

# ウェアラブルデバイスを活用した 作業の難易度評価

山形大学 近藤 康雄

## 1. はじめに

モノづくり作業の技能を習得する方法として反復練習が薦められているが、技能は無形物のため標準化が難しく、習得に長い時間がかかるだけでなく、習得前に挫折する人も少なくない。このため、技能習得の過程を科学的に分析し“見える化”する試みが続けられている<sup>(1)</sup>。

しかし、①技能のような身体知を数理モデルで表現することが困難で、作業者の試行錯誤によってのみ習得が可能となること、②習得に個人差が強く影響するため、最善の方法を一意的に決定できず、特定の被験者による結果を直ちに一般化できないこと、③身体知の全体の体系化や、個別技能の客観的かつ定量的な取り扱いができないため、継承利用が難しいこと、という障壁があり、技能の定量的・客観的表現は難題中の難題といえる<sup>(2)</sup>。

技能継承における個人差や個人内変動といった多様性を含んだ形での作業のモデル化は最重要課題の一つとなっている。これまで、個人差や個人内の変動を考慮した作業のモデル化に関しては、経験の有無による巧拙の違いを比較する研究<sup>(3)</sup>、作業の繰り返しと習熟に関する研究<sup>(4)</sup>、習熟とともに疲労を考慮した研究<sup>(5)</sup>等、多くの研究が行われ、技能を定量的・客観的に表現する努力が続けられている。筆者らは、道具や工具を使う手作業では、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と仮定し、道具や工具の動作状態をデジタル表現することで作業者の欠点やクセを見つけ出し、

技能習得の効率を上げることを試みている<sup>(6),(7)</sup>。これらの研究では、アルミパイプの丸のこ切断における作業者の力のかけ方をデジタル表現し、お手本データと比較することで個々の作業者特性の“見える化”を試みている。本技法を活用することで技能習得が促進できることは間違いないが、作業内容が複雑になると効果が現れにくくなる。これは、複雑な作業では、作業者の技能レベル以前に作業内容を正しく認知しているかが作業の結果に大きな影響を与えるためと考えられる、すなわち、身体動作をスムーズに行うには、作業内容や手順をあらかじめ脳が認識している必要があり、技能習得の過程を“見える化”するには、身体的動作と人の内面的な働きを総合的に評価する必要があることを物語っている<sup>(8)</sup>。

一般に、知覚・神経系にかかわる動きは、作業の熟練度合いや作業ミスと強く関係するとされ、脳血流、脳波、心拍などの生理的指標の測定によって“見える化”することが試みられている。なかでも心拍は計測が容易で分かりやすい指標であることから、身体動作との関連を調べた報告も多数ある<sup>(9)</sup>。本研究では、近年急速な進歩を見せている「ウェアラブルデバイス」を活用した瞬時心拍計測を技能習得に生かすことを考えた。簡単な事務的作業およびボール盤による穴加工を行ったときの瞬時心拍を測定し、作業者が感じる作業の難易度と瞬時心拍変化の関係について実験的に調べた。また、ウェアラブルデバイスで測定された心拍変化をどのように処理加工すれば、技能の習得速度を上げることにつながるかについても検討した。ここでウェアラブルデバイスとは、特に身体の活動情報を活用する目的で開発

された、いわゆる“フィットネス用リストバンド”を指し、機種によって異なるが、心拍、血圧、呼吸数などを1秒程度の間隔で測定できるものが多い。

## 2. ウエアラブルデバイス

本研究では、Garmin社製vivosmart4をウェアラブルデバイスとして用いた。本デバイスは、赤外光を用いて血管内の血流変化（脈波）を計測し心拍タイミングを検出するセンサーで、瞬時心拍を1秒間隔で測定できる。この方式は光電式容積脈波記録法（photoplethysmography-PPG）と呼ばれ、皮膚上であればどこからでも脈波を取得可能である。PPGセンサーで検出される心拍タイミングは、医療分野で広く利用される心電図上のR波タイミングとは微妙なずれを持ち、心電図と同じような高精度の心拍変動（HRV）測定は保証できない<sup>(10)</sup>。他方、ウェアラブルデバイスは腕時計と同じ構造を持つことが多く、胸部や頭部等に電極を装着する必要がないため侵襲性が小さく、作業者の意識や感覚をストレートに反映した心拍変化が得られることが期待できる<sup>(11)</sup>。また、ウェアラブルデバイスは1～数万円程度のものがほとんどで、かつ、特別な知識がなくともスマートフォンとの通信アプリを利用することで簡単に計測結果をビジュアル化できることから、あらゆる現場で簡単に導入することができる。ウェアラブルデバイスによる心拍変化の計測データの例を図1に示す。

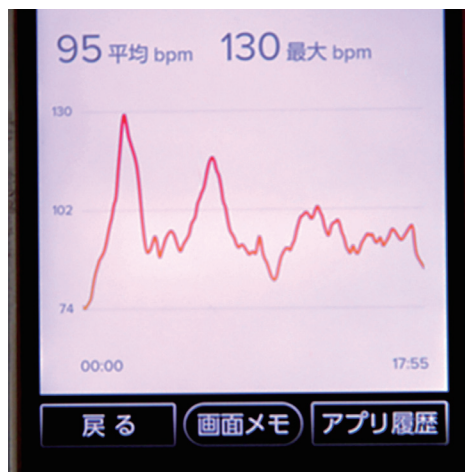


図1 瞬時心拍の計測例

## 3. 方法

### 3.1 実験体系

本研究の目的は、個々の作業者が感じている作業の難易度を、PGPセンサーによる心拍計測結果から読み取る方法を見出すことにある。そのため、日常会話、作業指示書の黙読およびボール盤による穴加工といった内容が大きく異なる作業をいくつか用意し、各作業者による作業難易度の自己評価と心拍の変動の関連付けを試みた。次に、心拍変動の計測結果をどのように活用すると技能の習得速度が高まるかについて定性的な検討を行った。一般に心拍の変動は自律神経活動に反映する生体现象である心理的な思い込みが生みだす効果（プラシーボ効果）の影響を受けず、心身の健康状態の良しあしの測定指標として広く利用されている。瞬時心拍は心身の健康状態によって柔軟に変動するのが良いとされ、変動が小さいと状態がよくない、すなわちストレスがかかっている状態とされる<sup>(10)</sup>。

### 3.2 被験者

事務的作業を含め、ボール盤による穴加工を行う被験者は20歳代の男子4名とした。これらの被験者は、ボール盤による穴加工の経験はあるが、技能訓練などは受けていない。

### 3.3 作業内容

本研究では、各被験者に次の流れで作業を行ってもらった。

- A. 簡単な会話
- B. 作業指示書を読み、実験の流れを理解する
- C. ボール盤の使用に慣れる目的で木材に穴加工を行う
- D. アルミ板に3個の穴を続けてあける
- E. アルミ板の所定の位置に、バリ生成が起これないように3個の穴を続けてあける
- F. 各作業の難易度の自己評価（5段階評価）および感想をヒアリング調査

A～Fの作業は、大きく3つのパートに分けるこ

とができる。AおよびBの作業は、作業者にCからEの作業内容を正しく認知してもらうためのもので、身体的動作を伴わないものである。CからEの作業は、あらかじめ脳で認識した作業を具体的に実行してもらう身体的動作を伴う技能作業である。作業Cは、ボール盤の使用に慣れるために行うもので、加工穴の品質は問題としていない。作業DおよびEは、本実験におけるメインの作業で、汎用のボール盤によりΦ8の鉄鋼用ドリルを用いてアルミ板に3個の穴をあける技能作業である。作業Dでは、漠然と「アルミ板に穴を3個連続して開けてください」という指示を与え、作業Eでは、「アルミ板上のマークを施した位置に、出口バリの発生が極力ないように、穴を3個連続して開けてください」という指示を与えている。作業Fでは、作業者が感じた各作業の難易度等についてヒアリングを行ったが、心拍変化の評価の対象からは除外している。AからEの作業は、直観的には後の作業になるほど難易度が高く作業者の緊張度は増す傾向にある。一連の作業における瞬時心拍変化を、フィットネス用リストバンドで測定し、各作業者による作業難易度の自己評価と心拍の変動との関連付けを試みた。検討にあたっては、瞬時心拍変化のパターン、各作業における平均心拍および心拍の変動を表す指標として変動係数（＝標準偏差/平均心拍）の利用を考え、これらが作業の種類や作業の難易度とどのような相関があるかについて考究した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 作業難易度の自己評価と瞬時心拍変化

4人の被験者に対して全作業終了後にヒアリングを行い、作業A～Eの難易度を自己評価してもらった結果を表1に示す。評価は5段階で行い、数値が大きいほど作業者が難しいと感じていることになるが、あくまで個々の作業者の中での難易度の違いを表したものにすぎず、難易度を客観的に表した数値ではない。個人差はあるものの、作業A、Bの会話および作業の流れの把握は「易しい作業」と感じ、アルミ板への穴加工である作業DおよびEは「難し

い作業」と感じている。また、直観的な予測通り、「アルミ板上のマークを施した位置に、出口バリの発生が極力ないように、穴を3個連続して開けてください」と細かい指示を与えた作業は、作業者全員が最も難しい作業であったと評価している。ボール盤作業の肩慣らしに実施した木材への穴加工である作業Cでは、難易度の評価結果に個人差がでる傾向にあった。

図2は、作業AからFを通しての瞬時心拍の変化を作業者ごとにまとめたものである。瞬時心拍変化には明らかに個人差が見られる。一般に、心拍は緊張度とかかわりが深く、緊張感が高まると大きくなり、慣れた作業だと小さくなることが知られている<sup>(2)</sup>。単純に難しい作業を行うときには緊張度も高まると仮定すると、作業がAからEへと進むにつれて瞬時心拍が大きくなる傾向が見えることになる。しかし、各作業者の瞬時心拍変化は必ずしもこのようにはなっておらず、A～Eの作業全体を通して瞬時心拍変化を単純に追っただけでは、作業者が作業を難しく感じているのか易しいと感じているのかを判別することは難しい。

#### 4.2 作業難易度と瞬時心拍

図3は、作業A～Eにおける瞬時心拍の変化から各作業中の平均心拍を求め、作業者別にまとめたものである。ここで平均心拍は、各作業者の安静時心拍を1として規格化した値として表示している。

各作業の難易度の評価値にかかわらず平均心拍の値はおおむね1.0を超えており、何らかの作業を行うと安静時より上昇することが分かる。また、難易度の評価値が2以上の作業では、難易度が高くなるほど平均心拍が高くなる傾向が見られ、難しいと感じ

表1 作業難易度の自己評価

	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4
作業A	1	2	1	1
作業B	1	1	1	1
作業C	2	3	1	1
作業D	3	4	3	3
作業E	5	5	4	4



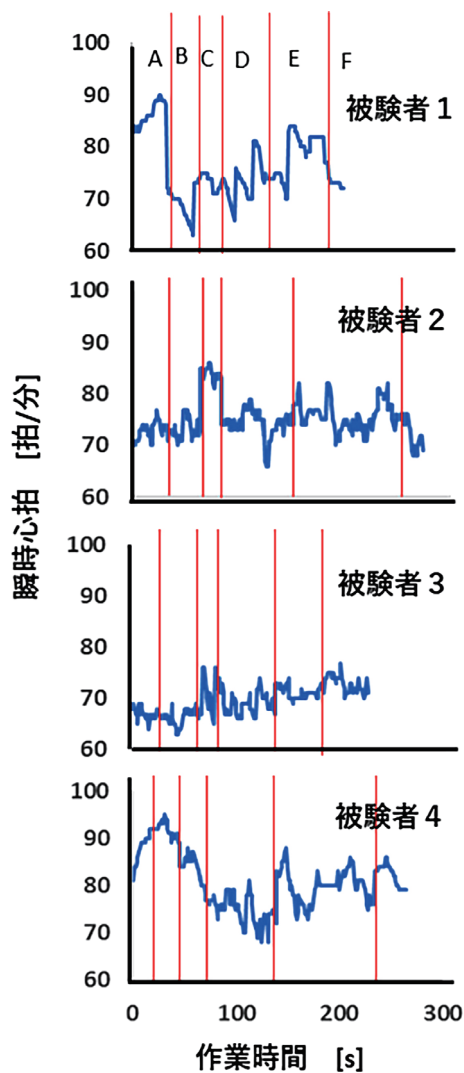


図2 全作業を通しての瞬時心拍変化

じる作業では緊張度が高まるのが分かる。他方、難易度の評価値と平均心拍のバラツキの関係に着目すると、評価値が1の「易しい」と感じる作業ではバラツキが非常に大きく、逆に評価値が5の「難しい」と感じる作業ではバラツキが最も小さくなっている。

図4は、作業A～Fにおける作業難易度の評価値と各作業における瞬時心拍の変動係数との関係を作業別者別にまとめたものである。変動係数とは、各作業における瞬時心拍の分布から瞬時心拍の標準偏差を求め、標準偏差/平均心拍、として定義される。

古谷野によると<sup>(9)</sup>、簡単な事務作業においては、単純な計算作業と計算と分類を並行して行う複合作業が性質が異なる作業であることを見分けるには、

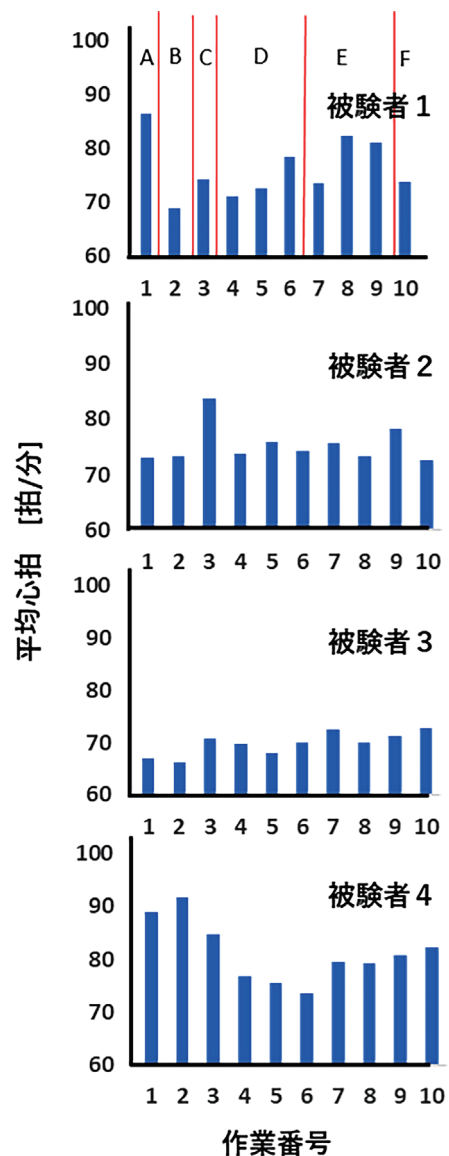


図3 作業内容と平均心拍の関係

平均心拍より変動係数が優れ、複合作業や要約作業では単純作業に比べて変動係数が大きくなるとしている。本研究において、難易度の評価値と変動係数の間には明確な相関は見られないが、評価値が5と「難しい」と感じる作業では変動係数のばらつきはほとんどなく、変動係数自体も0.02程度と小さな値となっている。また、評価値が4の作業でも同様の傾向が見られる。評価値が4および5の作業は、いずれもアルミ板に穴をあけるという技能作業で、古谷野らの事務作業の場合とは異なり、技能作業では難易度が高いほど変動係数が小さくなる傾向にあった。

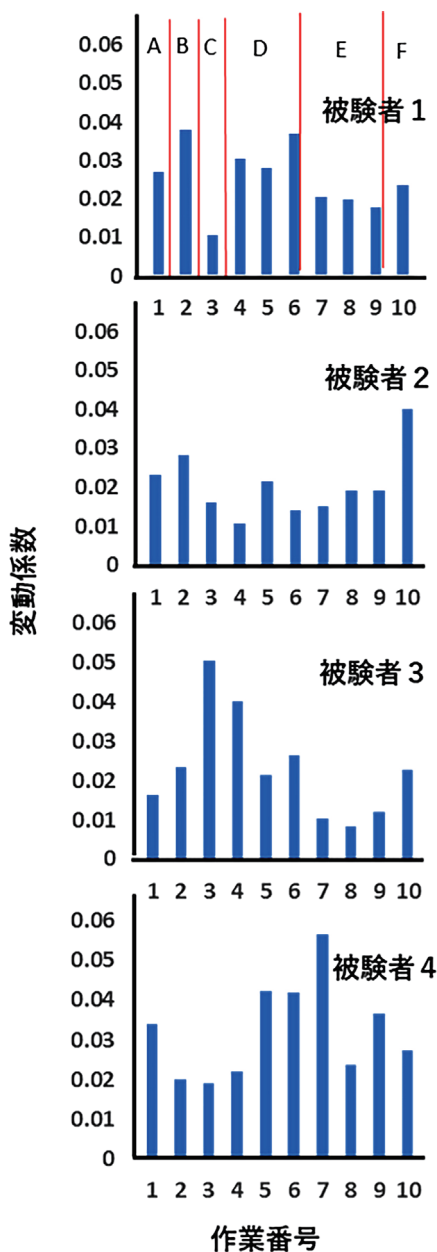


図4 作業内容と変動係数の関係

#### 4.4 技能習得への瞬時心拍計測の活用法の検討

図5は、作業A～Eにおける平均心拍と変動係数の関係を作業ごとに分けて示したものである。図には、すべての作業者が最大の評価値をつけた作業Eにおける平均心拍および変動係数の平均値を破線で示している。破線の交点である（平均心拍，変動係数） = （1.07， 0.0217）を原点と考え、プロット点の原点からの分布状態を見ると、作業A～Cの難易度が低いと評価した作業間ではバラツキの状態に大きな違いは見られないが、難易度が高いと評価した

作業DとEでは違いが見られる。作業Dのプロットは第2象限に集中し、作業Eのプロットはx軸（ $x = 0.0217$ ）付近に分布している。図6は、難易度を5とした作業における平均心拍および変動係数の平均値である（平均心拍，変動係数） = （1.07， 0.0186）を原点と考え、難易度の評価値ごとに平均心拍と変動係数の関係を示したものである。作業者が感じている難易度とプロット点の分布状態には興味深い関係が認められる。難易度5の作業では、プロット点はx軸上にありy軸に対称に分布している。難易度が4となると変動係数であるy軸方向にバラツキはじめ、難易度が3および2となるとy軸方向に加えてx軸負の方向へのバラツキも大きくなる。難易度が1となると、x軸，y軸の両方向に大きくばらついた分布となっている。

このことは作業者が感じる作業の難易度は、瞬時心拍の平均値と変動係数と何らかの相関があることを示している。本ケースでは、作業者が最大の評価値5をつけた作業における平均心拍および変動係数の平均値を原点（基準）として設定すると、ある作業における平均心拍と変動係数のバラツキ（分布）が基準に対してどのような形をするかで推定できることを示し、うまくいけば、多変量空間における距離尺度の一つであるマハラノビスの距離<sup>(12)</sup>と同様の考えが適用できることを示唆している。

作業の難易度が変化すると、作業中の平均心拍と変動係数の平均値の分布が変化することを利用すると、訓練によって技能の習得が進んでいるかどうかを見える化できる可能性がある。同じ作業でも、訓練を繰り返すことで「難しく感じる」から「簡単と感じる」に変化することは自然な流れで、この変化は、繰り返し作業における平均心拍および変動係数の平均値の分布状態を追跡することでモニターでき、結果として作業者の技能習得のレベルが推し測れることになる。

加えて、平均心拍と変動係数の平均値の関係は、瞬時心拍の変化のパターンとも関係が深い。図7は、難易度の評価値が4または5と難しい感じる作業中の瞬時心拍変化に見られる典型的な2つのパターンを示す。パターンIは、作業開始時に瞬時心拍が大きく上昇し、

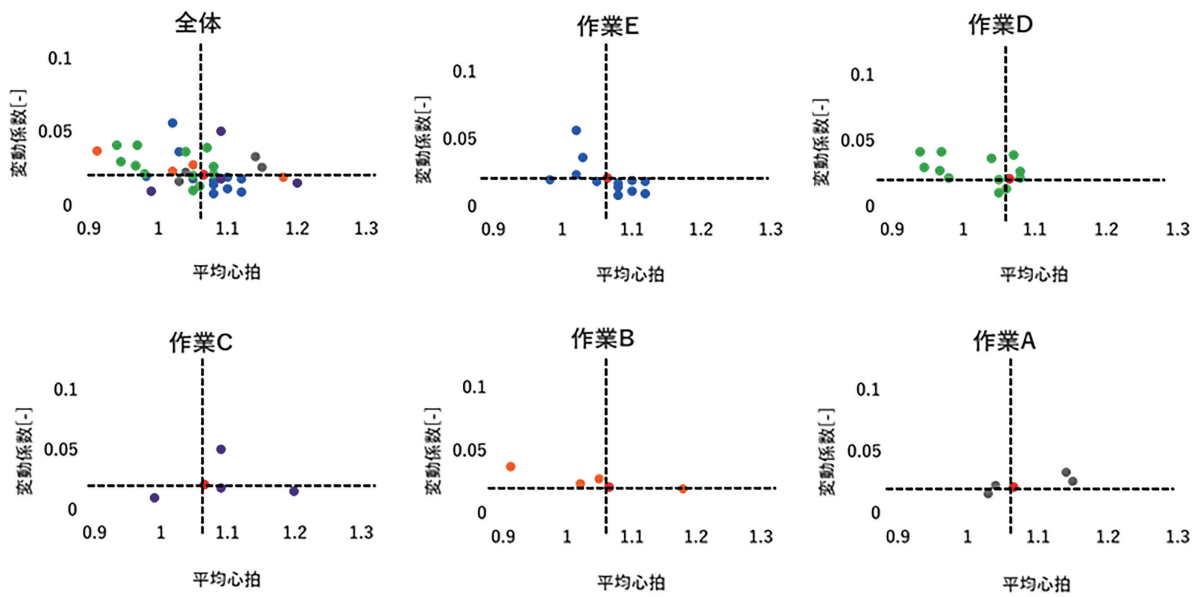


図5 作業内容と平均心拍－変動係数の分布

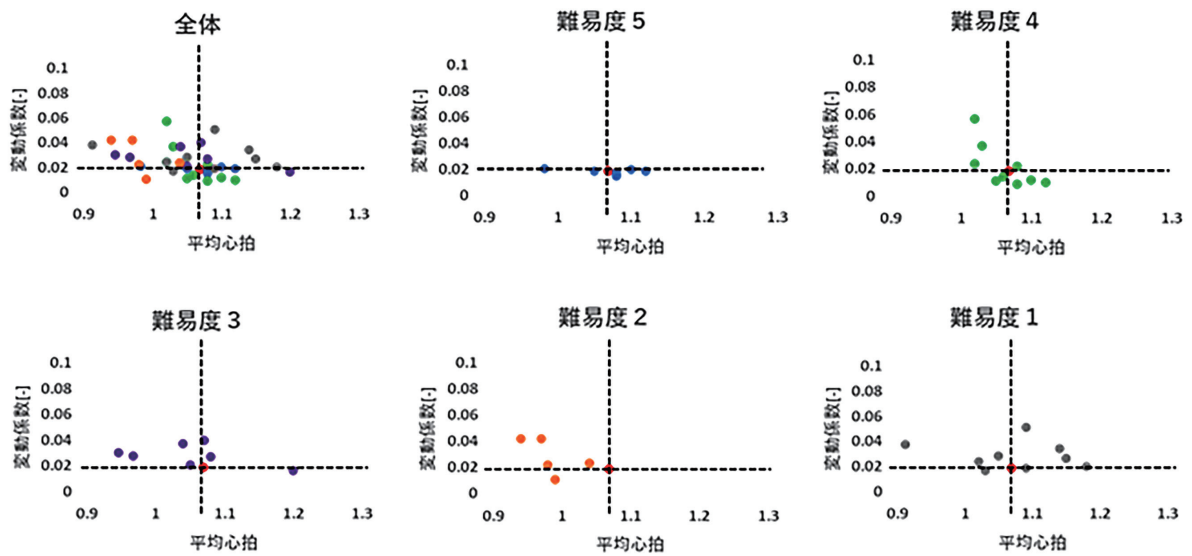


図6 作業の難易度と平均心拍－変動係数の分布

作業が進むにつれて心拍が徐々に減少していくもので、パターンⅡは作業中瞬時心拍の上昇が継続するパターンで、評価値が高いほどパターンⅡを示す傾向にある。両者のパターンの違いは、作業の慣れに起因すると言える。心拍は、作業の負担度を評価する方法として古くから利用され、定性的には作業の難易度とほぼ比例して変化する。また、作業の困難度が高い場合には作業中高い心拍を維持し変動が小さいのに対し、作業に慣れてくると、作業の初期段階では高い心

拍を示すが、次第に減少していくと言われ<sup>13)</sup>、難易度が4と5の作業の間で変動係数のバラツキに差が生じたのは、作業の慣れによる瞬時心拍の変化が原因と考えられる。作業中の平均心拍と変動係数の分布に加えて、一回一回の作業における瞬時心拍の変化のパターンも併せて評価の指標とすると、作業者の技能レベルの変化をより正確に評価でき、これらの技法を援用することで、技能習得の速度を高める訓練プログラムの設計等に役立てることができる。

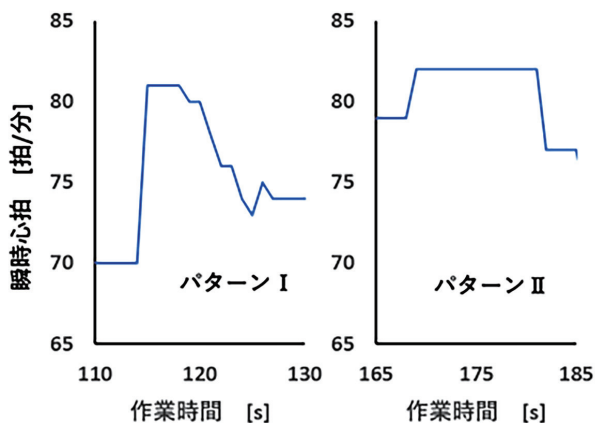


図7 作業中の瞬時心拍の変動パターン

## 5. まとめ

近年急速な進歩を見せている「ウェアラブルデバイス」を活用した瞬時心拍計測を技能習得に生かすことを考え、作業者が感じる作業の難易度と瞬時心拍変化の関係について実験的に調べた。ウェアラブルデバイスによる瞬時心拍計測においても、従来法と同様に、拍数は作業の難易度とほぼ比例的に対応して変化し、作業の困難度が高い場合には作業中高い心拍を維持し続け、慣れた作業のように困難度が低い場合には作業の初期段階で高い心拍を示した後急激に減少していく傾向が見られた。一方、簡単な会話や作業指示書の黙読など作業者にとって精神的な負担が小さい作業では瞬時心拍変化に個人差が強く現れ、このような作業における難易度を瞬時心拍から評価することは困難であった。穴加工において作業者が感じている難易度は、作業者が最も難しいと評価した作業における平均心拍および変動係数の平均値を原点としたときに、ある作業における平均心拍と変動係数の関係が原点に対してどのように分布するかを分析することで指標化できる可能性がある。このような指標と作業中の瞬時心拍変化のパターンを組み合わせると、ウェアラブルデバイスによって作業の難易度に加えて作業者の慣れ（内面的変化）をも反映した評価が期待でき、技能習得の速度を高めるための訓練プログラム等の設計に役立つものと考えられる。

## <参考文献>

- (1) 古川康一, 上野 研, 五十嵐 創, 森田想平: 身体知の解明を目指して, 第17回人工知能学会講演会予稿集, p.1-4, (2003).
- (2) 馬渡正道, 土屋健介: 高度熟練技能における数理解析モデルおよび制御解析法の構築ならびに書道の運筆活動における潤滑への影響, 計測自動制御学会論文集, 53, p.317-329, (2016).
- (3) Beilock, S. L. and Carr, T. H.: On the Fragility of Skilled Performance: What Governs Choking, J. of Experimental Psychology, General, 130 p.701-725, (2001).
- (4) Ofen, N., Moran, A. and Sagi, D.: Effect of Trial Repetition on Texture Discrimination, Vision Reserach, 47, p.1097-1102, (2007).
- (5) Mysezeski, J. M.: Mathematical Model of the Occurrence of Human Error in Manufacturing Processes, Quality and Reliability Engineering International, 229, p.1-6, (2017).
- (6) 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, 技能と技術, 54, p.16-22, (2019).
- (7) 近藤康雄: 切断作業にける作業者特性のデジタル化, 技能と技術, 55, p.20-27, (2020).
- (8) 古川勇二, 池田知純, 岡部真幸, 菅野恒雄, 寺内美奈, 二宮敬一, 繁昌孝二, 不破輝彦, 和田正毅: 身体的認知科学に基づくフライス加工技術の習得・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, p.1041-1042, (2014).
- (9) 例えば, 古谷野英一: 心拍の平均値と変動係数との有用性の比較, 日本経営工学会誌, 31, p.175-180, (1980).
- (10) 藤原幸一: ヘルスモニタリングのための心拍変動解析, システム/制御/情報, vol.61, p.381-386, (2017).
- (11) 松尾周汰, 荒川 豊, 吉田繁也: 継続的なストレスチェックを実現するためのスマートウォッチアプリケーションの設計と実装, 第82回情報処理学会講演論文集, p.3-299-3-300, (2020).
- (12) 球仁郷 誠: マハラノビスの距離入門, 品質工学, vol.9, p.13-21, (2001).
- (13) 例えば, 石橋富和, 大谷 璋, 三浦武夫: 精神負担の指標としての心拍数, 産業医学, vol.10, p.377-379, (1968).