

# 鉄工やすりによる平面仕上げ技能体得支援システムの訓練効果 —3年間の実践データに基づく長期的な有効性検証—

## 主執筆者

高木 勝規 独立行政法人 高齢・障害・求職者雇用支援機構  
四国職業能力開発大学校

## 共著者

千崎 貴大 独立行政法人 高齢・障害・求職者雇用支援機構  
四国職業能力開発大学校

木村 寛路 独立行政法人 高齢・障害・求職者雇用支援機構  
北海道職業能力開発大学校

## テーマ

新たな技能・技術領域の職業能力開発に必要な専門知識・技能・技術  
及び指導方法に関する調査・研究

## 要旨

鉄工やすりによる平面仕上げは、微妙な力感覚の体得が必要となる。しかし微妙な力感覚の体得は、映像を利用するVRやARのシステムでは対応できない。本論文では、VR、AR、及び切削動力計を併用した鉄工やすりによる平面仕上げ技能体得支援システムを述べる。平面仕上げ技能体得支援システムは、従来訓練に、VRゴーグルによる手本作業の模倣、ARスマートグラスによる作業のカン・コツの把握、切削動力計による力感覚の把握が付加されたものである。本システムの運用により、従来訓練と比較して、訓練生の大幅な技能習熟の向上（効果量1.70）を確認した。また、属人的な技能指導法に依存した訓練生の習得度のバラツキの低減、すなわち指導者の違いに依らない標準化された技能習得への道筋を示した。

## 第1章 緒言

鉄工やすりの平面仕上げとは、やすりを用いて金属塊の切削面を平らに削る技能である。機械分野の訓練生が習得すべき最も基本的な技能のひとつとして鉄工やすりの平面仕上げがある。

四国職業能力開発大学校（以下、四国能開大）生産技術科では、機械工作実習の一部に鉄工やすりの平面仕上げ実習を行っている。ここで職業訓練指導員（以下、指導員）は、訓練生に対して手本を見せて、教えすぎず、自ら考えさせて、困っていればフォローをする指導を行っている。指導員の手本と訓練生による試行錯誤のバランスが重要となる。

しかしながら、平面仕上げ技能は、微妙な力感覚を伴った手わざであり、手本作業のイメージや作業手順の把握が難しい。鉄工やすりの平面仕上げ実習は、標準時間の18時間に到達水準に達成する訓練生は少なく、6～8時間の補習を行っている。さらに補習を行っても、訓練の到達水準に達する訓練生は30%程度である。本来、訓練の標準時間内に到達水準に達することが望ましいが、現在の職業訓練環境では対応できていない。

このような言語化が困難な「微妙な力感覚」は、哲学者マイケル・ポランニーによって提唱された「暗黙知 (Tacit Knowledge)」の概念で説明することができる<sup>[1]</sup>。ポランニーは、個人の経験に根差し、言葉や図では表現しきれない主観的な知識を「暗黙知」と呼び、客観的で伝達可能な「形式知 (Explicit Knowledge)」と区別した<sup>[2]</sup>。この暗黙知の概念を知識経営論に応用したのが野中郁次郎である。野中は、暗黙知を言葉やデータなどの形式知へと変換する「表出化 (Externalization)」のプロセスが、組織的な知識創造の鍵であると論じている。鉄工やすりの平面仕上げ技能における力感覚の体得は、この暗黙知の継承における典型的な課題である。したがって本研究は、デジタル技術を用いて指導者の持つ暗黙知を表出化し、誰もが学習可能な形式知へと変換することで、この課題を解決することを目的とする。

これまで鉄工やすり作業における効果的な技能体得の先行研究は、センサを用いて技能分析を行い指導に活用した報告事例<sup>[3]</sup>がある。また、他の作業において、習熟時間の短縮を目的に拡張現実（以下、AR）や仮想現実（以下、VR）を利用したトレーニングシステムの開発事例<sup>[4][5]</sup>もある。しかし、これらのシステムにより、手本映像や文字・音声解説と合わせた模倣は可能であるが、力感覚までは把握できない。

本研究は、筆者らの先行研究<sup>[6]</sup>を基に、新たにデータを追加して有効性を長期的に検証し、考察を深めたものである。具体的には、VR、AR、及び切削動力計を併用した鉄工やすりによる平面仕上げ技能体得支援システム（以下、体得支援システム）について述べる。本システムは従来訓練に、VRゴーグルによる手本作業の模倣、ARスマートグラスによる作業のカン・コツの把握、切削動力計を利用した力測定による平面を仕上げる力感覚の把握が付加された訓練である。この付加された訓練のような技能のデジタルライゼーションは、手本作業の模倣、やすりの持ち方や角度、力加減、作業姿勢、作業速度などを正確で明確な情報として訓練生に伝えることができる。

## 第2章 鉄工やすりによる平面仕上げ実習

機械加工品では、鉄工やすりによる仕上げ作業が必要な場面が多い。四国能開大生産技術科では、機械工作実習において鉄工やすりによる平面仕上げ実習を行う。図2.1に鉄工やすりによる平面仕上げ作業を示す。訓練では、1辺が15mmの正方断面を持つ長さ100mmの角材を、卓上バイスで10mm程度挟んで、加工面（15×100mm）

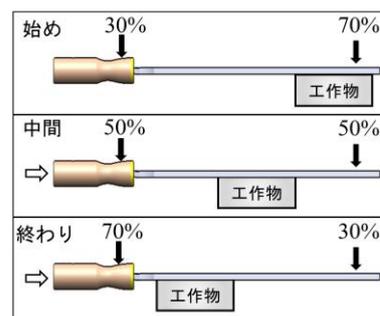


図2.1 平面仕上げ作業

(左図：作業姿勢，右図：やすりの力の分配)

を鉄工やすりを使って平面に削る。平面は、鉄工やすりにより2ストローク（2往復）あたり0.001mm程度削りながら作られる。平面仕上げ作業は、図2.1の左図に示すように、脇を締めて、加工面と一直線になる高さと同方向に手のひらでやすりの柄を押すイメージの動作で作業が行われる。

平面仕上げの作業は、鉄工やすりの平面を加工面に転写する中仕上げ工程と、中仕上げ工程後の加工面の微小な高低差をなくす仕上げ工程の2つからなる。中仕上げ工程では、赤当たり面積率の評価で20～40%程度、仕上げ工程では60%以上を目指す。赤当たりとは、酸化亜鉛を主成分とした微粒子に鉱油を混ぜた展性の良好な赤色の検査用塗料（以下、検査用塗料）を測定定盤に薄く延ばし、これと工作物の加工面とをすり合わせることで、検査用塗料の付着有無や濃淡にて平面度を把握する作業をいう。また、本研究における赤当たり面積率とは、加工面の全体面積に対して、検査用塗料が付着した部分の面積が占める割合を示す。中仕上げ工程では、図2.1の右図に示すように、ストローク長さは100mm程度に一定にして、ストロークの始めは「先端70%根元30%」、ストローク50mm程度で「先端50%根元50%」、ストローク100mm程度で「先端30%根元70%」と、やすりの先端と根元に押し当てる力加減を換える協調作業となる<sup>[7]</sup>。

また、仕上げの工程では、赤当たりにより加工面の平面度の狂いを確認し、高精度な平面加工を目標に、微小な高低差を小さくする。やすりの接触状況に応じた作業姿勢の修正や力感覚の調整が求められる。この時、やすりを加工面に対して平行にし、押し当てる力を一定にしつつ、やすりと加工面が密着していることを確認しながら作業することが大切である。

鉄工やすりによる平面仕上げでは、やすりの持ち方、基本的な作業姿勢、力のかけ方など多くの技能が求められる。実習では、指導員の手本作業の観察学習後、訓練生は思考錯誤を通して作業を繰り返す。指導員は、課題に直面している訓練生に対し、手本となる作業を提示しながら、改善すべき点について助言を行う。ここで指導員が行う主な助言内容には、①正しい作業姿勢、②やすりの適切な握り方、③平面に仕上げるための力感覚の把握、④加工面に対して平行にやすりを動かす方法、⑤一定のストローク長を維持する技能が含まれる。平面仕上げ技能の体得には、これら5つのマスターが肝要となる。

### 第3章 平面仕上げ技能体得支援システム

#### 3.1 平面仕上げ技能体得支援システム構成

図3.1に本研究で実施した平面仕上げ技能体得支援システム訓練（以下、体得支援システム）の全体像を示す。体得支援システムでは、技能のデジタルライゼーションされた訓練教材を用いた指導と、従来訓練とを組み合わせる。本システムは、従来訓練に技能のデジタルライゼーションを加えたものである。技能のデジタルライゼーションを加えることにより、①正しい姿勢、②正しいやすりの握り方、③平面に仕上げる力感覚の把握、④加工面に平行なやすりの動かし方、⑤一定のストローク長さの維持に必要な技能を、訓練生に正確に明確な情報として伝えることができる。技能のデジタルライゼーションは、以下に示す3つの訓練からなる。

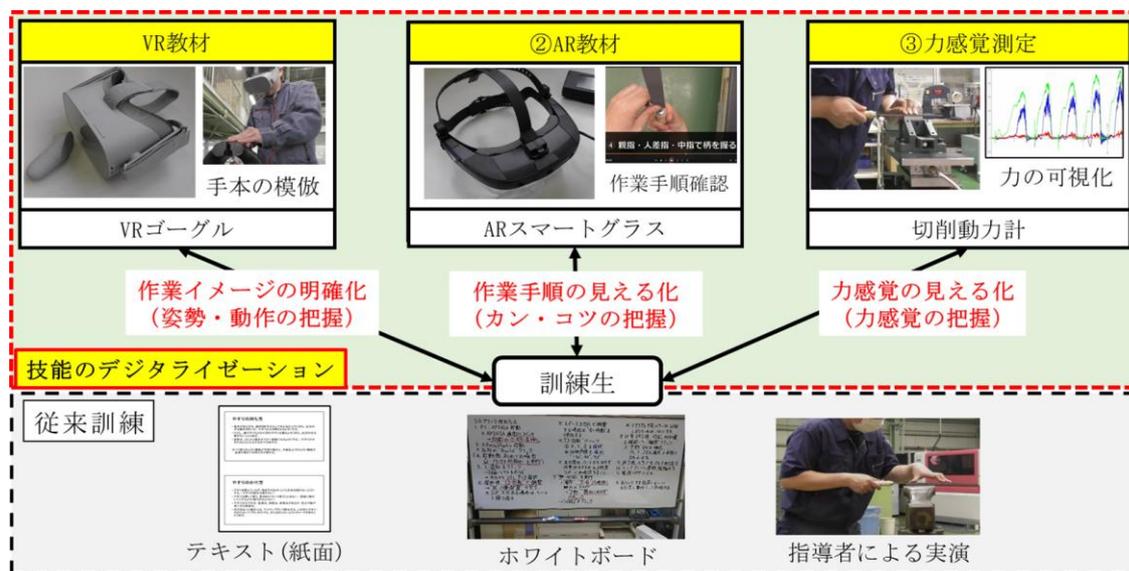


図 3.1 平面仕上げ技能体得支援システム訓練の全体像

##### 3.1.1 VR教材を活用した訓練

VR教材を活用した訓練では、訓練生がVRゴーグルを装着し、手本作業を模倣することで作業イメージの明確化を図ることを目的としている。本訓練では、やすりの持ち方や角度、作業姿勢、作業速度など、技能習得に必要な要素を視覚的に理解させるための構成とした。VRゴーグル上のディスプレイには、熟練指導員による手本作業の360度映像が表示される。映像の撮影には、360度アクションカメラを使用し、手本作業の視点とVRゴーグル装着時の視線高さが一致するように、撮影時のヘッドバンドおよびカメラの固定位置を調整した。さらに、映像には熟練指導員の音声による作業解説を追加し、視覚情報と聴覚情報の組み合わせによる理解促進を図った。撮影時は、手ぶれなどの映像揺れを抑える工夫を行い、編集においてもVR酔い・映像酔いの軽減に配慮した。なお、VR動画の長さは訓練生の体調への影響を考慮し30秒程度に設定し、長時間使用による負荷の低減を図った。

##### 3.1.2 AR教材を用いた訓練

AR教材を用いた訓練では、ARスマートグラスのディスプレイに表示される手本作業の案内に従い、訓練生が実作業を行う構成とした。本訓練の目的は、実作業を通じて手順を確

認め、各工程における「カン」や「コツ」といった技能の暗黙知を把握することにある。手本作業の映像は、作業員視線で定点撮影した映像であり、繰り返し視聴しやすい形式にするため、1本の動画は1分程度の長さとなるよう編集した。

また、映像再生中の作業説明は字幕によって提示し、字幕表示中は動画を5秒間停止することで視聴者の理解を促進した。字幕の内容は、熟練指導員による手本作業を分析した結果に基づき、補足説明を加えつつ、作業手順のポイントを箇条書きで簡潔に提示した。

さらに、訓練中の煩雑な操作を軽減するため、ARスマートグラスに搭載されたカメラで二次元コードを認識し、対応する動画を表示するARマーカ機能を活用した。これに伴い、鉄工やすりによる仕上げ作業の実習用テキストを新たに作成した。作成したテキストには、AR教材の動画内で表示される字幕内容を列挙するとともに、関連動画が視聴可能となるよう動画データと対応させた二次元コードを付記した。図3.2にテキストと関連動画の一例を示す。



図 3.2 AR教材に合わせたテキスト教材(a)と再生動画(b)

### 3.1.3 切削動力計を使った力感覚測定

平面仕上げ時の鉄工やすりに加える力を切削動力計により測定した。この訓練の目的は、言語情報では伝えられない力感覚の把握にある。図3.3に力感覚測定の概要図を示す。切削動力計の一般的な用途は、工作機械のテーブルとワークの間に設置し、フライス加工などの機械加工プロセスにおける切削力の測定に利用する。本測定では、鉄工やすりの平面仕上げ作業で作業員がやすりにかける力加減を力感覚とし、工作物を經由して伝わる力の変動を測定するのに切削動力計を利用する。力

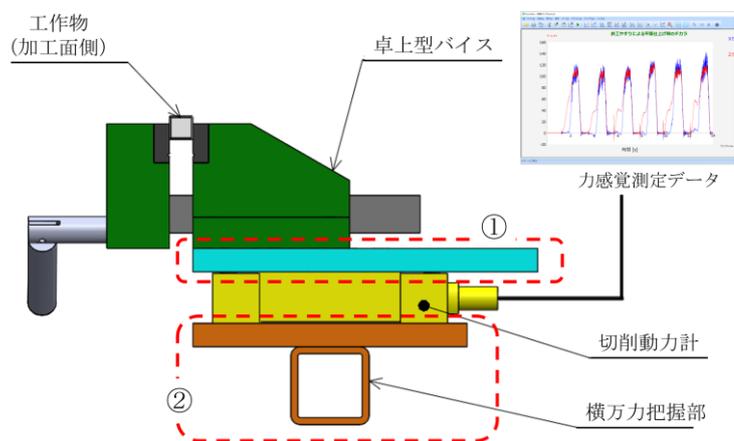


図 3.3 切削動力計を使った力感覚測定の概要図

感覚測定が、繰り返し練習を行う作業環境でできるように、図3.3の破線①で示す切削動力計を横万力に固定するジグプレートと、破線②で示す切削動力計の上面にバイスを固定するジグプレートを製作した。図3.4に力感覚測定データの測定中の様子(a)と表示される力感覚の測定データ(b)を示す。力の測定方向は、平面仕上げ作業時の作業者がやすりを前方に押し加工する方向(以下、X方向)と、やすりを工作物に押し当てる方向(以下、Z方向)の2方向とした。

切削動力計により、卓上バイスに保持された工作物の上面に加わる2方向の力をデジタル情報として取得することができる。また、切削動力計で測定した力感覚の測定結果は、図3.4(b)に示す力の変化をグラフ化し、リアルタイムに大型ディスプレイに表示される。

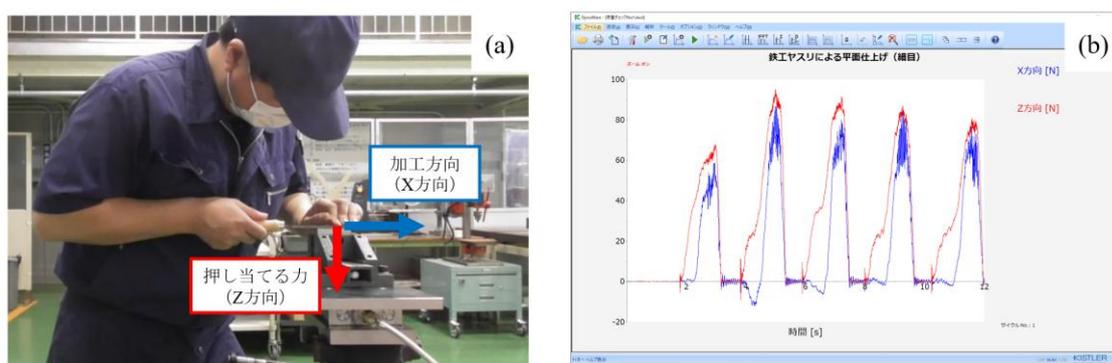


図3.4 力感覚測定の様子(a)と測定した力感覚データ(b)

熟練指導員の種々の手本データから、鉄工やすりによる平面仕上げ作業では、中仕上げ工程の切削力で、X方向およびZ方向それぞれの最大値は180N程度であった。また、仕上げ工程の切削力の最大値は、X方向で30N程度、Z方向で40N程度であった。

図3.5に熟練指導員の切削動力計で取得した平面仕上げ作業における仕上げ工程中の力感覚の測定結果を示す。図は、横軸に時間変化をとり、縦軸に荷重の変化をX方向とZ方向で示した。

熟練指導員のやすり作業の特徴として、X方向の力の挙動から、1ストローク当たり1.2秒で削っていることが分かる。やすりのストロークが工作物の長さ100mmと同じと仮定すると、やすりが工作物を削る時の速度は83mm/秒程度である。さらに、X方向の力の増加の周期から、ストロークから次のストロークまでの周期が2.2秒であることが分かる。このことから、熟練指導員は1分間に28回程度のストロークで削っていることが分かる。このように、力感覚データを時間変化の図として図示することで、力だけでなく速度や回数といった身近な単位で伝えることも可能である。

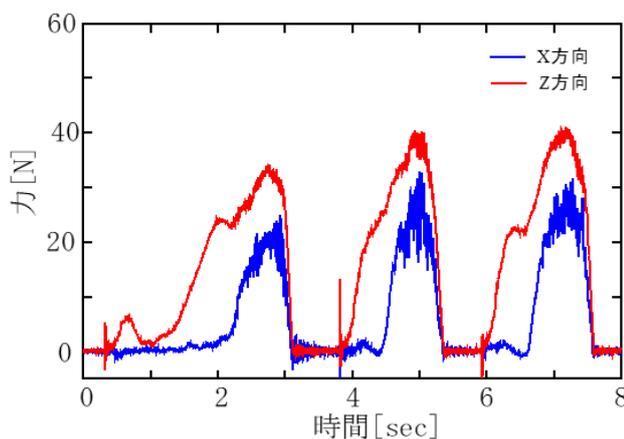


図3.5 熟練指導員の仕上げ工程作業中の力感覚データ

さらに、X方向の力の増加の周期から、ストロークから次のストロークまでの周期が2.2秒であることが分かる。このことから、熟練指導員は1分間に28回程度のストロークで削っていることが分かる。このように、力感覚データを時間変化の図として図示することで、力だけでなく速度や回数といった身近な単位で伝えることも可能である。

注目すべきは、Z方向の力の挙動から、熟練指導員は平面仕上げ作業中に、やすりを工作物の加工面に押し当て、やすりと加工面が密着していることを確認する動作と0.2秒ほどの時間があり、その後押し当てる力を増しながらやすりを前進方向に動かして削っている特徴的動作があることが分かる。この動作は、平面仕上げによる赤当たり面積率を増加するために重要な技能である。

測定データの表示時間範囲の設定においては、平面仕上げ作業における繰り返し加工の切削力ストロークが5回程度表示される範囲とすることで、力の変動が確認しやすいことが分かった。そこで、測定時間は熟練指導員の手本データを参考にして15秒間と設定した。また、この熟練指導員の力感覚の図に示された特徴を目標として、訓練生への実技指導を行った。

### 3.2 体得支援システムによる繰り返し練習の流れ

#### 3.2.1 体得支援システムを用いた訓練全体の流れ

表3.1に体得支援システムの運用の基本的な流れを示す。体得支援システムの運用にあたっては、訓練生に体得支援システムによる訓練の方法を、ガイダンスで理解してもらう必要がある。指導員は、体得支援システムで利用する各種機器の操作を担当し、一部操作を訓練生が行うようにする。繰り返し練習時において指導員は、直接指導のほか、模範作業も実施する。さらに、振り返りシートの確認とコメントの記入を実施する。

ガイダンスでは、使用するテキストの配布、支援システムを利用した訓練内容、習得する技能の達成水準、課題採点方法について説明をする。また、配布したテキストを用いて、平面仕上げ作業の概要および用語の説明を行う。

表 3.1 平面仕上げ技能体得支援システムの流れ

段 階	標準 訓練時間	内 容	資料・機器
ガイダンス	1時間	作業内容・課題・概要説明	テキスト
体得支援システムによる訓練	4時間	① VR ゴーグルによる訓練 ② AR スマートグラスによる訓練 ③ 力感覚測定	VR ゴーグル AR スマートグラス 切削動力計 ビデオカメラ
従来訓練	12時間	① 指導員による模範作業の観察学習 ② 繰り返し練習 ③ 赤当たり評価（訓練生による） ④ 振り返りシート記入（改善作業）	振り返りシート
技能習熟度評価	1時間	赤当たり評価（指導員による）	

ガイダンス終了後、VR ゴーグルの使用方法、AR スマートグラスの使用方法について先に説明を実施する。VR ゴーグルの使用方法では、装着方法や操作方法、VR 酔いへの対策方法

について説明する。AR スマートグラスの使用方法では、スマートグラスの装着方法、AR マーカーの操作方法、動画再生に関する操作方法について説明する。その後、体得支援システムを併用した訓練を実施する。訓練では、初めにVR 教材による作業イメージの明確化することで、これから受講する訓練でできるようになる作業の把握をする。

次に、AR 教材をテキストと併用しながら作業の手順とカンやコツを学ぶ。この時、訓練生は自分のタイミングで訓練の説明を聞くことができ、何度でも視聴することができる。また、AR スマートグラスをかけながら作業をすることで、AR 教材の説明動画と比較しながら自分の作業が見えるので、容易に作業ポイントを理解することができる。

VR 教材およびAR 教材による訓練学習後は、指導員による模範作業の提示を観察する。この時、AR 教材による細分化された作業手順やポイント等は既に学習済みであるが、作業の繋がりを持つために、再度 VR 教材による作業の確認を行う。その後、指導員による模範作業とともに訓練生は個人の技能習得のために繰り返し練習による作業の習熟をする。工作物表面が、鉄工やすりによる平面仕上げ作業によって削られた面になった段階で、力感覚測定による力感覚の把握を行う。

力感覚測定を使った訓練では、訓練生が繰り返し練習で使用している鉄工やすりと工作物を使用して測定を行う。力感覚測定では、訓練生が自分自身の力感覚のデータを測定後に見返せるように記録した。

### 3.2.2 繰り返し練習

鉄工やすりによる平面仕上げでは、やすりの持ち方、基本的な作業姿勢、力のかけ方など技能のカンやコツを習得する必要がある。図 3.6 に鉄工やすりによる平面加工の一般的な工程を示す。

カンやコツの習得するために訓練生は、平面加工の工程に沿って作業を行う。繰り返し練習は、鉄工やすりによる平面仕上げ加工から赤当たりの確認までの練習とする。

さらに繰り返し練習時に指導員からの直接指導だけでなく、訓練生自身が練習中の作業姿勢を把握するために、ビデオカメラにて録画した映像を確認できるようにした。これにより視覚的に訓練生自身と熟練指導員との作業姿勢の比較を可能とし、自己省察を行うモデリング（観察学習）を促すようにした。

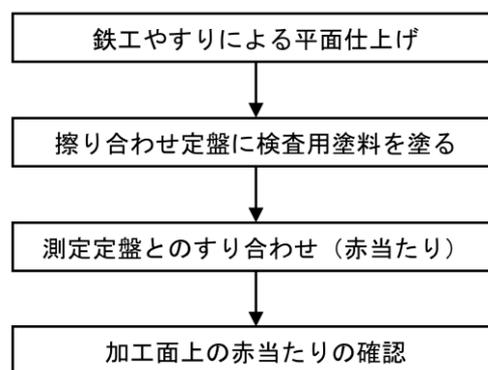


図 3.6 平面仕上げ加工の工程

### 3.2.3 振り返りシート

図 3.7 と図 3.8 に支援システムで使用する振り返りシートの一例を示す。振り返りシートは、AR スマートグラスや仕上げ作業実習用テキストに記した作業手順のポイントの把握をチェックシート化し、(1) 訓練生自身で作業手順のミスの箇所をチェック、(2) 赤当たりの面積率、(3) 気づき・対策・改善点欄、アドバイス欄により構成されている。訓練生は、練習が終わる毎に繰り返し練習の時間を記入する。次いで、指導員による赤当たり面

積率の評価値を記入する。そして、作業手順等の振り返り作業を行う。

振り返りシート 1						
作業名: 鉄工やすりによる平面仕上げ				学籍番号 _____		
				氏名 _____		
作業名	確認ポイント	作業回数				備考
		1	2	3	4	
加工前	鉄工やすりの 持ち方	やすりの柄の先端は手のひらのくぼみに当てている				
		親指・人差し指・中指でやすりの柄を握る				
		薬指・小指はやすりの柄に添える				
	加工物の クランプの仕方	工作物をバイスでクランプする				
		工作物上面の傾きを見るために、やすりを工作物上面に置く				
		バイスの上面(口金)に対してやすりが平行になっているか確認する				
	足の位置	左足を一步(肩幅半分)前に出す				
		右足を肩幅半分後ろに広げる				
	やすりの ストローク	やすりを左手で支えている				
		やすりの位置が奥過ぎると、やすりがぐらつくことを知っている				
		やすりの位置が手前過ぎると、やすりがぐらつくことを知っている				
		安定する位置が、左手で抑えているところと材料の端が同じ位置となることを知っている				
		手のひらで押さえつける支え方では、ストローク量が稼げないことを知っている				
		支える手を伸ばして押さえつけて、ストロークを稼ぐようにする				
		やすりを動かすストロークの目安は理解した				
	立ち位置の調整	やすりの長さの真ん中の位置が材料の中心位置になるように置く				
		やすりの柄を軽く握る				
		肘が90度になるように立ち位置を調整する				

※出来なかったところに

図 3.7 振り返りシート 1

振り返りシート 3			
作業名: 鉄工やすりによる平面仕上げ		学籍番号 _____	
		氏名 _____	
実習日	月	日	
		作業時間	時間 分
		赤当たり面積率(提出時)	%
気づき・対策・改善点		アドバイス	

図 3.8 振り返りシート 3

## 第4章 運用事例

### 4.1 運用の流れ

体得支援システムの運用から、システム導入前後の訓練効果、及び指導員の指導法に依存しない訓練環境が構築できているかを評価する。被験者は四国能開大専門課程1年生の訓練生とした。体得支援システム導入前の評価は、2021年度22名（以下、2021年度）とした。体得支援システム導入後の評価は、2022年度20名（以下、2022年度）、2023年度18名（以下、2023年度）、2024年度16名（以下、2024年度）の計54名とした。

体得支援システムの訓練効果を検証するにあたり、訓練を担当する指導員の違いが技能習熟度に与える影響も重要な要素であると考えられる。

このため、2022年度は10名編成のグループを2つ設け、それぞれ異なる指導員が実習を担当した。また、2023年度および2024年度は、2022年度に担当した2名とは別の指導員が訓練を担当した。その際、3名の指導員間で指導の進行や説明内容に差が生じないように、指導案による指導内容とスケジュールの確認、模擬訓練によるイメージの共有を実施した。なお、赤当たり評価については、指導員による評価の差異を最小限に抑えるため、2021年度に指導を担当した指導員が一貫して評価を行った。

### 4.2 技能の評価方法

四国能開大の機械工作実習の実習課題は、技能検定仕上げ職種の機械組立仕上げ作業3級課題を参考にした。本課題では、卓上ボール盤以外の動力を使用せず、鉄工やすりなどの手工具を用いて、「台・蓋・ロッド」の3部品を組み立てられるように所定の精度に仕上げ加工を行う。図4.1に機械工作実習で提示している実技課題図を示す。

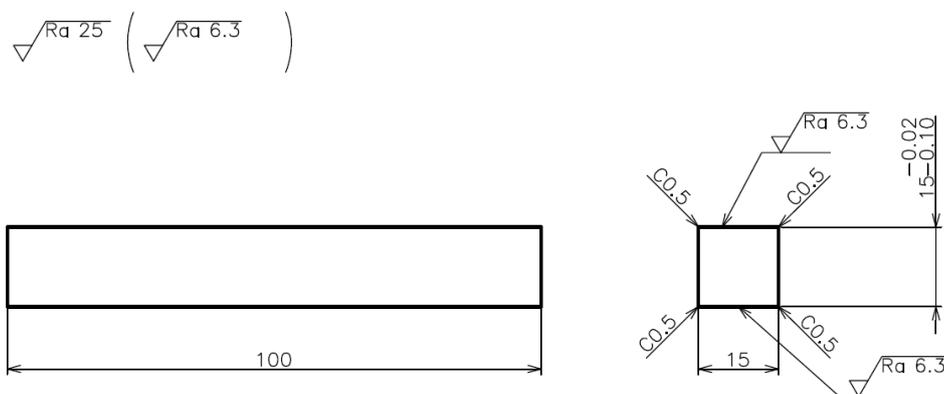


図4.1 機械工作実習実技課題図（技能検定 機械組立仕上げ3級作業の一部）

体得支援システムの技能評価は、ロッド部品の課題作成を平面仕上げ作業とした。課題は、フライス加工された正方形断面の角ロッド（15×15×100mm）を長手方向（100mmの方向）に鉄工やすりにて平面仕上げ加工を行う。技能習熟度は、平面仕上げ加工する1つの面での赤当たり面積率とした。訓練の総時間は18時間である。なお、合格基準は技能習熟度0.6（赤当たり面積率60%）以上である。

### 4.3 体得支援システムによる訓練生の習熟度

表 4.1 に従来訓練と体得支援システム導入後の訓練実施結果を示す。体得支援システムの効果検証として、2021 年度の実技評価を用いた。なお、実技評価値は、訓練指導記録に基づき、18 時間の訓練時間内での評価結果を採用した。訓練実施結果の比較から、従来訓練と体得支援システム導入後の訓練を比較すると、18 時間の訓練時間内で合格基準を満たした訓練生の割合は、14%から 89%へと大幅に増加したことが確認された。

表 4.1 体得支援システム導入前後の技能習熟度の統計量

項目	従来訓練	体得支援システム 導入後
受講者数	22	54
時間内合格者数	3	48
時間内合格者の割合	14%	89%

表 4.2 に従来訓練と体得支援システム導入後の技能習熟度の統計量を示す。従来訓練で行った 2021 年度は、技能習熟度の中央値は 0.2，平均値は 0.37，最小値は 0.2，標準偏差は 0.21 であった。一方、体得支援システム導入後の 2022 年度以降では、中央値が 0.8，平均値が 0.70，最小値が 0.3，標準偏差が 0.18 となった。この結果より、中央値および平均値の大幅な向上と、標準偏差のわずかな減少が確認され、技能習熟度の底上げと習熟度のばらつきの提言が図られたと考えられる。一方で、最小値には大きな変化が見られず、一部の訓練生では依然として習熟度が低い傾向が残っている可能性がある。

表 4.2 体得支援システム導入前後の技能習熟度の統計量

項目	従来訓練	体得支援システム 導入後
受講者数	22	54
平均値	0.37	0.70
標準偏差	0.21	0.18
中央値	0.2	0.8
最大値	0.8	0.9
最小値	0.2	0.3

次に、効果量と t 検定から技能のデジタルライゼーションによる教育効果を調査する。ここで効果量について説明を加える。効果量 1.0 とは、実験群と統制群との比較において、標準偏差が 10 向上したことを示す。学力偏差値に置き換えると 10 偏差値が向上したことと同義である。効果量の一般的な考え方は、1 年間の一般的な学習の効果量は 0.4 程度であることから、効果量 0.4 以上が望ましい効果の範囲とする。また、効果量 0.8 以上を教育効果に高い影響を与える要因とする。教育実践の大半は効果量 1.0 以下である。訓練の効果量に必要な被験者数は、 $d=0.5$  の場合、被験者 34 人以上、 $d=0.8$  の場合、被験者 18 人以上である<sup>[8]</sup>。

体得支援システムの導入による訓練効果を検証するため、体得支援システム導入前の2021年度の学生22名と、体得支援システム導入後の2022年度、2023年度、2024年度の学生54名の技能習熟度を対象に、対応のない2群間のt検定を実施した。その結果、技能のデジタルイゼーションにより、効果量は1.70と大きく、技能習熟度が顕著に向上した。またt検定のp値は、 $4.9 \times 10^{-7}$ と極めて小さく、1%有意水準で統計的に有意な差が認められた。これらの結果から、言語や図では十分に伝達できなかった技能の暗黙知が、五感を通じて可視化・共有されることにより、従来以上の訓練効果が得られることが明らかとなった。

また、高い訓練効果がもたらされた要因の一つとして、振り返りシートを用いた自己省察のプロセスが挙げられる。この振り返りシートを用いた学習サイクルは、ドナルド・ショーンが提唱した「省察的实践家」の概念における「行為についての省察 (reflection-on-action)」を促す仕組みと解釈できる<sup>[9]</sup>。ショーンによれば、実践家は自らの行為の結果を客観的に振り返り、次に向けた改善策を立てることで、単なる反復練習を超えた深い学びを得る。本研究の訓練生が、赤当たり評価や録画映像という客観的データをもとに自身の作業を振り返るプロセスは、この省察的实践であり技能習熟を効率化した重要な要因の一つである。

#### 4.4 繰り返し練習による効果

力感覚測定による訓練生技能習熟変化を調査した。図4.2から図4.4に訓練生3人の力感覚測定の測定結果を示す。図は時間変化に対するX方向とZ方向それぞれの力の変化をグラフ化したものである。なお、それぞれの図において、訓練生の作業初期の測定結果(a)、および(b)の測定結果と作業中の定点カメラによる姿勢チェックをもとにアドバイスと繰り返し練習後の再測定結果(b)で示す。

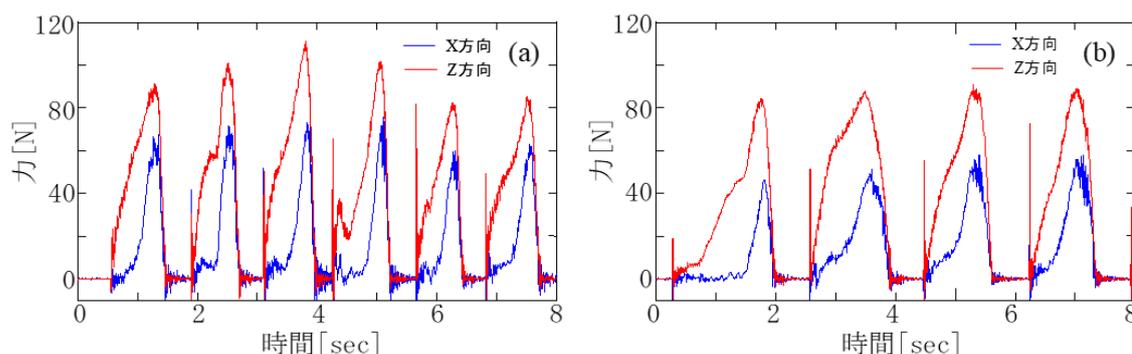


図4.2 訓練生Aの力感覚測定データ

(a) 1回目の測定 (b) 繰り返し練習後の測定

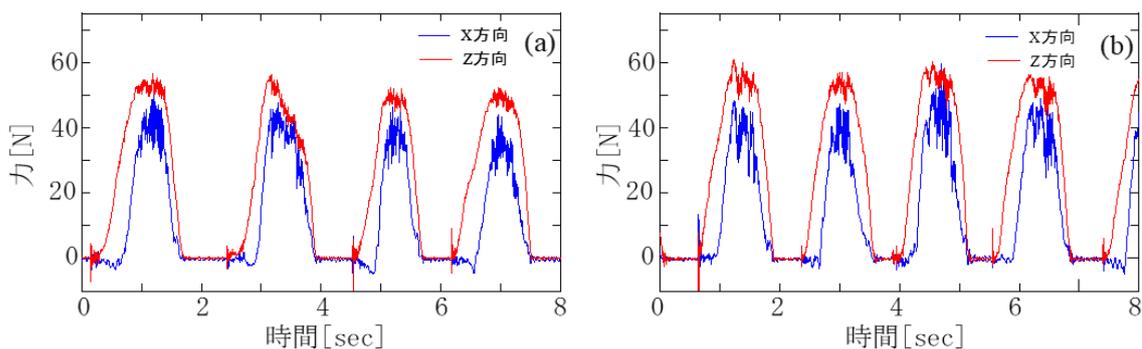


図 4.3 訓練生 B の力感覚測定データ  
(a) 1 回目の測定 (b) 繰り返し練習後の測定

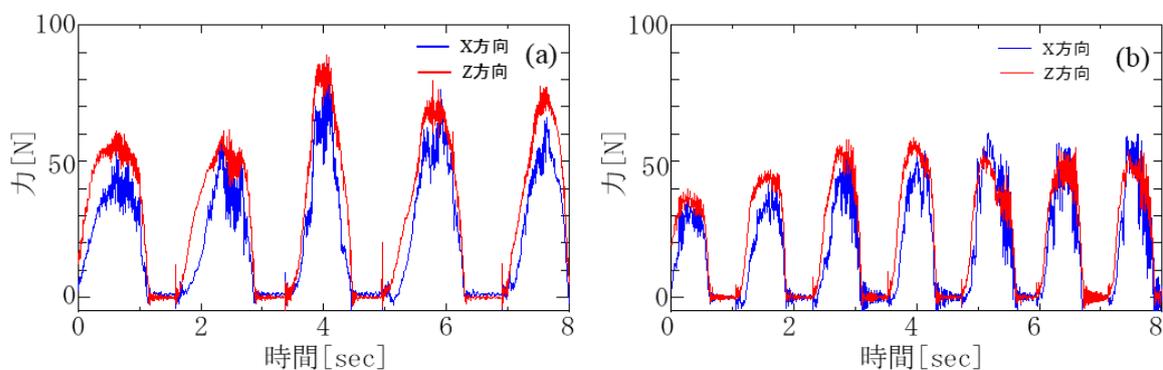


図 4.4 訓練生 C の力感覚測定データ  
(a) 1 回目の測定 (b) 繰り返し練習後の測定

図 4.2(a) で示す訓練生 A の 1 回目の測定結果を見ると、やすりを押し当てる力を表す Z 方向の力の増加は、やすりを前進して切削する X 方向の力の増加より前に始まっている。この X 方向より先に Z 方向の力が増加するグラフの変化は、やすりの接触状況を材料上面に押さえつけることで確認し、その後切削動作と一致する挙動である。また、平面仕上げによる赤当たり面積率を増加するためには、やすりの平面を如何にして材料に転写させるかが重要である。

訓練生 A は、やすりを押し当てる力の最大値にばらつきがあった。正しいやすりを抑える手先の使い方を習得することで、図 4.2(b) に示すように押さえつける力が一定となり、平面仕上げ技能における力のかけ方が上達した。

図 4.3 に示す訓練生 B や図 4.4 に示す訓練生 C の (a) 1 回目の測定と (b) 繰り返し練習後の測定の力の変動の比較から、訓練生 A と同様に力のかけ方の均一化や削る前のやすりの接触状態の把握作業の有無の可視化には作業改善への一定の効果があったことがうかがえる。このように、動作や動きだけではわからない力感覚を可視化することで、訓練生への気付きと技能改善に貢献することができた。

次に、指導員の指導法に依存しない訓練環境を構築できているかを評価する。表 4.3 に 2022 年度 1 グループと 2022 年度 2 グループ、2023 年度、2024 年度の技能習熟度に関する

統計量を示す。2022年度2グループを指導した指導員Bは、体得支援システム導入前の担当者である。また、2023年度と2024年度は指導員Cが担当した。システム導入前と比較して、高い訓練効果の向上が確認されている。また、すべての受講者グループにおいて、技能習熟度の分布に若干の違いは見られるが、平均値および中央値に大きな差は見られなかった。

t検定の結果、2022年度1グループと2024年度との比較において最も低いp値(0.09)を示したが、統計的に有意差は確認されなかった。この結果から、体得支援システムを活用することで、指導員の指導法や経験に依存せず、高い技能習熟度が得られていることが明らかとなった。

表 4.3 指導者の違いによる技能習熟度の統計量

項目	2022年度 (1グループ)	2022年度 (2グループ)	2023年度	2024年度
受講者数	10	10	18	16
平均値	0.71	0.69	0.80	0.81
標準偏差	0.13	0.19	0.14	0.12
中央値	0.8	0.8	0.8	0.85
最大値	0.8	0.9	0.9	0.9
最小値	0.4	0.3	0.4	0.5
指導担当	指導員A	指導員B	指導員C	指導員C

近年、学校教育では大きな変革の時期を迎えている。大学では学位とは別に、大学卒業後のリカレント教育への期待から、マイクロレデンシャルの普及促進が行われている<sup>[10]</sup>。マイクロレデンシャルとは学習内容をより詳細な単位に分けて個別に認定する方法である。マイクロレデンシャルの普及により、新しい知識や技術を個別の学習によって身につけて、技術や社会の変化に迅速かつ継続的に対応できるような機会の提供が期待される。職業訓練においても、訓練生に新しい技能を迅速に継続的に習得し、変化する生産現場のニーズや短期間の技能の再習得ニーズの変化に対応できる技能習得と機会は必要である。

効果量の高い技能のデジタルライゼーションは、訓練内容をより詳細な単位に分け、個別に技能認証する技能版のマイクロレデンシャルの実現を可能にする。また、デジタルライゼーションされた訓練教材は、対面訓練だけでなく、オンライン訓練や多様な訓練形態の実施を支援することを可能とする。本研究で提案する平面仕上げ技能体得支援システムは、訓練効果量も高く、技能版のマイクロレデンシャルを実現するための指針として示すことができる。

#### 4.5 アンケート結果

体得支援システムを使用した訓練生に対してアンケート調査を実施した。表 4.4 には、2022 年度から 2024 年度にかけての受講生アンケートの結果を示す。

訓練生は、切削動力計による力感覚の把握が技能習熟に効果的であると認識していることが明らかとなった。また、VR を活用した模倣訓練も作業イメージの明確化に寄与していると多くの訓練生が感じている。一方で、AR スマートグラスの使用については意見のばらつきが見られた。具体的には、ヘッドバンドによる重量負担や、工作物の加工面への照明反射により説明動画の視認性が低下し、作業負担の一因となっていると考えられる。

自由記述項目では、「AR の説明が分かりやすかった」「VR 教材は実際に目の前で見るように作業イメージが明確になった」など、AR や VR を活用した新たな訓練体験への肯定的な意見も複数確認された。

注目すべき点として、Q5「技能習得に最も有効だった教材」に関する調査では、AR スマートグラスを除く教材の評価が分散していることが挙げられる。さらなる調査は必要であるが、この結果は、訓練生個人の技量や経験に起因する教材への受容の違いが表れている可能性がある。これらの結果から、今後の教材開発においては、訓練生の保有する感覚や技能の多様性に応じた教材の選択肢の拡充と、対応可能な訓練環境の整備が重要であると考えられる。

表 4.4 アンケート結果

番号	質問項目
Q1	VR ゴーグルによる模倣は手本作業の理解に有効でしたか？ a. 非常に有効であった b. まあまあ有効であった c. どちらとも言えない d. あまり有効ではなかった e. まったく有効ではなかった
A1	a. 30 票 b. 19 票 c. 4 票 d. 1 票 e. 0 票
Q2	AR スマートグラスを見ながらの作業は行いやすかったですか？ a. 行いやすい b. まあ行いやすい c. どちらとも言えない d. 少し行いにくい e. 行いにくい
A2	a. 23 票 b. 18 票 c. 7 票 d. 5 票 e. 1 票
Q3	切削力測定は作業中の力の入れ方の把握に有効でしたか？ a. 非常に有効であった b. まあまあ有効であった c. どちらとも言えない d. あまり有効ではなかった

	e. まったく有効ではなかった
A3	a. 38票 b. 14票 c. 1票 d. 1票 e. 0票
Q4	振り返りシートは改善点の把握に有効でしたか？ a. 非常に有効であった b. まあまあ有効であった c. どちらとも言えない d. あまり有効ではなかった e. まったく有効ではなかった
A4	a. 30票 b. 20票 c. 2票 d. 2票 e. 0票
Q5	技能習得に最も有効だったものは何でしたか？ a. 振り返りシート b. VR ゴーグル c. AR スマートグラス d. 切削力測定 e. その他 ( )
A5	a. 12票 b. 12票 c. 4票 d. 26票 e. 0票
Q6	自由記述欄
A6	<ul style="list-style-type: none"> <li>・VR ゴーグルで細かな作業などをじっくりみたい。</li> <li>・VR がとても分かりやすかった。実際に目の前で見ているみたいで、とても理解できた。</li> <li>・とても分かりやすかった。</li> <li>・360° カメラで自分の作業している姿を撮影し、後で確認できるようにしてほしい。</li> <li>・切削力測定はとてもいいと思った。自分の力加減や数値も出るため、改善点などがとても分かりやすかった。</li> <li>・赤当たりの説明がわかりやすかった。</li> <li>・AR スマートグラスの手本を見ながらできてやりやすかった。</li> <li>・AR の実用性が思ったよりあった。</li> </ul>

## 第5章 結言

本研究では、訓練生の技能習熟度の低下が著しい鉄工やすりによる平面仕上げ作業技能において、技能習熟の効率化を目的とした新たな訓練指導法を検討した。本作業技能は、感覚的な要素が強く、従来は「カン」や「コツ」といった暗黙知に依存していた。そこで本研究では、デジタル技術を用いて暗黙知を可視化することで、言語では伝達が困難であった視覚情報や力感覚の共有を可能とした。さらに、デジタル化された感覚情報の可視化を通じて、客観的評価による理解促進と作業改善の効率化を図った。新たな訓練システムとして、AR スマートグラス、VR ゴーグル、および切削動力計による力感覚測定を組み合わせた「平面仕上げ技能体得支援システム」を開発し、従来訓練と併用する訓練指導法を提案した。この体得支援システムにより、平面仕上げ技能のデジタル化・可視化を実現し、感覚情報の伝達を通じて技能のデジタルライゼーションが可能となった。さらに、技能支援システムを活用した訓練を実施し、訓練生の技能習熟度向上に対する効果検証を行った。

その結果をまとめると、次のとおりである。

- ① AR スマートグラスやVR ゴーグルを活用することで、訓練導入時の説明や指導員による模範作業を、訓練生が自身のタイミングで受講できるようになった。また、これらの視聴覚教材により、指導員の目線からの作業内容を分かりやすく伝達することが可能となり、技能の理解促進に寄与した。
- ② 力感覚測定の導入により、鉄工やすりによる平面仕上げ作業中の力の変化を可視化することが可能となった。さらに、作業中に可視化された力の変動パターンは、熟練指導員が意識的に行っている作業の「コツ」と一致していることが明らかとなった。
- ③ 従来の訓練と比較して、体得支援システムを併用した訓練では、訓練生の技能習熟度が大幅に向上した。デジタルライゼーションを活用した技能訓練により、従来の方法では十分に伝達できなかった感覚情報（力の変化や視覚的な注意点など）を可視化・共有することが可能となった。その結果、訓練生は繰り返し練習の初期段階から技能目標とのズレを認識できるようになり、早期の気づきと改善の促進によって、効率的な技能習熟が図られたと考えられる。
- ④ 体得支援システムを用いた訓練では、訓練指導者が異なっても技能習熟度に顕著な差は見られず、一定の習熟成果が得られていることが確認された。

本研究では、一人の匠が持つ暗黙知を全国の訓練生が共有財産として享受できる技能継承の新たなモデルを構築し、場所や機会に捉われない人材育成の可能性を提示した。

しかし、このモデルを広く社会実装するためには、いくつかの課題も存在する。特に、本研究で力感覚測定に用いた切削動力計は高価である点が挙げられる。今後はより安価な測定器を活用して、ネットワークを通じて多様な技能データを効率的に蓄積していくことが不可欠である。将来的には、蓄積されたデータをAIによる自動診断などに活用し、単

なる技能の可視化に留まらない，より高度な学習支援の実現を目指すことで，技能習熟のさらなる効率化を実現させていきたい。

## 参考文献

---

- [1] M. Polanyi, 暗黙知の次元, 筑摩書房, 2003.
- [2] 野中郁次郎, 竹内弘高, 知識創造企業, 東洋経済新報社, 1996.
- [3] 榎堀優, 間瀬健二: 「ウェアラブルセンサを用いた熟練指導員のヤスリがけ技能主観評価値の再現」, 人工知能学会論文誌, Vol. 28, No. 4, pp.391-399 (2013) .
- [4] 池田隆之: 「職業訓練における AR 溶接シミュレータの活用」, 溶接学会誌, Vol. 91, No. 4, pp.239-243 (2022) .
- [5] 綿貫啓一: 「バーチャルトレーニングと OJT を融合した鑄造技能伝承および人材育成」, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 4, pp.382-389 (2010) .
- [6] 高木勝規, 木村寛路, 奥猛文, 新家寿健, 藤田紀勝, “鉄工やすりによる平面仕上げ技能体得支援システム,” 工学教育, vol. 71, No. 4, pp. 106-111 (2023) .
- [7] 職業能力開発総合大学校 基盤整備センター編: 機械加工実技教科書, 社団法人雇用問題研究会 (2008).
- [8] 鈴川由美, 豊田秀樹: 『認知科学』における効果量と検定力, その必要性, 認知科学, Vol. 18, No. 1, pp.202-222 (2011) .
- [9] D. A. Schön, 省察的实践とは何か—プロフェッショナルの行為と思考, 鳳書房, 2007 .
- [10] 井上雅裕, 角田和巳, 長原礼宗, 八重樫理人, 石崎浩之, 丸山智子: 大学教育のデジタルトランスフォーメーション, 工学教育, 70 巻, 3 号, pp.3\_3-3\_8 (2022) .