調査研究報告

切断加工における作業者特性のデジタル化

山形大学　近藤　康雄

1．はじめに

近年の産業のグローバル化および急速な少子高齢化により，世界中のどこでも同じ品質を同じタイミングで実現することが求められている[1)]。こうした産業の潮流変化の中で，限られた時間・コスト・労力での人材育成や，技能の機械化・自動化による品質向上のために，“巧みな技”を定量的・客観的に記述することが強く求められている[2)]。ここで，“巧みな技”とは，訓練によって身体が覚えた高度な技能であり，高度熟練技能あるいは身体知などとも呼ばれている。

これを受け，多くの生産現場では熟練作業者の技術や技能の継承に関するさまざまな取り組みを行っているが，大多数は派遣社員の採用や再雇用などの一過性的な対応にとどまっている。分かりやすく言えば，熟練者の作業をビデオで撮影し，動画情報として残すなどの対応が講じられているが，利用方法などの検討が不十分なため，熟練技能を継承するどころか単なる作業風景としての映像として社内に保管される状況に陥っていることが多い。また，教育体系や技能・技術に関する豊富な情報を保有する場合でも，継承に必要な技術・技能を若手に伝えるための方法に悩んでおり，多くの生産現場で，熟練技能の継承や共有化のための環境整備や対応が不十分な状況である[3)]。

筆者らは，人間の動作そのものは対象とせず，道具や工具に作用した力の計測から作業者の特性を“見える化”する方法について研究を進め，本技法が技能習得に及ぼす効果について検討を行っている。本稿では，これまでに得られた成果の概要を述べる。

2．技能・技術継承について

技術や技能の継承には大きく二つの方向性があるとされる。一つ目が，自動化や標準化などに代表される比較的定量化や形式知化が簡単な「技術継承」で，二つ目が，熟練工の固有ノウハウである「技」を継承する「技能継承」である。技能継承はさらに，IE（Industrial Engineering）などの科学的アプローチによって「技術継承」のカテゴリーに落とし込めるものと，人間が状況に応じて判断を行いながら作業を行うしかない「技能継承」に分けることができ，前者と後者の割合は７：３または８：２といわれ，多くの生産現場で対応に苦慮しているのが，後者の形式知化が難しい「技能継承」である[3)]。

技能の習得では，「技は見て盗む」といわれるように熟練者の所作や道具・機械を使う動作を直接観察することが重要とされてきた。従って，技能継承においても，直接観察ができる身体部位と道具や機械との関係に関する測定が行われ，動画教材をはじめ，測定部位の３次元位置，加速度，角速度などの解析が行われている[4) 5)]。また，工作技能では熟練工の道具や機械の操作が，製品の精度や品質に直接影響するため，道具や機械の動きを計測することも行われているが[6) 7) 8)]，技能習得を目的とする場合

には，加工中の道具や機械の状態が理想状態となるように作業者の動作を修正していくことが前提となっている。

いずれの技能継承においても，継承者に必要な熟練技能を継承するには，継承すべき技術や技能の特定と，熟練者がどのような時にどのような判断で，どのような行動をしたのかを継承者が正確に把握できることが重要となる。多くの場合，継承すべき技術や技能の洗い出しはできているが，継承ポイントの特定と継承方法の検討が不十分なため，結果として使われない動画や熟練技能に関する情報が薄い作業標準が氾濫した状況となっている。

筆者らは，道具や工具を使う手作業では，実際にモノの切断や溶接を行っているのは道具や工具のアクション（行為）で，身体の動きは道具や工具を正しく動作させる機械の役割を果たしていることを前提とした「技能継承」法について検討を進めている[9]。これは，道具や工具を使う手作業の結果の良否は，作業中の身体の外形的な動きではなく，道具や工具の動きに依存することを基に考案したものである。

このように，人間の動作そのものを対象とせず，道具や工具に作用した力の計測によって技能習得がスピードアップできれば，個人差や個人内変動が激しい身体の動きをモデル化する必要がなく，継承すべき技能の客観的かつ定量的な取り扱いが容易となり，熟練者がどのような時にどのような判断で，どのような行動をしたのかが追跡しやすくなる。また，IoTを活用した技能継承システムへの貢献も期待できる。

3．研究対象と問題意識

3.1　対象とする手作業

本研究では丸鋸盤による角パイプの切断作業を取り上げ，ヒトが丸鋸盤に作用した結果，工具である丸鋸に加えられた力の変化をデジタルデータとして取り出すことで，作業者の特性を見える化することを試みた。次に，手本となるデジタルデータと初心者のデータを比較することが技能習得に与える効果を検証するとともに，訓練対象とする技能を習得するうえで重要と考えられる要素技能の事前訓練が技能習得に与える効果についても検討を行った。さらには，２工程以上に分けて作業を行うことを指示した場合に生じる検討課題の抽出を行った。

丸鋸の切断能力は非常に高く，直線のカットを効率的に行うことができる。電動丸鋸は，高速回転する鋸刃は切りくずの排出性が高く，ハイペースで切断でき，熟練工が作業するときれいな平面を持つ切り口が得られるが，切断する材料の送り方が不適切であると，切り口が荒れたり，直線ではなくジグザグの切断線となりやすい[10]。

一般に，熟練技能を継承可能な形にするには，第一に技能の数値化・機械化を試み，それがかなわない部分について熟練技能の定量的・客観的表現を試みるのが自然なアプローチといえる。市販の丸鋸盤では，金属や木材を手送りすることで切断を行うため，切断線が直線（真っすぐ）かつ切断面にバリや荒れがないように切断するには，少なくとも材料を送る方向と掛ける力の二つのことを意識して作業する必要がある。“材料を真っすぐに送る”という意識と“切断面にバリ等が発生しないように力の掛け方を調整する”という意識は互いに影響を及ぼし合うと考えられ，力の掛け方だけを分析するには，“真っすぐ送る”ことを意識しなくとも切断が行える状況をつくる必要がある。そこで本研究では，図１に示すように，誰がどのように材料を送っても切

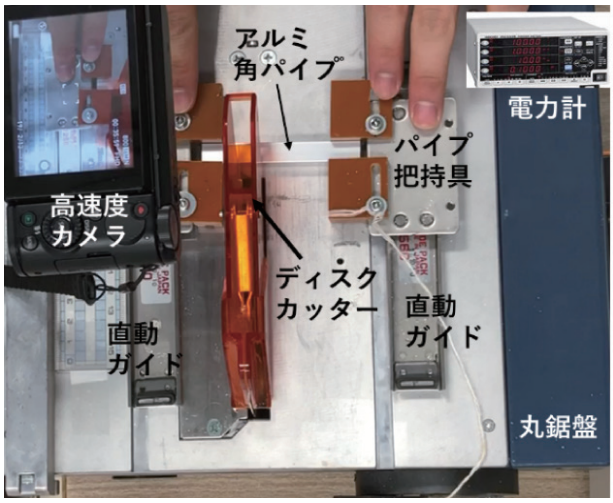

図１　丸鋸の概略構成

断線が真っすぐとなるように，角パイプの把持具を装着した直動ガイドを丸鋸盤に敷設し，直動ガイド上に固定した角パイプを手動送りで丸鋸切断する作業を研究対象とした。すなわち，角パイプの把持具を装着した直動ガイドという器具を導入することで，作業者が“材料を真っすぐに送る”という技能を機械化したことになる。

3.2　実験および力の計測原理

丸鋸盤として，小さな金属，プラスチック，木材等を切断するための卓上丸鋸盤（ホーザンK-210）を使用した。本丸鋸盤により，１辺が10㎜，肉厚が１㎜の正方形断面を有するアルミ角パイプを手送りし，直径85㎜，刃厚1.6㎜，山数30，回転数3500pmの超硬金属製ディスクカッターを用いて切断作業を行った。丸鋸盤においてディスクカッターは電気モータによって駆動されるが，駆動時に消費された電力（消費電力）はディスクカッターを回転させるために必要となる動力（トルク）に比例する[11),12),13)]。ディスクカッターに大きな力が加えられると消費電力は大きくなり，小さな力が加えられたときには消費電力も小さくなる。本研究では，ディスクカッターに作用する力と消費電力の間に線形関係があることを利用して，作業者の力の掛け方の変化を見える化した。具体的には，切断作業中のディスクカッター駆動用モータによる消費電力を0.2秒間隔で測定し，測定データはパソコンに伝送され，作業の経過時間と消費電力の関係が自動的にディスプレーされる。また，取得したデータはインターネットを介してクラウド上に揚げることも可能で，昨今注目されているIoTモニタリングに対応可能なシステム構成にもなっている[12)]。

3.3　作業内容

丸鋸切断作業における力の掛け方のデジタルデータ化が技能習得に及ぼす効果を検討するために，次の三つの作業を設定した。

ア．作業１

機械加工が未熟の20歳代の男子学生９名を作業者とし，１人につき６回の切断作業を行うこととした。作業１の要領を表１に示す。１回目の作業では，作業者に自由に切断作業を行わせ，作業時間と消費電力の関係を記録する。アドバイザーは，得られた消費電力変化を手本データと比較し，手本と異なる部分を作業者に口頭で伝える。このとき，作業者には消費電力変化の関係を示したグラフの提示は行わず，口頭で改善点だけを指示した後，２回目および３回目の切断作業を実施してもらう。３回目の切断作業終了後に，１回目から３回目までの切断作業における消費電力変化と手本データを比較したグラフを作業者に提示し，１回目の作業終了後と同様の方法で指示を与え４回目の切断作業を行ってもらう。５回目および６回目の切断作業は，それぞれ４回目および５回目の電力変化を作業者に提示した後に実施してもらった。

表１　作業１の実施手順

① 被験者：機械加工未経験者9名

② 作業内容

作業回数	１回目	２回目	３回目	４回目	５回目	６回目
指示	自由に切断	各回の電力データを基にアドバイザーが口頭で改善点を指示		各回作業の電力データを手本データとともに作業者に見せながらアドバイザーが改善点を口頭で指示		
アドバイザーの口頭指示	×	○	○	○	○	○
電力データの閲覧	×	×	×	○	○	○

力の掛け方を提示しないで口頭で改善点を指導する1～3回目の技能向上と力の掛け方を手本データと比較して提示しながら改善点を指示する4～6回目の技能向上を実験的に比較

イ．作業２

本研究では，切断作用における作業者の力の掛け方に注目しているが，多くの場合，作業者は自分が掛けている力の大きさを数値としては把握していない。このため，技能の習得過程において「もう少し小さな（大きな）力で」といった指示を受けても，感覚的にどの程度力を小さくまたは大きくすればよいかが分からず，結果的に適切な技能修正が達成されないことも多い。そこで，作業１に取り掛かる前の事前訓練として，作業者の感覚的な力加減と実際に掛かっている力の関係を認識するための荷重電力表の作成作業を実施した。荷重電力表とは，図２に示すように，作業者の感覚としての弱・中・強を横軸として，縦軸には，それぞれの力加減で切断を行った時にディスクカッターに作用している力の大

きさを消費電力量で表示したものである。荷重電力表の作成作業を通じて，作業者は自身が掛けている力の大きさを感覚的ではなく定量的に把握できることになる。

作業２の要領を表２に示す。機械加工が未熟の20歳代の８名の男子学生を，荷重電力表の作成作業を行う事前訓練を実施するグループ４名と実施しないグループ４名に分けて実施した。両グループのメンバーに対し，１回目は自由に切断作業を行わせ，作業時間と消費電力の関係を記録する。２回目以降は，前回の切断における消費電力変化を手本データと比較した図を作業者に見せ，改善点を指示した後に切断を行い，良好な切断面が２回得られるまで作業を繰り返した。

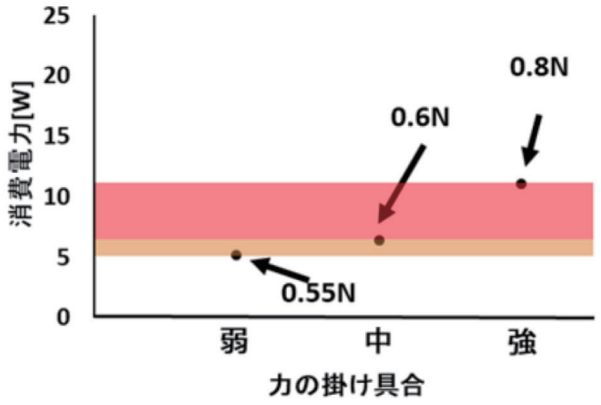

図２　荷重電力表

表２　作業２の実施手順

①被験者：機械加工未経験者8名

②グループ分け

グループ1：荷重電力表を作成せずに切断作業を行う被験者4名

グループ2：荷重電力表を作成した後に切断作業を行う被験者4名

③作業手順

グループ	1	2
荷重電力表の作成	しない	する
1回目	自由	
2回目以降	被験者と手本データを比較し指導	

良好な切断面が2回得られた時点で作業終了

→グループ1,2を比較し、荷重電力表の作成が技能向上に与える効果を検証

ウ．作業３

作業１および作業２は，切り始めから切り終わりまでを一定の力を掛けて切断する１工程作業といえるが，現実の作業では複数の工程を経て完結するのが一般的である。そこで，切り始め部とバルク部で掛ける力の大きさを変え，切断作業を２工程で行うことを考えた。作業２を経験した男子学生４名に対し，作業者ごとに荷重電力表を作成する事前訓練を行った後に，図３に示す手本データを提示し試し切りを行ってもらう。その後は作業者のデータと手本データを比較した図を作業者に見せ，改善点を指示しながら１人当たり３回切断作業を実施してもらった。

作業１～３で得られた作業データから，手本となるデジタルデータと初心者のデータを比較することが技能習得に与える効果および訓練対象とする技能における要素技能の事前訓練が技能習得に与える効果を検討するとともに，２工程以上に分けて作業を行うことを指示した場合に生じる検討課題の抽出を行った。

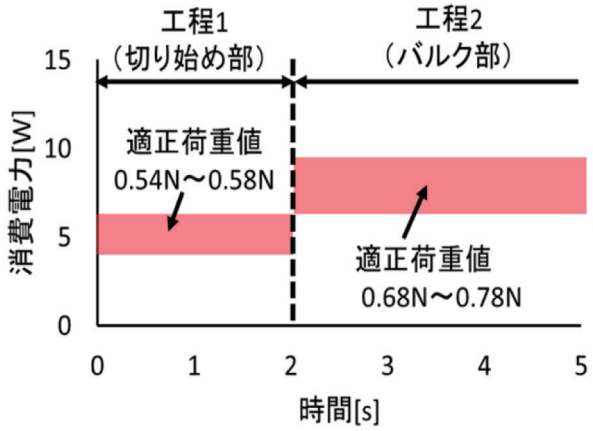

図３　作業３における手本データ

4. 結果および考察

4.1　手本データとの比較が技能習得に与える効果

本研究において，熟練技能者による切断データとして位置付けた手本データは，角パイプに一定荷重を負荷することで材料送りを実現する定負荷送り切断を行って得たデータである。データの取得方法および意義は前報[9]で述べた通りで，熟練技能が個人差や個人内変動といった多様性を含んだものであることを反映して手本データは複数存在する。作業１

における典型的な技能の習得過程を図４に示す。詳細については前報を参照していただきたいが[9]，口頭で改善点を指示された後の３回目の消費電力変化を１回目のデータと比較してみると，口頭での指示だけでは掛ける力の大きさを調整しきれていないことが多い。一方，第６回のデータを第３回目のデータの比較から，手本データと比較して切断時の消費電力変化を見せながら改善点の指示を行うと，２～３回の作業の繰り返しで掛けている力は手本データのレベルに収束し，切断に要する時間も自然に手本データのレベルとなることが分かる。また，得られる切断面にも明らかな欠陥は認められなくなり，手本となるデータと作業者自身のデータの比較を見える化することで，どの点をどのように変えればよいかという修正点と修正の方向が明確となるため，技能習得に要する時間の短縮が可能となる。また，消費電力の時間変化から作業中に無意識に現れる細かな癖を発見することも可能となるが，作業１の訓練だけでは個々の作業者が持つ細かな癖を修正するまでには至らないことも確認してる。

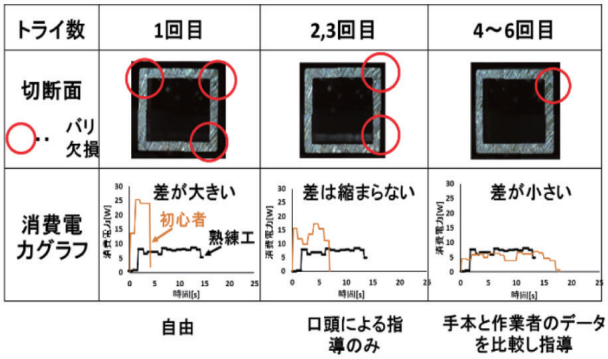

図４　作業１における技能の習得過程

4.2　要素技能の事前訓練が技能習得に与える効果

作業者の感覚的な力加減と実際に掛かっている力の関係を認識するために作成された荷重電力表の例を図５に示す。弱く，強く，その中間の力の順で掛けて切断作業を行ってもらった結果を整理したものである。ダイヤルやデジタル設定の機械では，誰が操作しても弱・中・強で同じ出力となるが，人間が感覚的に力の調整を行うと，弱と強の差は作業者ごとにバラバラで，中間の力は弱と強の平均に近い値ではなく弱側に偏る傾向が見られた。

図６は，事前訓練実施の有無による技能習得過程の相違を示したものである。作業１と同じ内容の作業を繰り返し実施したときの消費電力変化の推移をまとめたもので，ハッチングした範囲が手本データの電力範囲となっている。事前訓練を行っていない場合，自由に切断作業を行う１回目の切断では，消費電力（掛ける力の大きさ）を手本データの範囲内に維持することが難しく，手本データと自身のデータを比較した図を見せられた後の２回目の切断作業においても消費電力値を手本の範囲内に維持することは難しい状態であった。事前訓練を行ったグループでは，１回目の切断作業から消費電力値は手本データの範囲内に収まる傾向が強くなり，手本データと自身のデータを比較した図を見せられた後の２回目以降の切断作業では，消費電力値が手本の範囲外に外れるケースはほぼなくなった。図７は，各回の切断作業において，消費電力の計測値が手本データの範囲内に収まった割合（一致率）を事前訓練の有無で分けて表示したものである。一致率が100％は，すべての測定値が手本データの範囲内であったことを意味し，作業者は意図通りの力を掛け続けて切断作業を終了したことになる。

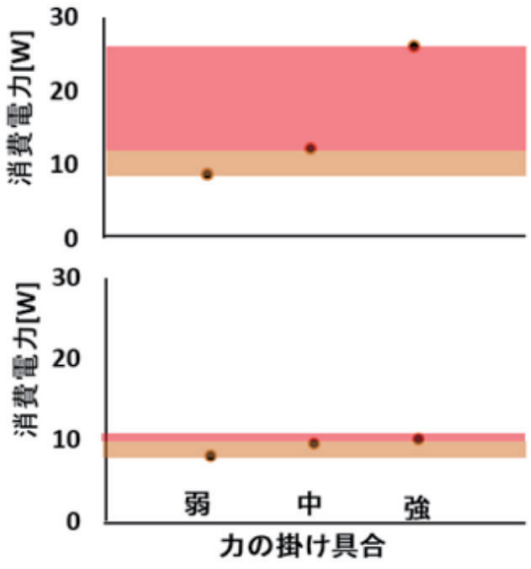

図５　作業２で得られた荷重電力表の例

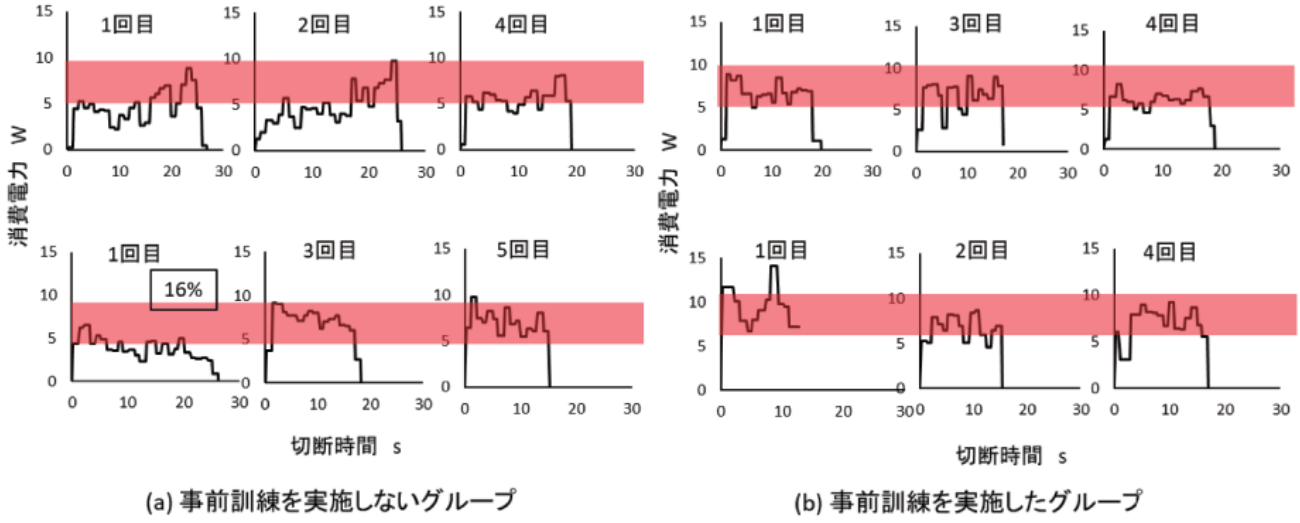

図６　事前訓練実施の有無による技能習得過程の相違

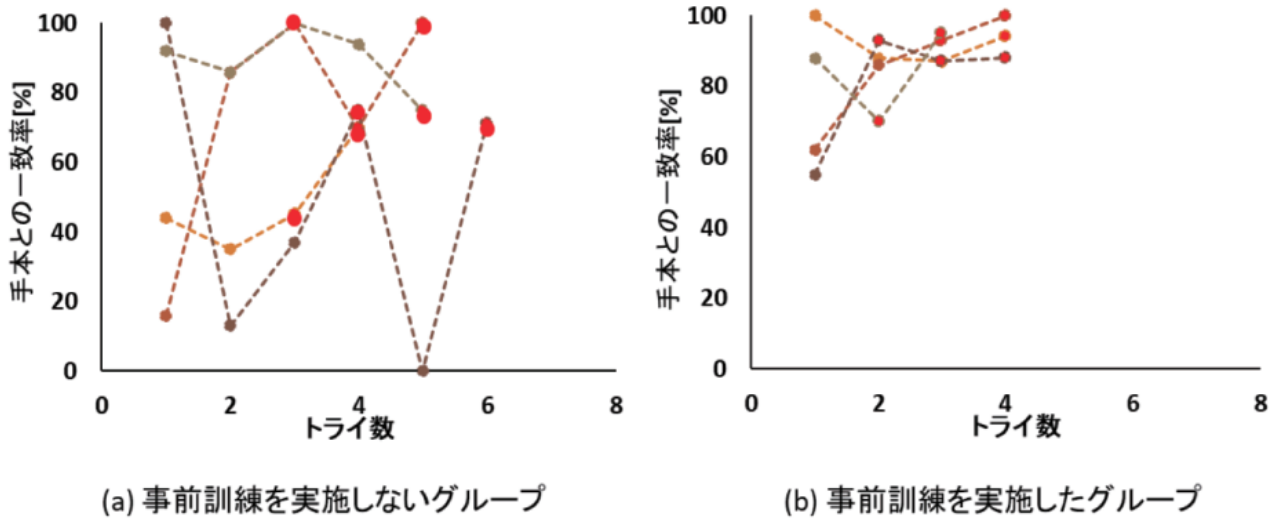

図７　事前訓練実施の有無が手本データとの一致率に及ぼす効果

事前訓練を行わない場合，切断回数に対する一致率の変化が作業者間で大きく異なるうえに，同じ作業者でも切断回数ごとに一致率が大きく変化している。すなわち，作業の結果に個人差や個人内変動が顕著に現れている。一方，事前訓練を行ったグループでは，２回目以降の切断作業では全員が100％近くの一致率を示し，作業の結果に個人差や個人内変動が現れにくくなっている。また，図８に示すように，良好な切断面が２回得られるまでの作業の繰り返し回数も，事前訓練を行うことで大きく減らすことができる。

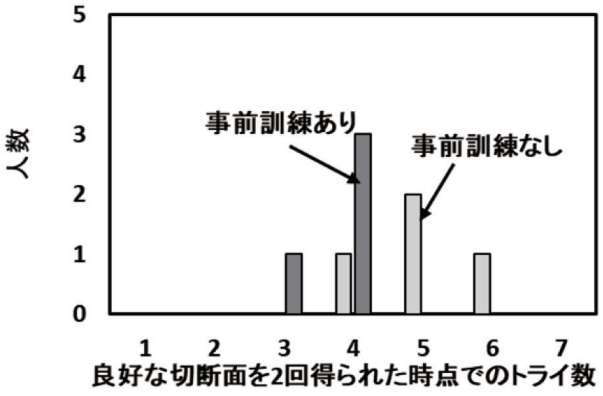

図８　良好な切断面を２回得られるまでのトライ数

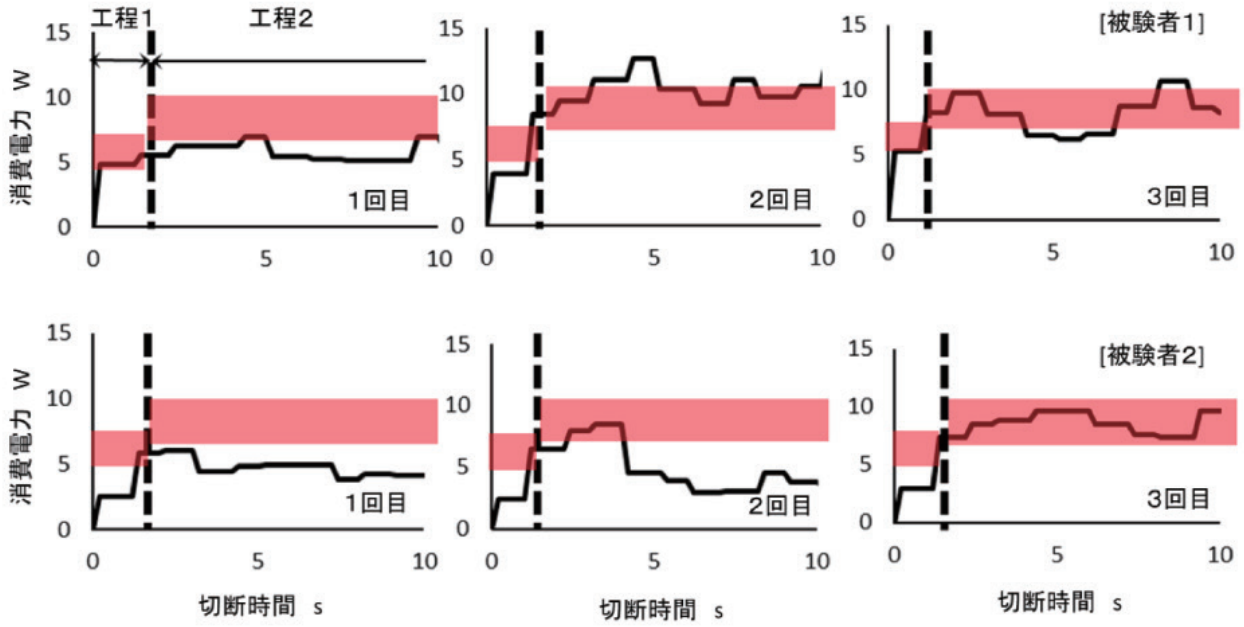

図９　２工程で切断作業を行ったときの代位表的な消費電力変化

一般に，技能継承を難しくする大きな要因に個人差や個人内変動が挙げられるが[14]，人間の動作を基にモデルを構築すると，経験の有無による動作の違いが大きく表れるため簡単にはモデル化ができない。ところが，本研究のように人間の動作そのものを対象とせず，道具や工具に作用した力の計測によって作業をモデル化すると，個人差や個人内変動の影響を受けにくいモデルが得られ，継承すべき技能の客観的かつ定量的な取り扱いが容易となる。

4.3　２工程以上で作業を行う場合の検討課題

切り始め部とバルク部で掛ける力の大きさを変え，切断作業を２工程で行ったときの代表的な消費電力変化を図９に示す。ハッチングした範囲が手本データの電力範囲となっている。本切断作業は，作業２を経験した作業者が実施したにもかかわらず，工程１および工程２の両工程において消費電力を手本データの範囲に収められたケースは一度もなかった。一方，多くの作業では，切り始め部またはバルク部のどちらかの力を手本データに合わすことはできており，難しいのは，各工程における力加減の調整ではなく，工程の切り替えに合わせて力加減を変化させるところにある。実際，作業に協力いただいた学生からは，“作業の途中で力の大きさを変えなければいけない”ということに意識が集中し，力の調整がうまくいかなかったという趣旨のコメントを多くいただいた。

このことは，多くの作業標準にあるように，手順１：電力値が○○W程度となるように力加減を調整し1.5 mm 角パイプを送る，手順２：電力値が△△W程度になるように掛ける力を大きくし，残りの部分の切断を行うといった，作業工程を何工程かに分け，各工程におけるノウハウを書き下した作業手順書では技能の継承が難しいことを物語っている。技能継承のための作業手順とするには，手順１と手順２の間に，手順１．５：角パイプを1.5 mm切断した段階で一度切断作業に小休止を入れて軽く深呼吸し，手順２の作業を行うための心の準備を行うというような，熟練者の中にある属人的な行為をexplicit（生々しい描写）に表現した手順を書き足す必要がある。こうした“生々しい描写”は，工程と工程の間だけではなく，各工程の中でも必要となると考えられる。このことは，本研究で提案する技法をより洗練させるには，道具や工具に作用した力の計測と同時に，心拍数等によって作業者が作業から受ける負担感（主観的次元）[14] の変化も計測し，負担感を最小にしつつ良好な作業結果が得られるよう作業をモデル化する必要があることを示唆する。

5. おわりに

丸鋸盤切断において，作業者が丸鋸に加えた力の変化をデジタル化し，作業者の特性を見える化することが技能習得に及ぼす効果を実証的に検証した。手本となるデータと初心者のデータを比較したものを作業者に提示しながら修正点等を指示することで，技能習得のスピードアップが図れることが明らかとなった。また，訓練対象とする技能を習得するうえで重要と考えられる要素技能の事前訓練を行うと，技能習得のさらなるスピードアップが図れるだけでなく，作業結果に個人差や個人内変動が現れにくくなることが実証された。

一方，切り始め部とバルク部で掛ける力の大きさを変え，切断作業を２工程で行った場合には，工程１および工程２の両工程において掛ける力の大きさを手本データの範囲に収められたケースは一度もなかった。これは，“作業の途中で力の大きさを変えなければいけない”ということに意識が集中し過ぎて生じた現象で，これを解決するには，工程と工程をつなぐ段階で熟練者が暗黙のうちに行っている深呼吸等の属人的な行為もexplicit（生々しい描写）に表現していくことが重要となる。今後は，道具や工具に作用した力の計測と同時に，心拍数等によって作業者が作業から受ける負担感の変化も計測し，負担感を最小にしつつ良好な作業結果が得られるように作業工程を分割したうえで作業をモデル化していく必要がある。

＜参考文献＞

1）内閣府：第５期科学技術基本計画，https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html，（2016）．
2）上田洋一郎：産業用ロボット業界の現状と展望～業界構造変化を踏まえた日系ロボットメーカーの戦略方向性～，Mizuho Industry Focus, 150, 1-22，（2014）．
3）野中帝二，安部純一，白石一洋：技術・技能伝承への取組み，FRIコンサルティング最前線，1, 138-143，（2008）．
4）紅林秀治，小林健太，高山大輝，江口　啓，兼宗　進：KINECTセンサーを用いた簡易動作分析システムの開発，日本産業技術教育学会誌，55-3, 213-220，（2013）．
5）武雄　靖，夏　恒：普通旋盤加工の送り停止時における工具摩耗と加工面うねりにおよぼす作業者の技能習熟度の影響に関する研究，砥粒加工学会誌，57-9，30-35，（2013）．
6）福田収一，丹羽竜介：けさぎ作業の遠隔技能伝承システムの構築，日本機械学会論文集（C編）,72-716, 271-276，（2006）．
7）松浦慶総，高田　一：溶接技能教育における情報構造化手法の提案，第29回人工知能学会全国大会，（2015）．
8）綿貫啓一，小島一恭：没入型VRシステムによる鋳造方案の教育支援，日本機械学会論文集（C編），73-725, 44-54，（2007）．
9）近藤康雄：工作技能の継承に向けたノウハウのデジタル化，技術と技能，54-298, 16-22，（2019）．
10）中村源一：丸鋸切断における切削トルクと送り力についての二，三の実験，木材学会誌，15, 1-5，（1969）．
11）Kondo, Y., Higashimoto, Y., Sakamoto, S., Fujita, T. & Yamaguchi, K. : Feature Extraction from Sensor Data Streams for Optimizing Grinding Condition, Materials Science and Engineering, 229, 1-6，（2017）．
12）Kondo,Y., Mizunoya,S., Sakamoto,S., Yamaguchi, K., Fujita, T., & Yamaguchi, M. : A Utilization Method of Big Sensor Data to Detect Tool Anomaly in Machining Process, Key Engineering Materials, 719, 122-126，（2016）．
13）Kondo, Y., Yamaguchi, M. & Sakamoto, S. : A Big Data Analysis Technology for Catching Usual/unusual State of Cutting Tool, Proc. of 3rd IC3MT, CD-ROM，（2018）．
14）加藤象二郎：メンタルワークロードの個人差について，人間工学, 29-6, 365-368，（1993）．