データの密度を大きくすることが考えられる。

3.2.2 溶接ビードのレプリカ作製

図8に溶接試験板とレプリカの溶接ビードの外観および高さの比較を示す。溶接ビードの外観は、被覆アーク溶接および炭酸ガスアーク溶接の3姿勢のいずれも再現することができた。なお、溶接ビードの色彩は再現することができないため、波目などの微細な特徴は目視で確認が困難であった。ビード高さはおおよそ一致しており、平均誤差は被覆アーク溶接で0.11mm、炭酸ガスアーク溶接で0.13mmであった。

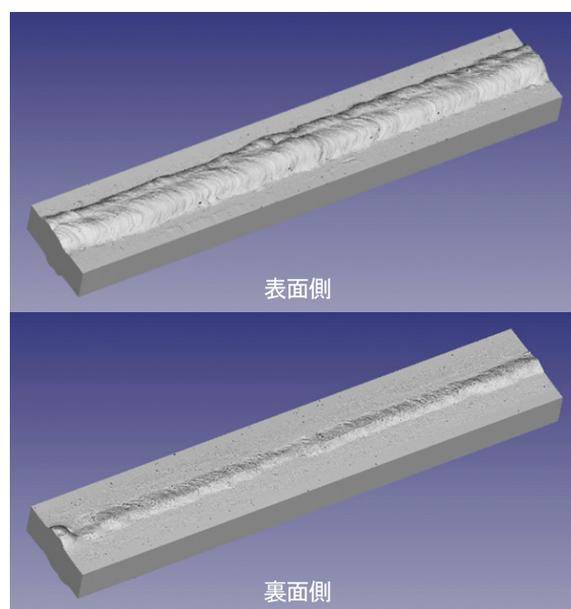


図7 被覆アーク溶接の溶接ビード形状の3Dモデル

ができた。手動判定は高い技術が必要とされることから、熟練の評価員が行っていたが、自動判定は作品の設置とレーザ変位計の操作のみ行えば良いため、溶接の知識がない者でも評価を行うことができた。

4.2 溶接ビード形状の再現技術の実証

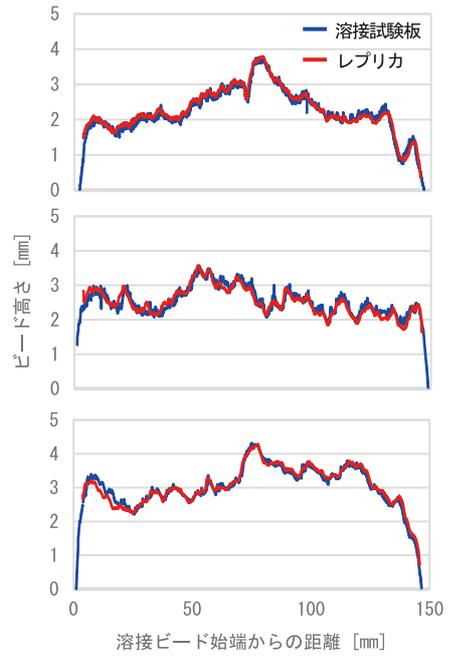
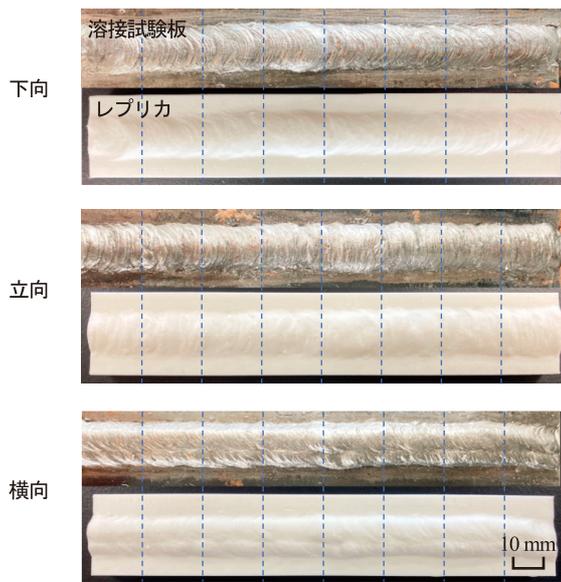
被覆アーク溶接の部および炭酸ガスアーク溶接の部の上位3名に対して作品の3Dモデルの作製を行い、レプリカを使用した表彰盾を配布した。図9および10に表彰盾の外観と授賞式の様子を示す。表彰盾はレプリカにケヤキ製の木枠を組合せたデザインとし、レプリカの色は順位に合わせて金、銀、銅とした。なお、表彰盾の裏面では裏波ビードを確認することができる。

受賞者へのアンケートでは、自分の溶接ビードを後から確認することができて良かった、溶接ビードの出来栄に

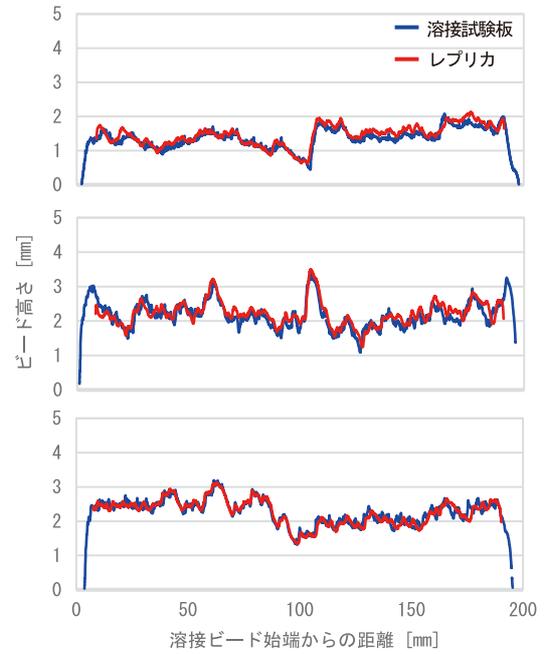
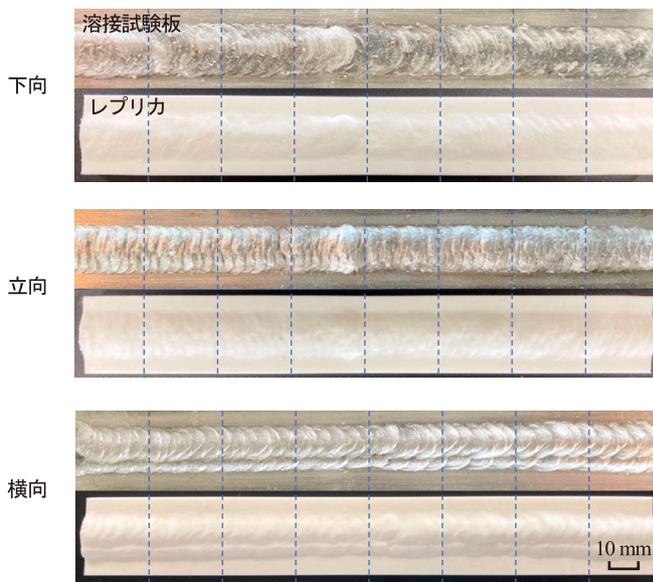
4. 溶接技術競技会での実証結果

4.1 溶接ビード形状の自動判定技術の実証

溶接技術競技会の作品の自動判定を表1に従って行った。作品は被覆アーク溶接が8名×3姿勢、炭酸ガスアーク溶接が4名×3姿勢の計36枚を対象とした。従来の手動判定では評価員がゲージなどで計測して採点を行っていたが、自動判定ではレーザ変位計による正確な計測値をもとに採点を行うことができた。作品の採点時間は、手動判定が2時間30分、自動判定が1時間30分となり、40%の短縮



(a) 被覆アーク溶接



(b) 炭酸ガスアーク溶接

図8 溶接試験板とレプリカの溶接ビード形状の比較



図9 溶接ビード形状を再現した表彰盾



図10 授賞式の様子

ついて同僚から意見を聞くことができた、今後も表彰盾を配布してほしいなどの意見が多くあった。若手の溶接技能者などは、表彰盾を家族や友人に見せることで、自身が学ぶ溶接について話をするきっかけにすることが期待できる。

4.3 溶接試験板の自動識別技術の検証

図11に識別ラベルの認識状況を、表3にOCR処理による自動識別の結果を示す。自動識別の一致率は平均で69%であった。自動識別が失敗した原因として、白色のラベルに黒色の印字を行ったために、ラベル外の母材部分を文字として認識してしまったことが考えられる。対策としては、処理範囲を厳密に設定すること、ラベルではなく打刻による印字を行うことが考えられる。



(a) 成功 (b) 失敗

図11 識別ラベルの認識状況

表3 自動識別の一致率

溶接法	位置	一致数/全数	一致率
被覆アーク溶接	表面	18/24	75%
	裏面	9/24	38%
炭酸ガスアーク溶接	表面	12/12	100%
	裏面	11/12	92%
全体		50/72	69%

5. おわりに

溶接技術競技会の課題である手動での外観判定と作品の保存の難しさを解決するため、溶接ビード形状の外観判定を自動で行う方法、溶接ビード形状を3Dデータで保存する方法、および3Dプリンタでレプリカとして再現する方法を検討し、その検証を行った。さらに、溶接技術競技会でこれらの技術を実証した。

① 溶接ビード形状の自動判定技術

- ・採点基準に従って溶接ビード形状の自動判定を行うことができる。手動判定との一致率は77%であった。
- ・自動判定では、手動判定では難しいビード高さの平均値の算出や判定範囲全体のアンダカット深さの計測を行うことができる。

② 溶接ビード形状の再現技術

- ・溶接ビード形状を実物に近いイメージで確認できる3Dモデルに変換し、データとして保存できる。
- ・3Dプリンタで溶接ビード形状のレプリカを精度よく作製できる。ビード高さの平均誤差は0.12mm程度であった。

③ 溶接技術競技会での実証

- ・自動判定によって採点時間を40%短縮できる。
- ・作品の溶接ビード形状のレプリカを用いた表彰盾を作製できる。

今後は溶接ビード形状の数値解析によって審美性の評価を行い、溶接技量採点システムを構築することで技能伝承を効果的に行うための研究を行う。また、溶接技術競技会の作品を3Dデータとして蓄積することで、歴代の溶接技能者の技量傾向を比較することも可能になり、さらなる応用技術の確立が期待できる。

6. 謝辞

本研究は、九州工業大学との共同研究講座（プラントライフサイクルエンジニアリング講座）にて行った。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) W.Mizunuma: Effort to Develop and Secure Welding Human Resources, Journal of the Japan Welding Society, Vol.92 No.1 (2023), 6-12 (in Japanese)



渡邊 彰吾 Shogo WATANABE
技術統括部



小出 鷹史 Takafumi KOIDE
技術統括部



中野 正大 Masahiro NAKANO
九州工業大学