

ピアノ演奏スキルの解明

—ピアノ未経験者の短期訓練による学習効果の実験的検証—

中村 あゆみ*・古屋 晋一**・合田 竜志*
巳波 弘佳*・長田 典子*

Effect of Short-term Piano Practice on Fine Control of Finger Movements by the Beginner Pianists

Ayumi NAKAMURA*, Shinichi FURUYA**, Tatsushi GODA*,
Hiroyoshi MIWA* and Noriko NAGATA*

The purpose of the present study was to assess effects of daily piano practice on speed and accuracy. When they were asked to play the trained tone sequence as fast and accurately as possible, the maximum rate of keystrokes increased after the practice, indicating enhancement of finger movement speed. This was also the case when playing an untrained tone sequence with the left hand and untrained right hand as fast as possible. A retention test, being performed two months after the final practice session, revealed no apparent deterioration of the hand motor functions, suggesting robustness of motor memory acquired through the piano practice. Finally, provision of visual feedback regarding rhythmic accuracy of keystrokes facilitated the movement accuracy, which implicates a potential of the augmented feedback for improving piano performance.

Key Words: motor learning, music education

1. はじめに

芸術、スポーツ、ものづくりなど多様な分野において、熟練動作の獲得過程の解明が注目を集めている。熟練動作の獲得には運動制御、感覚統合、脳神経系、表象・言語、メタ認知などさまざまな機能がかかわっており、未だ解明されていないことが多い。こうした人間の熟練動作にかかわるメカニズムを明らかにすることは、学習・訓練・教育の支援、あるいは各種メディア生成・ヒューマンマシンインタフェースの向上に役立つと考えられる。

ピアノ演奏はその中でも長期間にわたる訓練の賜物として得られる、卓越した熟練動作である。そのため、手指の巧緻運動機能の背景にある身体運動制御の仕組みを解明するために、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)}。たとえば、熟練度の異なるピアニストを比較した結果、指の独立運動機能はプロピアニストのほうがアマチュ

アピアニストやピアノ未経験者よりも高いことが知られている^{3),4)}。Aokiらはプロピアニストとピアノ未経験者に各指で最速度でのタッピング動作を行なわせた。その結果、ピアノ未経験者は薬指のタッピング速度がほか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プロ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なった結果、プロピアニストはすべ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⁵⁾。しかしながら、これらの研究は、プロピアニストとピアノ未経験者とのスキルの差異に関して検討したものであり、ピアノ未経験者がプロピアニストのような手指の運動機能を獲得する過程、手指の運動機能を効果的・効率的に獲得する正しい訓練方法はこれまでに一切検討されていない。熟練動作を獲得するための正しい訓練方法を確立することは、科学的なピアノ教育法を確立するためにも、ピアノ学習を支援するためのインタフェースを作成するためにも必要不可欠である。

Chiangらは1本の指だけがほかの指と独立して力を発揮する訓練を4週間行なわせた結果、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⁶⁾。さらに、視覚的に指同士の独立の程度を被験者に提示した結果、視覚指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

* 関西学院大学理工学研究科 三田市学園 2-1

** ハノーファー音楽演劇大学音楽生理学・音楽家医学研究所
ドイツ連邦共和国

* Graduate School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University, 2-1 Gakuen, Sanda

** Institute for Music Physiology and Musicians' Medicine, Hannover University of Music and Drama, Germany

(Received November 21, 2012)

(Revised March 7, 2013)

とが明らかとなった。また、プロピアニストとピアノ未経験者に 35 分間におよぶ指運動訓練をさせ、その際の手指の動きと脳活動の変化を調べた研究によると、訓練中の指運動速度の増大に伴い、訓練手と対側の運動関連脳領域の賦活量が增大することが明らかとなった⁷⁾。これは、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ことが必要であることを示唆している。さらに、訓練後、非訓練側の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したことから、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ったことが示唆された。これら先行研究の結果に基づき、ピアノ訓練に伴い、指の運動速度が向上すること、訓練効果が訓練していない手にも転移すること、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仮説を立てた。

本研究の目的は、4 日間におよぶピアノ訓練により、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なってもらい、その結果、訓練課題に用いた音列の最速度および正確性の変化を調べた。先行研究とプレ実験に基づき、期間を 4 日間とし、実験時間が 2 時間程度になるように実験計画を立てた⁸⁾。訓練課題は、非利き手の示指、中指、薬指、小指の 4 本の指から 2 本の指を選ぶすべての組み合わせを含む単純な音列とした。また、感情などほかの要素が結果に影響を及ぼす可能性を排除するため、メロディーを成さない単純な音列を訓練課題とした。さらに、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訓練後に被験者に視覚的に提示するインタフェースを作成することで、視覚フィードバックが訓練による手指巧緻運動機能の向上を促進するか検討を加えた。

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 12 名(男性 10 名、女性 2 名、平均年齢 22.4 ± 1.2 歳、全員右利き)とした。本実験の参加者には、手順の説明と書面によるインフォームドコンセントを行なった。本研究の実施は、関西学院大学における倫理委員会によって承認された。

2.2 実験方法と訓練課題

実験装置はタッチレスポンス・アクション式のデジタルピアノ(P-250 YAMAHA co.)を使用し、打鍵の MIDI データを取得した。MIDI データとは、打鍵時刻、ノートナンバー(音高)、打鍵速度(ヴェロシティ)に関する情報を含む。ヴェロシティは 1~127 で表わされ、127 が最も大きい音量を表わす。

実験参加者は Fig. 1(A) に示す音列(訓練課題)を左手で打鍵した。その際、メトロノームを 1 分間あたり 60 拍(60 BPM)に設定し、それに合わせて演奏した(打鍵間隔時間は 500 ms)。



Fig. 1 (A) The scores displayed for practice with the left hand, (B) untrained tone sequence played with the left hand, (C) tone sequence played with the untrained right hand. Numbers below each score indicate fingering (1, 2, 3, 4, and 5 corresponds to the thumb, index, middle, ring, and little finger, respectively)

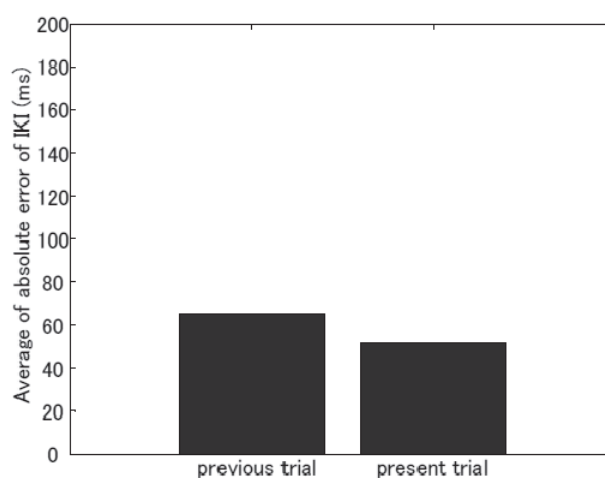


Fig. 2 A graph displayed as a visual feedback regarding temporal accuracy of keystrokes. Vertical axis indicates the average of absolute error of the inter-keystroke interval between each participant and metronome (500 ms) within a trial. A left and right bar indicates accuracy of the previous and present trial, respectively

また、訓練課題時の音量はヴェロシティ 90 を目安とし、試行中に大きく基準値から外れないように実験者がリアルタイムでモニターした。基準値から ± 10 ヴェロシティ以上外れた場合には、その試行を再度実施してもらった。実験参加者を 6 名ずつランダムに 2 群に分け、各試行終了後、一方の群(正確性教示群)にのみ演奏テンポの正確性をグラフで教示した(Fig. 2)。なお、テンポの正確性は以下の式を用いて算出した。

$$y_{FB} = \frac{\sum_{i=1}^{11} (|IKI_i - 500|)}{11} \quad (1)$$

ここで、パラメータ IKI_i は訓練課題の i 番目の打鍵間隔時間(Inter-keystroke interval: IKI)を表わす。訓練課題は 12 打鍵を伴う音列であるため、11 個の打鍵それぞれの IKI 値に対して理想の打鍵間隔時間(500 ms)との差分の絶対値の平均を算出した。

実験参加者は訓練前後に三つの運動機能テストを実施した。すなわち、(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 (Fig.1(B)) をできるだけ速く弾く, (3) 右手で訓練課題と同じ指使いの鏡像音列 (Fig.1(C)) をできるだけ速く弾く.

2.3 実験手続き

実験参加者は訓練課題を1日50回, 連続4日間実施し, その前後に運動機能テストを実施した. Fig.3に実験手続きを示す. なお, 2~4日目は, 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.

学習効果の保持効果を評価するため, 訓練実施2か月後に実験に参加した中から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実施した(保持テスト).

2.4 データ解析

訓練課題中のテンポの正確性は, 訓練日ごとの1~5試行目と46~50試行目について, それぞれ以下の(2)式により算出した.

$$y_{tempo} = \sum_{i=1}^{11} (|IKI_i - 500|) \tag{2}$$

また, 左手で訓練音列, 左手で非訓練音列, 右手で鏡像音列を打鍵した際の打鍵の最速度を解析するため, それぞれの試行について以下の(3)式により算出した.

$$y_{speed} = \frac{\sum_{i=1}^n IKI_i}{n} \tag{3}$$

ここで, n はそれぞれの試行の打鍵間隔の総数を表わす. よって左手で訓練音列, 右手で訓練課題と同じ指使いの鏡像音列を打鍵した際には $n = 11$, 左手で非訓練音列を打鍵した際には $n = 6$ として計算した.

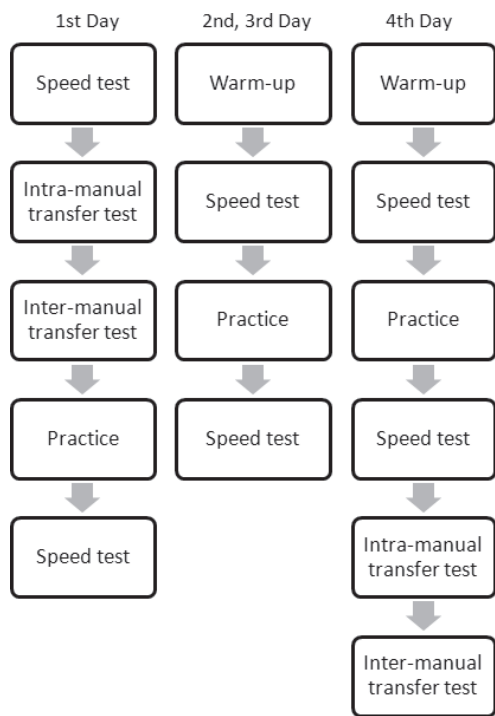


Fig.3 The flow chart of experimental procedure during successive 4 days

2.5 統計

群内の比較には, 訓練日(群内因子)と教示の有無(群間因子)を独立変数, 打鍵にかかわる諸変数を従属変数として繰り返しのある2要因分散分析(ANOVA)を行なった. 多重比較にはニューマン・クルズの検定を用い, 有意水準を $p < 0.05$ とした.

3. 結果

3.1 訓練による指運動の最速度の変化

Fig.4(A), (B), (C)に4日間の打鍵の最速度の被験者間平均値の推移を示す. 図において, (A)は左手で訓練音列をできるだけ速く打鍵した場合, (B)は左手で非訓練音列をできるだけ速く打鍵した場合, (C)は右手で訓練課題と同じ指使いの鏡像音列をできるだけ速く打鍵した場合の平均値である. 繰り返しのある2要因分散分析を行なった結果, 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効果は認められなかった (Table 1).

さらに訓練日に関して多重比較を行なった結果, これらすべての変数に関して, 1日目の訓練前とそれ以外すべてにお

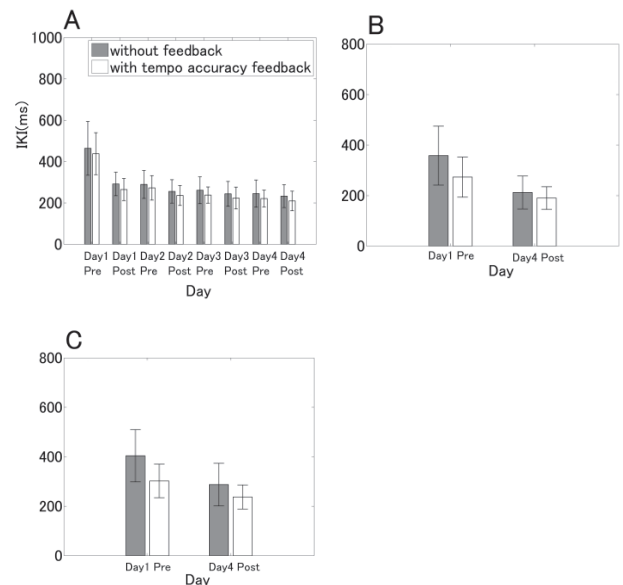


Fig.4 Changes in the inter-keystroke interval during the fastest performance with practice. (A) The trained tone sequence with the left hand, (B) The untrained tone sequence with the left hand, (C) The trained sequence with the untrained right hand

Table 1 Results of ANOVA

Variable	Practice	Group	Practice × Group
Pre- and post-test			
Speed test	$F(7, 70) = 57.87^{**}$	$F(1, 10) = 0.45$	$F(7, 70) = 0.03$
Intra-manual transfer test	$F(1, 10) = 31.82^{**}$	$F(1, 10) = 1.63$	$F(1, 10) = 2.40$
Inter-manual transfer test	$F(1, 10) = 32.90^{**}$	$F(1, 10) = 3.07$	$F(1, 10) = 2.65$
Accuracy of keystrokes	$F(7, 70) = 2.04$	$F(1, 10) = 5.01^*$	$F(7, 70) = 1.74$
Retention test			
Speed test	$F(2, 12) = 17.53^{**}$	$F(1, 6) = 0.04$	$F(2, 12) = 1.15$
Intra-manual transfer test	$F(2, 12) = 14.08^{**}$	$F(1, 6) = 0.84$	$F(2, 12) = 1.46$
Inter-manual transfer test	$F(2, 12) = 14.95^{**}$	$F(1, 6) = 2.13$	$F(2, 12) = 0.78$

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

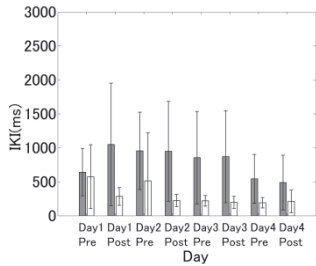


Fig. 5 Changes in the rhythmic accuracy of keystrokes during the training session over the four successive days

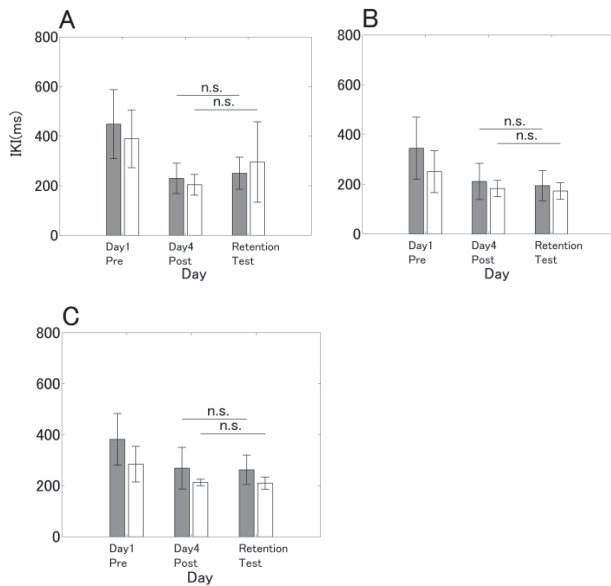


Fig. 6 Changes in the inter-keystroke interval during the fastest performance with practice. (A) (Retention test) The trained tone sequence with the left hand, (B) (Retention test) The untrained tone sequence with the left hand, (C) (Retention test) The trained sequence with the untrained right hand

いて有意差が認められた。これは、訓練手と非訓練手の指の運動速度が、初日の訓練によってのみ向上したことを示唆している。

3.2 教示による訓練中のテンポ正確性への影響

Fig. 5 に 4 日間の訓練課題中のテンポの正確性の被験者間平均の推移を示す。繰り返しのある 2 要因分散分析を行なった結果、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効果は認められなかった (Table 1)。群に関して多重比較を行なった結果、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。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唆している。

3.3 訓練効果の保持

Fig. 6 は、1 日目の訓練前、4 日目の訓練後、2 か月後の保持テストにおける打鍵間隔時間の被験者間の平均値である。(A) は左手で訓練音列をできるだけ速く打鍵した場合、(B) は

左手で非訓練音列をできるだけ速く打鍵した場合、(C) は右手で訓練課題と同じ指使いの音列をできるだけ速く打鍵した場合の平均値である。

繰り返しのある 1 要因分散分析を行なった結果、すべ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示唆された。

4. 考 察

4.1 訓練による指運動の最速度の変化

本研究の結果、左手による訓練音列、左手による非訓練音列、右手による訓練と同じ指使いの音列を最速打鍵した際の打鍵間隔時間は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唆している。さらに、左手の最速度は初日の演奏後にのみ向上したことから、訓練の効果が演奏速度に及ぼす影響は日間で一様ではないことが示された。

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、一定のテンポでの短期手指運動訓練が、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。左手の最速度は初日の演奏後にのみ向上したことに関しては、今回の実験課題が容易すぎた、あるいは難しすぎたことが原因と推察される。今後は、ピアノ未経験者に適した実験課題の検討を行なう必要がある。

先行研究により、手指の運動関連脳領域の大きさや手指の運動速度の間に正の相関があることが報告されている¹⁰⁾。また、機能的核磁気共鳴画像を用いた研究によると、プロピアニストが複雑な手指動作を行なう際、脳の運動関連脳領域の賦活量はピアノ未経験者よりも少ないことが知られており、これは音楽訓練により手指運動時の脳賦活量の効率化が進んだと考えられている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。

それに加え、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⁷⁾。したがって、本研究で報告された、一定テンポによる訓練の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。

ピアノ訓練と手指の運動機能の関係について、本研究では短期間におよぶ一定のテンポでの訓練と打鍵の最速度の変化の関係を新たに見出した。両者の因果関係を明らかにするにはさらなる実験が必要である。

4.2 教示による影響

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。

一方、教示の有無にかかわらず、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、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い⁶⁾。その原因として、一つは正確性に関する教示が対象とする運動機能によって異なる影響を及ぼすことが考えられる。もう一つは、今回の実験では、試行実施中ではなく試行が終わるごとにテンポの正確性について教示を与えたために効果が得られなかった可能性がある。今後は、トライアル中にリアルタイムでテンポの正確性について教示を与え、その効果を検証するなど、効果的かつ効率的な教示方法を解明することにより、ピアノ学習支援インタフェースの開発を目指す。

4.3 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⁾。本実験により短期間の訓練であっても効果が長期間にわたり保持されることが示された。

5. む す び

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なってもらい、その訓練効果を検証した。その結果、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わたる保持が認められた。これらは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ことを示唆している。しかしながら、テンポの正確性に関する教示を与えると学習に伴う手指運動機能の向上が促進されるという仮説は支持されなかった。ただしピアノ初学者が正確性へ注意を向けることの意義は示された。

ピアノ初学者の訓練に伴う手指運動機能の向上過程を定量化した本研究結果は、ピアノスキルの客観的指標の作成への貢献が期待できる。また、熟達支援という形で音楽教育への有益な情報を提供する。

今後はほかの教示法も試み、手指巧緻運動機能をより効果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ていく。

参 考 文 献

- 1) T. Munte, E. Altenmuller and L. Jancke: 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) D. Parlitz, T. Peschel and E. Altenmuller: Assessment of dynamic finger forces in pianists: Effects of training and expertise, *J. Biomech.*, **31-11**, 1063/1067 (1998)
- 4) S. Furuya, M. Flanders and J. Soechting: Hand kinematics of piano playing, *Journal of Neurophysiology*, **106-6**, 2849/2864 (2011)
- 5) T. Aoki, S. Furuya and H. Kinoshita: Finger-tapping ability in male and female pianists and no musician controls, *Motor Control*, **9-1**, 23/39 (2005)
- 6) H. Chiang, S.M. Slobounov and W. Ray: Practice-related modulations of force enslaving and cortical activity as revealed by EEG, *Clin. Neurophysiol.*, **115-5**, 1033/1043 (2004)
- 7) M. Hund-Georgiadis and D. Yves von Cramon: Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals, *Exp. Brain Res.*, **125**, 417/425 (1999)
- 8) A. Pascual-Leone, N. Dang, L.G. Cohen, J.P. Brasil-Neto, A. Cammarota and M. Hallett: Modulation of muscle responses evoked by Transcranial Magnetic Stimulation during the acquisition of new fine motor skills, *Journal of Neurophysiology*, **74-3**, 1037/1045 (1995)
- 9) A. Karni, G. Meyer, C. Rey-Hipolito, P. Jezzard, M.M. Adams, R. Turner and L.G. Ungerleider: The acquisition of skilled motor performance: Fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **95-3**, 861/868 (1998)
- 10) K. Amunts, G. Schlaug, L. Jancke, H. Steinmetz, A. Schleicher, A. Dabringhaus and K. Zilles: Motor Cortex and Hand Motor Skills: Structural Compliance in the Human Brain, *Human Brain Mapping*, **5-3**, 206/215 (1997)
- 11) L. Jancke, N.J. Shah and M. Peters: Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists, *Cognitive Brain Research*, **10-1-2**, 177/183 (2000)

[著 者 紹 介]

中 村 あゆみ



2012年関西学院大学理工学部情報科学科卒業。同年同大学院理工学研究科情報科学専攻博士前期課程、現在に至る。音楽演奏科学の研究に従事。

古 屋 晋 一 (正会員)



2008年大阪大学大学院医学系研究科博士課程修了。同年関西学院大学理工学研究科博士研究員。2009年ミネソタ大学神経科学部研究員、2011年ハノーファー音楽演劇大学音楽生理学・音楽家医学研究所研究員。音楽演奏科学の研究に従事。博士(医学)。

合 田 竜 志



2012 年関西学院大学大学院理工学研究科情報科学専攻博士前期課程修了。音楽演奏科学の研究に従事。

巳 波 弘 佳



1992 年東京大学理学部数学科卒業。同年 NTT 入社。通信ネットワーク設計・制御・性能評価、およびグラフ理論・最適化理論とその応用に関する研究開発に従事。2002 年関西学院大学理工学部情報科学科専任講師，2006 年同助教授，2012 年同教授。数理工学の研究に従事。博士（情報学）。

長 田 典 子



1983 年京都大学理学部数学系卒業。同年三菱電機（株）入社。産業システム研究所などで産業計測機器の研究開発に従事。96 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。2003 年関西学院大学理工学部情報科学科助教授，2007 年同教授。2009 年 Purdue 大学客員研究員。感性情報学，メディア工学の研究に従事。博士（工学）。

.....