

溶接技能デジタル化システム Skill Digitizer™

Skill Digitizer™ — System for Visualization of Manual Welding Skill

佐久間 正剛 浅井 知 薄 正司

■ SAKUMA Masatake

■ ASAI Satoru

■ USUKI Shoji

東芝は、モノづくりの重要なプロセスの一つである溶接に着目し、溶接技量の可視化と定量的評価を行う溶接技能デジタル化システム Skill Digitizer™を開発、商品化した。複数の CCD (電荷結合素子) カメラを用いて施工中の溶接士の詳細な挙動を映像として記録するとともに、その映像の分析・評価により溶接技能の可視化と定量化を行うことを特徴としている。

近年問題となっている、モノづくりの現場における技能継承問題の解決に効果を発揮するツールとして、今後、幅広い分野への展開が期待されている。

Toshiba has developed a system for visualizing a welder's behavior and evaluating the welder's skill, and commercialized the Skill Digitizer™ system as a welder training and skill visualization tool offering various functions and easy operation. The system utilizes multiple visual sensors and image processing techniques to synchronously monitor and extract various parameters of the welding process.

This paper describes the basic concept and features of the system, which enable the skill of a manual welder in the workshop environment to be effectively visualized and assessed.

1 まえがき

モノづくりの重要なプロセスの一つである溶接の分野においては、従来、工程の自動化が推進されてきたが、ロボット化や自動化が難しい工程の多くは依然として熟練技能者の技量に依存している。その一方で、近年、現場における溶接士の高齢化と後継者不足による熟練技能者の減少が顕在化しつつあり、現状の施工品質レベルの維持だけでなく、技能継承の面で対応が必要となっている。

特に、製造現場において日本のかつての高度成長をけん引した、いわゆる“団塊世代”に当たるベテラン技能職の定年退職により、今まで培われてきた技術やノウハウなどが適切に継承されないことが懸念されており、“2007年問題”として社会的な注目を集めるようになってきた。技能の断絶を回避するために、具体的な施策や取組みが各方面で始められているが、文書化が難しい現場のノウハウや技能の伝承については、ほとんどの場合、熟練技能者によるマンツーマン指導によって行われているのが実態である。

東芝は、重電部門を中心とした溶接現場の技能継承や訓練支援を目的として、溶接施工中のようすを複数の CCD (電荷結合素子) カメラを用いて鮮明な動画映像として記録し、画像処理による多面的な特徴抽出や分析・評価の結果を元に溶接技能の可視化と定量化を行う、溶接技能デジタル化システムを開発し、実用化した^{(1), (2)}。このシステムを、TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接の新人訓練における技能レベル評価をはじめとし、当社工場内での複数の事例に適用した。

以下では、TIG 溶接訓練向けに商品化した溶接技能デジタル化システム Skill Digitizer™の機能を中心に、システムの概要と特徴について述べる。

2 Skill Digitizer™の構成と機能

2.1 システムの機器構成

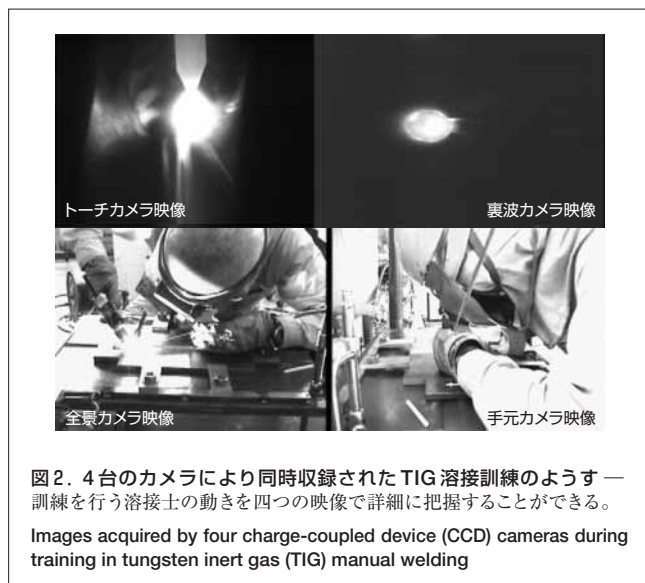
V 開先平板突合せ TIG 溶接の訓練を対象とした、Skill Digitizer™の主要構成機器の外観を図1に示す。このシステムは、溶接施工中の挙動を収録するための4台のカメラと、



図1. 溶接技能デジタル化システム Skill Digitizer™ — カメラの配置は、溶接条件や溶接士の姿勢に応じて調整できるようになっている。
Skill Digitizer™

記録された映像の再生や特徴抽出処理、スコア評価を行う映像の記録・分析結果表示用パソコン(PC)から構成される。4台のカメラはそれぞれ異なる視野に配置され、全景、手元、溶接部周辺、溶接部裏面の計4種類の動画映像を同時に撮影する。溶接部周辺の映像は、作業性を極力妨げないようにトーチに取り付けられた小型CCDカメラ(トーチカメラ)により得られ、トーチの運棒とワイヤの送給の状況を確認できる。試験片を載せる架台の下方、溶接部開先の裏面を観察する位置に設置したカメラ(裏波カメラ)は、裏波の溶融状況とその安定性を確認するものである。溶接姿勢やワイヤ挿入角度などの計測と確認には、溶接作業現場全体を撮影するカメラ(全景カメラ)と溶接士の手元周辺部を拡大して撮影するカメラ(手元カメラ)を用い、それぞれ離れた場所から施工中の溶接士の動きを撮影する。

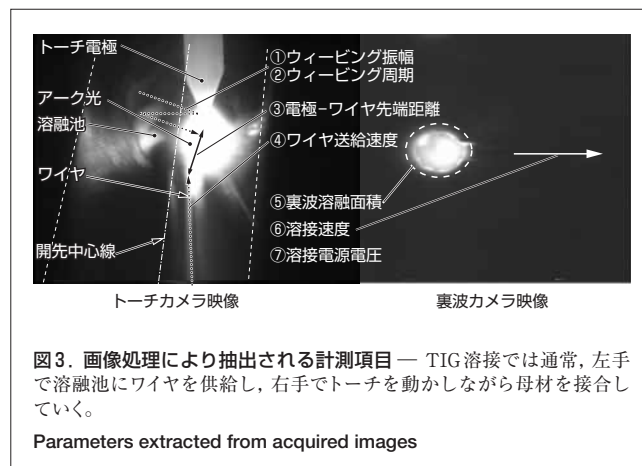
4台のカメラで取得された映像は、図2に示す4分割画面のデジタル動画映像として同時収録され、電流計・電圧計の出力と同期して、画像キャプチャカードを介して映像の記録・分析結果表示用PCの記憶媒体に記録される。いったん記録されたデータは測定終了後即座に分析処理が開始され、結果のオンライン比較表示や確認ができるようになっている。



2.2 画像処理による計測項目の抽出

このシステムは映像による記録の作成や映像間の比較だけでなく、収録された画像から複数の計測項目を抽出することにより、定量的かつ多面的な技量の特徴比較を行うことができる。

図3は、図2のトーチカメラと裏波カメラの映像から抽出処理する計測項目を示したものである。V開先平板突合せTIG溶接を対象とした場合、二つのカメラの映像と一つの時



系列信号から、以下に示す七つの計測項目を抽出している。

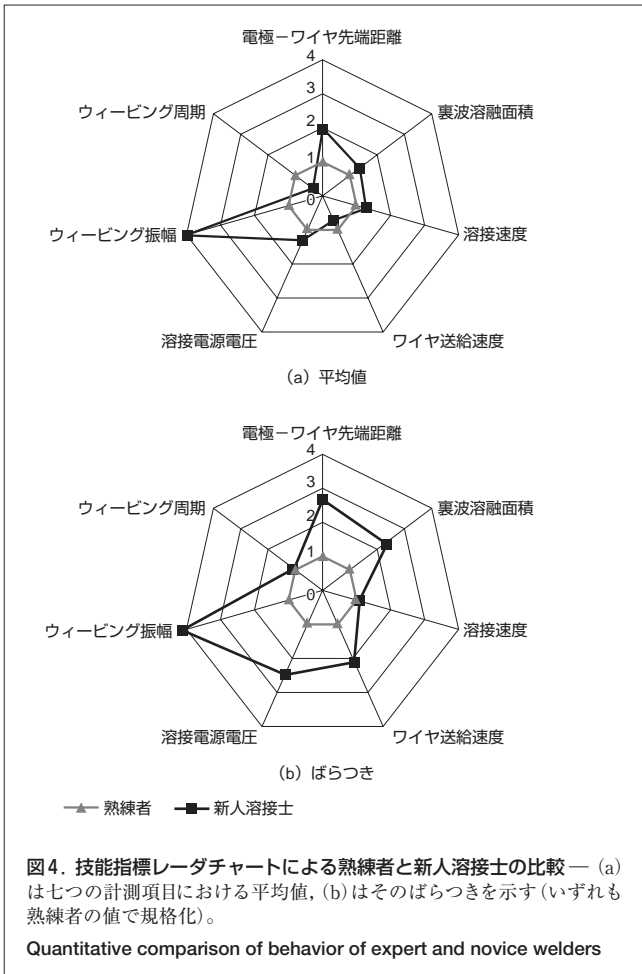
- (1) ウイーピング(トーチ運棒) 振幅
- (2) ウイーピング(トーチ運棒) 周期
- (3) 電極-ワイヤ先端距離
- (4) ワイヤ送給速度
- (5) 裏波溶融面積
- (6) 溶接速度
- (7) 溶接電源電圧

計測項目(1)～(4)については、図3左に示すように、トーチカメラの映像を画像処理して算出している。(5)、(6)については、図3右に示す裏波カメラの映像から抽出した裏波の溶融形状と重心位置から算出している。アーク長(電極先端-母材間の距離)に対応する計測項目として(7)をモニタし、AD (Analog to Digital) 変換の後で画像と同期してサンプリングしている。全景カメラと手元カメラの映像は、主に溶接姿勢やワイヤ挿入角度などの確認に用いられ、基本機能としては画像処理による計測項目の抽出の対象外としているが、これらの映像に対しても適宜、画像処理機能の追加や修正が可能である。

2.3 技能指標の比較

前節で列挙した(1)～(7)の計測項目は、各項目が異なる単位系(次元)であるため、技量の優劣をパターンとして容易に把握できるような表示方法を導入する必要がある。そこで、各計測項目の時系列データから算出される各々の平均値とばらつき(変動幅)を技能指標と定め、それぞれ熟練者の数値で規格化し、レーダチャート上に表現することとした。これにより、チャート上の二つの7角形状における大きさといわずみぐあいが、そのまま溶接士の技量の特徴に対応するパターンと解釈することができる。

図4は、新人溶接士の教育・訓練における溶接の特徴を、七つの計測項目についての平均値とばらつきの二つのレーダチャート上にプロットしたものである。この新人溶接士の特徴は、図4上のプロットからウイーピング(トーチ運棒)の振



幅が熟練者に比べて大きく、また図4下のばらつきに関するプロットから七つの項目すべてにおいて熟練者に比べてばらつきが大きく、不安定であると解釈することができる。

そこでこの新人溶接士の場合には、まずウィーピング(トーチ運棒)の振幅を小さくするよう注意しながら、全体としてより安定した動きができるように訓練を進めていけばよいということがわかる。このようにして訓練を行う溶接士は、自分の挙動が熟練者と比べてどこがどの程度異なり、どこに注意して訓練をすればよいのかを定量的に把握することができる。また、訓練を繰り返す過程における計測項目と技量指標は、時間履歴として映像とともにすべて記録されており、必要に応じて画面上での様々な比較検討を行うこともできるため、訓練による技能習得の状況を詳細に確認することも可能である。

2.4 技量スコアと結果の表示

現在のところ、標準的な炭素鋼の下向き姿勢での溶接だけを対象とした機能ではあるが、抽出された七つの計測項目の平均値とばらつきの数値を元に、マハラノビス距離^(注1)

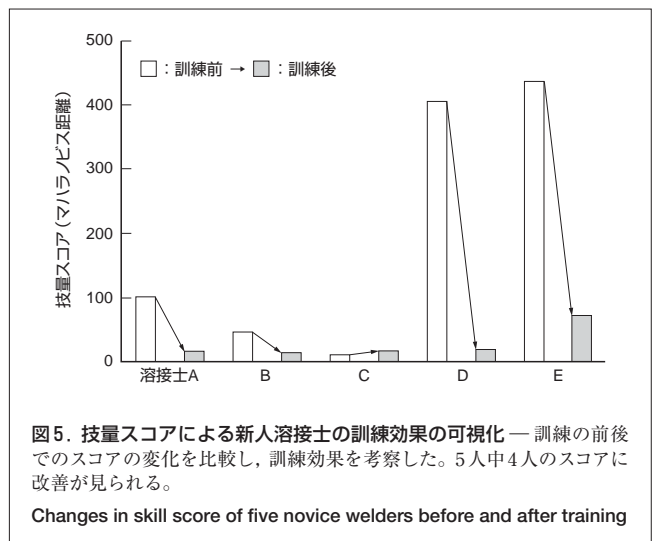
(注1) インドの数学者 P. C. Mahalanobis に由来する、あるデータの、空間内に分布する基準データ群からの偏差を表す距離尺度。

(Mahalanobis Distance) による技量スコアの評価を行うことができる。このスコアは効率的な技量習得の目安として導入したものであるが、当社の複数の熟練者から得られたデータ群によって構成される基準母集団と訓練を行う溶接士の特徴との距離尺度であるマハラノビス距離を技量スコアとみなし、評価を行っている。すなわち、熟練者のデータを基準(技量スコア=1)としたときに、訓練を行う溶接士のデータがどの程度パターンとしてかけ離れているかを示す数値となる。

当社内でこれまでに実施した試験結果によれば、上級者の技量レベルが1~2、中級者が2~10、初級者は10以上となるような対応関係としている。技量スコアもレーダチャート同様、データ収録直後の分析処理によって即座に表示される。

現場配属1年目の新人溶接士訓練に対してこのシステムを適用し、訓練前後の技量スコアで習熟度の評価を行った。結果の比較プロットを図5に示す。溶接士A~Eの5名で訓練前後の技量スコアは異なる値を示しており、レーダチャート上でのパターンも個人差が認められるものであったが、5人中4人の新人溶接士において改善が見られ、訓練前に100を大きく超えていたスコアが大きく改善しているものもあるなど、訓練の効果を可視化できていることがわかる。

このシステムの技能分析結果の表示画面を図6に示す。この画面は、収録した映像から得られる一連の定量的なデータを集約的かつ階層的に提示するものである。画像処理によって抽出された各計測項目に対応する時系列データのプロットが画面の左右に配置され、画面中央には計測項目から導かれる技能指標を二つの7角形状パターンとして表示するレーダチャートと、技能指標から算出される技量スコアが表示されている。訓練を行う溶接士は、映像収録後、即時処理によってこの画面上の情報で自分の挙動の定量的な特徴を認識、把握できると同時に、収録した画像データの動画だけでなく、あらかじめ撮影された模範的な熟練者やほかの



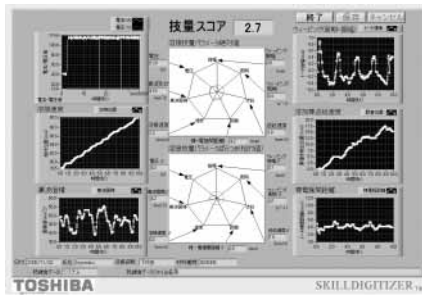
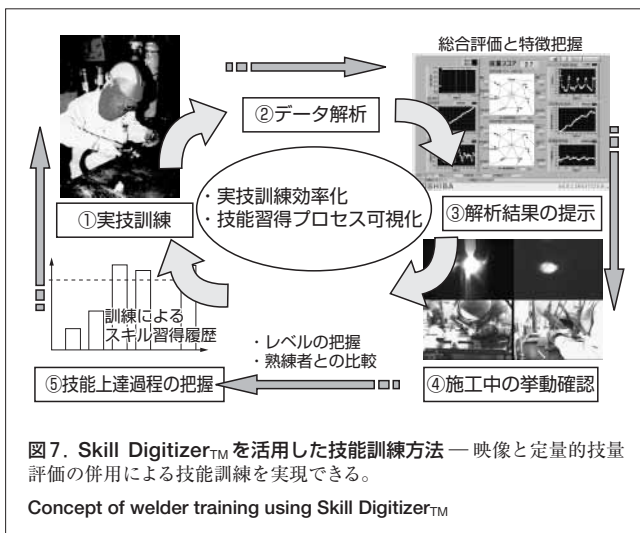


図6. Skill Digitizer™の技能分析結果の表示画面 — 計測項目の時系列データ、技量指標のレーダチャート、及び技量スコアを1画面上で確認できる。

Display screen of Skill Digitizer™



溶接士の記録映像を再生、確認し、画面上でみずからの挙動と比較することができる。

図7は、このシステムを技能訓練で活用する方法の一例を示している。このシステムを用いることで、訓練を行う溶接士に測定結果の再生映像を提示して熟練者から意見を聞いたり、ほかの溶接士と比較したりすることで自分の癖を客観的かつ定量的に把握できるため、訓練による技能習熟の効率改善に役だつと考えられる。また、指導者がつきっきりで指導するという従来の訓練形態に代わり、Skill Digitizer™を使用した画像による定性的な比較や数値指標による定量的な比較によって、指導者が常駐できない職場においても、このシステム上のデータを元に独習による訓練を実施することも可能となる。

3 Skill Digitizer™の活用事例

以上、TIG溶接訓練向けSkill Digitizer™の機能構成や特徴を中心に述べてきた。技能継承のために、熟練者の持つ

ノウハウや特殊な溶接を行う技能の映像記録と詳細分析にこのシステムを活用する場合、対象となる溶接の条件に応じた撮像系の再設計や、画像から抽出する計測項目の検討が必要となる。当社では、以下に示す複数の技能分析にこのシステムを実際に適用し、その効果を確認している。

- (1) 配管の全姿勢TIG溶接における、熟練者と非習熟者の挙動の詳細比較・分析
- (2) 管と管板のTIG溶接における、熟練者の溶接トーチの狙い位置やトーチ運棒の分析と非習熟者との比較
- (3) 気密容器のMAG (Metal Active Gas) 隅肉溶接における、複数の溶接士の挙動分析と相互比較

4 あとがき

複数のCCDカメラを用いて施工中の溶接士の詳細な挙動を映像として記録するとともに、その映像の分析・評価により溶接技能の可視化と定量化を行うことを特徴とする溶接技能デジタル化システムSkill Digitizer™について紹介した。既に述べたように、このシステムは、従来OJT (On the Job Training) 中心に行われてきた製造現場での技能訓練や人材育成を支援するツールとして、社内の若手の教育・訓練、技能の分析・評価、映像の記録作成などに活用され始めているほか、社外の教育機関への納入実績もある。今後更に、様々な用途に特化した撮像系の最適化や処理系の改良を進めていくことで、現場の技能継承に関する多様なニーズに応えていくことができる。

文献

- (1) 浅井 知, ほか. 溶接技能のデジタル化と手溶接士支援システムへの展開. 溶接技術. **50**, 1, 2002, p.59 - 64.
- (2) Sakuma, M., et al. Monitoring and Analysis of the Behavior of Welders during Manual Welding. 保全学. **3**, 2, 2004, p.38 - 44.



佐久間 正剛 SAKUMA Masatake, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 計測・検査技術開発部主務, 工博. 統計的な信号処理・画像処理技術の開発に従事。日本原子力学会, 溶接学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



浅井 知 ASAI Satoru

電力システム社 京浜事業所 生産技術部主幹. 自動溶接システムの開発・実用化に従事。溶接学会会員。
Keihin Product Operations



薄 正司 USUKI Shoji

産業システム社 事業開発推進統括部 事業開発推進室 第二担当グループ長. 溶接技能デジタル化システムSkill Digitizer™の事業化業務に従事。
New Business Promotion Div.