

演奏情報のオンラインフィードバックによるピアノ練習支援システム

加宅田 知[†] 阪口 豊[‡]

[†] 電気通信大学情報理工学域 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

[‡] 電気通信大学大学院情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†] satoshi.kayada@uec.ac.jp, [‡] yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

あらまし スポーツや楽器演奏などの身体技能の練習過程で「気づき」は重要な役割を果たす。本研究では、ピアノ演奏の練習において「良い気づき」との出会いを誘導し練習を支援することを目的として、演奏中の楽器の状態を実時間でフィードバックするシステムを実装し、その効果について実験的に検討した。3名の被験者を対象に練習課題を設定して実験を行ったところ、本システムを利用することにより、被験者ごとに新しい「気づき」が得られ、練習を支援する効果が得られることが示された。特に、本システムの利用を通じて演奏音をより注意深く聴こうとする作用が生じたことは、本システムが演奏者の「聴く力」を涵養するうえで有効であることを示唆する。

キーワード ピアノ演奏, オンラインフィードバック, 練習支援, 気づき

An On-line Visual Feedback System for Assisting Piano Practice

Satoshi KAYADA[†] and Yutaka SAKAGUCHI[‡]

[†] School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

[‡] Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: [†] satoshi.kayada@uec.ac.jp, [‡] yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

Abstract “Awareness” plays an essential role in doing practice for acquiring various motor skills, such as sports and music instrument performance. Aiming to assist the practice of piano playing by inducing “helpful awareness”, the authors implemented a real-time visual feedback system of the motion of piano actions and examined its effect experimentally. We prepared several practice subjects and asked three participants to use the proposed system. All participants reported that they acquired some new findings (i.e., awareness) with the proposed system, which could not be noticed without the system. Especially, the system led the participants to listen to the sound more carefully and attentively, suggesting that the proposed system may be effective for cultivating the listening ability of the piano students.

Keywords Piano Performance, On-line Visual Feedback, Assistance of Practice, Awareness

1. はじめに

スポーツや楽器演奏などの身体技能の練習過程で重要な役割を果たすのが「気づき」である[1-3]。「気づき」とは、動作の過程において「ここがポイントだ」と思える事象や主観的感觉を見出すことであり、課題遂行における副次的な評価指標（動作の良し悪しを判断する二次的なものさし）の役割を果たす。したがって、「良い気づき」を得ることは練習を効果的に進めるうえで重要であるが、「良い気づき」に出会うことは現実には難しい。その理由は、難しい技能ほど学習者が抱く主観的な「動作意図」や「身体感覚」と、結果として得られる客観的な「パフォーマンス」のあいだの因果関係が複雑で、両者の関係性が容易にわからないからである。本研究の目的は、このような「良い気づき」との出会いを誘導して学習者を支援するシステム

を構築することにある。

この目的を実現するため、本研究では、学習者が直接感じる情報が難しい情報を外部機器により計測し、可視化・可聴化等によりその情報を学習者に提供する「付加的情報フィードバック」の手法に着目する。技能習得における付加的フィードバックの試みとして、例えば、身体の動きや筋活動を音響情報に変換して提示する研究[4-6]などがすでに行われているが、このような習得支援において重要なポイントは「いかなる情報をいかなる形態で学習者に提供するか」である。本研究では、先に指摘した「運動意図・身体感覚とパフォーマンスのあいだの因果の過程」における定量的データを提供して、学習者がパフォーマンスに影響を与える因子を自ら発見する（つまり「気づき」を得る）過程を支援することを構想した[3]。

以上の問題意識に基づき、本研究では、付加的フィードバックによるピアノ練習支援システムを実装し、その効果について実験的に検討した。

なお、練習時の「気づき」の重要性に着目し、楽譜中に「気づき」をアノテーションする機能を組み込んだピアノ練習支援システムがすでに提案されている[7]。二つの研究はどちらも「気づき」に着目している点で共通するが、練習支援の方向性が大きく異なる。すなわち、文献[7]の研究が、利用者の練習伸展状況の理解や練習の動機づけ強化、練習計画の効率化を促すといった認知レベルでの練習支援を目指しているのに対し、本研究は、音色制御能力（いかに美しい音色の演奏音を作り出すか）というピアノ演奏の基盤的技能の向上を目的として、聴き分け能力や身体の方法といった知覚・運動制御・注意制御レベルの練習支援を目指している。

2. システムの構成

2.1. 概要

本研究では、アップライトピアノの内部にセンサを取り付け、その計測データをピアノ奏者に実時間でフィードバックする。

ピアノに組み込んだセンサは表 1 のとおりである。これらのセンサの出力（すべてアナログ電圧信号）は AD コンバータ（NI 社、USB-6218）を介して、サンプリング周波数 200 Hz で PC に収録した。取得したデータはフィルタリングなどの前処理を加えたうえで、ピアノの譜面台上に設置した液晶モニター上に表示した（図 1）。なお、センサを組み込んだピアノは、二つの鍵盤の化粧板に割れ目があることを除いて外見上通常のピアノと異なる点がなく、奏者に与える違和感はきわめて小さい。以下、これらのセンサの詳細とその働きについて具体的に説明する。

なお、ピアノのアクション機構計測系としては、Yamaha 社の Disklavier や Bösendorfer 社の CEUS などグランドピアノを土台とした本格的なシステムが楽器メーカーにおいて開発されており、演奏記録や自動演奏に広く利用されている。本研究で構築した実験系はこれらのシステムに比べると相当簡易なものであるが、ブラックボックスの部分がなくセンサ信号の性質がわかっているほか、情報を自在に加工できる利点がある。また、次に述べる鍵盤にかかる 3 次元力計測機能は本システム独自の機構である。

2.2. 鍵盤にかかる力の計測

鍵盤を押したり鍵盤に接触したりする際の指と鍵盤の力のやりとりを計測するため、二つの白鍵（ピアノ中央から 1 オクターブ上にある C5（ド）および E5（ミ））に 3 軸力センサ（テック技販，USL06-H5-100N および USL06-H5-200N）を組み込んだ（図 2）。

表 1：アップライトピアノに組み込んだセンサ

| | センサ | 設置箇所 | 計測対象 |
|---|-------|-----------|-------------------|
| ① | 力センサ | 鍵盤 C5・E5 | 指から鍵盤に作用する 3 方向の力 |
| ② | 位置センサ | 鍵盤 C5・E5 | 鍵盤の位置 |
| ③ | 位置センサ | ハンマ C5・E5 | 弦を打つハンマの位置 |
| ④ | 位置センサ | ダンパ C5・E5 | 弦の振動を抑えるダンパの位置 |
| ⑤ | 位置センサ | ダンパペダル | ダンパペダルの踏み込み量 |
| ⑥ | 音量センサ | 筐体内 | 音量のおおまかな変化 |

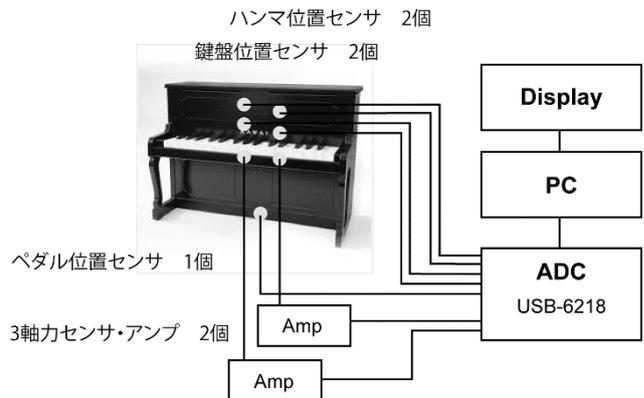


図 1：実験装置の構成



図 2：鍵盤に組み込んだ力センサ

ピアノ打鍵時に鉛直方向にかかる力の大きさの様子はすでに先行研究において調べられている[8,9]。

しかし、奏者の指から鍵盤に作用する力は鉛直方向の成分だけではない。打鍵の際に突くようにして鍵盤を押せば奥方向の力が作用し、離鍵の際に指を丸めながら手前側に回収するように指を動かせば手前方向の力が作用する。また、鍵盤上で指を回したり（ある指が別の指の下をくぐる）とき鍵盤に接触したまま指が回

転する), 鍵盤との摩擦を利用して素早く離鍵したりするときは左右方向の力が作用する. このように, 鍵盤表面に働く水平方向の力の向きや大きさは演奏中の指の使い方を反映しており, この情報を練習者にフィードバックすることにより, 指の使い方を認識させることが期待できる.

2.3. 鍵盤の動きの計測

鍵盤は指で押すことで上下方向に動く部品であり, その動きが次の述べるハンマやダンパの動きを定め, 結果的に演奏音の強さ(大きさ)や長さに作用する. 鍵盤の動きは触覚・力覚や視覚で捉えられるが, 客観的にどのように動いているかが明確に知覚できるわけではない. したがって, 鍵盤位置の時間的変化をフィードバックすることで, 打鍵の速さやタイミング, 離鍵の様子をより意識的にとらえられるようになる.

2.4. ハンマおよびダンパの動きの計測

ハンマは弦を打って弦の振動を引き起こす部品であり, ダンパはフェルト状の部品で弦を押さえることで弦の振動を抑える部品である. つまり, ピアノの音を直接的にコントロールしているのは, 鍵盤ではなくこれらの部品である. これらの部品の動きはいずれも鍵盤の運動によって引き起こされるが, その動きは鍵盤の動きだけで完全に決まるわけではない. 特に, ハンマはある瞬間から鍵盤から自由になり, 単体で弦に衝突するため, 弦を打つ瞬間のハンマ速度はハンマ自体の動きを測ることによってしか知りえない. 弦にあたる瞬間のハンマ速度を知ることは音量や音色の制御を練習するうえで有用な情報になると考えられる.

また, ダンパが弦の振動を抑える効果は, on-off の二値的なものではなく, フェルトの先端が弦にどのように触れるかによって連続的に変化することから, ピアノ奏者はその変化を音色制御に利用しているといわれている. したがって, ダンパの動きを詳細に把握することは, 音色を精密にコントロールする練習をするうえで重要な情報となると考えられる.

2.5. ダンパペダルの動きの計測

多くのピアノには, 足で踏むペダルが左右に二つ取り付けられている. このうち, 右側のペダルは, サステインペダルあるいはダンパペダルと呼ばれ, 音の響きを豊かにしたり伸ばしたりする効果をもつ.

ダンパペダルの機械的機能はすべてのダンパを一括して上げることであり, このペダルを踏むことで鍵盤の動きによらずにダンパが上がった状態になる(つまり, 弦の振動を抑える機能が失われる). このため, ペダルを踏むと弦の振動がゆっくりと減衰するようになり, 響きが長く続くことになる. さらに, 響板を介して打鍵した弦の振動が他の弦の振動が誘発され, 音色が豊かになる効果もたらされる[10].

ダンパペダルの操作も on-off の二値的なものではなく, いつでも踏むかによって音色に大きな影響をもたらす. 一方で, ピアノの楽譜にはペダルをいつでも踏むかについて具体的な指示がされておらず, 初級者にはその操作を学ぶ機会が乏しい. ペダルの踏み込み量を視覚的に提示することは, ペダルの動きを客観的にとらえながらペダリングの練習をするうえで有効な手がかりをもたらすと考えられる.

3. 実験方法

3.1. 方法

楽器演奏の練習過程は, 個人の身体的特性やくせ, 身体感覚, 過去の練習・指導履歴など多様な要素に依存するため[11], 万人に共通する練習効果を統計的手段により検証することは困難である. 諏訪[1,2]が明確に指摘するように, 技能の習得過程は個人の知的な営みであり, 個人差を統計的ばらつきとして捉える従来のデータ手法に基づいてその過程を解析することは必ずしも適切とはいえない.

本研究では, 実験に参加した被験者ごとにその被験者に適合した練習内容を決め, 練習中に本システムを利用した効果を個別に検討することとした. 個々のケースの実験内容は異なっているが, 利用者個人が本システムを利用することで効果を実感できれば(つまり, 新たな「気づき」を得ることができれば), 本システムの目的は達成されたことになる.

なお, 以下で報告する実験において被験者に提供した情報は, センサで取得した信号そのもの, あるいは, 最小限の加工を加えたもの(例えば, 時間微分して速度情報に変換するなど)の時間波形のみであった. このため, 例えば, 二つの鍵盤の打鍵時刻の関係性を読み取るといったことは現状のシステムでは難しかった. プログラムの変更により, このような加工した情報の提供も十分に実現できるが, いかなる形態で情報提供するのが有効であるかは今後の検討事項である.

3.2. 被験者

本実験には, 音楽大学・芸術大学等でピアノ演奏の専門教育を受けていないアマチュア奏者3名(筆者を含む)が参加した. 被験者のうち, 2名は小学校卒業までのあいだに数年間のピアノ指導を受けた経験があり, 残りの1名は指導を受けた経験が皆無であった. 本研究は, 電気通信大学ヒトを対象とする実験に関する倫理審査委員会の承認を受けて行った.

3.3. 手続き

実験の手順は以下のとおりである.

①練習内容の決定

実験者があらかじめ用意した数種類の練習メニューから選択することによって, あるいは, 被験者自身が希望する内容にしたがって練習課題を決定した.

②フィードバックシステムを使わない練習

①で選択した練習課題について、ふだんの練習と同じように（つまり、フィードバックなしで）被験者が納得するまで十分に練習してもらおう。練習時間は明示的に定めなかったが、おおむね1分間程度であった。

③フィードバックシステムを利用した練習

システムが提供するフィードバック情報を参照しながら被験者に練習してもらおう。このとき、提示される種々の情報のなかでどれが重要な手がかりになるかを意識しながら練習するように指示する。練習時間は約5分間とした。

④フィードバックシステムを使わない練習

再び、情報フィードバックなしで同じ練習を繰り返してもらおう。このとき、②の段階での感じ方と何が変わったかに意識しながら練習するように指示する。これは、おおむね1分間程度であった。

⑤アンケート調査

本実験に参加したことで、感じたこと、気づいたことについて自由に答えてもらう。特に、情報フィードバックにどのような効果があったか（新しい気づきを得られたかどうか）、どのような情報が有用であったか、その効果は、情報フィードバックを取り去ったあとも継続したか、などについて記述するように促した。このような事後のアンケートに加え、練習中に被験者が自ら発話した内容も実験者が記録した。

4. 実験結果

3名の被験者を対象に行った種々の練習課題の中には、付加的情報フィードバックの効果が明確にあった場合とそうでない場合の双方があった。明確な効果が得られなかったケースについては後述するとし、以下では、情報フィードバックの効果が明確に生じたものの中から三例を取り上げて具体的に説明する。

4.1. ケース A: 音の大きさを揃えて音階を弾く

課題：ドレミレドの音階を音の大きさを揃えて弾く課題である。3種類の音のうち、ド（C5）とミ（E5）の鍵盤にはセンサが取り付けられているので、これらについては打鍵データも観測できる。

結果：図3に、システムを利用前（A）と利用中（B）の音量、鍵盤およびハンマ位置および鍵盤にかかる力の鉛直方向（z方向）成分の時間パターンを示す（注：ここに示した図は被験者に提示した画面と同じではない）。この図からわかるように、システム使用前は5音の系列のうち3番目のミ（E）の音の大きさが突出して大きくなっているのに対し、システム利用中には、ドとレの大きさが大きくなり、5音の大きさのばらつきが減少している。また、鍵盤やハンマの動きには明確な違いがみられないが、鍵盤にかかる力は、システム利用前はミ（E）の方が若干大きいのに対し、利用中は

ド（C）の方が明らかに大きくなっており、ドとミのバランスを調整できていることが読み取れる。このことから、システムを利用した練習効果があるといえる。なお、このような調整をしてもまだなおミの音が大きいことから、このピアノがE5の音が鳴りやすい設定になっていることが推測される（これは調律により調整が可能である）。

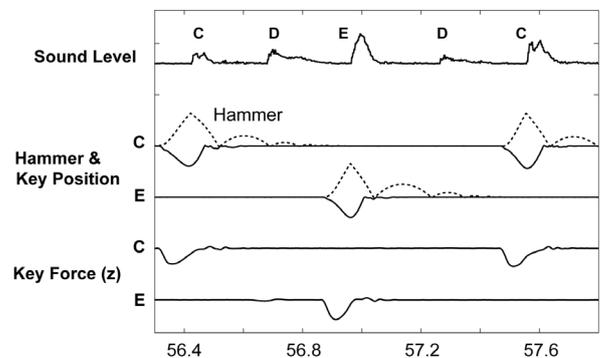
この被験者はピアノ指導を受けた経験のなかったためか、練習するうえでの特段の「気づき」が得られたわけではなかったが、実験終了後の感想として

- ・フィードバック情報が提供されたことで、目標が明確になり、練習しやすかった。特に、音量と鍵盤にかかる力の情報が参考になった。
 - ・レの音の鍵盤データがあるとなおよい。
- と回答していた。

4.2. ケース B: 同音連打で音の粒を揃える

課題：ピアノ演奏では同じ音を繰り返し弾く場合、打鍵ごとに指を変えて弾くのが通常である。このとき、個々の指がもつ特性の違いから、音の大きさや長さ、間隔が一樣にならず「音の粒」が揃わないことがある。ここでは、「音の粒」を揃えてド（C5）の音を薬指、中指、示指、拇指（4-3-2-1）の順で繰り返し打鍵する課題を設定して練習を行った。

(A) Before Using Assistance System



(B) With Assistance System

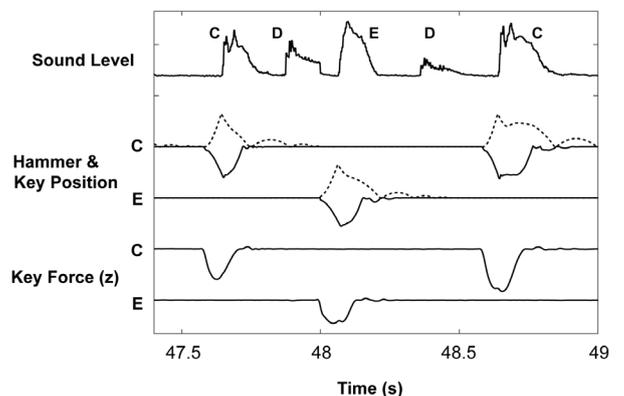


図3：音階課題の結果

結果：図4はシステムを利用せずに同音連打したときの音量、鍵盤およびハンマ位置および鍵盤にかかる3方向の力の時間パターンを表したものである。図中の番号は打鍵につかった指を表しており、1, 2, 3, 4の順で拇指、示指、中指、薬指である。一見すべての指で波形は揃っているように見えるものの、図をよく見ると、拇指で打鍵するとき他の指で打鍵するときとパターンが若干異なることが読み取れる。具体的には、鍵盤を離すタイミングが遅れ、それに伴いハンマの動きが乱れているほか(図中矢印部分)、音が鳴っている時間長も若干長くなっている。また、鍵盤に作用する力は、鉛直(z)方向の力はすべての指でほぼ一様であるが、前後(y)方向の力は拇指で打鍵するとき限り、手前(-)方向に大きく作用している(図中点線部分)。また、左右(x)方向の力は、拇指、示指、中指では右方向であるのに対し、薬指では前半で左向き、途中から右向きに変化している。これは手首と指の動きを組み合わせる作用によるものと考えられる。

この被験者は、システムを利用して練習を始めたところまず鍵盤やハンマの動きが一樣でないこと、それが拇指での打鍵時であることに気づいた。続いて、このような現象が起きる原因を試行錯誤的に探索する過程で、被験者は拇指で打鍵する際に拇指の側面で鍵盤を手前に引く動きをしていることを見出した。そこから、さらに練習を繰り返すなかで、親指の先端だけを使って打鍵することで指を手前方向に引く作用が減り鍵盤やハンマの動きが一樣になることを見出した。

一方、システムを使った練習中に、この被験者が拇指による打鍵時だけ音の長さや間隔は長くなっていることに気づくことはなかった。これは、現在の情報提供方法では、音のもつ属性のうち時間方向の情報を明示的に提示できていないためであると考えられる。

4.3. ケース C: 二和音のスタカート

課題：二つの音を同時に鳴らす二和音では、二つの音のバランスをとるとともに音がばらばらにならないようにタイミングを揃える必要がある。今回の実験では、ド(C5)とミ(E5)の二和音を異なる指遣い(拇指+中指(1-3)と示指+薬指(2-4))で同じように弾く練習を設定して実験を行った。

結果：図5はシステムを利用せずに弾いたときの二つの音の鍵盤の動きと力の様子を示したものである。この図からわかるように、1-3の指遣いで弾くとき、3の指で鍵盤を鉛直方向(z方向)に押す力が大きく、結果としてミの方がハンマの動きが早く立ち上がり、ドよりも弦を打っていることがわかる(これは、旋律を浮かび上がらせるテクニックとして知られている)。

一方、2-4の指遣いで弾くときは、ミを打鍵する力がドにも若干先行して立ち上がるものの、ドに比べて力

の大きさが小さくハンマ速度が遅いため、結果的にハンマ速度が2の指の方が大きくなっている。ミの方がハンマ速度が遅いことは、打鍵終了後のハンマのバウンスがないことからわかる(ドではハンマがもどったあと大きくバウンスしているのに対し、ミではハンマのバウンスが小さい)。このことは、ミの音を打鍵した薬指の力が弱いことを意味している。加えて、1-3の指遣いの場合には打鍵前に鍵盤に預けている重みが二つの鍵盤で均等であるのに対し、2-4の指遣いの場合にはミの鍵盤の方が大きい。これらの情報から被験者は4の指をしっかりキープして打鍵すべきことを気づくことができた。また、この過程で、音をよく聴いて二つの音のバランスにより注意を払うようになったという。

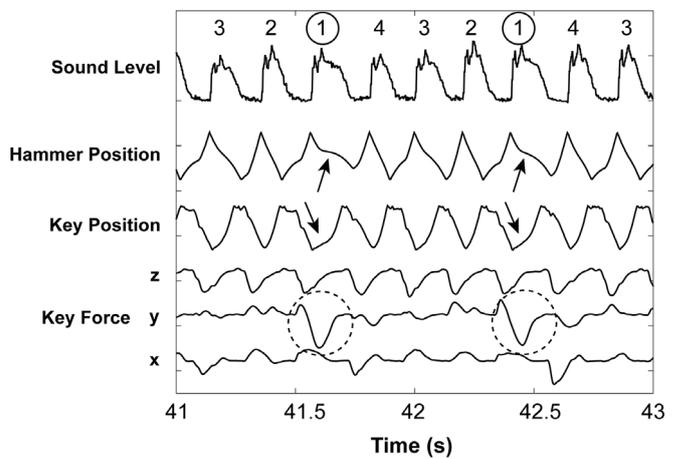
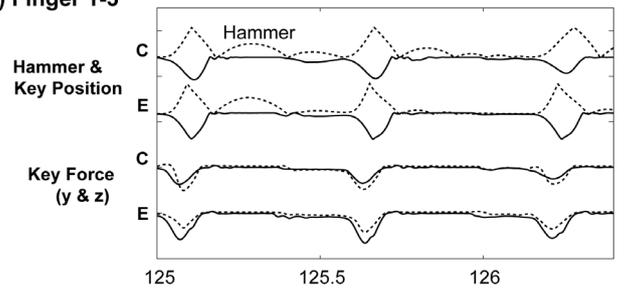


図4：同音連打課題の結果

(A) Finger 1-3



(B) Finger 2-4

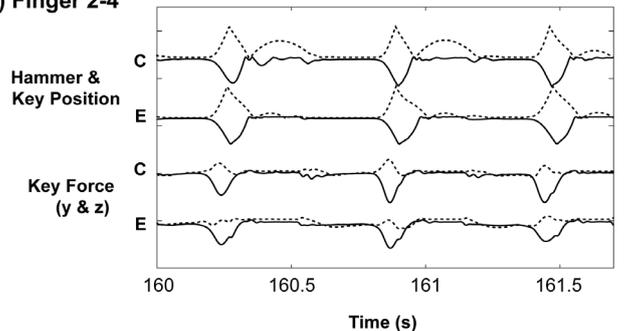


図5：3度の和音課題の結果

5. まとめと考察

本研究では、ピアノのアクション機構の動きや音量情報を実時間で視覚的にフィードバックすることによりピアノの練習を支援するシステムを実装し、その効果について実験的に検討した。その結果、まだ被験者数は3人に過ぎないが、本システムを利用することにより一定の練習効果があることが確かめられた。

現状では、センサで計測した信号値をそのままグラフとして提示しているだけで、利用者にとって必ずしも使いやすい情報が提供できているわけではない。今後、利用者の意見を参考に、提示する情報内容を加工し、より「気づき」を得やすいシステムとして改良を重ねていく必要がある。特に、利用者が練習しながら欲しい情報を自ら選択・加工して表示できるような機能をもたせることを検討していきたい。

4節で触れたように、本研究ではシステム利用の効果が明確でないケースがいくつか見受けられた。その原因の一つは上述した情報提供形態の問題である。例えば、今回の提供した情報だけからでは二つの打鍵の時間的關係性が読み取りにくく、音のタイミングを揃える課題や音の間隔を一定に保つ課題などを練習するうえで手がかりが得にくかったといえる。もう一つの原因は、利用者の習熟度に応じて学ぶ内容が異なることである。4.2節で述べたように、演奏指導の経験のない被験者では、表示された情報を利用して音の大きさを揃えることはできても、そこから一般的な「気づき」を得ることはなかった。このことは、「良い気づき」を得るには、利用者自身にそのための素地が必要であることを示唆している。

一方、4.3節でも触れたように、本検討を通じてあらためて示唆されたことは「演奏音を聴き分ける能力」の重要性である。演奏がうまくできているかどうかは本来聴覚によって判断されるものであり、習熟した演奏者は音の響きだけを頼りに自身の演奏をコントロールしている（実際、筆者が演奏家と会話する機会ではほとんどすべての演奏家が「耳で判断する」と話す）。それに対し、初級・中級の演奏者は、自身の演奏中に耳に入る音を聴きとる能力が十分でなく、音色の違いに気づけずにいる。音の違いに気づくことなく弾いているのでは練習を方向付けることができないことから、効果的な練習を行うには音色の違いを聴き分けられる能力の獲得が本質的と考えられる。特に、利用者が本システムに依存することなく自力で練習できるようになるうえで、このことはきわめて重要である。

4.3節で結果を示した被験者はシステムを利用したことで音をよく聴くようになったと答えている。このことは、本システムが、演奏動作そのものに関する「気づき」に加えて、「音をどのように聴けばよいか」とい

う聴覚に関する「気づき」をもたらしたことを意味している。さらに、このような「よく聴く」という構えや習慣は、いったん獲得してしまえば、システムがなくても継続的に働き続けると考えられる。例えば、音の粒を揃える練習を通じて音に対して適切に注意を向ける能力や習慣が身につけば、ペダルをコントロールする課題においても響きの違いに適切に注意を向けられるようになることが考えられる。すなわち、実際に練習した課題だけでなくその他の課題の練習をする際にも「聞き分ける能力・習慣」が汎化される可能性が考えられる。本システムを用いた練習にこのようなメタ学習の効果があるかどうかについては、今後さらなる検証が必要である。

なお、本研究を実施するにあたり、カワイサウンド技術・音楽振興財団から研究助成（「ピアノ演奏における複数鍵盤操作の關係性の解析およびそれに基づく練習支援システムの構築」）を受けた。この場を借りて謝意を表する。

文 献

- [1] 諏訪. 「こつ」と「スランプ」の研究 身体知の認知科学, 講談社, 2016.
- [2] 諏訪, 堀. 一人称研究のすすめ: 知能研究の新しい潮流, 近代科学社, 2016.
- [3] 阪口: 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, 日本認知科学会第35回大会論文集, OS06-6, 926-931, 2019.
- [4] 柏野, 持田, 井尻, 木村. 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一潜在脳機能に基づくスポーツ上達支援を目指して一, パイオメカニクス研究, 19, 230-239, 2015.
- [5] Matsumura, K. and Sakaguchi, Y.: 'Audializing' human movements for motor skill learning", *Proceedings of SICE Annual Conference*, 2312-2315, 2008.
- [6] Hour, N., Arita, H. and Sakaguchi, Y.: "Audializing body movement: Its concept and application to motor skill learning", *Proceedings of 2nd Augmented Human International Conference (AH-2011)*, No. A-13, 2011.
- [7] 上田, 竹川, 平田: ピアノ練習状況の可視化および気づきのアノテーション機能をもつ学習支援システムの設計と実装, 情報処理学会論文誌, 57, 2617-2625, 2016.
- [8] Parlitz, D., Peschel, T., and Altenmüller, E.: Assessment of dynamic finger forces in pianists: Effects of training and expertise," *Journal of Biomechanics*. 31, 1063-1067, 1998.
- [9] Kinoshita, H., Furuya, S., Aoki, T. and Altenmüller, E.: Loudness control in pianists as exemplified in keystroke force measurements on different touches, *Journal of Acoustical Society of America*, 121, 2959-2969, 2007.
- [10] フレッチャー, N.H., ロッシング, T.D. (岸, 久保田, 吉川訳) 楽器の物理学, 丸善出版, 2012.
- [11] 田柳, 平田, 竹川, 椿本: 音楽演奏熟達化研究への一人称物語記述手法の導入, 知識共創, 4, III5-1-10, 2014.