

論文・解説

23 デジタル動作解析による技能伝承システムの開発と実用化**Development and Realization of System for Passing Down Skills and Techniques on Digital Motion Analysis**

佐伯 千春^{*1} 久保 祐貴^{*2} 須賀 実^{*3}
 Chiharu Saeki Yuhki Kubo Minoru Suga
 江草 秀幸^{*4} 大田 敦史^{*5}
 Hideyuki Egusa Atsushi Ohta

要 約

「魂動デザイン」は随所にデザイナーの想いが込められている。マツダの生産技術領域では、魂動デザインを高い精度で量産車にて実現するため、Mass Craftsmanship（職人技の量産化）に取り組んでいる。その中で、金型製作部門は、匠と呼ばれる熟練技能者の動作をモーションキャプチャーで計測し、匠技の見える化に取り組んでいる。長年掛けて培われる匠技の勘・コツを定量化することで、技能者本人と匠の技能を定量的に比較することができ、技能の短期育成を実現する。これまで金型製作の重要な技能の1つであるグラインダー研削技能を対象に、デジタル動作解析による技能伝承システムを開発し、技能育成期間の短期化を実現した。本稿では、同様に重要な技能である肉盛り溶接技能について技能伝承システムを開発した事例を紹介する。

Abstract

Mazda designers' aspiration appears everywhere throughout the "KODO Design". Mazda's Production Engineering Division is proceeding with "Mass Craftsmanship" for realization of the "KODO Design" with high precision in production vehicles. By measuring the motions of craftsmen called 'Takumi' with a motion capture system, Mazda's Tool & Die Production Department works on visualization of craftsmen's skills and techniques. Quantification of craftsman's skills and techniques, which have been cultivated over the years, enables quantitative comparison of those between a trainee and craftsman, realizing short-term nurturing of technician. We realized shortening of the training term for grinder skill which is one of the important skill for die production by using a new system for passing down skills and techniques. This article introduces a case of the system used for passing down welding skills which is also important for die production.

Key words : Human engineering, Production manufacture, Common infrastructure, Burden, Physical burden, Musculoskeletal system, Quality control, Welding, Weld overlay, Engineering training

1. はじめに

マツダは、カーライフを通じて人生の輝きを人々に提供することをコーポレートビジョンに掲げている。それを実現するための提供価値の一つに「魂動デザイン」がある (Fig. 1)。魂動デザインには、デザイナーの想いが随所に込められており、昨今はアートとして深化している。マツダの生産技術領域の使命は、魂動デザインを高い精度で量産車にて実現することであり、職人技による造り込み（希少性・感動）と生産性の高さ（高速・高精度）を高次元で両立させる Mass Craftsmanship（職人技

の量産化）に取り組んでいる。その中で、マツダの金型製作部門も、お客様の心を揺さぶる美を追求することにこだわり続け、マザーツールである金型の製作及び技術開発に日々取り組んでいる。金型製作は高度な技能と技術の融合であり、双方の進化によって魂動デザインを具現化している。一方で、人から人へ伝承される高度な金型仕上げ技能を習得するためには長い歳月を要しており、深化する魂動デザインを具現化し続けていくためには、技能を高い効率で伝承していく必要がある。

本稿では、金型製作の匠技を定量的に解明し、短期での技能育成を可能とする技能伝承システムの開発と実用

*1～5 ツーリング製作部
 Tool & Die Production Dept.



Fig. 1 KODO Design

化について取り組んだ事例を紹介する。

2. 技能伝承の目指す姿と課題

マツダの金型製作部門の目指す姿は、技能を定量化し目標と課題を認知できる技能伝承と、自己成長を実感し自信と誇りをもって研鑽する働き甲斐のある職場づくりの実現である。目指す姿を実現するため、匠級技能者の育成期間の目標を従来の20年から5年とした (Fig. 2)。金型製作において「技能」は、「人の動き」となって表現される。そのため、身体の動きを分析することで、匠技に潜む勘・コツを解明できると考えた。よって、匠技を短期間で伝承するためには、「動きを全て見える化」し、「重要ポイントを特定」、それを「正しく伝え、習得する」ことが必要であると考え、以下3項目を重点課題とした。

- ① 技能の見える化
- ② 技能のメカニズム解明
- ③ 技能訓練の定量化

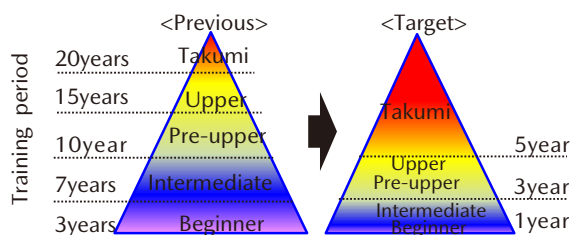


Fig. 2 Target of Takumi Development

3. 技能の見える化

3.1 対象技能

金型製作部門では、数多くある金型製作の技能を体系化しており、その中で長い育成期間を要する技能を選定し技能伝承システムを開発している。これまで、金型仕上げ作業の基礎として重要なグラインダー研削技能において、育成期間の短期化を実現した^{(1)~(4)}。本稿では、新たに「肉盛り溶接技能」を対象に取り組んだ事例を紹介する。肉盛り溶接技能は、グラインダー研削技能に次いで重要な基礎技能であり、金型にとって重要な意匠面の補修などに活用される。

3.2 システム概要

本稿で紹介する技能伝承システムは、技能の定量的な計測・評価・訓練が可能である。システムの概要を Fig. 3 に示す。身体動作の計測は光学式モーションキャプチャーを採用し、4m×4m×2mの範囲において、8台のカメラで身体に取り付けた反射マーカを計測し、三次元座標や速度などの情報を取得した。反射マーカは技能者の身体に41個、ツールに3個取り付けた。更に、作業中の筋活動量は、モーションキャプチャーで計測した身体動作情報を基に、筋骨格モデリングシミュレーションを用いて推定した。これらの情報を分析することで、技能が見える化し、技能メカニズムを定量的に解明した。

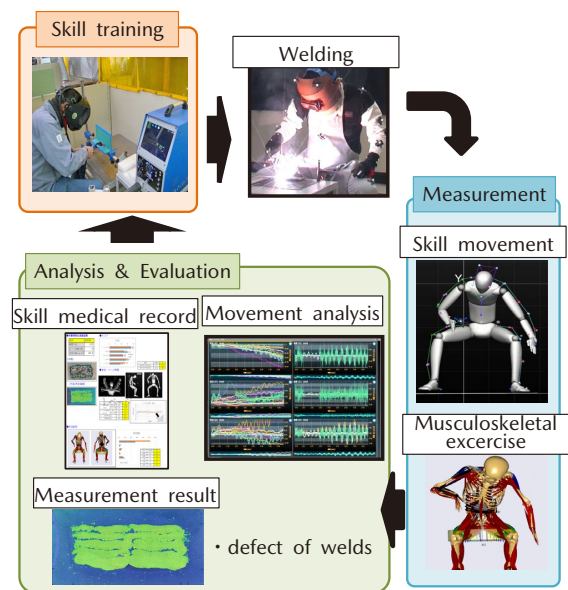


Fig. 3 System for Passing Down Skills and Techniques on Digital Motion Analysis

4. 技能のメカニズム解明

4.1 技能階級の定義

現在、マツダの金型製作部門では、技能階級を5階級 (匠級, 上級, 準上級, 中級, 初級) に区分し設定している。従来、初級から上級までは国家技能検定の取得や経験年数によって定めており、匠級技能者は20年以上の業務経験を持ち、海外での業務や指導・育成の経験がある「誰もが認める技能の優れた人」という周囲の官能評価を基に設定していた。技能伝承システムでは、これまでの官能評価ではなく、定量的な階級評価基準を新たに設定し、匠級技能者の基準を明確にした後、技能者の計測データを分析し、技能メカニズムを解明した。その評価に用いるテストピースの仕様を Fig. 4 に示す。評価は、球状黒鉛鋳鉄品 (FCD600) の母材への多層盛りとし、実際の作業状態を考慮し母材を45°の傾きをもつ治具に設置した。溶接種類は金型製作部門で使用頻度の高いマグ溶接とし、溶接条件は固定とした。

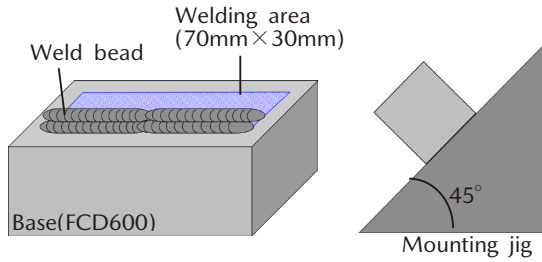


Fig. 4 Test Piece of Examination

評価する溶接品質は、溶け込み不良、巣、欠肉を対象とした。以降、まとめて溶接欠陥と呼称する。これらの溶接欠陥は、肉盛り部分をフライスで切削除去した後、その面を三次元測定機で測定し、溶接指示範囲内で溶接欠陥が占めている面積を算出した。その平均値と標準偏差を基に技能階級の閾値を設定した (Table 1)。

Table 1 Area of Defect of Welds in Each Rank

Class	Area of defect of welds [mm ²]
Class5 : Takumi	<15
Class4 : Upper	<30
Class3 : Pre-upper	<60
Class2 : Intermediate	<130
Class1 : Beginner	130 ≥

4.2 技能のメカニズム解明手法

技能伝承システムでは、身体動作及び筋骨格に関する情報を取得できる。身体動作は、モーションキャプチャーにより、身体とツールに取り付けた44個のマーカークの位置情報に加え、19個の身体部位(頭・首・胸・左右肩・左右上腕・左右前腕・左右手・腰・尻・左右腸骨・左右膝・左右足)及びツールの重心位置情報を取得できる。筋骨格は、筋骨格モデリングシミュレーションにより、筋活動量や腰椎間反力などの身体負荷に関する情報を取得できる。これらはモーションキャプチャーで得た身体動作情報を基に算出され、筋活動量は全身921本の筋肉について算出される。筋活動量は、最大可能筋力 F_{max} [N] に対する筋力 F [N] の割合であり、単位は [%] で表される。

技能のメカニズム解明では、これらの情報から匠技の特徴を抽出した。その手法は、多変量解析の一つである主成分分析を活用した。主成分分析は、多数のデータ(以下、説明変数)を集約することで特徴を抽出する手法である。今回対象とした溶接技能の動作は外的変化が少なく、モーションキャプチャーから得られる外見の動きだけでは技能の特徴を抽出しきれないと考えた。そのため、説明変数に筋骨格モデリングシミュレーションから得られる筋活動量の情報を加え、身体内部からも技能の特徴を抽出し、Table 2 に示す計73種の説明変数に対し、主成分分析を行った。

Table 2 Explanation Variable

	Details	Quantity
Center of gravity of body	Center of gravity of 19 portions of each body Displacement, Velocity, Acceleration of XYZ axes	57
Center of gravity of tool	Displacement, Velocity, Acceleration of XYZ axes	3
Amount of muscle activity	13 portions of each body	13

Total: 73

匠級技能者1名、上級技能者2名に対し主成分分析を行い、累積寄与率が60%以上となる第5主成分までのデータで評価を行った。ここで、技能者個人に特化した特徴でなく、上位階級に共通する特徴を洗い出すため、上位階級3名の主成分分析結果を合成した。また、主成分分析では、各主成分に寄与度の高い説明変数を得ることができるため、上位10個の説明変数を各主成分の重要管理項目とした。次に、この重要管理項目を基に、第1主成分から第5主成分の特徴づけを行い、第1主成分から順に、「ツール把持部変位」「体幹速度」「接地部位筋力」「体幹筋力」「ツール操作筋力」とした。この特徴づけした5個の主成分を匠技の重要因子とし、主成分スコアを計算した (Fig. 5)。主成分スコアは、上位階級の方が高い傾向になっており、肉盛り溶接技能の特徴量を5つの主成分で定量的に表現できていると考えた。この主成分スコアは、訓練者と匠級技能者を比較し、評価に活用した。

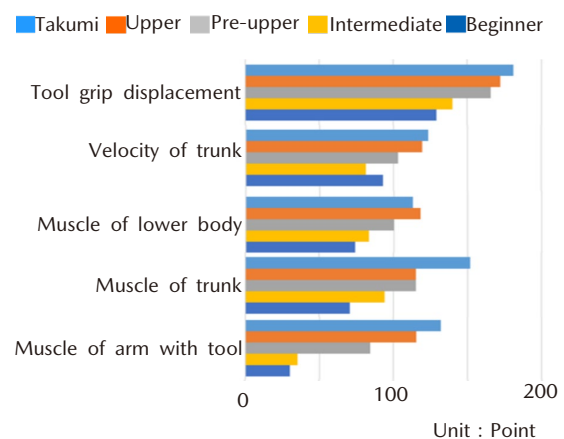


Fig. 5 Principal Component Scores

4.3 匠技の特徴

主成分分析から得た重要管理項目について、「ツール動作」と「作業安定性」の視点から匠級技能者の特徴を明らかにした。匠級技能者と初級技能者の比較事例を紹介する。

(1) ツール動作

メカニズム解明で抽出した匠技の特徴の1つに「ツール保持部変位」がある。そこで、Fig. 6 に示す (i) ツール移動速度、(ii) ツール移動角、(iii) ツール動作角、(iv) ツール先端の母材に対する変位、を始めとするツール動作に着目した。特に、匠級技能者と初級技能者には、「ツール移動速度」や「ツール先端の母材に対する変位」に差があり、これらが溶接ビードの形状や重なり具合へ影響した結果、溶け込み不良などの溶接欠陥に差が出たと考えた。このように、メカニズム解明で抽出した特徴を基に、ツール動作における技能向上課題が明らかとなった。

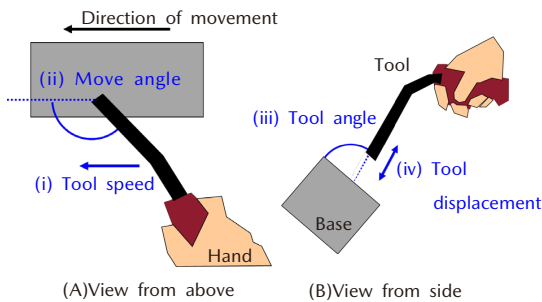


Fig. 6 4 Items of Tool Movement

(2) 作業安定性

作業安定性を向上させるための勘・コツは、筋骨格動作に潜むと考えた。匠級技能者と初級技能者の筋活動量の比較を Fig. 7 に示す。匠級技能者は初級技能者と比べて、体幹の筋活動量が大きく、ツール持ち手である右手の筋活動量は小さい、という特徴が見えた。また、Table 3 に (1) ツール動作で着目した4項目について匠級技能者と初級技能者の標準偏差の比較を示す。Table 3 に示すように匠級技能者はツール移動速度やツール先端の母材に対する変位の標準偏差が小さく、一定の速度と距離を保っていることが分かった。このことから、匠級技能者は体幹を効率よく使うことで身体をコントロールし、右手の筋力の負荷が小さくなる筋骨格動作により、作業安定性を維持していると考えた。また、筋骨格動作の違いは、モーションキャプチャーから得られる腕や足の位置などの作業姿勢に現れていることが判明した。よって、作業安定性を維持する筋骨格動作は、姿勢改善により訓練することとした。

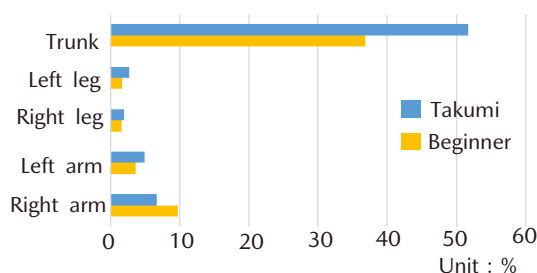


Fig. 7 Comparison of Amount of Muscle Activity

Table 3 Comparison of Standard Division of Tool Movement

	Tool Movement	Takumi	Beginner
i	Tool speed [mm/s]	5.11	8.90
ii	Move angle [deg]	0.50	0.52
iii	Tool angle [deg]	0.12	0.36
iv	Tool displacement [mm]	0.43	1.90

5. 技能訓練の定量化

5.1 技能カルテの概要

技能メカニズムの解明から得た一連の情報を基に、技能者個人の技能カルテを作成した。技能カルテの例を Fig. 8 に示す。

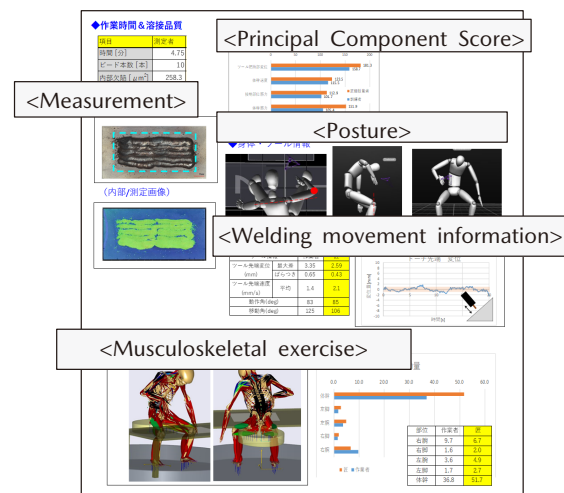


Fig. 8 Example of Skill Medical Record

この技能カルテには、技能メカニズムの解明で得た重要管理項目を基に、技能者が理解し技能動作を改善しやすい情報を記載した。また、技能者と匠級技能者の値を並べることで技能を定量的に比較・評価でき、技能向上課題が一目で分かるようにした。この技能カルテを訓練の前後に作成することで、技能者及び指導者が技能を定量的に把握でき成長に向けた確かな訓練を可能とした。更に、技能の変化を視覚的にとらえることができるため、技能者本人のモチベーション向上にもつながる。

5.2 実機及びバーチャル訓練

技能カルテを基に訓練を行った。技能者は、技能カルテで技能向上課題を把握した後、ツール動作や筋骨格情報が匠級技能者の値に近づくように訓練した。訓練は2種類を実施した。1つ目は、実機を使った訓練である。金型製作の現場と同様の機器を使い、肉盛り溶接を行う。実機訓練では溶接の実現象と技能動作の感覚をすり合わせながら技能を向上できる。2つ目は、バーチャル機器

を使った訓練である。バーチャル訓練は、拡張現実 (Augmented Reality : AR) を活用した疑似訓練である。Fig. 9 にバーチャル訓練の様子を示す。訓練では技能者が自身の動作をリアルタイムに確認し即時補正していくことが重要である。バーチャル訓練では、頭部に装着する機器の画面内で、自身のツール動作の情報を確認しながら訓練できる。そのため、技能者は自分の動作を即時確認し修正して技能を身に付けることができる。また、バーチャル機器は、ツール移動速度やツール角度など溶接で重要とする項目を基に、溶接動作を評価することができる。メカニズム解明で明らかにした重要管理項目と匠級技能者の値を基に、評価の閾値を独自に設定し、匠級技能者育成コースを作成し運用した。更に、バーチャル訓練では、溶接材やガスが不要であり、熱や光、煙、スパッタが発生しないため、従来の実機訓練よりも低コストでより安全性な環境下での技能育成が可能である。より効果的な育成を行うために、実機訓練とバーチャル訓練の長所を組み合わせさせた訓練を実施している。

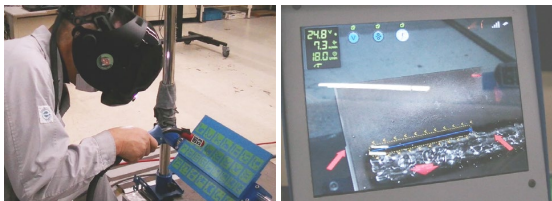


Fig. 9 Virtual Welding Training

6. 技能育成の効果

技能者 1 人につき、1 回 2H×4 回の訓練を行い、訓練前後での技能階級の変化を確認した。8 名訓練した結果として、訓練前後での階級分布の変化を Fig. 10 に示す。8 名中 5 名の技能階級が昇格した。また、8 名中 7 名は溶接欠陥が改善し、技能の向上を確認した。

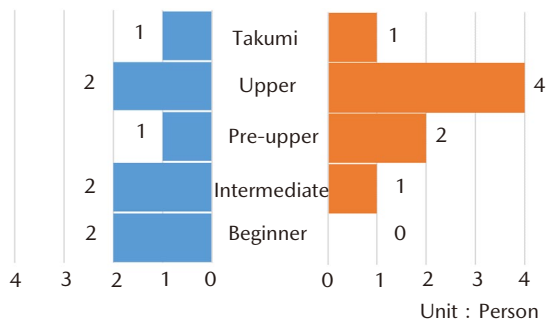


Fig. 10 Rank Change Before and After Instruction

初級から準上級へ昇格した事例を Table 4 及び Table 5 に示す。Table 4 は溶接欠陥の写真と溶接欠陥の面積を示し、写真内の四角枠は溶接指示範囲を示す。Table 5 には、訓練前後でのツール動作の標準偏差を示す。Table 5 より、訓練後は特にツール移動速度とツール先端の母材

に対する変位の標準偏差が小さくなり、作業安定性が向上した。これらの各項目の改善により、溶接欠陥が減少し、溶接品質の向上につながった。また、従来の階級基準であれば 10 年掛かる準上級に、経験年数 2 年で到達できた。これにより、技能者が自己成長を実感し自信と誇りをもって研鑽する働き甲斐のある職場づくりを実現した。更に、短時間訓練での技能向上効果により対面での指導時間を削減でき、新型コロナウイルス禍での技能伝承の在り方を変え、働き方改革にもつながった。今後は、引き続き技能者の技能訓練を行っていく中で、より効果的かつ高効率に技能を向上させる指導方法を検討していく。

Table 4 Comparison of Before and After of Defect of Welds

	Before	After
View of Defect of welds		
Detect of welds [mm ²]	140.7	49.5

Table 5 Comparison of Before and After of Tool Movement

Tool Movement	Before	After
Tool speed [mm/s]	6.31	3.84
Move angle [deg]	0.40	0.35
Tool angle [deg]	0.87	0.22
Tool displacement [mm]	1.92	0.81

7. おわりに

本取り組みによって、肉盛り溶接技能の匠級技能者を早期育成するシステムを開発した。今後も「魂動デザイン」の忠実な再現のため、金型製作における Mass Craftsmanship に取り組んでいく。そして、魂動デザインを通して、お客様の人生に輝きを提供するクルマづくりに取り組み続けていく。

参考文献

- (1) 久保祐貴：「魂動デザイン」を支える技能者の育成、[マツダ技報, No.36, pp.165-170 \(2019\)](#)
- (2) 久保祐貴：デジタル動作解析による匠開発システムの構築、型技術、7月号, pp.74-75 (2020)
- (3) 佐伯千春：仕上げ技能における匠の動作および筋活動分析による技能伝承システム (TDS-DMA) の開発と実用化、精密工学会誌、87巻、2号, pp.169-172 (2021)
- (4) 久保祐貴：金型仕上げ技能における匠の動作及び筋

活動分析による技能伝承システム (TDS-DMA) の
開発と実用化, 型技術者会議講演論文集, 第 35 回,
pp.21-25 (2021)

■著者■



佐伯 千春



久保 祐貴



須賀 実



江草 秀幸



大田 敦史