

[研究助成 (C)]

エキスパートの手指の巧緻運動技能を促進する 神経筋トレーニングの開発と評価

Development and evaluation of neuromuscular training to enhance dexterous motor skill in expert individuals

2217002



研究代表者 ソニーコンピューターサイエンス 博士研究員 木本 雄大
研究所
(助成受領時： 上智大学 博士後期課程)
大学院理工学研究科

[研究の目的]

手指運動は日常生活に不可欠であるが、長期間の訓練を積むことで、音楽家や外科医に見られる熟練した巧緻運動スキルを獲得できる。しかし、さらに熟練技能を洗練するにあたり、既に膨大な訓練を積んだ熟練者は、トレーニングをさらに反復するのみでは技能の上達は見込めない天井効果に悩まされる。反復練習で上達をしないため、練習量を増やして再起不可能な怪我を負ってしまうことや、自身の才能に限界を感じてプロのキャリアを諦めてしまうこともある。本研究では、熟練者特有の問題である天井効果を脱却するトレーニングの開発を目的とする。

運動学習に関与する神経として、一次運動野(M1)の再組織化が注目されてきた(Pascual-Leone et al. 1995)。一方、動物研究から、一ヶ月の運動学習後にM1を不活性化しても運動スキルが損なわれないことから、運動学習において脊髄の再組織化も重要と考えられている(Hwang et al. 2019)。脊髄の神経回路の可塑性を誘導する手法として、連合性ペア刺激法(PAS)確立されており(Stefan et al. 2002; Taylor and Martin 2009)、健常成人の運動スキル向上や運動障害の患者の機能回復が報告されている一方(Bunday and Perez 2012)、熟練者の運動スキルへの効果に関しては未解明な部分が多い。本申請では、脊髄機能の可塑性を誘導

するPASトレーニングを熟練ピアニストを行うことで、天井効果の打破する神経トレーニングの開発と効果検証を行う。

[研究の内容, 成果]

実験：皮質と脊髄の連合性ペア刺激法による神経筋トレーニングの開発と評価

方法

実験装置

PASによる神経トレーニングと中枢神経系と末梢神経系の興奮性の評価のために、非侵襲磁気刺激(Transcranial Magnetic Stimulation: TMS)と末梢神経電気刺激装置を用いた。右手小指の主動筋である小指外転筋(ADM)に筋電図計を貼付し、筋活動を10 kHzで計測した。また、ピアノ運動スキル評価のため、電子ピアノを用いて、MIDIから運動のタイミングと速度を1 kHzで計測した。

実験手続き (図1)

熟練ピアニスト4名を対象に、右手首の尺骨神経への末梢神経電気刺激と右手小指の一次運動野へのTMSを、脊髄で同期して刺激するPASを用いたトレーニングを行った。PASトレーニングの前、直後、30分後に手指のタッピング運動課題、皮質脊髄路の興奮性の評価、脊髄の興奮性の評価を行い、トレーニングが運動スキルと中枢神経系と末梢神経系に与える影

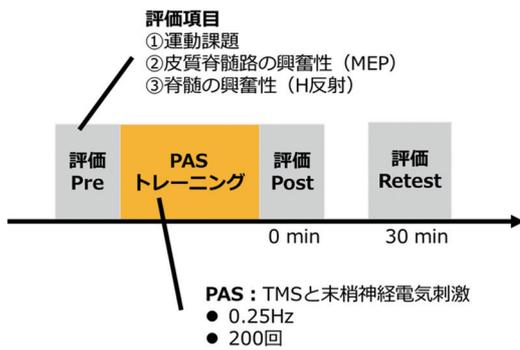


図1 実験手続きの概要

響を評価した。

運動課題

脊髄へのPASトレーニングが、熟練者のどのような運動スキルの上達を促すか検証するため、運動の複雑さが異なる2条件 (easy, complex) の指運動課題を設定した。easy条件として小指の打鍵運動課題、complex条件として示指と薬指の同時打鍵と中指と小指の同時打鍵を交互に反復する運動課題を選定した。これらの運動課題を、20秒間最大速度で打鍵を行った際の運動の速度と、3Hzのテンポで弱い力または強い力で24回打鍵した際の打鍵力の正確性を評価した。

TMS

運動指令の伝達経路である皮質脊髄路の興奮性を評価するため、M1の右手小指の領域にTMSで刺激を行い、ADMから運動誘発電位(MEP)を計測した。1mVのMEPが得る刺激強度を基準として、その100%、110%、120%、130%の刺激強度で各15回刺激を行い、MEPを評価した。

末梢神経電気刺激

脊髄の興奮性を評価するため、右手首の尺骨神経に電気刺激を行い、ADMからM波の振幅を計測した。M波の振幅のpeak-to-peak値が $50\mu\text{V}$ となる電気刺激の強度を基準とした。被験者が、ADMの最大発揮筋力の10%

程度で筋収縮を行っている間に、基準の電気刺激強度の100%、110%、120%、130%の刺激強度で各15回刺激を行い、脊髄反射機能を示すH波の振幅を誘発電位として評価した。

PAS トレーニング (図2)

TMSと末梢神経電気刺激を脊髄で同期して刺激を行うため、基準の120%の強度でTMSによる刺激を行った際のMEPが出現する最小潜時を算出した。また、右手首の尺骨神経にM波の振幅が最大値を示した強度の120%の強度で電気刺激を行い、F波を計測し、その出現潜時の最小値を算出した。先行研究に基づき、F波の出現潜時とMEPの出現潜時の差を末梢神経電気刺激とTMSの刺激間隔時間として算出した(Shulga et al. 2015)。算出された時間間隔を用いた末梢神経電気刺激とTMSのペア刺激を、0.25Hzで200回行った。

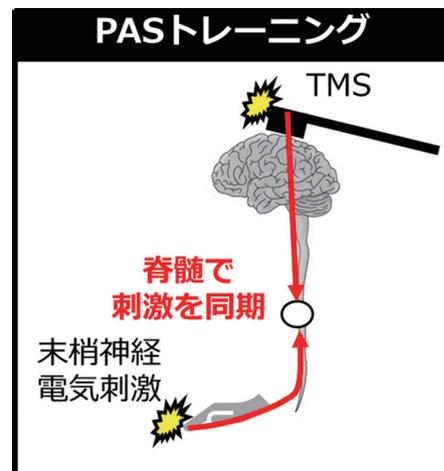


図2 PAS トレーニングの概要

解析方法

ADMから計測した誘発電位は、1.5-1000Hzのバンドパスフィルタで平滑化を行い、振幅のpeak-to-peak値と潜時の算出を行った。ノイズによる影響で適切な計測が行得なかった被験者2名は解析から除去した。

結果

図3は、PASトレーニングの前(Pre)、直後(Post)、30分後(Retest)に、easyとcom-

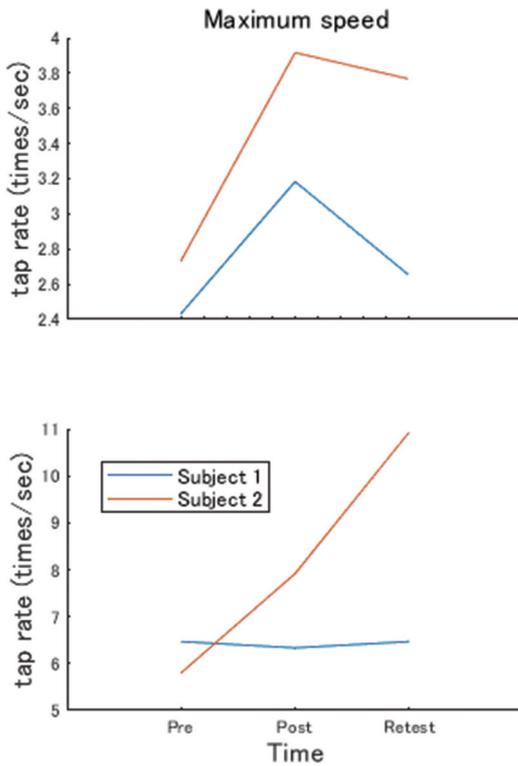


図3 最大速度運動時の打鍵速度

plex 条件の運動課題を最速度で行った際の運動の速度を示している。easy 条件では、Pre に比べて Post での運動速度が向上しており、Retest でも Pre よりも速度が向上していた。complex 条件では、Subject 2 は運動速度が向上し続けている一方で、Subject 1 では運動速度の変化は見られなかった。

図4は、easy と complex 条件の運動課題を、3Hz のテンポで強い力 (右) または弱い力 (左) で 24 回打鍵した際の打鍵力の正確性を評価した。Y 軸の force error の値が大きいほど、正確性が低いことを示す。easy 条件の強い力で打鍵した際の正確性に大きな変化は見られなかった。一方、easy 条件での弱い力で打鍵した際の正確性は 2 名とも減少傾向にあり、Pre よりも Retest での正確性が高いことから、PAS によるトレーニング効果が長期に継続している傾向を示している。また、complex 条件では、強い力および弱い力で打鍵した時の正確性は、どちらも減少傾向を示した。

図5は、基準の刺激強度の 100%, 110%,

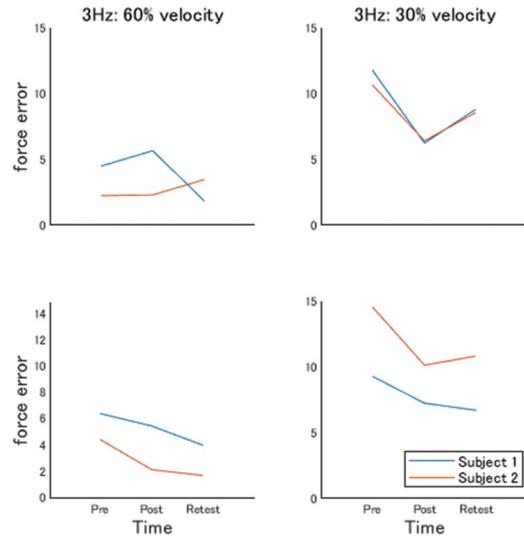


図4 3 Hz で運動時の打鍵力の正確性

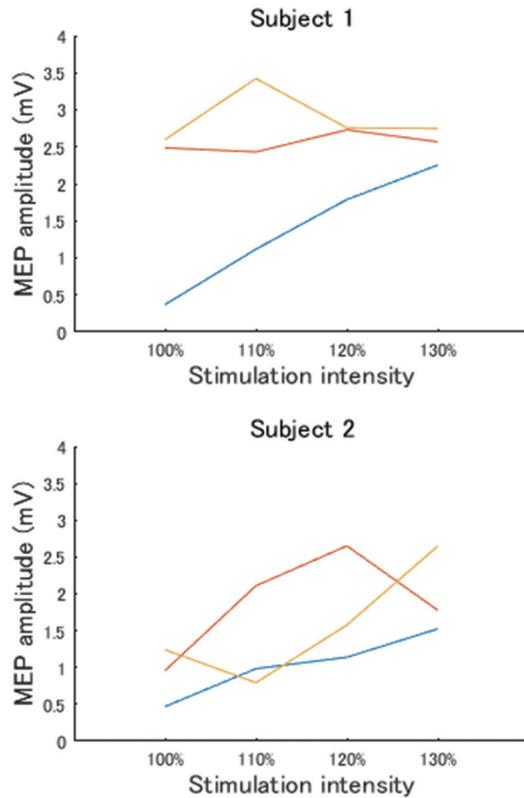


図5 MEP の振幅

120%, 130% の刺激強度で、TMS で M1 を刺激した際の小指の筋肉 (ADM) の MEP を示している。刺激強度が上昇すると、MEP は上昇している。両被験者共に、PAS トレーニングの後は MEP が上昇していることから、運動指令の伝導路である皮質脊髄路の興奮性が向上

していることを示している。

図6は、基準の刺激強度の100%、110%、120%、130%の刺激強度で、右手首の尺骨神経に電気刺激を与えた際の、脊髄の興奮性指標であるH波の振幅を示している。Subject 1は値が微小であることから、適切に計測が行えていないことが分かる。Subject 2から、刺激強度を上げるにつれて脊髄の興奮性が向上していることが分かる。また、トレーニングの直後のPostでは脊髄の興奮性は抑制しており、RetestではPreと同程度まで値が戻っている。

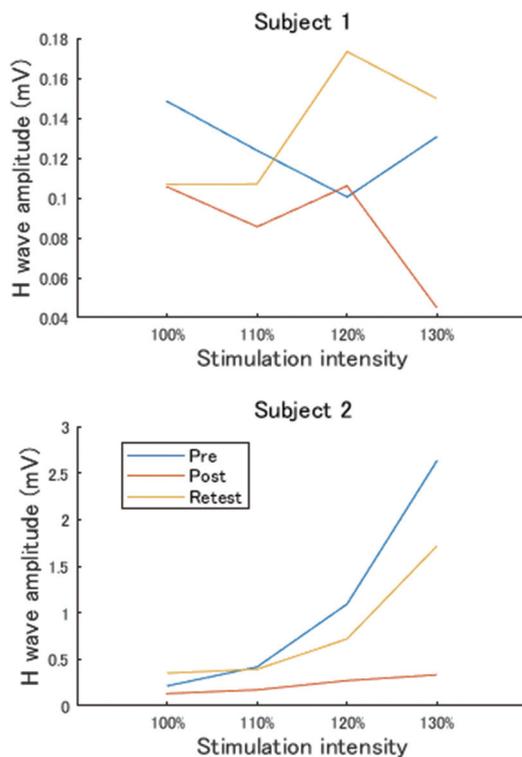


図6 H波の振幅

考察

運動課題

本研究では、小指の単一運動 (easy 条件) と、示指から小指の4本の指を用いた複雑運動 (complex 条件) の速度と力の正確性を評価した。運動速度に関しては、easy 条件では30分後まで効果が持続していた。一方、complex 条件では、Subject 2のみ速度の上昇が見られたこと。これらから、本トレーニングは比較的簡易な運動である小指の連続打鍵の速度上昇に効

果があることが示唆された。力の正確性に関しては、運動課題の複雑さに加えて、二種類の強さで打鍵した際の力の正確性を評価した。先行研究から、熟練ピアニストであっても、弱い力発揮時の方が力の正確性が低いことが報告されている (Hirano et al. 2019)。結果は、easy 条件の強い力発揮時の正確性は向上していなかった。一方、easy 条件の弱い力、complex 条件の弱い力・強い力発揮時の正確性が向上していた。以上より、本トレーニングは難易度の高い弱い力発揮時や、複雑な4本指の連続運動時の力の正確性が向上にも効果があることを示唆する。これらから、本トレーニングの効果が、運動スキルの指標と運動課題の複雑さで交互作用効果があることを示唆する。

神経機能

運動に参与する神経機能の指標として MEP、脊髄機能の指標として H 波の振幅の変化を評価した。MEP は、Retest でも向上したままであることから、本トレーニング短期的な効果ではなく、長期的にピアニストの皮質脊髄路の塑性を誘導することを示唆する。一方、H 波に関しては Post で減少し、Retest ではベースラインに近づいているが Pre と比べて抑制傾向を示していることから、本トレーニングは一時的に脊髄反射の機能を抑制することを示した。H 波の振幅値は脊髄反射の指標であり、運動スキルが向上していることから、熟練運動スキルの更なる向上のためには、感覚情報に基づいた脊髄反射機能を抑制が必要である可能性を示唆する。

[今後の展望]

これらの結果から、脊髄での PAS トレーニングは熟練者の運動スキルであっても向上させることを示唆した。その一方で、被験者数が足りていないため更なるデータ計測が必要である。さらに、本申請期間では脊髄への PAS トレー

ニングしか実施できなかつたが、M1でPASトレーニングが熟練者のどのような運動スキルへ効果があるかは未解明であるため、同一被験者に脊髄PASトレーニングとM1PASトレーニングを行い効果の違いを検証する必要がある。

[成果の発表, 論文等]

該当なし。