

新規脳機能計測システムに基づく感覚運動情報統合の脳内機構解明

Specialized somatosensory-motor integration function in expert pianists

2181022



研究代表者	上智大学	特別研究員	平野 雅人
共同研究者	株式会社 ソニーコンピュータサイエンス研究所	リサーチャー	古屋 晋一

[研究の目的]

生物は、センサからのフィードバック (FB) 情報を用いて、様々な環境に適応する。特に人間は、感覚器からの FB 情報を高速度かつ高精度に処理し、得られた自身と外界の情報を筋肉への運動指令へ統合することで、音楽演奏のようなスピードと正確性の両方を要求される高度な運動を制御・獲得する能力を備えている。実際、感覚に障害が生じると精緻な運動の制御能力や運動学習能力が低下すると報告されている (Rothwell et al. 1982; Yousif et al. 2015)。また、高度な運動能力を有するアスリートや音楽家では、大脳皮質の運動野のみならず、感覚野にも可塑的な変化が生じる (Hirano et al. 2014; Murakami et al. 2008)。しかし、処理された FB 情報を制御指令へと統合するための感覚運動統合機能に関して、運動スキルのトレーニングによってどのように発達し、それが行動にどのように作用するのかは未だ明らかでない。人間が持つ高度な情報処理機構を理解することは、効率的な運動学習法やリハビリテーション法の開発のみならず、人と協調して様々な作業を遂行できるロボットの開発や、BMI の機能向上に繋がり、人間と機械が調和する未来の実現に貢献できる。本研究では、手指の高度な運動能力を有するピアニストと一般健常成人を比較することで感覚運動統合機能の可塑的変化及びそ

の機能的意義を明らかにすることを目的として研究を行った。

[研究の内容, 成果]

1. 実験 1: 皮膚感覚 —— 運動統合機能

1.1. 被験者

健常ピアニスト 11 名、楽器演奏経験のない一般健常人 10 名が参加した。すべての実験は、上智大学の倫理審査委員会の承認を得て実施された。

1.2. 手法

1.2.1. 皮膚感覚刺激

皮膚感覚を提示するために、右示指の腹と遠位指節間関節上に一対のリング電極を配置し、定電流刺激装置 (Digitimer, DS7A) を用いて電気刺激 (1ms の矩形波) を与えた。刺激強度は感覚閾値の 3 倍とした。

1.2.2. 脳波計測

脳波の測定は、脳波計 (ANT Neuro, eego-sports) を用いて国際 10-20 法において一次体性感覚野周辺にあたる CP5 から計測を行った。サンプリングレートは 2 kHz で基準電極は Fz とした。電気刺激装置からのトリガ信号の時間を基準とし、トリガ前 50 ms からトリガ後 100 ms までの波形を記録し、300 回の加算平均処理を実施した。

1.2.3. 経頭蓋磁気刺激法 (TMS)

先に記録した電気刺激による脳波活動の早期成分のタイミング +2 ms 後に左一次運動野を TMS で刺激し、右第一背側骨間筋から運動誘発電位 (MEP) を測定した。当初、複数の筋から MEP を測定し筋協調構造を抽出する計画であったが、筋間の筋電量の基準化・各筋を支配する運動野の閾値・刺激強度などの問題により意味のある筋協調構造を抽出することが困難であったため、単一筋の MEP 計測に計画を変更した。電気刺激を与える試行と、与えない試行を各 15 試行ずつ実施し、それぞれ MEP の振幅を測定した。

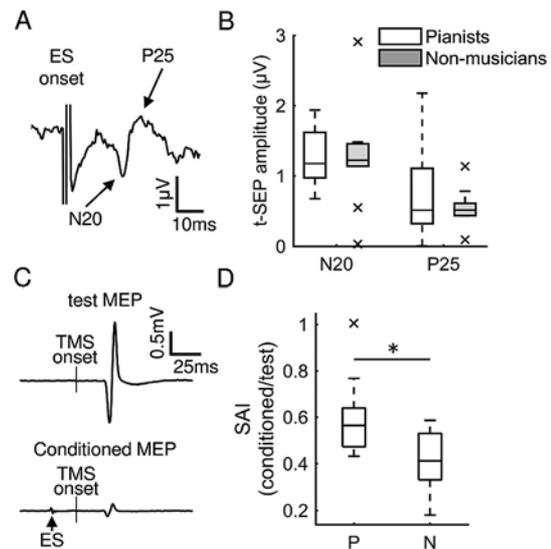
1.2.4. 運動課題

最速度タッピング課題を被験者に実施させた。フォースプレートの上に5指を置き、右示指で出来るだけ速くタッピングを実施するように教示した。

1.3. 結果と考察

右示指への電気刺激に対する感覚閾値は一般健常成人と比較してピアニストの方が低かった (ピアニスト: 0.66 ± 0.06 mA, 一般健常成人: 0.84 ± 0.04 mA, $t=2.32$, $p<0.05$)。電気刺激の提示後、約 20 ms 後 (N20) と約 25 ms 後 (P25) に体性感覚誘発電位 (t-SEP) が生じた (図 1A)。これらのピーク振幅は群間で統計学的有意な差は認められなかった (two-way mixed ANOVA: group: $F_{1,19}=0.25$, $p=0.64$; component: $F_{1,19}=106.91$, $p<0.01$; interaction: $F_{1,19}=0.40$, $p=0.54$)。この結果は、本実験で用いた皮膚感覚刺激は、一次体性感覚野において両群で同様の活動を生じさせたことを示す。

皮膚感覚刺激によって MEP 振幅が小さくなるのが観察された (図 1C)。これは皮膚感覚情報が一次運動野の活動を抑制的に修飾したことを示す。ピアニストと一般健常成人の間において統計学的有意に電気刺激による運動誘発電位の抑制量に差があることが明らかとなった



* : pianist vs control, $p<0.05$

図1 A: 皮膚感覚刺激によって誘発された t-SEP の典型例。B: N20 振幅と P25 のグループデータ。C: TMS によって右第一背側骨間筋から誘発される MEP の典型例。電気刺激なし条件 (上) と比較して、電気刺激が TMS に先行すると MEP 振幅が抑制される (下)。D: 電気刺激なし条件に対する電気刺激あり条件の比率。P はピアニスト群, N は一般健常成人のグループデータ。

(図 1D, $t=2.79$, $p<0.01$)。本実験で用いた電気刺激は一次体性感覚野レベルでは両群において同様の活動を示していたことから、この結果は群間における皮膚感覚-運動統合機能の差であることが示唆される。したがって、長期間のピアノのトレーニングによって皮膚感覚-運動統合機能に可塑的な変化が生じることが明らかとなった。

最速度タッピング課題において、4 秒間のタッピング回数はピアニストの方が有意に多かった (ピアニスト: 26.68 ± 2.34 回; 一般健常成人: 24.7 ± 1.84 回, $t=2.17$, $p<0.05$)。つまり、ピアニストはより速い指運動が可能であることが分かった。

また、ピアニストにおいてタッピング回数と電気刺激による MEP の抑制量との間に強い正の相関があることが分かった ($r=0.88$, $p<0.01$)。これは、皮膚感覚-運動統合機能に可塑的な変化が生じたピアニストほど指を速く動かせることを示しており、感覚運動統合機能の可塑性は高度な運動能力と関連していることが

示唆された。

2. 実験 2：固有感覚 —— 運動統合機能

2.1. 被験者

健常ピアニスト 10 名，楽器演奏経験のない一般健常人 10 名が参加した。すべての実験は，上智大学の倫理審査委員会の承認を得て実施された。

2.2. 手法

2.2.1. 固有感覚刺激

固有感覚刺激を提示するため，力触覚提示デバイス (Geomagic Touch X, 3D systems, Inc.) を用いて右示指の中手指節間関節を 225 度/s の角速度で屈曲 45 度から 0 度に伸展した。

2.2.2. 脳波計測

固有感覚刺激によって誘発される体性感覚誘発電位 (proprioceptive-somatosensory evoked potential: p-SEP) を測定するために脳波の測定を行った。脳波の測定は脳波計 (ANT Neuro, eegsports) を用いて 32 個の電極から測定した。電極は国際 10-20 法を基に頭部全体を覆うように設置した。サンプリングレートは 2 kHz で基準電極は右耳朶とした。示指伸展の開始時間を基準とし，伸展開始前 100 ms から開始後 500 ms までの波形を記録し，100 回の加算平均処理を実施した。加算平均波形から p-SEP の成分を検出し，各成分のピーク振幅及びトリガからピーク振幅までの潜時を算出した。

2.2.3. 経頭蓋磁気刺激法

先に記録した p-SEP における 3 成分のピーク潜時のタイミングで左一次運動野を TMS で刺激し，右第一背側骨間筋から MEP を測定した。示指を伸展する試行と，伸展しない試行をそれぞれ 15 試行ずつ実施し，それぞれ MEP の振幅を測定した。

2.2.4. 運動課題

ピアノ鍵盤の重量変化に対する適応学習課題を実施させた。被験者は右示指にて，2 Hz の

テンポおよびターゲットとして設定した音量 (MIDI velocity: 65) が生成される強さで 1 つの鍵盤を連続して打鍵する。計 300 回打鍵するうち，101 回から 200 回目の打鍵の間，鍵盤に外力 (ステンレスの円錐ばねを鍵盤の下に設置，MIDI velocity が 30 低下する程度) を提示した。外力の提示中は，ターゲットの音量を生成するために通常以上の力を発揮する必要がある。

1.1. 結果と考察

図 2 に示指の伸展後の脳波波形を示す。伸展後，まず一次体性感覚野付近に陽性波 (P1) が生じ，その後頭頂付近に陰性波 (N1) と陽性波 (P2) が生じた (図 3)。N1 と P2 において，ピアニストは一般健常人と比較して反応が時間的に早く生じており (図 4A, two-way mixed ANOVA: $F_{2,36}=3.82$, $p=0.03$)，P1 に関しては反応する領域が狭かった (図 4B, two-way mixed ANOVA: $F_{1,76,31,74}=4.66$, $p=0.02$)。これらの結果は，一般健常人と比較して，ピアニストは固有感覚の処理過程が素早くそして限局された領域で生じることを示唆する。

右示指伸展が MEP へ及ぼす効果に両群間で統計学的有意な差が見られた (two-way mixed ANOVA: group: $F_{1,18}=4.58$, $p=0.046$, component: $F_{2,36}=0.26$, $p=0.77$, interaction:

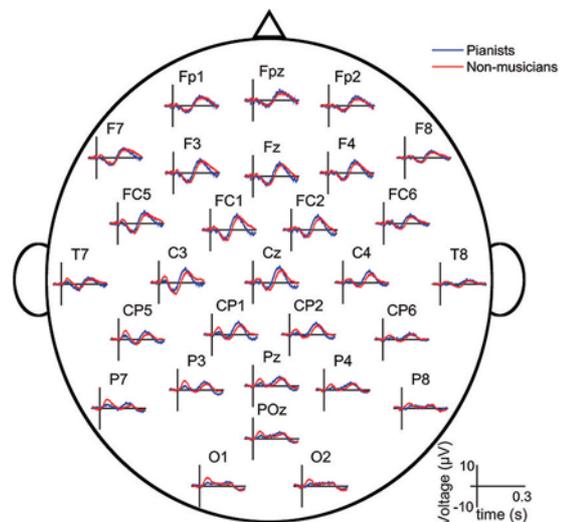


図 2 各電極における p-SEP 波形。青線がピアニスト，赤線が一般健常人の平均波形を示す。

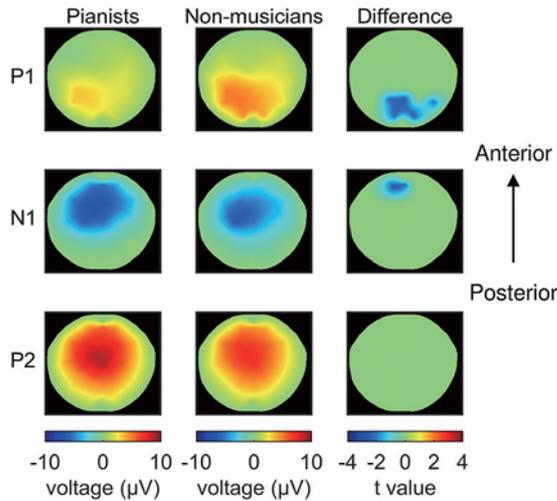


図3 右示指伸展に伴う脳波のトポグラフィ。左端と中央の図はピアニストと一般健常成人における各成分の電位分布を示す。右端は振幅に関して群間で統計学的有意な差が見られた領域を示す。

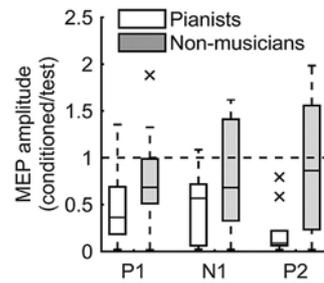
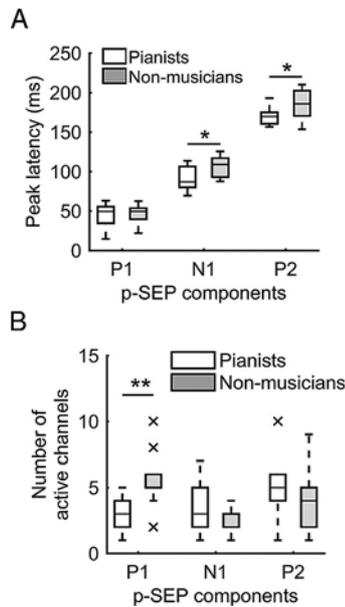


図5 示指の伸展後、各 p-SEP 成分のピーク潜時のタイミングに TMS によって誘発された MEP の振幅値。示指伸展なし条件に対する示指伸展あり条件の比率を表す。

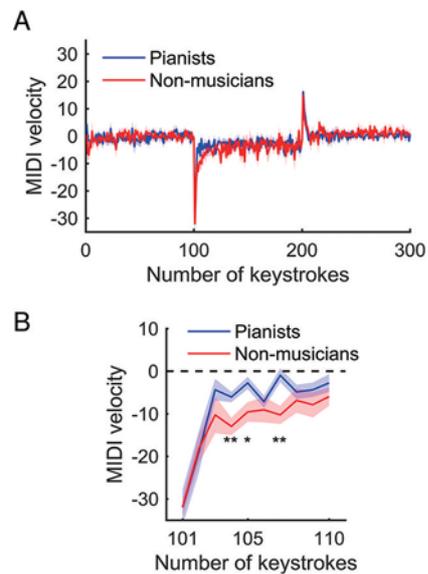


pianist vs control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

図4 A: 示指伸展開始時間を基準とした p-SEP の各成分の潜時。B: 各成分において、全電極間の最大振幅値に対して 85% 以上の振幅値を示した電極の数。

$F_{2,36} = 1.70$, $p = 0.20$)。特にピアニストは全ての刺激タイミングにおいて抑制傾向が観察された一方、非音楽家では促通傾向に転じる被験者も多く観察された(図5)。この結果は、固有感覚入力は促通性にも抑制性にも運動野の活動を修飾し、ピアニストでは特に抑制性の修飾が増強していることを示唆する。

図6に鍵盤の重量変化に対する適応過程を示



pianist vs control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

図6 鍵盤重量の変化に対する適応学習過程。A: 101回目から200回目の打鍵において、鍵盤が重くなっている。重量変化に応じて音量が小さくなっていることが分かる。一方、鍵盤重量が元に戻る201回目からは、音量が一時的に大きくなっていることが分かる。B: 101回目から110回目の拡大図。ピアニストの方が速く適応していることが分かる。

す。ピアニストは一般健常成人と比較して、鍵盤重量変化に素早く適応できることが分かった。重量の知覚は主に固有感覚が寄与しているとされている。ピアニストは、固有感覚を正確・迅速に処理しそれを素早く運動に統合することができることを示唆された。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究は、電気生理学的手法と力触覚提示デバイスといった工学的手法を組み合わせた新規

計測手法を立ち上げ、高度な運動スキルを有するピアニストを対象に実験を実施した結果、長期のトレーニングによって感覚運動統合機能に可塑性が生じ、それは高度な運動能力と関連していることを明らかにした。しかし、本研究では単一筋・単一指の感覚運動統合機能に着目しており、複数筋・複数指に拡張することが今後

の課題である。

[成果の発表, 論文等]

Hirano et al. 2019. Specialized somatosensory-motor integration functions in musicians. *Cerebral Cortex*. In press.