

情報フィードバックの有効性を手がかりとした 身体技能遂行過程の理解

An Approach to Cognitive Process for Motor Skill Execution based on Effect of Augmenting Information on Task Performance

阪口 豊[†]

Yutaka Sakaguchi

[†]電気通信大学

University of Electro-Communications

yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

概要

身体技能習得を支援する手法として運動者が感知できない情報を付加的にフィードバックする手法があるが、付加的情報を有効に利用できるかどうかは課題遂行中の運動者の認知過程に依存している。本発表では、「音の粒を揃えてピアノを弾く」課題を用いた実験での観察に基づき、情報提示の有効性の有無が運動者の認知戦略を理解する手がかりとなる例を示すとともに、有効な情報提示方法の探索が課題実行に関わる認知過程解明に向けた方法論として機能する可能性を議論する。

キーワード: 身体技能, 技能習得, 付加的情報フィードバック, 認知戦略

1. はじめに

身体技能の習得過程では「この感覚が大事」という主観的な「気づき」が大きな役割を果たす。試行錯誤の過程でさまざまな「気づき」に遭遇し、それをパフォーマンス向上に反映させる営みは、人間の実生活における知的活動の一つである[1]。

一方、技能動作遂行中の身体や環境に関する情報は通常、運動者自身の感覚受容器で捉えてもたらされるが、近年では、感覚受容器で直接とらえることが困難な情報（不感知情報）を外部の人工システムにより測定しその情報を運動者にフィードバックすることにより、技能習得を助ける試みが種々行われている（2節参照）。このような付加的情報フィードバックの狙いは、自然には感じる手がかりがない情報を運動者に提供することにあるが、後述するように、このような情報提供は「感じる手がかりがない」のではなく、「感じる手がかりがあるのに気づいていない」手がかりの発見、すなわち「気づき」を促進する場合にも有効である。いったん「気づき」を呼び起こすことができれば、運動者はもはや付加的情報がなくてもその「気づき」を足がかりとしてパフォーマンスを向上させることが可能になる。このようなことから、付加的感覚フィードバックという

情報提供は人間の技能習得過程を支援する手段として機能する。

一方で、このような情報支援において、いかなる内容の情報をどのような形態（感覚モダリティや刺激の内容）で提供するかは難しい問題である。付加的感覚フィードバックの手法はその概念や狙いが明快であるが、後述するように、現実には具体的な問題に適用しようとすると、その実装に向けてさまざまな問題を解決する必要があり、有効な実装方法を見出せない場合もある。その原因は、運動者が運動課題を遂行するにあたりどのような内容の情報をどのような形で受け取れば有効に利用できるかが明らかでないことにある。この問題を逆の視点から考えれば、運動者に対するどのような情報支援が有益な技能習得支援をもたらすかを明らかにする過程、すなわち、有効な情報支援手段を開発する過程は、情報支援を受ける運動者の知覚・認知過程を解明する過程を表裏一体であり、したがって、運動者の知覚・認知過程を解明する研究手段として利用できることを意味している。

以上の考え方にに基づき、本稿では、技能習得に向けた情報提供方法の構築と、技能遂行における運動者の知覚・認知過程の解明を並行して行うという方法論について議論する。以下ではまず、付加的感覚フィードバックを通じた技能習得支援に関わる試みについて紹介したのち、筆者らの研究室で行った行動実験の中で筆者自身が遭遇した事例を題材として議論を進める。

2. 付加的情報フィードバックと技能習得支援

情報機器等を利用して、自身が運動中に直接感受できない情報を得て自分の動作の改善や理解に利用することは日常的に広範囲に行われている。例えば、ダンス教室では鏡張りのスタジオでレッスンをを行い自分の動

作をいろいろな角度から確認することが当然のように行われており、スポーツや楽器演奏の練習中にビデオカメラを使って自身の動きを録画して自身の動作を分析することは広く行われている練習方法である。

近年では、このような一般的方法に加え、特別な計測機器を用いて人間が直接感じる事が不可能あるいは困難な情報（不感知情報）を観測し、それを観測可能な信号に変換して運動中に提示する試みが種々提案されている。例えば、運動中の筋活動を音に変換して提示するもの[2]、腰に取り付けた姿勢センサの出力を音に変換して提示するもの、書道の筆に取り付けた力センサやはんだごてに取り付けた温度センサの出力を音に変換して提示するものが報告されている[3,4]。一見すると、これらの試みはいずれも不感知情報を可感知情報に変換して運動者に提供するものであると思えるが、厳密に考えると、上にあげた例のうち、真にヒトの感覚器で観測できない情報ははんだごての温度だけであり、他の情報（筋活動、腰の姿勢、筆にかかる力）は運動者が自分の感覚器を使って観測可能な（つまり脳がアクセスできる）情報である。それにもかかわらず、このような付加的情報フィードバックが効果をもたらすという事実は、（もちろん、脳がアクセスできる情報のすべてが運動者の認知過程に上るわけではないもの）運動者が自分で観測している感覚情報のすべてを利用してきていないこと、そして、付加的情報フィードバックによってそれを有効に利用できるようになることを示唆している。つまり、付加的情報フィードバックによる技能獲得支援は、不感知情報を提供する場面だけでなく、（本来は感じ取ることはできるはずだが）運動者が気づいていない情報を異なる形態で提供する場面でも有効に機能すると考えられる。このような方法が有効に働く理由として考えられることは、付加的情報が運動者の「気づき」を促進することである。運動者の耳や目に入っている運動者自身が気づかない感覚情報は無数にある。このようなとき、付加的情報を与えることにより、感覚信号に含まれていた「気づかない情報」の中から付加的情報と相関のある情報が抽出され、それに対する「気づき」が生まれるのではないだろうか？このようなプロセスを経て、付加的情報が運動者の「気づき」を促進し、それが技能習得を支援する働きをもたらすことは十分に考えられる。

ただし、上述したように、付加的情報を提供する手段の実装にはさまざまな検討を要し、特に、提供すべき信号の次元が高いときには大きな問題になる。このこと

について、筆者らが以前に構築した可聴化システム[4]の例をあげて説明する。

まず、歩行者の腰に姿勢センサをとりつけて腰の動き（速度）に応じて高さ（周波数）を変調した音として提示すると、歩行中の腰の動きの様子を直感的に理解できるようになる。例えば、左右の足を踏み出すときの腰の動きが非対称であると音の変化も非対称になるので、自分が歩行中にいかに非対称な動きをしているかを痛感させられることになる。そして、音の変化が対称的になるように歩き方を工夫することにより、左右対称な歩き方の感覚を獲得することができる。この例では、運動者に提供する情報が「腰の運動速度」という1次元信号であるため、それを「音の高さ」という1次元信号に変換することが可能で、運動者もその変化を容易に読み取ることができた。一方、筆にとりつけた3次元力覚センサの信号を可聴化するシステムでは、 x, y, z 3軸の力センサ出力をそれぞれ何らかの音響特徴量に変換して音信号を生成する必要があったが、その方法は一筋縄では決まらなかった。最も単純なアイデアは、各軸の力信号をそれぞれ異なる周波数成分に対応させた複合音を生成し、センサの出力に応じて各成分の強度（パワー）を変調する方法である。しかし、複合音を構成する個別の周波数成分のパワー変動の様相を読み取ることは一般に難しい課題である。したがって、このような実装方法を用いると、技能習得を支援するために付加的情報を提供しているにもかかわらず、必要な情報を音響信号から読み取る（つまり音の変化を聞き分ける）という新たな知覚的能力の習得を求めることになるという皮肉な状況が生じるのである。結局のところ、上記の研究では、3軸の情報を同時にフィードバックすることは断念し、 z 軸方向（筆の長軸方向）にかかる力に着目し、その力の大きさに応じて音量を変調して筆先にかかる長軸方向の力をフィードバックする方法を採用した。力の大きさに応じて音量が変化するというのは自然な感覚であり、このシステムの利用者は、音の変化から筆先にかかる力の大きさの変化を一体感をもって感じ取ることができた。さらに、このシステムを利用すると、運筆中に筆先にかかる力が変化の様子を運筆者本人だけでなく脇にいる人も知ることができるため、異なる個人間で筆先の力感覚の変化を共有する（例えば、師匠の力加減の変化を弟子が感じ取る）ことも実現できた。

筆にかかる力の可聴化システムの例において、仮に3つの力センサの出力信号の時間変化をグラフに表示

し可視化すれば、おそらく可聴化で生じたような読み取りの難しさは生じないであろう。しかし、手先にかかる力感と画面に表示される力センサの出力が一体感をもって感じられることもないであろう。以上で述べた例は、付加的情報フィードバックにおいては、いかなる感覚モダリティを通じていかにして情報を提供するかが重要であり、それはヒトの知覚メカニズムと密接に関わっていることをよく表している。

本節で述べてきたことは、本稿の命題である「有効な情報提示手段を開発する過程は、情報支援を受ける運動者の知覚・認知過程を解明する研究手段として利用できる」ことの一例を与えている。

3. ピアノ打鍵課題を題材とした実験

前節で紹介した可聴化の研究は2010年ごろに学生の修士論文研究の中で行ったものであるが、筆者の研究室ではその後も技能習得過程における情報提供のあり方について断続的に検討してきた。本節で述べるピアノ打鍵課題を題材とした卒業研究[5]もその一つである。

ピアノ演奏においてはしばしば「音の粒が揃っている」こと、すなわち、連続して打鍵する音の大きさ（音量）が不用意に変動しないことが求められる（注：現実のピアノ演奏において「音の粒が揃って聞こえる」ときに音の大きさが一定に保たれているかどうかは不明であるが、ここでは音の大きさを一定に保つ課題として定式化した）。音の大小は聴覚を通じて知覚される特性であり、さらに、音量を一定に保つことが求められる状況では、被験者は打鍵ごとの音量の変化をモニタすべく聴覚に注意を向けて課題を実行するにちがいない。このような場面において、さらに、音の大小変化に関する情報を付加的にフィードバックすることにより音量のばらつきをさらに小さくする効果が得られるかどうかを調べるのがこの実験の目的であった。

実験の内容や条件設定は卒業研究の過程でさまざまな変遷があったが、本稿では「音量を一定に保ちながら、ピアノ中央のド（C4）の鍵盤を6回繰り返し打鍵すること」を課題として設定した実験について説明する。この実験では、鍵盤楽器の演奏経験のない被験者でも容易に実行できるように、示指を繰り返し使って（注：現実のピアノ演奏では同一の鍵盤を繰り返し打鍵する際異なる指を使うことが多い）、打鍵頻度を毎秒2回程度のゆっくりとした条件に設定した。音の大きさは、電子ピアノ（ヤマハ Grand Avant 2）が出力する MIDI

コードのベロシティ値を用いて評価し、その値を PC ディスプレイ上に表示することにより被験者にフィードバックした。ベロシティ値は鍵盤の打鍵速度を表す変数であり、0 から 127 までの値をとる。実験では、無理なく打鍵動作ができるように、ベロシティ値が概ね 60 前後になるように誘導したが、被験者には、課題遂行中に音の大きさ（ベロシティの絶対値）を気にする必要はなく、音の大きさのばらつき（ベロシティ値の標準偏差）を小さくすることが重要であることを伝えた。

実験では、被験者にフィードバックする内容を3種類設定した。具体的には、実験条件として①付加的情報を与えない「通常条件」、②試行（6回打鍵）終了時にベロシティ値の標準偏差を数値で表示する「偏差提示条件」、③試行終了時に打鍵ごとのベロシティ値を棒グラフと数値でまとめて表示する「オフライン提示条件」、④試行中打鍵するごとにベロシティを棒グラフと数値で表示する（つまり、打鍵ごとに棒が横方向に増えていく）「オンライン提示条件」の4条件を用意した。この中では、後者の条件ほどよりリッチな情報を提供されることになる。特に、オンライン提示条件④では、打鍵ごとにベロシティ値が表示されるため、被験者は前回の打鍵でのベロシティ値を参考にして次の打鍵を調整・修正することができる。

実験手順は以下のとおりである（図1）。被験者はまず、通常条件①で60試行課題を行ったのち（ブロック1）、偏差提示条件②で60試行を行った（ブロック2）。次に、半分の被験者（グループA）はオフライン提示条件③で60試行を行い、残り半分の被験者（グループB）はオンライン提示条件④で60試行を行った（ブロック3）。そして、最後に、全員の被験者が通常条件①で30試行課題を行った（ブロック4）。実験には、鍵盤楽器経験者3名、未経験者5名が協力した。

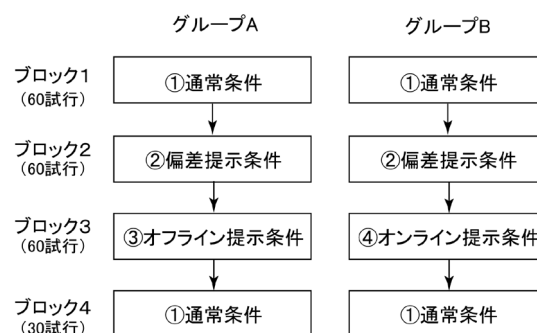


図1 実験の流れ

この実験は、卒業研究の制約から十分な準備の下で遂行できなかったため(例えば、本来であれば、通常条件①のみで試行を続ける統制群を用意して付加的情報フィードバックの有無の効果を押さえるべきであるが、それが欠けている)、ここで紹介するデータはあくまで予備的結果であることを断っておく。図2は、ベロシティ値の標準偏差のブロック内中央値の被験者間平均の推移を示したものである(注:ブロック内で中央値をとったのは、打鍵ミスにより特定の試行で例外的に大きな標準偏差が生じることがあるためである。中央値ではなく平均値を用いると、この異常値によって結果が大きく変動する)。この図に示した8人の被験者間平均値は、実験の進行に従ってベロシティ値の標準偏差(つまり、音量のばらつき)が一樣に減少し、実験の進行に伴い課題のパフォーマンスが向上したことがわかる。上述したように、本実験では統制群を用意しなかったため、このパフォーマンス向上が、単なる試行の繰り返しによるものか付加的情報フィードバックによるものかを判断できない。とはいえ、以上の結果から、少なくとも平均的な意味では、試行を繰り返すことにより音量のばらつきを次第に低減させる練習効果があったと推論できるであろう。

しかし、この実験中のパフォーマンス変化の実態はそのような単純なものではない。まず、パフォーマンス変化の様相は被験者ごとに大きく異なる。図3は、標準偏差のブロック間推移を被験者ごとに示したものであるが、実験が進行する過程での標準偏差の増減は被験者間で大きく異なっており、必ずしも音量のばらつきが一樣に減少するわけではないことが読み取れる。さらに、被験者は実験中音のばらつきが小さくなるように試行錯誤し続けていることから、同一ブロック内でも常にパフォーマンスは変動していた。また、その過程で、ベロシティ値の標準偏差を一定期間落ち着いていたにもかかわらず、ある試行を境に標準偏差が大きくなってしまふ「スランプ」状態に陥る現象もみられた。このように、この課題において被験者のパフォーマンスが一様な傾向をもって変化することは少なく、そのため、試行単位での標準偏差の変化の様子を(プリズム適応の学習過程を解析する場合に用いられるような)学習曲線でフィッティングすることはできなかった。したがって、図2に示した全般的傾向は、少なくともこの課題に取り組んだ被験者一人一人の学習過程を反映したものにはなっていない。このことは、逆に、技能を習得しようとしている個人の認知過程(つまり、練習中

に何を考え何を感じその結果何を得たか)を論じるうえで、課題パフォーマンスの個人間平均の振舞いはさほど有用でないことを示している。

以上の検討に基づき、次節では、一人称研究[6]の方法論にたち、筆者自身がこの課題を実行したときの内観に基づいてさらに議論を進めたい。

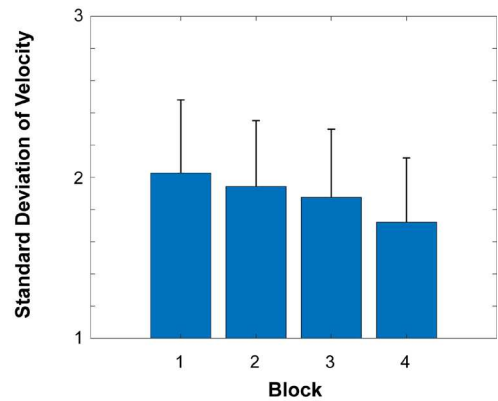


図2 打鍵速度の標準偏差の被験者間平均の推移

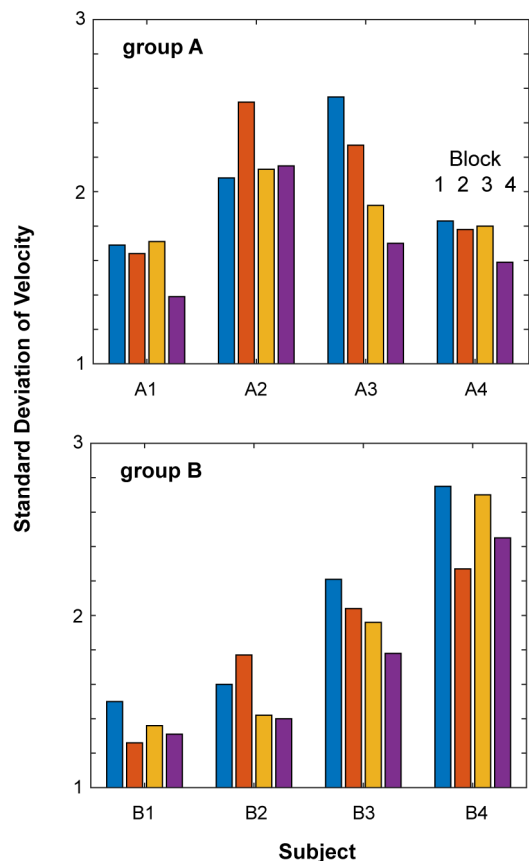


図3 被験者ごとの打鍵速度の標準偏差の推移

4. 打鍵を一定に保つための認知的な戦略

本実験の問いは、「連続して打鍵するピアノ音の大きさを揃える」という本来聴覚手がかりに基づいて遂行する課題において付加的情報フィードバックがパフォーマンス向上をもたらす効果があるかであった。この実験課題を経験した筆者自身からみれば、この問いに対する答えは「イエス」である。

この課題を自身で実行してみると、試行単位で与えられるベロシティ値の標準偏差の情報（つまり、偏差提示条件②で与えられる情報）は、打鍵のばらつきを定量的に把握するうえで極めて有用であった。これは、スポーツ等のトレーニングで広く行われている数値化・可視化の一例であり、何気なく行っている動作の内容や評価を数値として表すことの効果の一種である。音の大きさのばらつきが標準偏差という定量的な形で表示されると、達成すべき目標のものさしが明確になるため、どのように手や腕を使えばベロシティ値の標準偏差を減少させられるかを確固たるものさしの下で試行錯誤できるようになる。実際、偏差提示条件②においてこの課題に取り組む中で、筆者自身は、通常条件①では気づくことがなかった手首や前腕の使い方を認識することができ、前腕の使い方を工夫することで打鍵のばらつきを小さくできることを体得できた。

それに加え、偏差提示条件②において試行を繰り返す中で、音の大きさを聞きわける聴覚的知覚の感度も高くなったように感じられた。つまり、聴覚的に得られる「音の大きさ」だけを頼りにして課題を実行する条件（通常条件①）よりも、音のばらつきに関する定量的手がかりが与えられた条件（偏差提示条件②）の方が、かえって音の違いをよく聞けるようになったということである。このような違いが生じた原因は、聴覚信号だけに基いて音の大きさを判断しているあいだは、音の大小判断に対するふだんの向き合い方が温存される（これくらいの違いが区別できればよいという甘えが残る）のに対し、音のばらつきが数値として突きつけられると、音の大小判断についてより高精度のものさしが与えられ、ふだんより厳しい態度で音の大きさを判断するようになることにあると考えられる。つまり、聴覚信号の大小関係と相関のある情報が別チャンネルから与えられることで、聴覚信号の大小関係の判断精度が高まったということである。これは、聴覚だけに注意を向けて課題を実行している通常条件①の方がむしろ「音響信号の識別に対する集中力」を最大限に高められない

という意味で逆説的な結果である。しかし、聴覚情報のみが与えられた状況では聴覚的判断の精度を向上させる手がかりが存在しないと考えれば、このことは当然の結果であるとも考えられる。これは、付加的情報フィードバックにより、「感じようと思えば感じられるけれども気づいていない」情報に対する「気づき」が生み出された一例とってよい。

以上まとめると、試行内標準偏差の情報を得ることによって、筆者は打鍵のばらつきを減らすのに有効な手指・腕の使い方について新たな気づきを得るとともに、音の大小変化に対してより高い精度で判断する「構え」を身につけることができた。つまり、ベロシティ値の標準偏差を試行単位で提示するという付加的情報フィードバックは筆者には有効に機能したことになる。

次に、オフライン提示条件③において課題を実行したときの筆者の内観について述べる。

偏差提示条件②と比較してオフライン提示条件③で新たに得られる情報は、打鍵ごとのベロシティ値である。この情報の有用性は、課題遂行中に感じた打鍵の強弱に関する主観的感觉（例えば、第3打はやや弱く、第5打は強かったといった感覚）を定量的な形で確認できること、つまり、自身が感じる打鍵感觉の正確さを検証できることであった。このことは、「音の大きさを揃える」という課題達成に向けて直接的に役立つものではないが、自身の「タッチの感觉」（打鍵時の触力覚的な感觉）や「音量の聞き分け感觉」に対する自己信頼性を高める（つまり、自分が感じた感觉の正しさを数値的に確認できる）点で一定の効果があつた。自身の感觉に対する信頼性向上は、打鍵コントロールに関する認知プロセスに影響を与えると考えられるから、この情報が打鍵のばらつきを抑えるうえで間接的な効果をもたらす可能性は十分に考えられる。

最後に、オンライン提示条件④において課題を遂行したときの内観について述べる。

前述したように、この条件は、「被験者は直前の打鍵のベロシティ値を参考にして一音ごとに打鍵の強さを調整しているはずだから、打鍵ごとのベロシティ情報は次の打鍵の調整に有効に利用される」ことを前提として設定されたものである。すなわち、この実験では、「自分が実現したかったベロシティ値とフィードバックされたベロシティ値を比較し、その誤差に応じて次の打鍵の強さを調整する」というフィードバック制御の考え方に基いて被験者の認知過程を捉えていた。しかし、筆者がオンライン提示条件④でこの課題を行

ってみて実感したことは、「音の大きさを揃えて繰り返し打鍵する」際に自身が「一音ごとに打鍵の強さを調整する」という戦略をとっていないことであった。実際、筆者は、ディスプレイに表示される一音ごとのベロシティ値の情報を無視し、他の条件と同じく「同じ動作を繰り返したときにばらつきが小さくなるような手や腕の使い方を探す」という戦略を継続した。筆者がこのような戦略をとった理由をあとから考察すれば、「一定の時間間隔で繰り返し打鍵する」課題の遂行では「同じ動作を繰り返す」ことが重要であって、「打鍵ごとに調整する」ことはむしろ「同じ動作を繰り返す」ことの障害になるためということになる。したがって、(少なくとも筆者にとって) オンライン提示条件④で提供される情報は無用であったのである。

実は、オンライン提示条件④で課題を行った被験者の中には、実験中に一時的に混乱が生じて課題をスムーズに実行できなくなった(等間隔で打鍵を繰り返せなくなった)者が1名いた。上で述べた考察に基づけば、この被験者が課題をスムーズに実行できなくなった理由は、この被験者は前の打鍵でのベロシティ情報をもとに次の打鍵の強さを調整しようとしたためであると想像できる。すなわち、直前のベロシティ値を再現しようとして一打ごとに打鍵を調整するという認知戦略をとったことにより、一定の時間間隔で打鍵を繰り返すことができなくなったものと考えられる。

以上の考察を総合すると、「音の大きさを揃えて打鍵を繰り返す」という課題の実行は「打鍵ごとに運動を調整する」という認知的戦略によって実現されていないということができる。筆者がこのことを陽に認識できたのは、上述したように「前打鍵の誤差情報に基づいて打鍵ごとに運動を修正する」というフィードバック制御の仮説を想定して実験条件を組み立てたからである。このことを一般的な方法論という視点から捉えれば、

「技能動作遂行に関わる認知過程に関する一定の仮説に基づいて付加的情報をフィードバックしたとき、運動者がその情報を有効に利用できるかを検証することを通じて、身体技能遂行に関わる認知プロセスを理解する」という方法論の有効性を示しているといえる。

ところで、筆者が偏差提示条件②で提供される情報を主たる手がかりとして課題を遂行していたという事実は、この実験で用意した三つのフィードバック条件(②, ③, ④)は、一部の被験者にとっては課題遂行上何ら違いのなかったことを示唆している。そのような被験者が一定割合を占める状況でこの実験を行い、パ

フォーマンス変化の定量的結果だけを比較すれば「3条件のあいだで付加的情報フィードバックの効果に違いがない」という結論が下されることになるであろう。しかし、上述してきたように、仮に3条件の間で結果に定量的な差が生じなかったとしても、この課題に参加した被験者は、3条件の下でそれぞれさまざまな主観的感覚を感じ、それに対して認知的考察を加えているはずである。以上のエピソードは、技能課題遂行に関わる認知過程を理解するためには、被験者一人一人の主観的感覚、認知過程を拾い上げることの重要性をあらためて示している。

5. むすび：技能遂行をめぐる認知過程の理解に向けて

本稿では、「技能習得に向けた試行錯誤の過程で外部から受け取る付加的情報をどのように利用するか」を検討することは、自身がどのような認知戦略に従って技能動作を実行しているかを理解するための方法論として活用できる可能性について議論してきた。以上で述べてきたように、付加的情報フィードバックという手法は身体技能習得に関わる一人称研究の守備範囲を広げるツールの一つと考えることができる。さまざまな外部機器を使って自然のままでは得ることができない情報を手に入れ、それが技能習得にどう生かせるかを検討することにより、技能遂行過程に関わる考察範囲をこれまで以上に広げることができるものとする。

文献

- [1] 諏訪, (2016) 「こつ」と「スランプ」の研究 身体知の認知科学, 講談社.
- [2] 柏野, 持田, 井尻, 木村, (2015) “ウェアラブルセンサを用いたスポーツ中の心身状態の解読と調整—潜在脳機能に基づくスポーツ上達支援を目指して—”, バイオメカニクス研究, Vol. 19, No.4, pp. 230-239.
- [3] Matsumura, K. and Sakaguchi, Y., (2008) “‘Audializing’ human movements for motor skill learning”, Proceedings of SICE Annual Conference, pp. 2312-2315.
- [4] Houri, N., Arita, H. and Sakaguchi, Y., (2011), “Audializing body movement: Its concept and application to motor skill learning”, Proceedings of 2nd Augmented Human International Conference (AH-2011), No. A-13.
- [5] 後藤, (2019) “付加的なフィードバック情報がピアノ打鍵の安定化にもたらす効果”, 電気通信大学情報理工学部卒業論文.
- [6] 諏訪, 堀, (2016) 一人称研究のすすめ: 知能研究の新しい潮流, 近代科学社.