

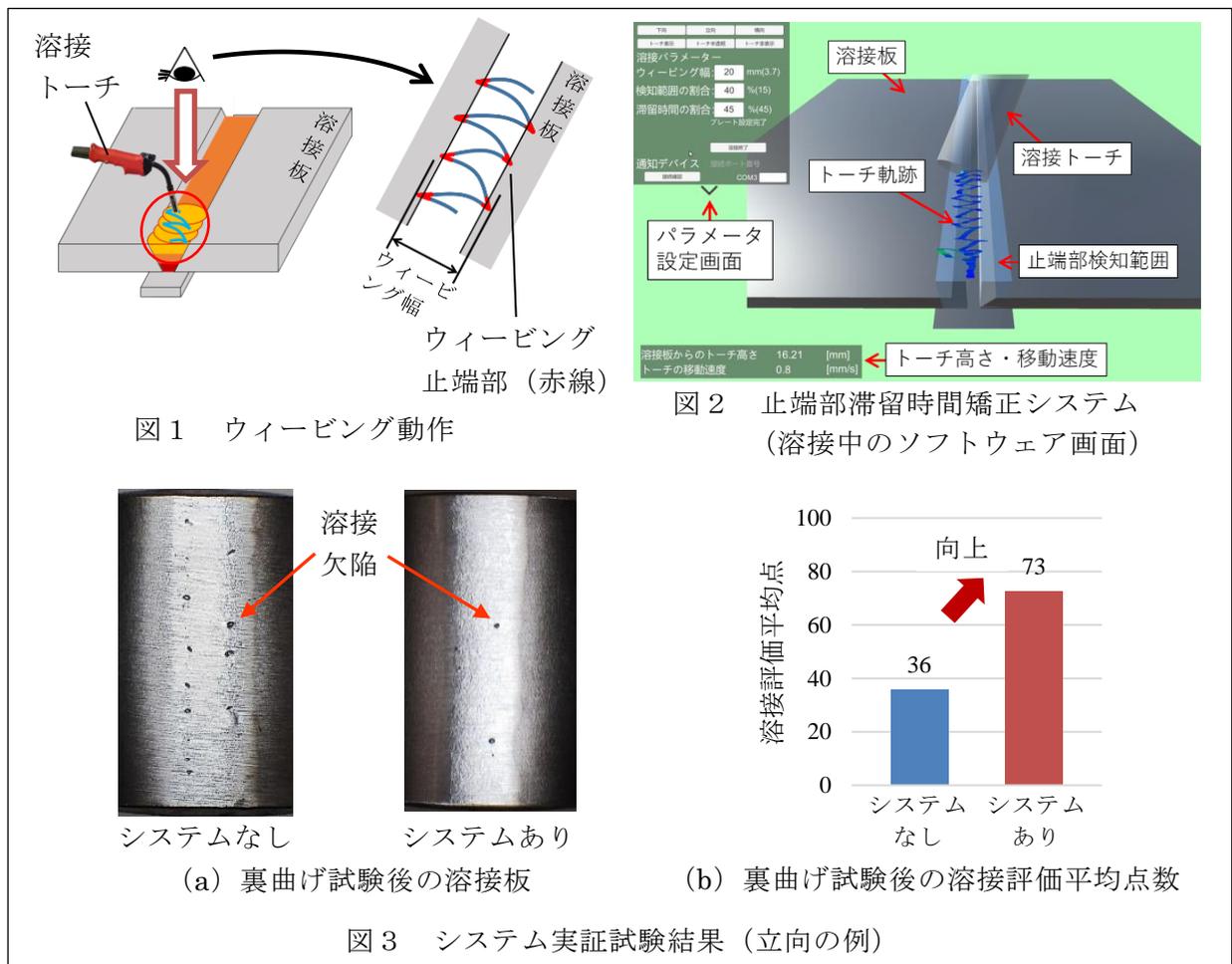
# 溶接現場用技術向上システムに関する試験・開発研究

Development of on-site welding skill's improvement system

長谷川 諒、佐々木 正司、松坂 八州男\*  
 (\*株式会社上北鉄工)

近年、金属加工業界で深刻化する熟練作業者の高齢化は溶接現場においても例外ではなく、早急な若手溶接士の育成が求められている。一方で溶接現場における技能教育は、溶接作業者の技量が溶接品質に大きく影響するにも関わらず、定量的に評価できていない課題があった。そこで本研究では、モーションキャプチャシステムを用いて溶接トーチ動作を数値化し、半自動溶接の技術伝承に取り組んでいる。基本姿勢である下向姿勢についての溶接トーチ動作矯正システムは以前開発したため、難易度の高い立向・横向姿勢における矯正システムの開発に取り組んでいる。

立向・横向姿勢ともに、ウィービング動作（トーチを左右に動かしながら溶接する動作）中にトーチ先端がウィービング止端部（図1）で滞留する時間の割合が大きいほど溶接品質が向上することが分かったため、昨年度に止端部滞留時間矯正システムを作製した（図2）。今年度は県内の未熟練者を対象にこのシステムを用いた実証試験を行った。その結果、立向・横向姿勢ともにシステムを使用することで溶接欠陥が減り、溶接評価平均点が向上した（図3）。システムの有効性が確認できたため、2024年4月より機器貸出による供用を開始した。



## 1. はじめに

近年、金属加工業界で深刻化する熟練作業者の高齢化は溶接現場においても例外ではなく、早急な若手溶接士の育成が求められている。一方で溶接現場における技能教育は、溶接作業者の技量が溶接品質に大きく影響するにも関わらず、定量的に評価できていない課題があった。そこでモーションキャプチャシステムを用いて、半自動溶接の基本姿勢である下向姿勢における熟練者と未熟練者の溶接トーチ動作の解析を行い、良好な溶接を行うには溶接トーチの高さ（溶接板とトーチ先端との距離）を一定にすることが大事であることを提案し、この動作を矯正するシステムを作製した<sup>1)</sup>。

本研究では、治具等を作製してモーションキャプチャシステムを持ち運びしやすいように改良し、企業等の溶接現場においても溶接トーチの動作を解析できるようにした。そして、下向姿勢よりも難易度が高い立向・横向姿勢において、溶接現場に向いて熟練者と未熟練者の動作を計測・解析し、異なる因子を見だし、未熟練者用の矯正システムの作製を試みた。さらに未熟練者のみならず、熟練者でも自身の溶接を振り返ることができるように、立向・横向姿勢における溶融池観察方法についても検討した。

## 2. 実験方法および結果

### 2. 1 溶接現場に持ち運びしやすい治具の作製

モーションキャプチャシステム（NaturalPoint 製 OptiTrack）は光学的にマーカの位置を読み取ることでマーカを取り付けた物体の位置と動きを三次元的に測定し、データ化して記録するものである。このシステムはカメラ8台、カメラ固定用の三脚、専用のソフトウェアをインストールしたパソコン等から構成される。溶接現場に持ち込む際、セッティングに時間がかかる主な工程は、三脚に固定したカメラの位置設定である。精度の良い計測を行うためにはカメラの台数が多い方が良いため、台数を減らすのではなく、4台のカメラを一つの治具に固定し、2本の三脚で支える構造とした（写真1、2）。これを採用したことにより、溶接現場への設置に30分以上を要していたものが20分に短縮された。

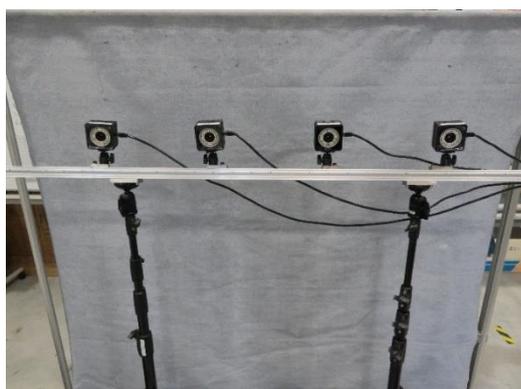


写真1 持ち運び用のカメラ固定治具  
(カメラ4台をまとめて固定)



写真2 溶接現場に設置した  
モーションキャプチャシステム

## 2. 2 立向・横向姿勢における溶接トーチ動作解析と異なる因子の発掘

企業の熟練者5名と未熟練者4名の溶接作業者に立向・横向姿勢での半自動溶接を行ってもらい、その際の溶接トーチ動作データを解析した。溶接電流は105~150 A、溶接電圧は18~20 Vの間で任意に設定してもらい、シールドガスは炭酸ガス、被溶接材のサイズは200×125×t9 mmで、裏当金ありとした。立向姿勢は2層2パスもしくは3層3パス、横向姿勢は3層6パスで溶接を行った。いずれも溶接トーチに取りつけたマーカをモーションキャプチャカメラが読み取り、マーカとの相対位置からトーチ先端の座標を取得した。マーカは溶接中のアーク光やスパッタの影響がない場所に取りつけた。溶接品質の評価方法は、溶接部の曲げ試験にて発生した欠陥の長さや深さを点数化し、100点満点からの減点方式で採点（溶接評価点）したが、表曲げ試験では溶接作業者ごとの差が出にくいいため、裏曲げ試験のみで評価を行った。

図1に熟練者と未熟練者の1層目の溶接トーチの軌跡の例を示す。裏曲げ試験に大きく影響するのは1層目であるため、1層目のトーチ軌跡を重点的に調べた。熟練者のトーチ軌跡は比較的規則性をもっているが、未熟練者は不規則であり、溶接作業者によってばらつきが大きかった。採取した35個のトーチ軌跡データから溶接速度、トーチ角度、ピッチ、幅等の因子を解析し、特徴を見出そうとしたが、両者の間で明瞭な異なる因子を見つけることはできなかった。

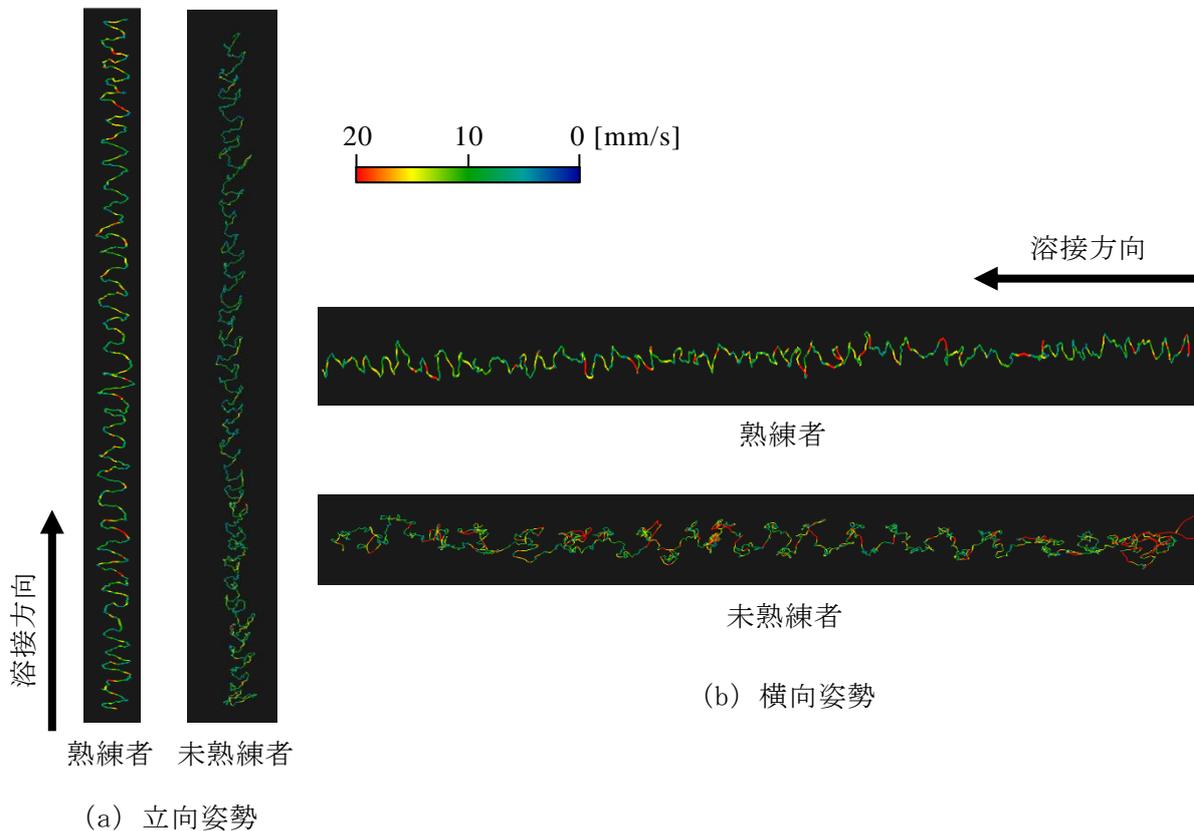


図1 立向・横向姿勢における1層目の溶接トーチ先端の軌跡の例

そこで、未熟練者の裏曲げ試験後の欠陥から特徴を見いだせないか検証を行った。その結果、写真3に示すように、ほとんどの欠陥は開先（溶接板の端の部分）に沿って割れが発生する溶け込み不良が原因と推察した。溶け込み不良の対策としては、開先形状の適正化、適切な溶接入熱、アーク位置の開先中央からのずれを抑えることなどが考えられる<sup>2)</sup>が、検証したところ溶接入熱が適正

でなく、止端部（ウィービングした際に溶接トーチが止まる部分）での溶け残しが主な原因であると考えた。

図2、3、4に、溶接時間に対して溶接トーチが止端部で滞留した時間の割合を指標にして、溶接評価点との関係を調べた結果を示す。なお、ウィービング幅に対して両端各15%の幅を止端部とした。下向姿勢の場合は46%付近にピークが生じるが、立向・横向姿勢ともに割合が大きくなると溶接評価点が向上することが分かった。下向姿勢の滞留時間割合40%以下で溶接評価点が低下するのは溶け込み不足、46%を超えると低下するのは先行して流れた溶融金属の凝固が邪魔し開先が溶融不足になったためと考えている。また、立向・横向姿勢は下向姿勢のようにピークは生じないが、滞留時間割合が大きい部分は溶融金属が垂れ落ちることが懸念されるためデータを取らなかった。

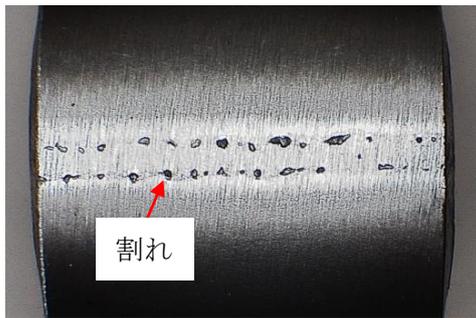


写真3 裏曲げ試験後の欠陥

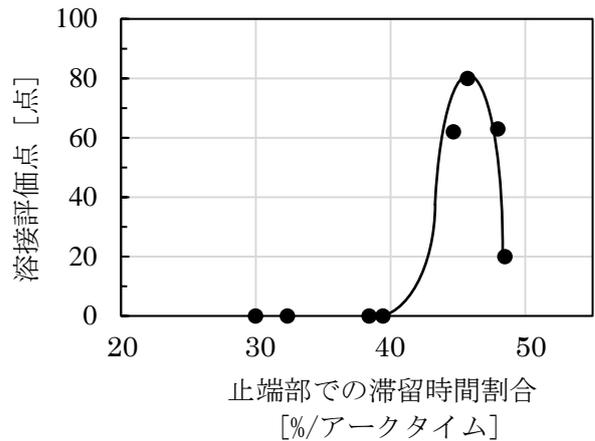


図2 止端部での滞留時間割合と溶接評価点の関係（下向姿勢）

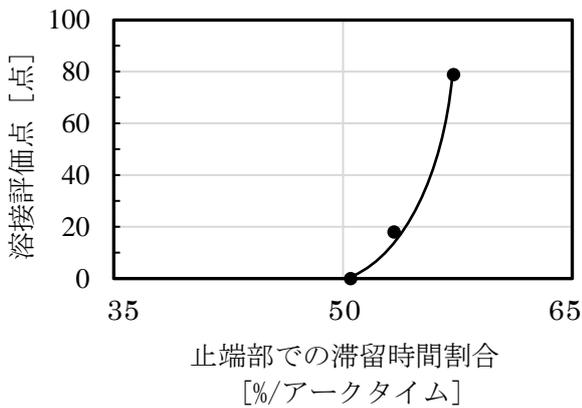


図3 止端部での滞留時間割合と溶接評価点の関係（立向姿勢）

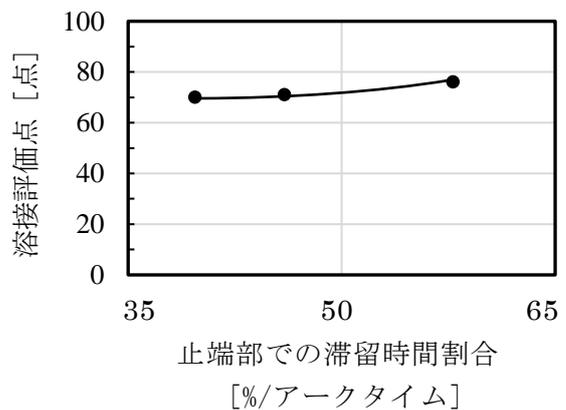


図4 止端部での滞留時間割合と溶接評価点の関係（横向姿勢）

### 2. 3 未熟練者用の溶接トーチ動作矯正システムの作製と実証試験

上記のことから、止端部での滞留時間割合が溶接評価点に影響を及ぼすことが分かったため、止端部での滞留時間が短いことを検知して溶接作業者に通知するシステムを作製した。溶接作業者に振動デバイスを取り付け、適正範囲から外れたら振動デバイスを 0.1s 以内に稼働させることで、溶接作業者にほぼリアルタイムで通知され、矯正を促すものである（図 5）。振動デバイスの作動には Arduino Uno を利用し、アプリケーションの作成には Unity を活用してシステムを作成した。図 6、7 にウィービング動作の模式図と溶接中のソフトウェア画面を示す。ソフトウェア画面には溶接板、溶接トーチ、止端部検知範囲、パラメータ設定画面とトーチ先端の軌跡が表示される。



図 5 止端部滞留時間矯正システムのイメージ

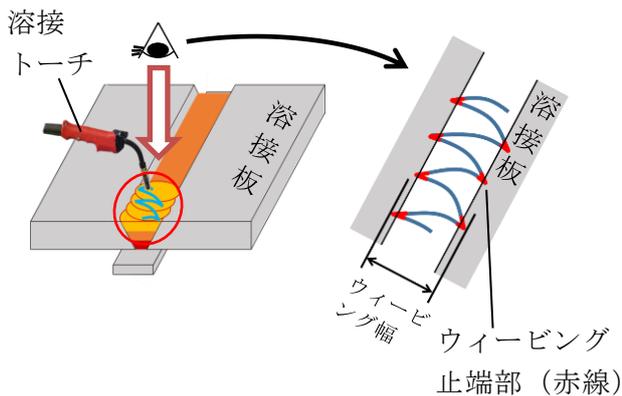


図 6 ウィービング動作

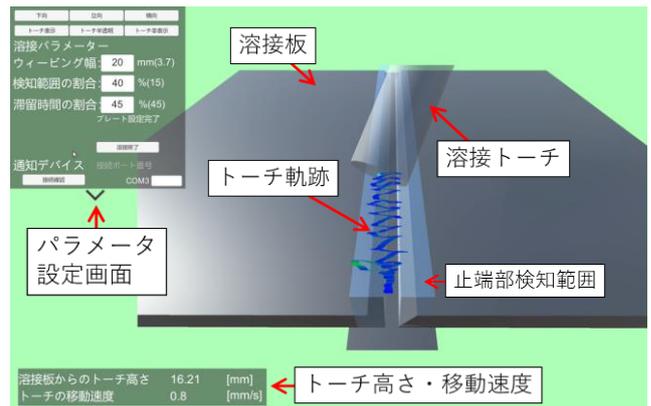


図 7 止端部滞留時間矯正システム (溶接中のソフトウェア画面)

次に、立向・横姿勢において、そのシステムを使用する前後での効果を検証した。図 3、4 の結果から下限を 55% に設定したが、この値を下回ったら腕に取りつけた振動デバイスを稼働させることとした。所内の研究員 1 名と企業 2 社の溶接作業者各 1 名の合計 3 名の未熟練者に立向・横姿勢での溶接を行ってもらった。曲げ試験片は被溶接材 1 枚から幅 20mm の曲げ試験片を 3~4 箇所を採取し、裏曲げ試験を行って発生した溶接欠陥を長さ・深さから点数化し、100 点満点からの減点方式で評価した。

その結果を図 8 に示すが、システムを使用したことで溶接評価点が向上もしくは同等となり、少なくとも低下しないことが確認された。未熟練者 (C) の立向姿勢は、溶接トーチに取りつけたマークが被溶接材や溶接土自身によって隠れてしまい、モーションキャプチャカメラが感知できなかった。そのためシステムを使用しないで 2 回溶接を行ったことになるが、溶接評価点は同等であるため、繰り返すことによる慣れや疲れの影響は無いことも分かった。写真 9 にシステム使用前後の裏曲げ試験片の表面の一例を示すが、欠陥が減少したことが分かる。

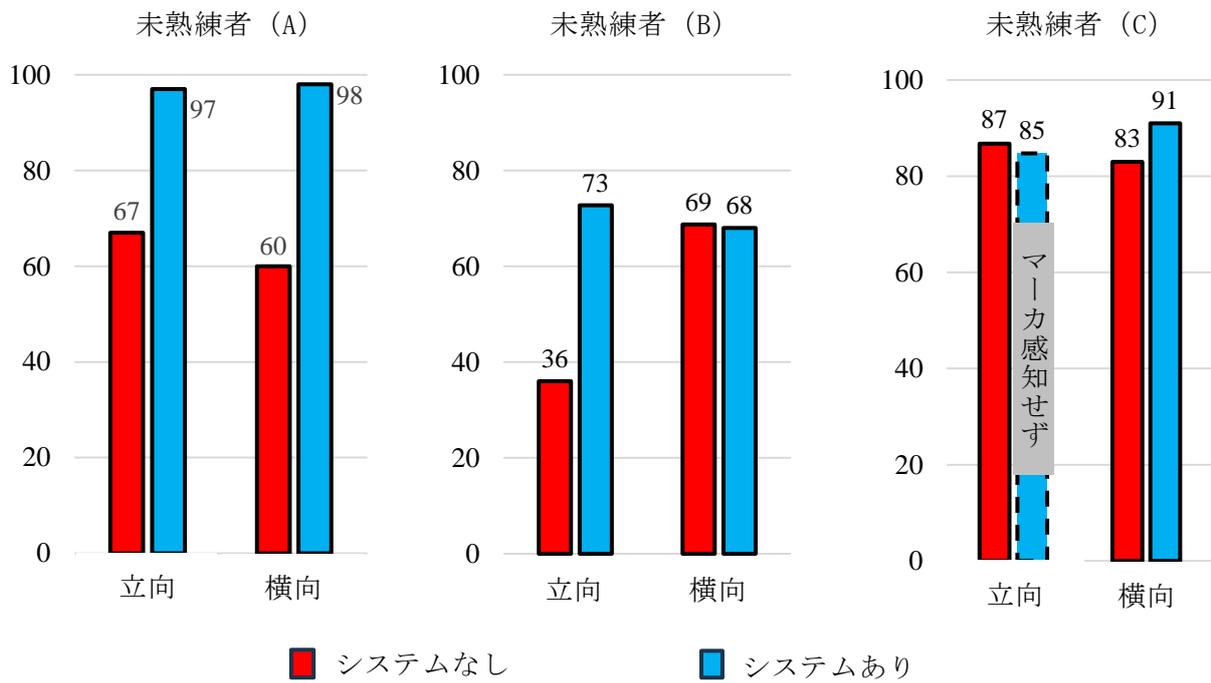


図8 システム使用有無における溶接評価平均点数 (n=3~4)

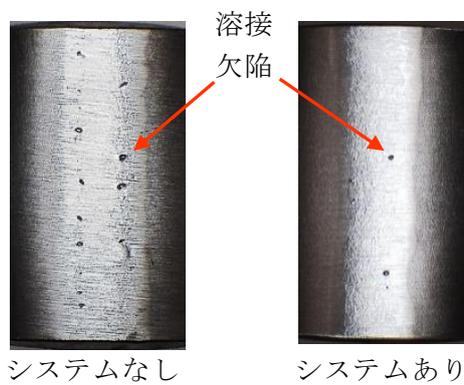


写真9 システム使用有無における裏曲げ試験片

## 2. 4 立向・横向姿勢における溶融池観察方法の検討

未熟練者のみならず、熟練者でも自身の溶接を振り返ることができるようにするため、市販の4Kビデオカメラ（Panasonic 製 HC-VX992M-T）を使用して溶融池やスパッタを後で観察することができるかどうか検討した。溶融池はアーク光により非常にまぶしいため、630 nm 以下の波長の光をカットする短波長カットフィルターを取りつけることでコントラストを解消した。立向・横向姿勢における溶融池を撮影した結果、アーク光の影響を受けずに溶接部を鮮明に撮影することができ、同時に動作評価結果（溶接電流値・電圧値）を表示させることもできた（図10は横向姿勢の例）。溶接トーチを動かすことで溶接電流・電圧値が変化するため、動画内に溶接電流値・電圧値も表示できるようにした。開先部分が溶ける様子、スパッタの発生具合などを後で振り返ることで、溶接条件や溶接トーチ動作の修正などに活用できることが期待される。



図10 ビデオカメラによる溶接部撮影映像（横向姿勢）

## 3. まとめ

- (1) モーションキャプチャシステムを溶接現場に持ち運びしやすいように、カメラを4台ずつ固定できる治具を作製し、溶接現場での動作計測を実施しやすくした。
- (2) 立向・横向姿勢での溶接トーチ動作の計測結果より、ウィービング止端部での溶接トーチ滞留時間割合が溶接品質に影響することが分かった。
- (3) (2)の結果を基に溶接トーチ動作を矯正するシステム（止端部滞留時間矯正システム）を作製した。所内試験および県内企業2社で実証試験を実施し、本システムが溶接品質向上に寄与することを実証した。
- (4) 市販のビデオカメラを使用して、溶融池やスパッタを後で観察できるようにした。これにより未熟練者のみならず、熟練者でも自分の溶接を振り返ることができるようになった。
- (5) 本研究で作製した止端部滞留時間矯正システムの有効性が確認できたため、2024年4月より機器貸出による供用を開始した。

#### 4. 参考文献

- 1) 加藤, 佐々木: 溶接学会全国大会講演概要, 第 105 集, (2019-9), 132-133
- 2) 一般社団法人溶接学会、一般社団法人日本溶接協会編: 新版改訂溶接・接合技術入門, (2019), 286