

ピアノ演奏スキルの解明 -ピアノ未経験者における 学習方法と学習効率に関する実験的検証-

三宅 祐美^{1,a)} 中村 あゆみ¹ 合田 竜志¹ 古屋 晋一² 巳波 弘佳¹ 長田 典子¹

概要: 本研究の目的は、4日間の継続的なピアノ訓練が、ピアノ未経験者の手指の巧緻運動機能に対してどのような影響を及ぼすかを明らかにすることである。この際、視覚的な教示が訓練効果を促進するかどうか、また訓練手の運動機能の向上が非訓練手に転移するかどうかをあわせて検討した。ピアノ未経験者に左手で特定の音列を一定のテンポで弾く訓練課題を行ってもらい、運動機能の向上を運動動作、筋電位、および MIDI データの観点から調べた。また視覚的な教示としてはテンポの正確性を提示し、運動機能の向上を促進するか検討を加えた。さらに訓練を行っていない右手にも運動機能の向上がみられるかどうか検証した。

1. はじめに

近年、デジタルピアノの普及などによって、手軽にピアノ演奏を楽しむことができるようになったが、ピアノ初学者にとってピアノの演奏技術を独学で向上させることは非常に困難なことである。そこで演奏を学習できるシステムやソフトウェアが多く提案されているものの、科学的に根拠のあるピアノ学習法は確立していない。正しい学習方法を確立できれば、ピアノ初学者の独習を効果的に支援するシステムの開発に役立つと考えられる。

ピアノの演奏技術を解明するために、ピアニストを対象とした研究がこれまでに数多くなされてきた [1][2]。青木らはピアニストとピアノ未経験者に各指による最速度でのタッピング動作を行わせた。その結果、ピアノ未経験者は薬指のタッピング速度が他の指より有意に遅かったのに対し、そのような指間の差異はピアニストでは認められなかった。これは、長期的なピアノ演奏訓練によって、指同士を独立に動かす機能が向上していることを示唆している。同様に、データグローブを用いてピアノ演奏時の手指運動を計測し、主成分分析と重回帰分析を行った結果、ピアニストは全ての指を同程度独立して動かせることが明らかとなった [3]。しかし、ピアノ演奏の訓練に伴って手指の

運動機能がどのように変化するかについては十分に検討されていない。

より素早く手指を動かすためには、運動関連脳領域をより多く賦活する必要があること、訓練効果の半球間転移が両側の運動関連脳領域間で起こるということが知られている [4]。また、Chiang らは1本の指だけが他の指と独立して力を発揮する訓練を4週間行わせた結果、指同士をより独立して力を発揮できるようになることを明らかにした。さらに、視覚的に指同士の独立の程度を被験者に教示を与えることが手指の独立運動機能の向上に有効であることが明らかとなった [5]。これら先行研究の結果に基づき、ピアノの演奏訓練に伴い、指の運動速度が向上する、訓練効果が訓練していない手にも転移する、さらには、動作のパフォーマンスについて学習者に視覚的に教示を与えることで学習効果が促進される、という仮説を立てた。

本研究の目的は、4日間の継続的なピアノ訓練により、ピアノ未経験者の手指の巧緻運動機能が向上するかを明らかにすることである。ピアノ未経験者に左手で特定の音列を一定のテンポで弾く訓練課題を行ってもらい、3次元空間での連続打鍵動作と訓練中の筋活動量の観点から、上肢運動制御方略に訓練が及ぼす影響を調べた。さらに、訓練課題に用いた音列の最速度および正確性の変化や、訓練効果が訓練に用いていない音列や非訓練手(右手)の運動機能に及ぼす影響も定量的に評価した。最後に、打鍵動作のテンポの正確性を視覚的に提示するインターフェースを作成することで、視覚フィードバックが訓練効果を促進するか検

¹ 関西学院大学
Kwansei Gakuin University

² ハノーファー音楽演劇大学
Hannover University of Music and Drama

a) yumi1225@kwansei.ac.jp



図 1 使用音列

討を行った。

2. 打鍵動作の計測と解析

2.1 実験参加者

実験参加者は、ピアノの学習経験のない 18 名（男性 16 名，女性 2 名，平均年齢 22.1 ± 1.2 歳，全員右利き）とした。本実験の参加者には，手順の説明を行いインフォームドコンセントを取得した。

2.2 実験方法と訓練課題

実験参加者は左手で訓練音列（図 1(A)）を 1 日 50 回打鍵する課題を，連続 4 日間実施した。その際，メトロノームを 1 分間あたり 60 拍（60BPM）に設定し，それに合わせて演奏した（打鍵間隔時間は 500ms）。実験参加者を 6 人ずつランダムに 3 群に分け，オフライン教示群には各試行終了後（図 2(a)），リアルタイム教示群にはリアルタイムで（図 2(b)），演奏テンポの正確性をグラフで教示した。訓練とは別に，音列の打鍵による運動機能テストを毎日実施した。テストは 4 種類あり，使用した音列は図 1 に示す通りである。(1) 左手で訓練音列をできるだけ速く弾く，(2) 左手で非訓練音列をできるだけ速く弾く（図 1(B)），(3) 右手で訓練課題と同じ指使いの反転音列をできるだけ速く弾く（図 1(C)），(4) 左手の示指，中指，薬指，小指による最速タッピングを行う（最速タッピング課題）。最速タッピング課題とは，4 本の指で鍵盤を押さえながら，残り 1 つの指で鍵盤をできるだけ速く打鍵するという課題である。

手指と腕に反射マーカを 27 個取り付け，同様のものを電子ピアノの鍵盤上に 5 個設置した。これらのマーカから運動動作を取得するために，13 台の高速度カメラによって構成されたモーションキャプチャシステム（MAC3DSYSTEM NAC.co）を用いて 120Hz で計測した。また，モーションキャプチャに同期して表面筋電位法を用い，浅指屈筋と総指伸筋の筋活動を 960Hz で取得した（原田電子工業）。同時に，電子ピアノ（P-250YAMAHA）をコンピュータと接続し，打鍵時刻と打鍵された鍵盤番号，打鍵音量を取得した（MIDI データ）。打鍵音量が一定（ヴェロシティ 90）になるよう実験者がリアルタイムにモニターを行った。リアルタイム教示群は MIDI データのみを取得した。

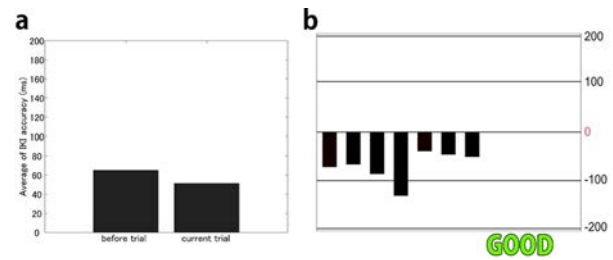


図 2 教示用グラフ

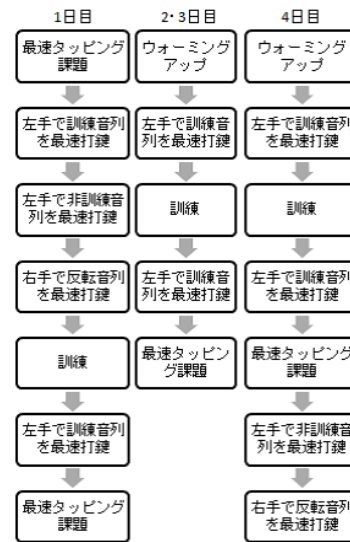


図 3 4 日間の実験手順

2.3 実験手順

実験参加者は訓練課題を 1 日 50 回，連続 4 日間実施し，その前後に前述の運動機能テストを実施した。各実験日に実施したテストおよびその実施手順を図 3 に示す。なお，2～4 日目では実験前にウォーミングアップとして訓練課題を 5 回打鍵してもらった。

また，教示なし群とオフライン教示群のみ学習効果の保持効果を評価するため，訓練実施 2 か月後に実験参加者から 8 名（男性 6 名，女性 2 名，平均年齢 22.5 ± 0.1 歳，全員右利き）に運動機能テストを 4 種類すべて実施した（保持テスト）。

2.4 データ解析

マーカから得られた運動動作のデータに関しては，訓練日ごとの 1～5 試行目と 46～50 試行目の示指，中指，薬指，小指における MCP，PIP，DIP 関節の平均角度を算出した。

筋電の値に関しては，訓練日ごとの 1～5 試行目と 46～50 試行目の総指伸筋と浅指屈筋の同時収縮量を算出した。

MIDI データのうちの打鍵時刻を用いて，訓練課題中のテンポの正確性を算出した。また，左手で訓練音列，左手で非訓練音列，右手で反転音列を打鍵した際と，最速タッピング課題の際の打鍵の最速度を算出した。

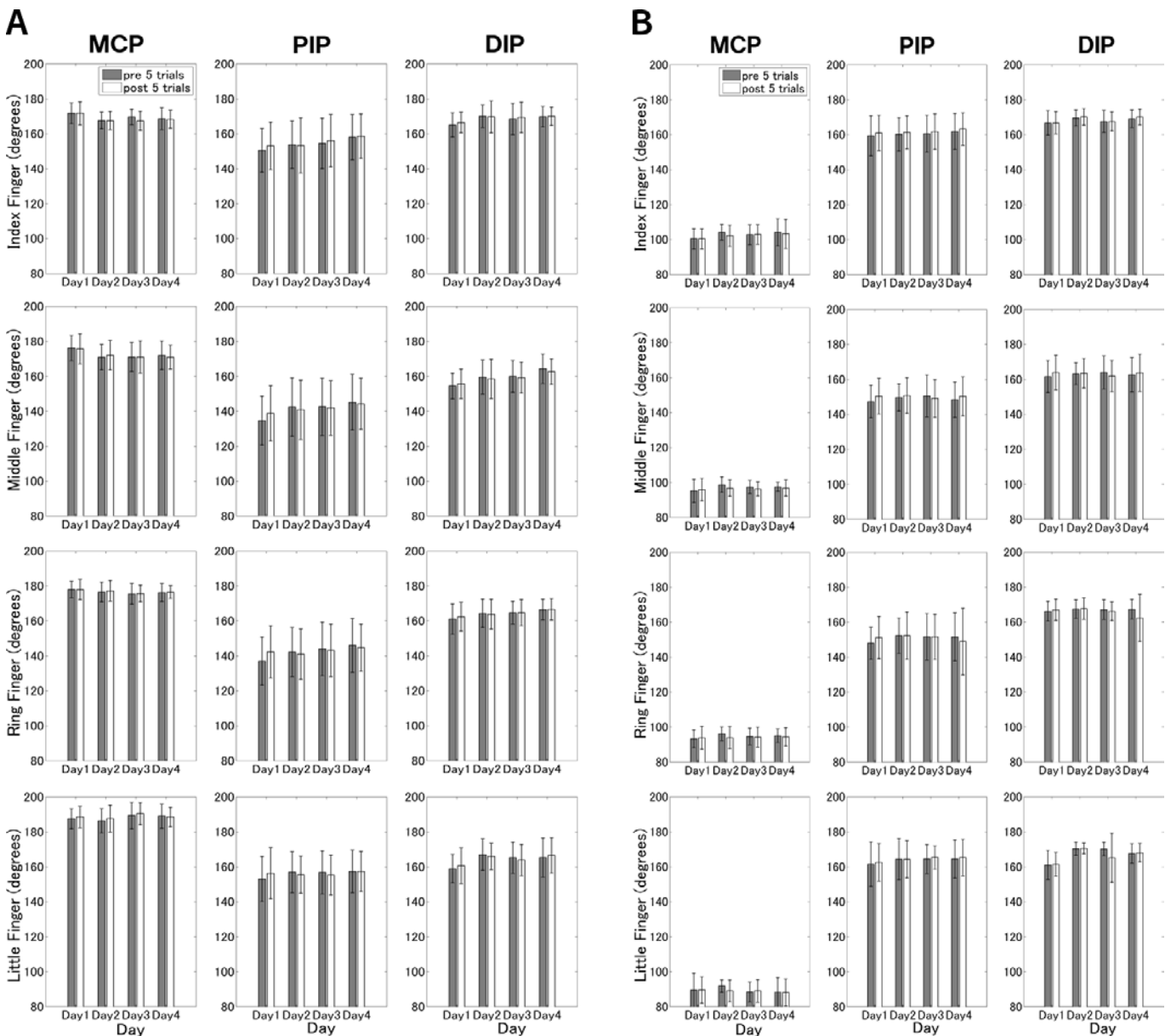


図 4 各関節の角度

3. 結果

3.1 キネマティクス

訓練課題を実施した4日間において、訓練課題中の示指、中指、薬指、小指におけるMCP、PIP、DIP関節の平均角度を図4のように求めた。図4(A)は教示なし群、図4(B)はオフライン教示群である。なお、リアルタイム教示群については運動動作および次節の筋活動のデータ計測を行っていない。2要因分散分析を行った結果、示指、中指、薬指、小指のMCP関節において群の主効果が、示指、中指、薬指のPIP関節、示指、中指、小指のDIP関節において訓練日の主効果が認められた。また、中指のMCP関節、PIP関節において訓練日と群の交互作用が認められた。群ごとに訓練日の効果について多重比較を行った結果、教示なし群において中指のMCP関節、示指、中指、薬指の

PIP関節、中指のDIP関節で有意な変化が見られた。中指のMCP関節の平均角度は全体的な傾向として訓練に伴って減少した。一方、示指、中指、薬指のPIP関節、中指のDIP関節の平均角度は増加した。なお、MCP関節の平均角度においては教示なし群よりオフライン教示群で一貫して小さな値を示した。

3.2 筋活動

訓練課題を実施した4日間において、訓練課題中の総指伸筋と浅指屈筋の同時収縮量を図5のように求めた。図4(a)は教示なし群、図4(b)はオフライン教示群である。2要因分散分析を行った結果、訓練日の主効果は認められたが、群の主効果は認められなかった。また、訓練日と群の間に交互作用は認められなかったが、群ごとに訓練日の効果について多重比較を行った。その結果、オフライン教示

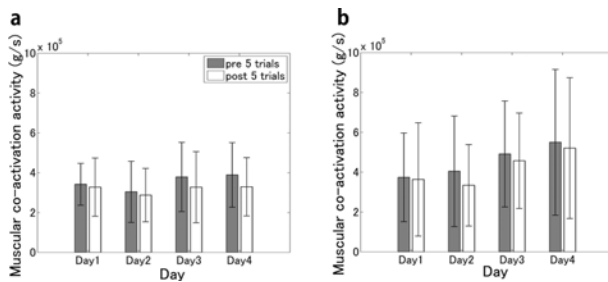


図 5 訓練中の同時収縮量の平均値

群において 1 日目の訓練前と 4 日目の訓練前において有意差が認められた。教示すると訓練に伴って、同時収縮量が増加したことが明らかとなった。

3.3 MIDI

3.3.1 最速打鍵

図 6(a-1), (a-2), (a-3) に教示なし群, オフライン教示群, リアルタイム教示群の打鍵の最速度の 4 日間の平均値の推移を示す。図において, (a-1) は左手で訓練音列をできるだけ速く打鍵した場合, (a-2) は左手で非訓練音列をできるだけ速く打鍵した場合, (a-3) は右手で訓練課題と同じ指使いの反転音列をできるだけ速く打鍵した場合の打鍵間隔時間 (Inter-keystroke interval:IKI) の平均値である。繰り返しのある 2 要因分散分析を行った結果, これらすべての変数に関して訓練日の主効果が認められたが, 群の主効果は認められなかった。また, 訓練日と群の交互作用は認められなかった。さらに群ごとに訓練日の効果について多重比較を行った結果, これらすべてに関して 1 日目の訓練前とそれ以外全てにおいて有意差が認められた。これは, 訓練による効果が訓練手と非訓練手の両方に見られ, 訓練音列に限れば, 初日の練習によって既に効果が生じていたことを示している。

3.3.2 テンポ正確性

図 6(b) に各群における訓練課題中のテンポの正確性の平均値の推移を示す。繰り返しのある 2 要因分散分析を行った結果, 群の主効果が認められたが, 訓練日の主効果は認められなかった。また, 訓練日と群の間に交互作用は認められなかった。さらに群に関して, 訓練日ごとに多重比較を行った結果, 1 日目の訓練後, 2 日目の訓練後, 3 日目の訓練前, 3 日目の訓練後で, それぞれ群間に有意差が認められた。教示なし群は他 2 群に比べて, 有意に正確性が低かった。これは, 演奏中のテンポの正確性を教示することによって, テンポの正確性が向上したことを示している。

3.3.3 独立運動機能

図 6(c) に各群における最速タッピング課題の最速度の平均値の推移を示す。図において, (c-1) は中指, (c-2) は小指でできるだけ速く打鍵した場合の IKI の平均値である。繰り返しのある 2 要因分散分析を行った結果, 訓練日の主効果が認められたが, 群の主効果は認められなかった。ま

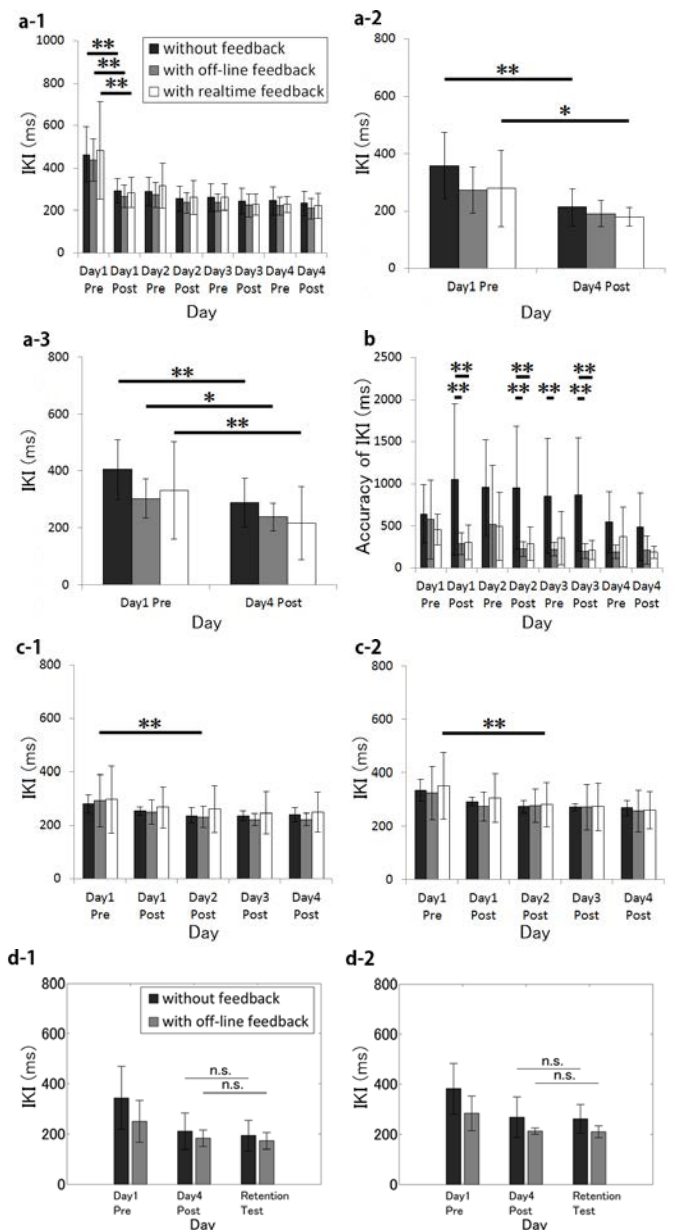


図 6 MIDI 解析結果

た, 訓練日と群の間に交互作用は認められなかった。さらに各群ごとに訓練日の効果を調べたところ, オフライン教示群は示指, 中指で, リアルタイム教示群は薬指, 小指でそれぞれ訓練日に有意差が認められた。例えば, 図 6(c-2) に示すように, 1 日目の訓練前と比較して 2 日目以降の訓練後の IKI が有意に小さく, 打鍵速度が速かった。有意差の見た他の指でも同様の傾向が見られており, これは演奏中にテンポの正確性を教示することによって, 独立運動機能が向上したことを示している。

3.3.4 保持テスト

図 6(d-1), (d-2) は, 教示なし群とオフライン教示群の 1 日目の訓練前, 4 日目の訓練後, 2 ヶ月後の保持テストにおける打鍵間隔時間の平均値である。一例として, (d-1) は左手で非訓練音列をできるだけ速く打鍵した場合であり, (d-2) は右手で訓練課題と同じ指使いの反転音列をできる

だけ速く打鍵した場合である。保持テストの結果、全ての運動機能テストにおいて、4日目の訓練後と保持テストの間に有意差は認められなかった。すなわち、訓練効果は訓練終了2か月後も保持されることが明らかになった。

4. 考察

4.1 キネマティクス

本研究の結果、教示なし群において中指のMCP関節の平均角度は訓練に伴って減少した。一方、示指、中指、薬指のPIP関節、中指のDIP関節の平均角度は増加した。先行研究では、プロピアニストは近位関節を効果的に用いることで、筋の疲労を軽減するという生理学的効率の高い運動技能を獲得しているということが報告されている[6]。したがって、本研究の結果、訓練に伴いより遠位であるDIP関節よりもより近位であるMCP関節を大きく動かすという、打鍵動作の効率を促進するような上肢運動制御方略の変化が起きたことが示された。また、MCP関節の平均角度において教示なし群よりオフライン教示群の方が一貫して小さな値を示した。教示をすることによって演奏する際の手のフォームが変わることが明らかとなった。

4.2 筋活動

本研究の結果、教示なし群の総指伸筋と浅指屈筋の同時収縮量は訓練に伴う変化はみられず、一方、オフライン教示群では増加した。先行研究では、手指の筋収縮量が增大すると打鍵動作の正確性が増すということが報告されている[7]。オフライン教示群はテンポの正確性を高めるために、筋の収縮量を増大させたと考えられる。しかし、筋の同時収縮量が增大すると、筋肉が疲労し無駄な筋肉の働きが大きくなるため、故障の原因になりうるということが報告されている[8]。したがって、本研究の結果、テンポの正確性を教示することにより正確な打鍵を促す一方、動作を必要以上に正確にしようとするに繋がり、手指の故障をまねく可能性があるということが明らかになった。

4.3 MIDI

4.3.1 最速打鍵

本研究の結果、左手による訓練音列と非訓練音列、右手による反転音列のいずれにおいても、最速打鍵の打鍵間隔時間が訓練に伴って減少した。これらの結果は、ピアノ未経験者の訓練手と非訓練手の指の運動速度は一定テンポでの短期訓練によって向上することを示している。

先行研究では、非利き手の指をできるだけ速く動かす訓練を5週間にわたり実施したところ運動速度と正確性が向上したと報告されている[9]。しかし、一定のテンポでの手指運動訓練が、運動速度に及ぼす影響はこれまでに検討されてこなかった。本実験は新たに、一定のテンポでの短期訓練が非利き手および利き手の運動速度の向上に寄与する

ことを明らかにした。

また、先行研究により、手指の運動関連脳領域の大きさと手指の運動速度の間に正の相関があること[10]、音楽訓練により手指運動時の脳賦活量の効率化が進むことが知られている[11]。したがって、本研究の結果、ある一定のテンポで手指を動かす際に必要となる運動関連脳領域の賦活量が減少したために、最速動作時に余剰に動員できる神経細胞の数が増え、非利き手の最速度が向上したと推察される。

片手による最速度の指運動訓練の結果、非訓練手の運動機能も向上し、訓練手と同側の一次運動野と運動前野の賦活量も増大することが報告されている[4]。したがって、本研究で述べた一定テンポによる訓練後の非訓練手の運動機能の向上は、同側の運動関連脳領域の機能的変化によるものであることが示唆された。

4.3.2 テンポの正確性

本研究の結果、訓練中に打鍵テンポの正確性を視覚的に教示することにより、打鍵動作の正確性が向上するということが示された。テンポの正確性を教示した群は、あらかじめ試行ごとに演奏テンポの正確性を教示すると指示されている。そのため自分の打鍵運動の正確性に注意が向いた結果、教示なし群に比べて高い正確性が得られたと推察される。しかし、オフライン教示群とリアルタイム教示群では打鍵動作の正確性に違いは見られなかった。

4.3.3 独立運動機能

本研究の結果、最速タッピング課題における打鍵間隔時間は、オフライン教示群では示指と中指、リアルタイム教示群では薬指と小指で訓練日による差異が認められた。これらの結果から、ピアノ未経験者が短期間訓練をすると、試行の終了後に演奏テンポの正確性を教示すると示指、中指の独立運動機能が向上し、リアルタイムで教示すると薬指、小指の独立運動機能が向上するということが示唆された。

先行研究により、熟練ピアニストはピアノ未経験者に比べて指が独立して動くということが知られている[3]。これは熟練ピアニストは長年の訓練によって、打鍵時の一次運動野と二次運動野の賦活量がピアノ未経験者より小さいため、効率良く指を動かすことが一因であると考えられている[11]。本研究により、ピアノ未経験者による訓練が指の独立運動機能に与える影響が明らかになり、ピアノ未経験者が短期間の訓練によって脳の賦活量が小さくなったということが示唆された。

4.3.4 訓練効果の保持

保持テストの結果、4日目の訓練課題後と2か月後の保持テストで手指の運動機能の差異が認められなかった。これらの結果から、訓練終了後も訓練効果は保持されること

が示唆された。先行研究において、非利き手による指運動訓練を実施した際と8週間後に脳の運動関連領域の賦活量に差異が認められないことが報告されている[9]。本実験によりさらに短い期間の訓練であっても、効果が長期間に渡り保持されることが示唆された。

5. おわりに

本研究では、4日間におよぶピアノ訓練がピアノ未経験者の手指巧緻運動機能に及ぼす影響を明らかにするため、ピアノ未経験者に左手で決まった音列を一定のテンポで弾く訓練課題を行ってもらいその訓練効果を検証した。その結果、打鍵動作の効率を促進するような上肢運動制御方略の変化、訓練手と非訓練手での指運動の最速度の向上、および訓練効果の長期間に渡る保持が認められた。これらは単純な音列を用いた継続的なピアノ演奏訓練が初学者の手指運動機能を高めるのに有効な学習方法であることを示唆している。なお、教示の有無にかかわらず、一連の手指運動機能の上達速度に差異は認められなかった。この結果は例えば、視覚的な教示を与えることが指の独立運動機能向上に有効であるという先行研究の結果と一致しなかった[5]。その原因として、本研究で行った正確性に関する教示は運動機能との関連性が低く、そのため運動機能の向上に影響を及ぼさなかったと考えられる。それどころか、教示を与えると、打鍵動作を必要以上に正確にしようとするあまり、手指の故障をまねく可能性があることが示されており、独習を支援するシステムの設計においては機能の選定に細心の注意を払う必要があることが示唆された。

今後は他の教示法も試み、手指巧緻運動機能をより効果的・効率的に向上させる学習や訓練の方法論について検討を進め独習システムの開発を進めていく。

参考文献

- [1] Munte, T. et al.: The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nat Rev Neurosci*, 3-6, 473/478 (2002)
- [2] 古屋晋一: ピアニストの脳を科学する 超絶技巧のメカニズム, 春秋社 (2012)
- [3] Aoki, T. and Furuya, S. and Kinoshita, H.: Fingertapping ability in male and female pianists and nonmusician controls, *Motor Control*, 9-1, 23/39 (2005)
- [4] Hund-Georgiadis, M. and Yves von Cramon, D.: Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals, *Exp Brain Res*, 125, 417/425 (1999)
- [5] Chiang H et al.: Practice-related modulations of force enslaving and cortical activity as revealed by EEG, *Clin Neurophysiol*, 115-5, 1033/1043 (2004)
- [6] Furuya, S. et al.: Distinct interjoint coordination during fast alternate keystrokes in pianists with superior skill, *Frontiers in Human Neuroscience*, 5-50 (2011)
- [7] Gribble, P.L. et al.: Role of Cocontraction in Arm Movement Accuracy, *J Neurophysiol*, 89, 2396/2405 (2003)
- [8] Myers, J. B. et al.: Proprioception and neuromuscular control of the shoulder after muscle fatigue, *J Athl Train*, 34-4, 362/367 (1999)
- [9] Karni, A. et al.: The acquisition of skilled motor performance: Fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 861/868 (1998)
- [10] Amunts, K.: Motor Cortex and Hand Motor Skills: Structural Compliance in the Human Brain, *Human Brain Mapping*, 5, 206/215 (1997)
- [11] Jancke, L.: The plastic human brain, *Restor Neurol Neurosci*, 27-5, 521/538 (2009)