

暗黙知を人間科学の力で“見える化”する — フライス加工技能に対する試み —

職業能力開発総合大学校 平成 25~27 年度科研費基盤研究 (B) (身体性認知科学) 研究班

不破 輝彦・池田 知純・岡部 眞幸・菅野 恒雄・寺内 美奈
二宮 敬一・繁昌 孝二・和田 正毅・古川 勇二

1. はじめに

職業能力開発総合大学校 (PTU: Polytechnic University。以下、職業大と略す。) では、平成24年秋から独立行政法人日本学術振興会の科学研究費助成事業に応募できるようになった。その初年度に採択された研究課題の一つが「身体性認知科学に基づくフライス加工技能の修得・伝承モデルの構築」(研究種目: 基盤研究 (B), 研究代表者: 古川勇二, 研究期間: 平成25~27年度) である。

この研究では、ものづくりの技能に対して人間科学的な計測および分析を行い、眼で作業のようすを見るだけではわからないことを明らかにすることを目指した。将来的には、技能の定量的な評価や、効率的な技能習得方法の開発につながることを期待している。我々は、このような研究の推進は職業大の責務であるとの認識のもとで、研究を進めた。

本稿は、この研究成果を職業能力開発関係者だけでなく、広く社会・国民に分かりやすく説明することを目的とする。

2. 研究の背景と目的

2.1 技能と技術の考え方

本誌のタイトルは「技能と技術」であり、本稿の題名にも「技能」が含まれている。技能と技術に対する想いは、人それぞれであろう。“技能”と“技術”

の違いがはっきりしない方も多いと思う。一般的な意味を確認するために広辞苑^[1]を調べてみると、技能は「技芸を行ううでまえ、技量」、技術は「①物事をたくみに行うわざ、技巧、技芸。②科学を実地に応用して自然の事物を改変・加工し、人間生活に役立てるわざ」と説明されている。

これに対して、本稿では、森の考え^[2]に基づいて、技能と技術を解釈する。すなわち、技能については、(1)技能とは人間が持つ技に関する能力である、(2)技能は人に備わり、直接見ることはできない、(3)人は体験や経験を通じて技能を習得できる、(4)人が技能を継承しなければ、技能を維持できない、(5)技能は人が持つものであるから、自然科学に加えて人間科学でもある、と考える。一方、技術については、(1)技術は、技を記録したり、伝えるように、何かに置き換えられたものである、(2)技術は、客観的に記述、記録、蓄積することができる、(3)技術は、論文やメモ、機械などによって、人に関係なく多くの人に伝達できる、(4)技術は自然科学である、と考える。

2.2 暗黙知の“見える化”と問題点

本稿の題名からわかるように、暗黙知は本稿のキーワードである。森^[3]に基づく、(1)暗黙知とは、表現が困難な知恵・知識や判断・処理・認識である、(2)暗黙知は、カン (感覚、感性)、コツ (要領、要点、ポイント)、ノウハウ (工夫、考え方、段取り) である、(3)暗黙知の多くは整理されていないため、

言葉で説明したり文で記述することは困難である、(4)暗黙知の多くは、科学的に検討・検証が困難である、(5)暗黙知を自覚できないことが多い、と考える。

このことから、技能は暗黙知であると言える。技能が暗黙知のままでは、技能を習得するためには経験やカンに頼ることが必要になり、訓練の効率を上げることは困難で、習得には多くの時間が必要だ。

この問題の解決策は、暗黙知の“見える化”=形式知化である。すなわち、暗黙知を特定し、図、表、数式、文章などで記述して、暗黙知の内容を明瞭にすることである^[3]。そのために、森らは暗黙知の4階層の仮説^[4]を立てて検討している。第1層は、外から観察可能で、記述が容易である。第2層は、観察は困難だが、言葉にできる。第3層は、作業者は自覚していないが、質問により引き出して言葉にできる。第4層は、作業者は無意識に行うもので、言葉にはできない。第1から第3層までは、記録者が熟練者を観察したり熟練者に質問することにより、形式知化できるだろう。しかしこのようなインタビュー形式では、第4層の形式知化は困難である。

技能は暗黙知のままでよいのだろうか。このままだと、技能の習得は従来どおりの徒弟的環境のなかで反復訓練に終始し、技能習得の効率の向上を革新することはできない。

2.3 技能と人間科学

2.1で述べたように、技能は人間科学でもある。人間科学の力を用いれば、暗黙知の第4層までを含む形式知化を実現できる可能性がある。20世紀末ごろから、人間科学のうちの身体性認知科学が発展してきた。1983年にラスムッセンは、人の行動を3階層（スキルベース、ルールベース、知識ベース）で表すモデルを提唱した^{[5][6]}。1999年にファイファーらは、身体、脳、環境が相互に関連して人が物事を認識するという『身体性認知科学』を提唱した^[7]。

はたして、このような人間科学は、技能に適用できるだろうか。

一口に技能と言ってもさまざまな種類があり、それによって習得の仕方も異なることを考えると、技

能の種類を考える必要がある。森^[2]は、技能のタイプを次の4種類—(1)感覚運動系技能：人間の手腕など、身体の感覚機能と運動機能に主に依存、(2)知的管理系技能：人間の判断、推理、思考などの知的管理能力に主に依存、(3)保全技能：感覚運動系技能、知的管理系技能の両者を使用、(4)対人技能：人間に対する働きかけを行う—toに分類した。

ものづくりの技能を考える場合は、感覚運動系技能が主体となるが、知的管理系技能も必要だろう。これらの技能のキーワード—身体・感覚・運動・判断—を見ると、前述の人間科学の説明と重なることがわかる。そこで我々は、人間行動の情報処理過程のモデルを、ものづくり技能に当てはめることにより、技能を人間科学で考えることができるのではないかと考えた。ものづくりの技能のなかで機械加工を例に挙げると、加工作業の流れは次のようになる。①指示書・図面・環境に基づき作業し、②工作機械の作用により、③工作物の形状が変化し、④それを知覚して脳が次の作業を指示する。この一連の流れは、まさに身体性認知科学の対象である。しかし、この理論に基づき技能習得過程を解明した研究は、ほとんどない^[8]。

職業大は、ものづくりに関するセンターオブエクセレンス（中核的研究拠点）であり^[9]、人材育成や職業訓練における効率的な技能習得方法の開発は、職業大の責務である。そのためには、技能を人間科学的に解明する必要がある。

2.4 研究の目的

本研究の目的は、身体性認知科学に基づき、暗黙知であるものづくりの技能を人間科学的に解明することである。人間行動の情報処理過程としてのラスムッセンの3階層モデルに基づいて、技能習得や技能伝承を考える。

具体的には、機械加工のなかでフライス加工を例として、①加工に伴い時々刻々と変化する工作物形状と知覚の関係、②知覚した結果に対応した動作と身体的ストレスとの関係、③知覚と動作を、スキル、ルール、知識ベースとして認知する階層について分析し、④これらを熟練者と中級者とで比較すること

により、フライス加工技能の情報処理過程モデルを構築する。

3. 研究の方法

3.1 概要

フライス加工作業者を被験者として、人間科学に基づき、被験者の感覚や動作、神経について測定する実験を行った。被験者の技能レベルに応じた違いが測定結果にあらわれるかどうかを検証した。また、ラスムッセンの3階層モデルに基づいて、フライス加工作業の3階層モデルを作成し、測定結果と比較した。

実験は、大別して2種類ある。第一は、技能レベルの異なる被験者の測定結果を比較する実験で、これを比較実験と呼ぶ。第二は、被験者の聴覚の感性に関する実験で、これを聴覚実験と呼ぶ。

3.2 被験者

被験者の技能レベルは、中級者と熟練者に大別した。フライス加工の中級者として、職業大総合課程（大学学部相当の課程）機械専攻4年生、熟練者として、職業大機械系教員（機械加工職種（フライス盤作業）の技能検定1級相当）および技能五輪全国大会フライス盤職種入賞経験者とした。聴覚実験の被験者は、中級者のみとした。

3.3 使用した工作機械と作業内容

工作機械として、汎用立てフライス盤（2MW-V、日立ピアメカニクス製）を使用した。作業内容については、比較実験では、あらかじめ六面体加工された機械構造用炭素鋼を被削材として、エンドミル加工を行った。聴覚実験では、各種の切削条件で正面フライス加工（荒加工）を行い、切込みを1mm、3mm（安全教育における上限）、5mmとして、作業者の設定ミスや異常切削状態を想定した条件を意図的に与えた。

3.4 測定項目と評価方法

以下の各事項について、測定項目と評価方法を説

明する。なお、特に断りのない場合は比較実験の測定項目であるが、個々の実験目的や測定上の制約により、実験時の測定項目は適宜、選択した。

（1）感覚

感覚のうちの視覚について、被験者の視線を測定した。被験者はアイマークレコーダ（EMR-9、ナックイメージテクノロジー製）を頭部に装着し、被験者が作業中にどこを見ていたかを評価した。

聴覚実験では、騒音計（SL-1370、カスタム製）を使用して、作業中に被験者が耳で感じる切削音を定量化し、後述するアンケート結果と組み合わせて被験者の感性基準を評価した。

（2）自律神経系

被験者の心電図、皮膚コンダクタンスを測定した。NeXus-10 MarkII（キッセイコムテック製）による無線（Bluetooth）計測を使用し、被験者胸部には心電図用の電極2個を装着し、左手中指および薬指に皮膚コンダクタンス計測用の電極を装着した。

各測定項目から、次のことを評価した。心電図から心拍変動（心拍数の時間的変化）を算出し、心拍変動からLF/HFの時間変化を算出した。心拍数やLF/HFは交感神経活動の程度を表す指標であり、値が大きいくほど、交感神経活動が高い（精神的な緊張度が高い、身体の活動度が高い、など）と評価できる。皮膚コンダクタンスの値が大きく上昇すると、一過性の精神的動揺がおきていることがわかる。

（3）中枢神経系

被験者の前頭前野の脳血流量変化をHEGセンサ（NeXus-10接続用、キッセイコムテック製）によるHEG値として測定した。HEGセンサは1か所のセンサ部（LEDと受光部）を持ち、センサ部を被験者の額の左側に当てるように頭部に装着する。

HEG値は、被験者の大脳のうち前頭前野の脳賦活反応の指標と考えることができる。前頭前野では、感覚の情報や記憶などが統合されて、思考や検討、判断などが行われる。したがって、HEG値を用いることにより、思考、検討、判断などの脳活動がどの程度、活性化しているかを評価できる。

（4）身体動作

被験者が作業中、どのように動作したかを評価す

るために、MAC3Dsystem（ナックイメーグテクノロジー製）を用いてモーションキャプチャを行った。MAC3Dは赤外線方式で、被験者には作業着の上から反射マーカを関節部分などに装着し、マーカークの三次元座標から、三次元動作分析を行った。

(5) アンケート調査

これまで述べた (1)～(4) の事項は、すべて客観的なものである。しかし実験対象が人間の場合、客観的評価だけでなく、主観的評価も必要だ。

比較実験では、作業終了後に、作業中の感覚（視覚、嗅覚、聴覚、ハンドルの重さ感覚）に対する意識の度合い、緊張度、難易度、頭を働かせた作業内容などのアンケートを実施し、被験者の主観を評価した。

聴覚実験では、作業中の切削音に対する正常/異常の主観的判断に対する水準判断アンケートを実施し、被験者の感性基準を定量的に評価した。

4. 研究成果

4.1 フライス加工作業の3階層モデル

フライス加工作業を身体性認知科学で検討するために、ラスムッセンのモデルをもとにしたフライス加工作業の3階層モデルを作成した（図1）^{[8][10]}。

各階層の行動は、次のように解釈できる。技能レベルの低い中級者あるいは入門者や、熟練者であっても不慣れた作業を行う場合は、簡単な作業でも確認や判断、動作の計画を行うと考えられる。このような行動が、知識ベース行動である。一方、熟練者が慣れた作業を行う場合は、五感で感じた状況

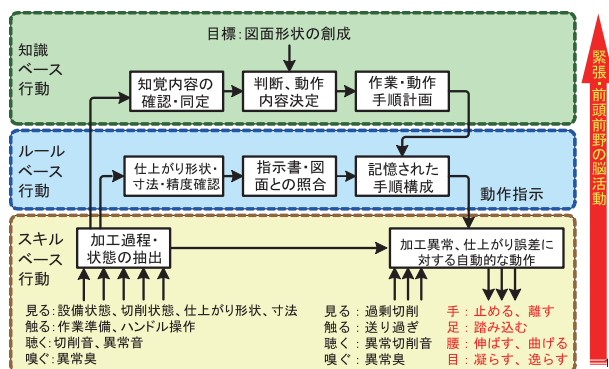


図1 フライス加工作業の3階層モデル^{[8][10]}

（環境）に対して条件反射的に適切な対応動作を行うと考えられる。これがスキルベース行動である。知識ベース行動とスキルベース行動の中間に位置するルールベース行動では、すでに記憶された行動の手順にしたがって行動する。

我々の3階層モデルの特徴は、神経系の活動傾向を追加したことである。行動の階層が知識ベース行動に向かうにしたがって、作業者はより多くのことを考え、確認・同定し、判断することになるため、自律神経系としての緊張度、中枢神経系としての前頭前野の脳活動が高まることを予想できる。この予想については、次で述べる比較実験の各種結果により評価する。

4.2 自律神経系の評価

図2は、中級者（左側）と熟練者（右側）について、

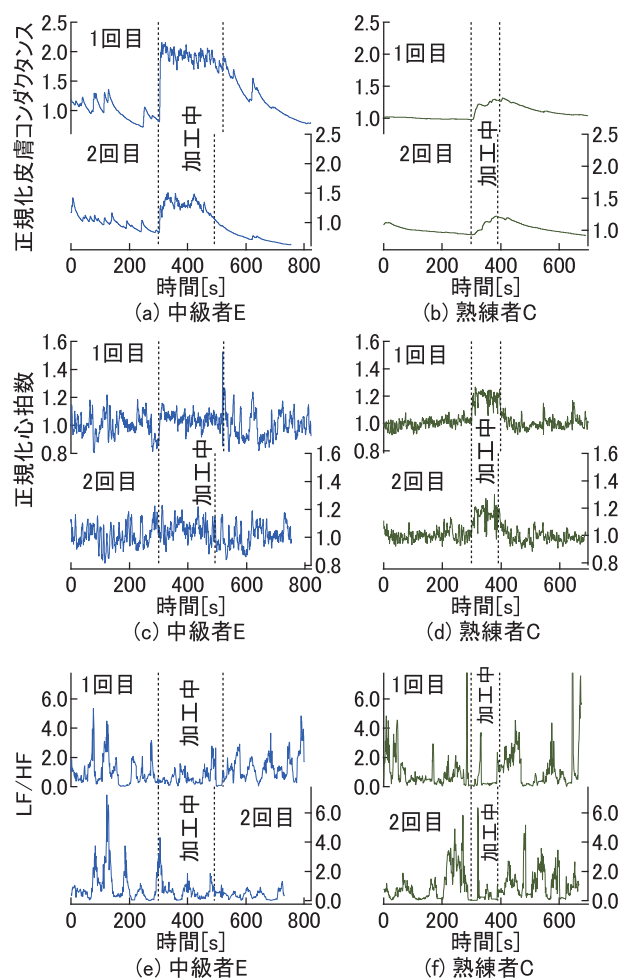


図2 自律神経系の測定結果例^[10]

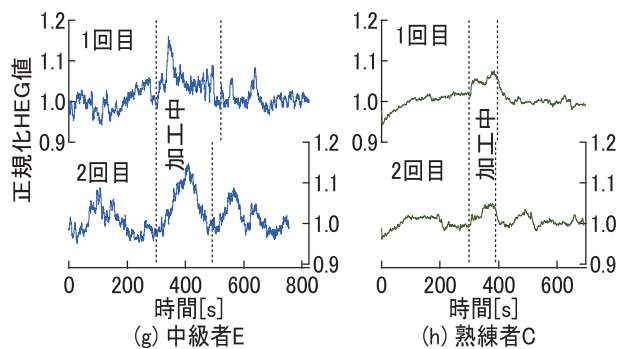


図3 中枢神経系の測定結果例^[10]

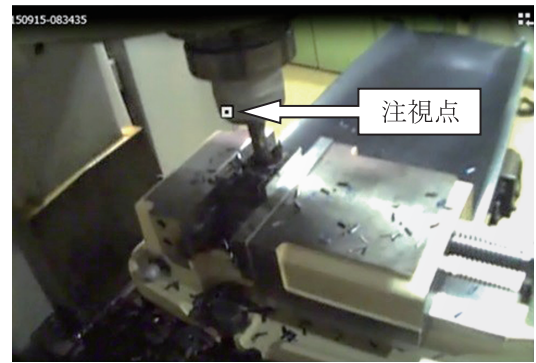


図5 アイマーカーレコーダ映像の一例



図4 自律神経系、中枢神経系の各種センサと無線計測・送信装置を腰部に装着した作業中の被験者の一例

各種の自律神経系の生体信号の時間変化の測定例である^[10]。加工作業を行った期間を点線で区切り、「加工中」と表示した。加工作業の前後各5分間は安静状態とした。同じ加工作業を2回（「1回目」、「2回目」と表示）、10分の間隔をおいて実施した。生体信号は、上から、皮膚コンダクタンス、心拍変動、LF/HFである。LF/HFを除き、作業前5分間の時間平均値で正規化した。

この例で中級者と熟練者を比較すると、加工中の皮膚コンダクタンスは中級者の方が変化が大きいことから、中級者は熟練者よりも作業中の精神的動揺・情動が大きいと考えることができる。加工中のLF/HFも中級者の変化の方が大きい。総合すると、中級者は熟練者よりも作業中の交感神経活動が高い傾向がみられた。

図2の測定と同時に行ったアンケート調査による主観評価では、中級者は「加工中に違和感があった」

のポイントが高く、熟練者は「作業を楽に感じた」のポイントが高かった。

以上の結果を図1の3階層モデルにあてはめると、熟練者はスキルベース行動寄り、中級者は知識ベース行動寄りで作業をしたと考えることができる。ただし、被験者数が少なく、統計学的有意差は示されなかった。

4.3 中枢神経系の評価

図3^[10]は、HEG値について図2と同様に示したものである。加工中のHEG値は中級者の方が熟練者よりも大きく、熟練者4名（職業大教員）、中級者5名のt検定では、有意水準10%で統計的有意差が示された。

この結果は、熟練者が中級者よりも加工中の前頭前野の脳血流量変化が小さく、3階層モデルにあてはめると、熟練者はスキルベース行動寄り、中級者は知識ベース行動寄りで作業したと考えられる。

作業内容の難易度をみると、熟練者3名（技能五輪経験者）の作業内容とHEG値をみたとき、荒加工時より中・仕上げ加工時の方がHEG値が大きい傾向があった。このことから、難易度が低い作業ほど、3階層モデルにおいてスキルベース行動寄りで作業している可能性が考えられる。

中枢神経系の測定は、自律神経系の測定と同時に行っている。図4は、各種センサを装着した作業中の被験者の様子である。センサ類からのコードの取り回しには、フライス作業の支障とならないように配慮した。



図6 3次元動作分析装置用のマーカー、およびアイマークレコーダを装着した被験者

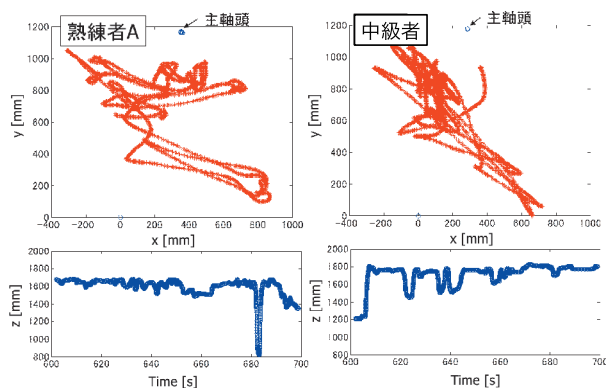


図7 仕上げ加工時の頭頂部の軌跡（一例）^[11]

4.4 視線の評価

図5(一例)のようなアイマークレコーダ映像から、熟練者3名（技能五輪経験者）と中級者1名で作業時の注視点を比較した^[11]。荒加工時は、技能レベルにかかわらず切削点を注視していて大きな差異は認められなかった。一方、仕上げ加工時のテーブル送り中では、中級者の注視点は切削点近傍にあったが、熟練者では、工具入り口では切削点近傍にあり、その後は作業台や測定器に移動し、注視範囲が広がる傾向がみられた。

これは、熟練者は仕上げ加工中に次の工程を意識していたことを示唆するものである。同時に、3階層モデルで考えると、仕上げ加工中は知識ベース行動寄りと考えられ、中枢神経系の評価とも矛盾しない。

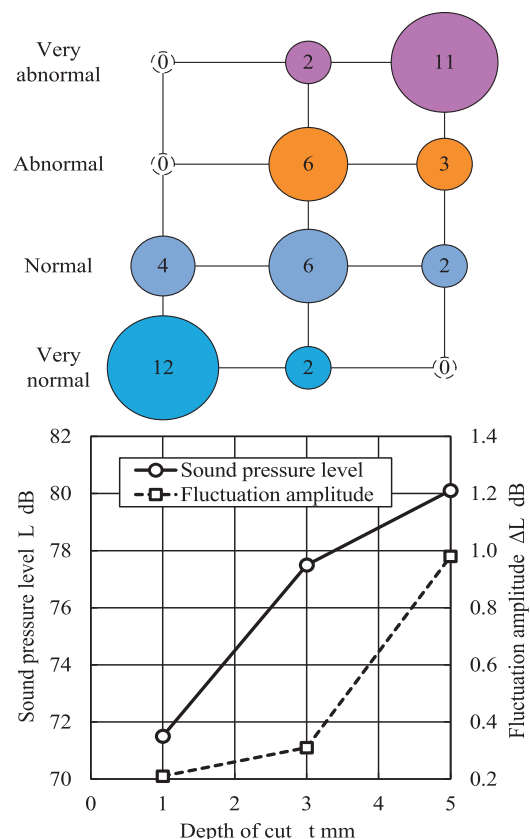


図8 聴覚実験の結果^[12]。上：切込み（Depth of cut）時の切削音に対する被験者の判断結果（円内数字は判断者数）。下：切込みに対する切削音の音圧レベル（左）と音圧変動振幅（右）。被験者は中級者16名。

4.5 身体動作の評価

図6は、モーションキャプチャにより身体動作を三次元で測定中の様子を示す。被験者の肩、肘、手首、腰、頭頂部、帽子のつばに見える小さな球状のものは、赤外線を反射するためのマーカーである。図7は、熟練者（技能五輪経験者）と中級者において、作業中の頭頂部の軌跡を解析した結果^[11]である。熟練者は中級者よりも移動量は小さかった。これは、熟練者の多くの経験が、作業に対する不安感を取り除き、作業効率を高める行動をとっていると推察できる。熟練者に無駄な動きがないとすれば、無駄な動きを生成するための動作手順計画が不要となり、熟練者はスキルベース行動寄りで作業したと推定できる。

なお身体動作の測定は、視線の測定と同時に行ったが、神経系の測定とは別に実施した。理由は、モーションキャプチャの赤外線ストロボが脳血流量計測

のHEGセンサと干渉するためである。

4.6 聴覚の評価

聴覚実験では、作業者の聴覚が加工異常をどのように聞き分けているのか、切削音に基づいて評価した^[12]。図8下をみると、切込み（Depth of cut）の増加とともに音圧レベル（Sound pressure level; L）も増加し、切込みが3mmから5mmになると、音圧変動の振幅（Fluctuation amplitude; ΔL ）が急激に上昇した。このとき、中級者の88%が「異常切削状態」と判断した。この中級者は、日常の訓練において最大切込みは3mmが上限であるとの安全教育を受けており、被験者の安全に対する、および加工状態の正常/異常に対する感性基準を定量評価できることを示唆した。

この実験における被験者は中級者のみだったため、熟練者との比較は実現できていない。しかし今後、フライス加工における聴覚の感性基準を示したことで、3階層モデルにおける、聴覚と自律神経系、中枢神経系との関係を議論できるようになることを期待できる。

5. おわりに

本研究を以下にまとめる。フライス加工中の被験者に対して多様な計測（自律神経系、中枢神経系、三次元動作分析、視線解析、聴覚解析、主観評価）を行い、中級者と熟練者を比較することにより、フライス加工の3階層モデルにおける3行動（スキルベース、ルールベース、知識ベース）と技能レベルとの関係を考察した。このような多様な計測と検証は、これまでの国内外の従来研究にはなく、本研究は、技能習得や技能伝承を考えるうえで、貴重な示唆を与えるものである。

最後に、本研究の問題点、および今後の展望について述べる。現時点において、被験者数が不十分である。統計的検証を行って技能習得過程を定量的に実証するためには、より多くの熟練者、中級者を被験者とする測定を重ねる必要がある。そのうえで、熟練者の暗黙知を形式知化し、初級者や中級者が熟

練者の域に達するための、より効率的な訓練技法の新たな開発を実現できることを期待したい。また、熟練者相互の違いを検証し、技能の“流儀”についても、定量的な検証を試みたい。

謝辞

本研究はJSPS科研費25289018の助成を受けたものです。ここに記して感謝します。

<参考文献>

- [1] 新村出編, 広辞苑 (第五版), 岩波書店, 1998.
- [2] 森和夫, 技術・技能伝承ハンドブック (初版第5刷), JIPM ソリューション, 2010.
- [3] 森和夫, 暗黙知の継承をどう進めるか, tokugikon, no.268, pp.43-49, 2013.
- [4] 森和夫, 森雅夫, 3時間でつくる技能伝承マニュアル, JIPM ソリューション, 2007.
- [5] J.Rasmussen, Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-13 (3), pp.257-266, 1983.
- [6] ラスムッセン (訳:海保博之, 加藤隆, 赤井真喜, 田辺文也), インタフェースの認知工学, 啓学出版, 1990.
- [7] ファイファー, シャイアー (監訳:石黒章夫, 小林宏, 細田耕), 知の創成—身体性認知科学への招待—, 共立出版, 2001.
- [8] 古川勇二, 他, 身体性認知科学に基づくフライス加工技能の修得・伝承モデルの構築—第1報 全体構想と予測される効果, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1041-1042, 2014.
- [9] 雇用・能力開発機構の廃止について, 平成20年12月24日閣議決定, 2008.
- [10] 不破輝彦, 他, 身体性認知科学に基づくフライス加工技能のユーザモデルと生体計測との関係, ヒューマンインタフェースシンポジウム2015 DVD-ROM論文集, pp.821-824, 2015.
- [11] 池田知純, 他, 身体性認知科学に基づくフライス加工技能の修得・伝承モデルの構築—第3報 身体動作と視線動向の計測, 2016年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.571-572, 2016.
- [12] M.Okabe, T.Tomiya, K.Yoshiura, M.Nakamura, Evaluation of sensibility criteria of milling workers for assessing normal or abnormal operating state based on cutting sound. Proceedings of the 2014 International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies, 112, 2014.