

人間と道具の調和を妨げる脳神経疾患の情報処理機構の解明

Impairment of internal representation of tool dynamics by task-specific focal dystonia

2151031



研究代表者
(助成金受領者)

上智大学 理工学部

准教授

古 屋 晋 一

共同研究者

ハノーファー音楽演劇大学

教 授

Eckart Altenmuller

【研究の目的】

人間は、進化に伴い、巧みに道具を使用する能力を獲得し、産業の発展や、文化の醸成を実現してきた。ハンマーやナイフといった原始的な道具から、楽器や手術支援ロボットといった高度な機械に至るまで、様々な道具を人間は訓練を通して使いこなすことができる。その背景には、道具の大きさや形状、重さや慣性モーメントといった物理特性を脳内に記憶する機構（内部モデル）の存在が知られている（Kawato 1999）。内部モデルは、ある道具を用いて思い通りの動きを実現するために必要な脳信号（運動指令）を計算する脳内機構である。

道具の習熟の過程で、過剰な訓練を行うと、特定の身体部位が震える振戦や、筋肉が意図せず収縮する局所性ジストニア（以下、FD：図1）といった脳神経疾患を発症する。これらは、人間と機械（道具）の調和を妨げる疾患であり、外科医がメスを使用する際や、ゴルファーのパッティング、音楽家が楽器を演奏する際に症状が現れる。しかし、訓練を積んでいない課題を行う際には、症状を発症しない。この症状の「道具特異性」の神経機序を明らかにすることは、道具の巧みな操作を実現する脳情報処理の仕組みを解明する上で不可欠である。

本研究は、FDの課題特異性が、道具の内部モデル表現の異常によるものであると仮説立て、当該仮説を検証するため、運動適応実験と生体情報計測を用いる。対象とするFDの患者群として、音楽家を選択した。その理由は、書痙をはじめとするFDの発症率に対して、音楽家のFDの発症率が非常に高いことが挙げられる。次に、内部モデルを調べるための実験系として、ピアノの鍵盤に外力を印加するシステムを構築する。適応実験では、鍵盤に外力を印加し、被験者が適応した後、外力を切ることで現れる事後効果から、内部モデルを評価する。

本研究では、力覚インターフェースを鍵盤と接合する実験装置を作成し、通常より重い鍵盤を一定回数打鍵した後、重さを元に戻す。事後効果を評価するため、指先が鍵盤に発揮する力を各指で計測するセンサーを開発した。本研究



図1 局所性ジストニア(FD)

を通して、FD が道具の内部モデルに及ぼす影響を明らかにすることを目指す。

〔研究の内容、成果〕

〈手法〉

健常なピアニスト 6 名および右手示指に FD を患ったピアニスト 6 名に、短い音列を右手で弾いてもらった。本実験は、「プレテスト」、「力場適応」、「ポストテスト」の順に行った。

被験者は、ピアノが自動生成するメロディ（ターゲット音刺激）を聴取し、同じテンポと同じ音量でその音列を演奏する（図 2）。これを 1 試行とし、プレテスト、力場適応、ポストテストのそれぞれにおいて、50 試行ずつ行う（計 150 試行）。課題は全て右手で行い、各試行終了の 5 秒後に、次の音刺激が提示される。打鍵間隔は 250 ミリ秒とする。



図 2 実験課題（1 試行）

力場適応時の 50 試行に限定して、示指による打鍵時にのみ、打鍵に抗する力場を鍵盤に印加する（図 3）。即ち、示指では、ターゲットの音量を生成するためには、通常以上の力を発揮する必要がある。50 試行の力場適応を行った後、ポストテスト時には外力の印加を切る。すると、ターゲットの音量を生成するために必要な力以上の打鍵力の発揮が期待される（＝事後効果）。なお、鍵盤に印加する外力の大きさは、2 ニュートンとする（※通常、鍵盤は 0.6 ニュートンの力で下降する）。

〈計測〉

データグローブ（CyberGlove。旭エレクトロニクス社）を用いて、手指の関節運動の時系列データを計測した。当初、手指の筋活動計測を計画していたが、プレ実験の結果、手指の内在筋の筋活動を表面筋電図によって精度良く計測できなかったため、手指の動作計測に研究計画を変更した。また、打鍵時の発揮力を、力センサーを用いて計測した（最先端研究開発支援センター）。さらに、ピアノから打鍵のタイミングおよび鍵盤の下降速度（音量）を MIDI 情報として計測した。

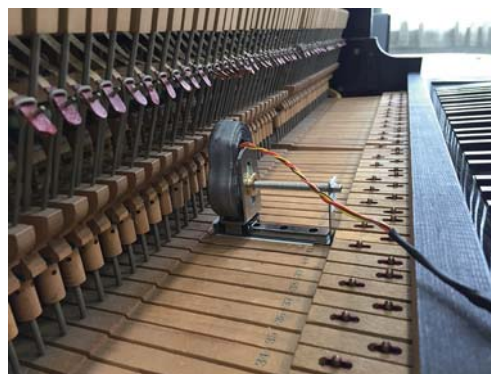


図 3 力場生成システム

〈解析・統計〉

各指において、プレテスト、力場適応、ポストテストの各試行において、①打鍵間間隔（打鍵と次の打鍵の時間間隔）、②離鍵間隔（鍵盤が指から離れる時刻の連続打鍵間の時間間隔）、③打鍵力を評価した。「試行」と「群」を独立変数とした混合デザインによる二要因の分散分析（Mixed-design ANOVA）を行い、多重比較は Benjamini & Hochberg の方法を用いて行った。

〈結果〉

プレテスト、力場適応、ポストテストのそれぞれ初めの 5 打鍵のグループ内平均を示す。図 4 は健常ピアニストおよび FD を罹患したピアニストの打鍵間隔の結果を示す。全ての打鍵に

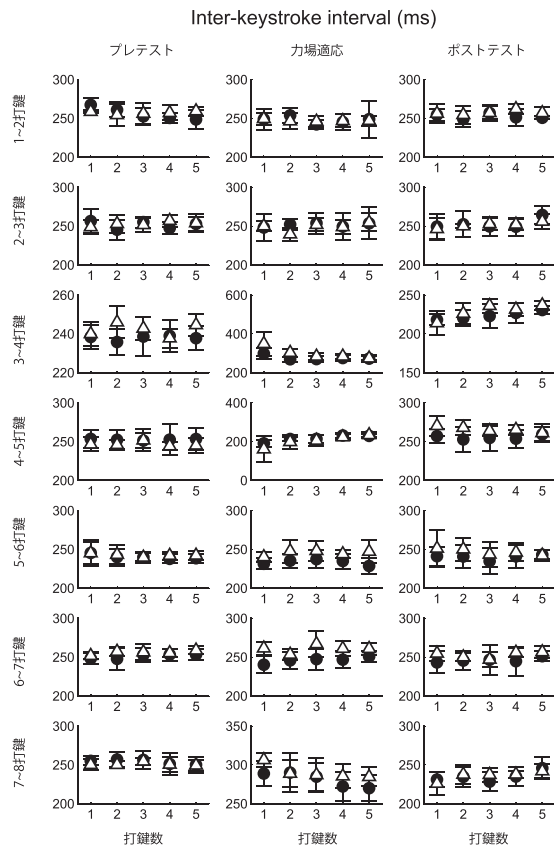


図4 打鍵間隔

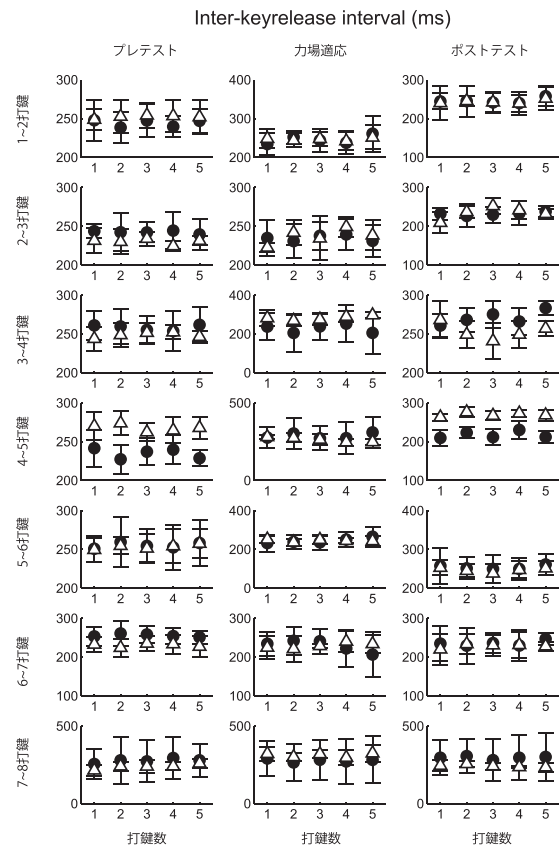


図5 離鍵間隔

において、群間の有意差は認められなかった ($p>0.05$)。

図5は健常ピアニストおよびFDを罹患したピアニストの離鍵間隔の結果を示す。プレテストおよびポストテストでは、4～5打鍵の離鍵間隔において、全ての試行で群間の有意差が認められた ($p<0.05$)。即ち、FD患者の方が、健常ピアニストよりも、離鍵間隔が有意に短かった。しかし、力場適応時には、全ての試行および全ての打鍵において、打鍵の離鍵間隔の群間の有意差は認められなかった ($p>0.05$)。したがって、力場印加中のみ、罹患指による打鍵（4打鍵目）の離鍵間隔の群間差が消失することが明らかとなった。

図6は健常ピアニストおよびFDを罹患したピアニストの打鍵力の結果を示す。分散分析の結果、全ての打鍵において、群間の有意差は認められなかった ($p>0.05$)。

〈考察〉

FD患者は健常者に比べて、離鍵間隔が短かった。しかし、力場を印加した鍵盤を打鍵する時のみ、患者と健常者の間の差が消失した。ある鍵盤を打鍵する際、鍵盤の力学情報を考慮に入れて、脳は筋に運動指令を出力する計算機構を備えている（内部モデル）。内部モデルの処理異常が、通常打鍵時の動作異常と関連があるとすると、力学特徴の異なる力場印加時の鍵盤を打鍵する際には、FDの影響を受けていないために、症状が一時的に消失して正常な打鍵が可能になると考えられる。そのため、本研究結果は、FD患者の内部モデル異常を示唆する結果と考えられる。

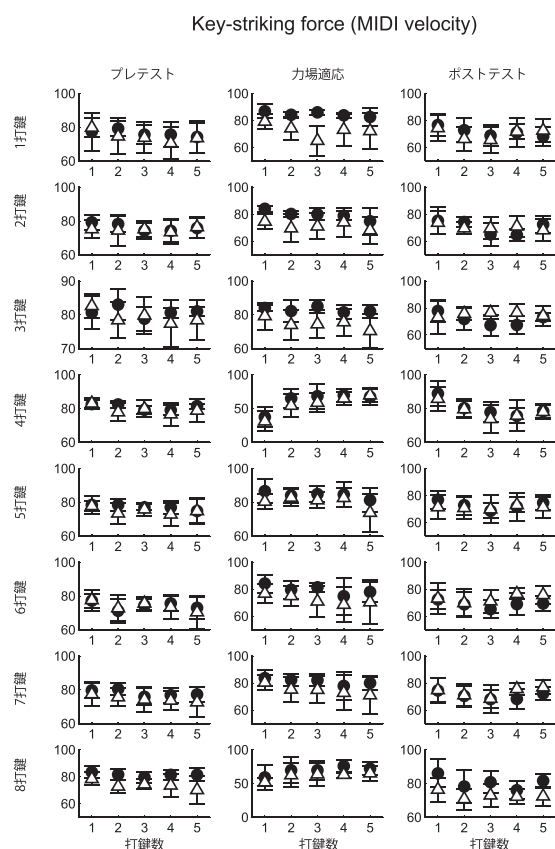


図6 打鍵力

[今後の研究の方向, 課題]

当該研究は、被験者数が不十分であるプレリミナリーな結果であるため、大規模数の被験者を対象とした心理物理実験を行う。その際、非侵襲脳刺激や脳波計測といった神経生理学的計測を行い、当該行動実験では明らかにすることが困難であった脳内情報処理の生理学的機序についての理解を深めることを目指す。