

論文・報告

次世代 3D 溶接部可視化マスクの開発

Development of Weld-Visualization Technology and Next-Generation, 3D-Welding Helmet

津山 忠久 *1
TSUYAMA Tadahisa布施 直彦*2
FUSE Naohiko本摩 敦 *3
HOMMA Atsushi室田 千春 *4
MUROTA Chiharu金平 徳之 *5
KANEHIRA Noriyuki

川田工業は鋼製橋梁および建築鉄骨を主体とするファブリーケーターである。溶接に関して工場では、自動化ラインを導入し可能な範囲で自動機やロボットを使用することで省力化を図っているが、製造しているほとんどすべての製品が一品一様であることから、人による作業は欠かせない。したがって、人員の確保・育成や溶接技能の継承は工場にとって重要なテーマの一つである。今後の労働力の減少を考えたとき、溶接技能というスキルをいかに効率的に初心者に伝えるか、ということは工場にとって取り組まなければならない喫緊の課題である。

このような背景のもと、川田グループ全体で取り組むタスクフォースプロジェクトとして企画された『川田グランドチャレンジ』の活動の中で、XDR 技術を用いた溶接部可視化システム(本システム)および本システムを搭載した次世代 3D 溶接部可視化マスクの開発に着手した。この狙いは、圧倒的な視野で「溶接が見える」ようになれば技能習熟のスピードを劇的に向上させられるのではないかという点にある。本稿では、開発中の本システムについてその技術的内容とこれまで得られている成果について説明する。

キーワード：溶接部可視化，XDR，技能伝承，溶接技能者育成，次世代 3D 溶接部可視化マスク

1. はじめに

ここ数年、日本の製造業はアベノミクスを背景に好調な業績を上げている一方で、人手不足の深刻化が問題となっている。経済産業省によると有効求人倍率は 2010 年より増加し続けており、人材確保が「大きな課題となっておりビジネスにも影響が出ている」と答えている企業の割合は 2017 年調査で 32.1%というデータがある¹⁾。この割合は前年から 9%も増加しており、人材確保の課題がさらに顕在化し深刻な課題になっていることがうかがえる。各産業への就業者数の推移を見ると、景気回復の中で雇用環境が改善したことから全体の就業者数は増えているものの、それは医療、福祉などで多く見られ、製造業の就業者数はほぼ横ばい圏内を推移しており、製造業では人材の確保にハードルを抱えている¹⁾。今後、少子高齢化と人口減社会に突入する日本において企業の雇用確保は容易ではなく、特に労働環境が他産業と比べて悪いとされている建設業においては死活問題である。

このような背景を踏まえ国土交通省は「建設業働き方改革加速化プログラム」を策定し、長時間労働の是正、給与・社会保険、生産性向上の 3つの分野における新たな施策をパッケージとして 2018 年にまとめた。週休 2 日制の導入、技能や経験にふさわしい処遇（給与）の実現などを掲げており、魅力ある建設業界を構築すること

で新規労働者を確保しようと努力している。2016 年度のデータでは、建設業就業者における 29 歳以下の割合は約 11%であり、55 歳以上が約 34%にあるのに比べると著しく若手が不足していることが明らかである²⁾（全産業においてはそれぞれ約 16%、約 29%）。このような若年入職者の確保の課題に対し政府は、人手不足の分野で一定の技能を持つ人を対象に新たな在留資格「特定技能」を 2019 年 4 月に創設、外国人労働者の大幅受け入れに舵を切った。建設は特定産業分野とされ労働者増が期待されるが、特定技能外国人をどう活用し生産性向上に繋げていくことができるかが最も重要であることは忘れてはならない。

経済産業省の調査によると、製造業において確保に課題がある人材の種類は「技能人材」が最も高い¹⁾。この傾向は製造する製品にかかわらず同じであり、部品、原材料・素材、加工の分野で特に高い。技能人材不足に対する企業の対策としては自動機やロボットの導入による自動化・省人化、IT・IoT・AI などの活用による生産工程の合理化等が最重要課題として取り組まれている印象が強いが、実は「新卒採用の強化」を掲げる企業が多い¹⁾。つまりロボットや IT よりも、まずは若手人材を確保することが最も重要であると考えていると言えるが、これは同時に、確保した人材を早期に育成することが必

*1 川田工業㈱四国工場生産開発課 課長

*2 川田工業㈱鋼構造事業部工事部 次長

*3 川田工業㈱鋼構造事業部橋梁企画部橋梁企画室 室長

*4 川田テクノロジーズ㈱技術研究所

*5 川田テクノロジーズ㈱技術研究所 所長

須となる。しかしながら技能人材は一朝一夕で育つものではないことは周知の事実であり、例えば弊社における溶接技能者育成には「偶肉 3 年、フルペネ 5 年」という言葉があり、一人前に仕事ができるようになるには非常に長い時間と多くの経験を必要とする。つまりコストがかかる。したがってこの育成期間（修業期間）を短くすることは企業の生産性向上に大きく寄与することになる。溶接は前述した外国人材受入れ対応策における技能実習生の「特定技能」にも位置付けられるため、やはり指導育成をどう行っていくかがカギとなる。

2. 弊社の事情

川田グループ内の川田工業は鋼製橋梁および建築鉄骨を主体とするファブリーケーターであり、工場に多種多数の技能工を抱えている。溶接に関して工場では自動化ラインを導入し可能な範囲で自動機やロボットを使用することで省力化を図っているが、製造しているほとんどすべての製品が一品一様であることから、人による作業は欠かせない。橋梁部材では写真 1 に示すような部材内部に入るのも大変なほどの開口しかない場合もあり、例えばロボットを内部に入れて溶接をするにはハードルが高すぎる。つまり部分的にロボット等で自動化ができる部位はあったとしても人が溶接をするところは無くならず、厚板隅角部など特に溶接が難しい部位の自動化は困難であろう。これは工場のみならず現場でも同じであり、開先形状や組立精度等に応じて臨機応変に短時間で対応できるのはやはり「人」である。したがって、溶接技能者を確保し育てることは溶接の自動化と同時に進めなければいけない喫緊かつ必須の課題である。

しかしながら前述したとおり技能工の育成は容易ではない。特に溶接においては経験だけでなくセンスも要求される。弊社では入社時に溶接トレーニングを数週間実施し、溶接に必要なセンスを有しているかをベテラン技能者が見極めている。これは将来に渡って溶接を続けられる能力があるかどうか、すなわち高度な技能を有する溶接技能者になれそうかどうかの観点で判断しているものである。簡単に言うと 100 点が取れる溶接技能者になれそうかということである。しかし将来を見据えたとき、100 点を取れる人材に絞ってしまうと溶接技能者が不足して生産性が低下する恐れがある。よって 80 点を取れる溶接技能者が多くいた方がいいのではないかと考えている。80 点が取れる溶接技能者が多くいることで若干の手戻りはあるかもしれないが仕事の大半がこなせるだろうし、その中で 100 点を取れる溶接技能者も出てくるだろう。IT だ AI だという時代に溶接技能者になりたがる若い人材は少なくなる一方と考えられるため、やりたい人にはできるだけチャンスを与えようという考えも十分ありうる。



写真 1 橋梁部材製造の様子

しかしながら次に課題となるのは、仮に溶接がやりたけれどセンスが少し足りない人がいるとして、どうやって 80 点が取れる溶接技能者になってもらうのか？ということになる。つまりどう教育していくかである。これまでの溶接技能教育は、先輩のやっているところを見よう見まねで覚えるという「背中をみて覚えろ」的なスタイルであろう。これは一見旧態依然としたやり方ではあるものの、溶接においては現代においてもある種仕方がない部分がある。というのも指導をするには溶接をしているところを見る必要があるが、「溶接を見る」と言っても溶接保護面に付いた遮光ガラスや液晶フィルター越しに見える世界はほぼ真っ暗で、特に初心者にとっては何が見えているのかさっぱりわからない（写真 2）。溶接が見えにくいと先輩がどこを見て何に注意しているのかはなかなか理解できない。また、高度な技能をもつ溶接技能者には特にありがちであるが、自分のやっている技能を言葉にして伝えることに不得手である傾向が強い。つまり「背中をみて覚えろ」というやり方はそうならざるを得ない部分があり、溶接技能伝承のハードルの一つになっているのが現実であろう。

3. 溶接部可視化システムの開発

2 で述べた教育の仕方を変えるには、まず「溶接が見える」ことがとても重要であることに気が付く。溶接保護面を通して見える世界は、アークを中心とした半径 5cm 程度の領域であり、自分の引いたビードや周辺の部材、自分が持っているトーチなどほとんど見えていない。筆者自身、初めて溶接をした時は何が見えているのかさっぱりわからなかったし、少し溶接ができるようになっても部材端が見えずに真っすぐビードを引けなかったり、アークを切るポイントを間違えてしまうことが頻繁にある。従って、もし「溶接が見える」ようになればどこを溶接しているかがすぐに分かる、自分の引いたビードが見えるようになる等メリットは非常に大きいと考えられ、技能習熟のスピードを劇的に向上させられるのではないかと考えた。

そこでこれまでにない溶接部可視化システムの開発に着手した。ここでまず「溶接が見える」とはどのようなことかを定義する。アーク、溶融池、ワイヤおよびノズル先端などの従来の溶接保護面で見えているものは同等以上の品質で見えるのはもちろん、加えて母材形状や自分の引いたビードおよびトーチなどの視界に入っているものはほぼ全てが同時に見えていることを「溶接が見える」とここで定義する。求めたのは従来の溶接保護面に比べて圧倒的に広い視野と高い鮮明度である。

溶接を撮影するための従来システムとしては、フィルターを装着したカメラが一般的に用いられ、自動機等に搭載され実用化されている。これは、様々な波長をもつアーク光を各種フィルターによって減光もしくは特定の波長を透過させ、さらに照明やカメラ側のシャッタースピードや絞り調整等により見たい対象物に応じて輝度とコントラストを調整する手法である。電極、アーク、溶融池、開先、溶接ビードなど見たい対象物に応じて調整するやり方であるため、言い換えれば見たいもの以外は見えづらいことになる。これは強烈な閃光であるアークとそれ以外の箇所で非常に大きい明暗差が生じていることが原因であり、このような特性をもつ溶接部を広い視野で可視化するには、取り扱える明るさの範囲（ダイナミックレンジ）の広い特殊なカメラを使用するか、レーザー照明などを使った大掛かりな装置が必要となる。しかしながらこれら装置は非常に高価であり溶接作業性を阻害するなどの課題がある。我々は特殊なカメラやレーザー照明などを使わずに「溶接が見える」ようにするための技術開発に取り組んだ。

図 1 に我々の開発した溶接部可視化システムの概念図を示す。本技術は米国の SRI International と共同で開

発した。SRI International は世界の主導的研究・技術開発組織のひとつであり、1946 年に非営利研究機関、スタンフォード研究所として設立、政府機関や企業、財団の戦略的要請に応じている。本技術により、一般的なイメージセンサを搭載したボードカメラ、つまりスマートフォンなどの小型デバイスに搭載されるような、一般的なカメラであってもダイナミックレンジを大幅に拡張することが可能となった。このダイナミックレンジ拡張技術を Xtreem Dynamic Range (XDR) と呼んでいる。本システムで得られるダイナミックレンジは 150dB 以上である。

図 1 に示す通り、本技術では、イメージセンサを 1 つのカメラユニットの中で複数用いることが、ダイナミックレンジの大幅な拡張を可能にしている。ダイナミックレンジを拡張するために一般的に用いられる手法の一つに「HDR 合成」がある。これは今日ではすでに一部のスマートフォンのカメラ機能に搭載され、日常生活にも生かされている。通常の HDR 合成は、1 つのイメージセンサで複数の画像を連続で撮影し、合成する。このとき、連続で撮影する画像 1 つ 1 つの明るさ（露出）の設定を変化させ、明るさの異なる複数の画像から得られる情報を適切に合成することで、「白飛び」や「黒つぶれ」などの飽和現象を抑える効果がある。明るさを変えて取得する画像の数が多いほど、明暗差のより大きなシーンに適用することが可能になるため、これを溶接のような極端に明暗差が大きい現象に適用させようとする、より多くの画像を連続で撮影する必要が出てくる。すると、最初に撮影した画像から最後に撮影した画像までの間で長い時間が必要になり、撮影から画像の生成までのタイムラグが大きくなるうえ、スパッタなど高速で動くもの

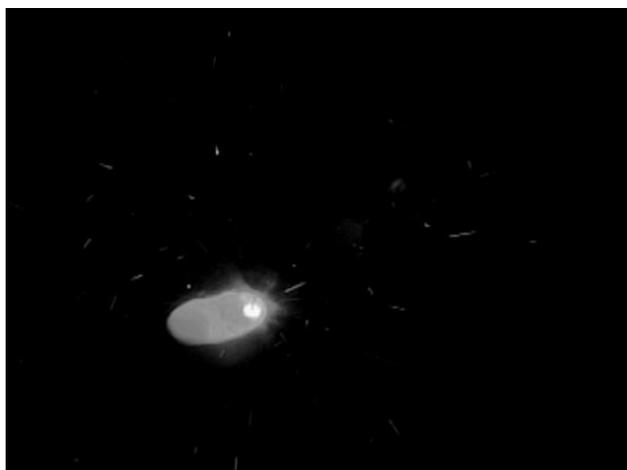


写真 2 溶接保護面越しの溶接部の見え方 (イメージ)

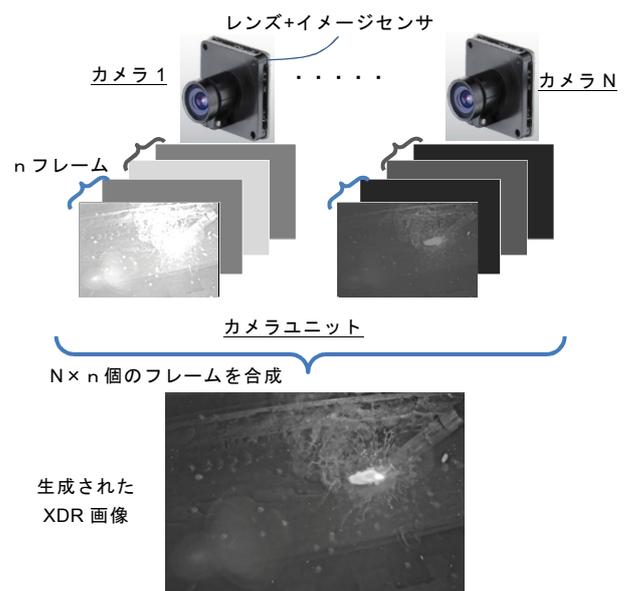


図 1 XDR 技術の概念図

が存在する溶接では、同じ画角で連写しても、高速の物体が映り込む位置の画像間での差異が大きくなり、合成がうまくいかない。本技術では、連続で複数の画像（フレーム）を取得するカメラを、1 つではなく複数用いることで、リアルタイムで溶接の可視化画像を連続して生成し、映像として表示させることを実現している。ここでは動画の撮影を前提とするため、画像の1枚1枚を「フレーム」と呼ぶこととする。本技術では複数のイメージセンサに、全く同一の画角の、異なる露出条件のフレームを取得させるために、新たに考案した光学機構を適用し、さらに1/1000秒単位で撮影タイミングとシャッタースピードをコントロールする。複数のイメージセンサから取得されるフレームの中からいずれの画素を最終画像に採用するかをピクセル単位で計算し、画素ごとに重みを付けて画面上にマッピングすることで「白飛び」や「黒つぶれ」などを起こすことなく1つのフレームを生成する。これらの演算処理はGPU（Graphics Processing Unit）により、リアルタイムに行われる。なお、演算して出力するのに必要な時間は0.066秒以下で、実際の動きと映像の時間的ズレである遅延はほとんど感じない。

写真3はソリッドワイヤを用いた炭酸ガス半自動アーク溶接にてすみ肉溶接を行ったときの本システムにより得られた画像の例である。アーク、ワイヤ、熔融池、トーチ先端だけでなく、従来の溶接保護面では視認することが難しかった「生成したビード形状」、「部材形状」、「作業環境」などが同時に視認できており、目標とした視野全てが可視化できており、その鮮明度は従来溶接保護面をはるかに上回っている。可視化された領域は従来溶接保護面のおよそ20倍である。なお本システムでは近赤外線波長を採用したため画像は熱に反応し、従来溶接保護面ではあまり見えないスパッタも見えるようになる。スパッタ発生量の多い炭酸ガスシールドアーク溶接では



写真3 溶接部可視化システムで撮影した溶接部

多量のスパッタが見えるようになるが、視野を阻害するほどのスパッタは演算によりキャンセルし、見える量を低減する画像処理も行うことで、溶接中はほとんど気にならないことを確認した。近赤外線はヒュームに影響されにくい性質を持つため、狭隘部にヒュームが滞留して従来溶接保護面では視界が遮られるような場合でも視界を確保できる。

本システムは自動機用の溶接部可視化システムとしても利用できる。現在一般的に採用されている自動機用可視化システムは見たい対象物に応じて複数のカメラやモニターが必要になるが、本システムでは一つのカメラユニットで多くの情報が可視化できるため、システム全体を簡素化できる可能性がある。

4. 次世代 3D 溶接部可視化マスクの開発

溶接部可視化システムを用いて、溶接技能者向けに次世代3D溶接部可視化マスクを開発した。**写真4**は試作品で、コンセプトの実現可能性を検証する目的で既成の部品を組み合わせた機能検証モデルである。人間の左右の目と同じ間隔にカメラユニットを2つ配置し、取得・合成した映像をマスク内に装備したヘッドマウントディスプレイ（HMD）に3D映像として表示する。

このような構成とすることで、溶接技能者目線の映像が取得できるようになった。**写真5**は本マスクによって取得された映像から切り出した画像の例（フラックス入りワイヤを用いた炭酸ガスシールドアーク溶接）であり、左右二つの画像は左右のカメラユニットそれぞれから取得されたものである。前述のとおり、カメラユニット内にはそれぞれ複数のイメージセンサが搭載されている。取得された**写真5**をよく観察すると、カメラアングルに差があることがわかる。左右のカメラユニットから取得



写真4 機能検証モデル（マスク部）

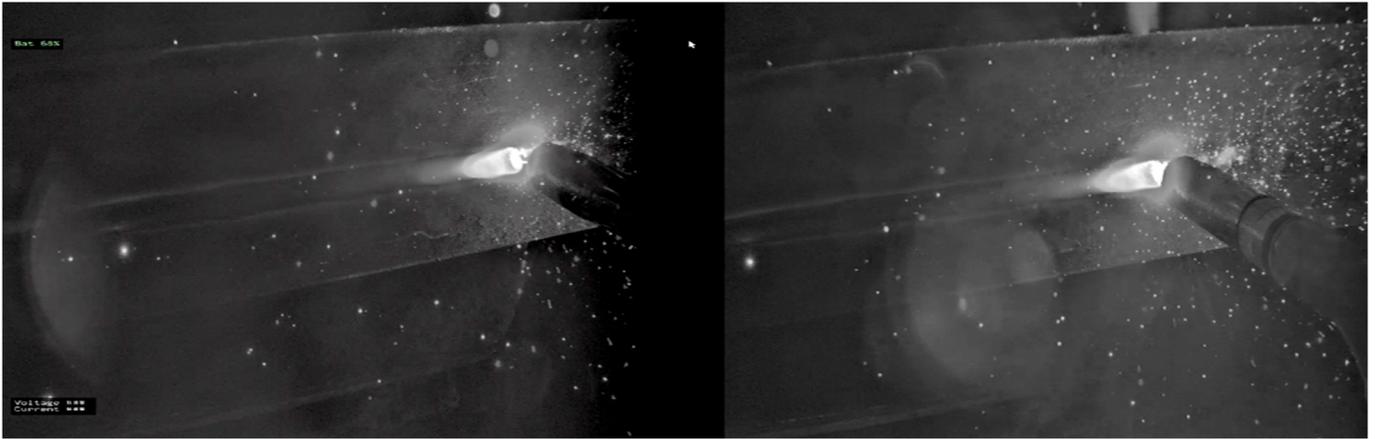


写真 5 HMD に投影される映像



写真 6 次世代 3D 溶接部可視化マスクの装着の様子

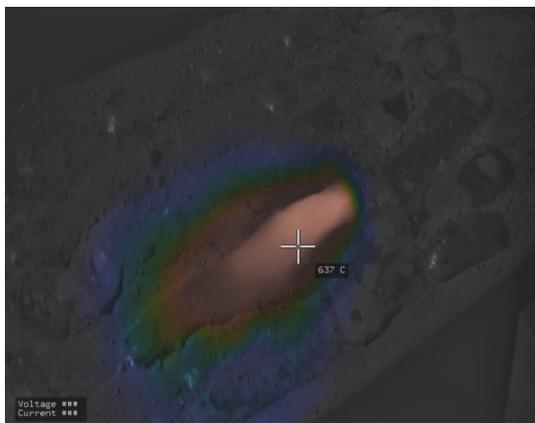


写真 7 温度計測機能

した映像は GPU 内で処理され写真 5 に示すようなステレオ映像として HMD に投影される。溶接技能者はこのステレオ映像を、HMD を通して左右それぞれの目で分けて見ることにより 3D として認識でき、立体的に視認しながら確実な溶接作業が行える。また、溶接に関する各種パラメータの表示・保存機能を搭載しており、特に実務経験の少ない溶接技能者にとっては溶接品質を確保するうえで有用な情報を容易に収集・確認することができるため、技能の早期向上が期待される。さらに、装置を介して間接的にアークを視認することになるためアークから目を完全に保護することができるのも大きなメリットである。なお、出力映像の見え方は、出力先のディスプレイにより最適となる設定が異なることから、同じ映像でも明るさ等が違って見えることがある。本稿を画面上または印刷紙面上でご覧いただくうえで、HMD 出力に最適化された写真 5 は鮮明度に課題があるように感じるかもしれないが、HMD で見える映像のクオリティは写真 5 よりも遥かに鮮明であることを付け加えておく。

本マスクはマスク本体以外に画像処理のための GPU とバッテリーから構成され、これらは安全帯に装着するスタイルを採用している（写真 6）。バッテリー給電とすることで外部電源のない環境にも対応可能である。サーモグラフィーによる温度計測機能も有しており、映像上に温度分布を重ねて表示させることができる（写真 7）。計測したいポイントに「+」マークが重なるようにすると温度が数値で表示され、この温度計測画面の録画も可能である。本機能は予熱温度やパス間温度の計測はもちろん、信頼性の高い記録として利用できる。

5. 次世代 3D 溶接部可視化マスクの効果

本マスクの効果は現在検証中であるが、弊社の溶接技

能者数名（年齢 20～43 歳，溶接歴 2 か月～26 年）に本マスクを使ってもらって得られたコメントを以下に示す。

- ・ アーク周辺はいつもよりクリアに見える
- ・ できたビードが見えるのはとても助かる。初心者には有効。
- ・ 開先ははっきり見える
- ・ ヒュームが見えないのは良い
- ・ 普段の面ではいろいろなところを同時に見て判断できるようになるには相当経験が必要だが、このマスクでは視野が広いので初心者でもそれができる可能性がある
- ・ 画像的には仕事に使えるレベル
- ・ 目を焼かないのはとてもよい
- ・ ゲーム感覚で面白い
- ・ 遅延はほとんどないが、ウィービング時にわずかに感じる時がある
- ・ HMD のピントが合いにくい
- ・ 見えていない領域がある

最も懸念していた本マスクのコンセプトに対する否定的な意見はなく、特に若手技能者の反応が良く好意的なコメントが得られた。上記コメント以外に経験 2 年目の溶接技能者より、従来の溶接保護面では見えなかった現象が見えるとのコメントがあった。具体的には、開先面と溶融池がなじんで溶けている様子が見えるというものである。本マスクは近赤外線波長を採用している関係上、溶融池は 2 つの領域（アーク直下の半径 10～20mm ほどの領域とそれ以外）に区別して視認できる。これは溶融池上に浮遊する溶融スラグの有無によって表面温度が異なることに起因すると考えられ、特にスラグ量の多いフラックス入りワイヤで区別しやすい。アーク直下近傍では溶融池表面の対流によって溶融スラグが後方に流されるために溶融スラグのない溶融池があり、これがアークを移動させるとほんの少し遅れて追隨していることに溶接技能者が気付いた。開先溶接では開先面をきちんと融合させるためにアークを当ててほんの少し止めるという動作を行うが、本当に開先面が溶けているのかは従来の溶接保護面では分からない。一方で本マスクではアークを開先面にあてた直後に溶融池がアークの周りに広がって開先面となじんで溶けている様子が確認できた。このことは融合不良の発生を可視化できる可能性と防止のための運棒指導ができる可能性があることを示している。この技能者はなぜアークを開先面で止める必要があるのかを経験的に理解していたが、本マスクによりその動作の意味が目で見て分かったと興奮気味に語っていたのが印象的であった。なお上記コメントで得られたいくつかの課題については引き続き改良中であり、本稿執筆

中の 2019 年 9 月時点でほぼ満足できるところまで改善している。

このように本マスクで溶接技能者目線の映像を取得することにより、従来溶接保護面ではできなかった指導ができるようになる可能性が高く、今後その手法について検討を進める。また、現状は MAG 溶接、TIG 溶接および被覆アーク溶接で可視化できることを確認しているが、例えば同じ MAG 溶接でも電流値の違いによってアーク光強度が異なる場合に可視化領域が狭くなる場合がある。これはカメラの撮影条件調整により容易に対応できることが分かっており、溶接法に応じた撮影条件の最適化も進めている。なお、基本的な機能として視野の明るさ調整は有しており、遮光ガラスの遮光度を選ぶような感覚で溶接技能者の好みに応じた明るさの変更は手元のボタンで容易に行える。また、年配の溶接技能者への適用可能性も検討する予定である。溶接技能者減に対応するためには現役世代に少しでも長く仕事をしてもらうことも重要であり、加齢による視力低下により溶接品質を保てなくなったベテランが本マスクを利用することで仕事が続けられるようになれば良いと考えている。さらに外国人技能実習生の技能向上および資格取得への活用も期待するところである。

6. さいごに

川田グループおよび SRI International で共同開発した溶接部可視化システムと、本システムを搭載した次世代 3D 溶接部可視化マスクについて紹介した。本マスクは次世代型と呼ぶにふさわしい機能を有しており、特に若い世代への訴求力が高いと思われる。今後は軽量化、耐久性向上などを進め、来年度には現場実証を行う予定である。さらに市販化も視野に入れ、開発を進めていくことにしている。

参考文献

- 1)2018 年版ものづくり白書：経済産業省。
- 2)建設業および建設工事従事者の現状：国土交通省 1994。