

## すくみ足歩行に対する聴覚刺激を用いたゆび歩き練習の

### 即時効果検証：シングルケーススタディー

北井 拳<sup>1)</sup>，齋藤 望<sup>1)</sup>，久保 綾子<sup>1)</sup>，埜村 彩<sup>1)</sup>，小幡 彰一<sup>1)</sup>，兒玉 隆之<sup>2)</sup>

- 1) 舞鶴赤十字病院リハビリテーション科部
- 2) 京都橘大学大学院 健康科学研究科

要旨：

【目的】本研究では、パーキンソン病患者におけるすくみ足に対し、聴覚刺激を用いた“ゆび歩き練習”の即時的な効果を検証した。

【方法】対象は Hoehn and Yahr 分類Ⅲの 70 歳代女性。介入として、100 Beats Per Minute の聴覚刺激を伴う母指・示指のゆび歩きを 1 分間実施し、歩行速度や下肢の筋活動、手指タッピング能力を評価した。

【結果】歩行速度の向上や前脛骨筋と腓腹筋の位相的筋活動の明瞭化、手指タッピングリズム形成の改善が認められた。

【結論】これらの結果は、Central Pattern Generator (中枢パターン生成器) の賦活および認知的負荷の軽減を示唆しており、ゆび歩き練習が安全かつ有効な在宅ニューロリハビリテーションとなり得る可能性を示している。

key words : パーキンソン病, すくみ足, 聴覚刺激, ゆび歩き練習, 在宅ニューロリハビリテーション

## I. はじめに

すくみ足歩行 (Freezing of gait : FOG) は、歩行の意志があるにも関わらず、効率的な前方移動を行うことが困難になる短時間の現象を指す<sup>1)</sup>。FOG は、パーキンソン病 (Parkinson's disease : PD) の代表的な症状とされ、FOG の重症度と転倒頻度が密接に関わっている<sup>2)</sup>。FOG を呈すると、歩幅の減少やステップ数の増加などの歩行リズム形成に障害が生じやすいことが報告されている<sup>3)</sup>。歩行リズムを誘発する神経回路の Central Pattern Generator (CPG) は、大脳基底核の障害により出力が障害されやすいとされる<sup>4, 5)</sup>。そのため、大脳基底核が障害される PD では、歩行リズム障害は頻発しやすい。これらの報告から、FOG の改善には歩行リズムの再獲得が重要であると考えられる。

CPG について、手掛かり提示である Cue を利用することで CPG を賦活することが可能とされている<sup>6)</sup>。特に、聴覚刺激による外的手掛かりの External Cue (EC) は、FOG の制御に有力な可能性があり、約 100-112 Beats Per Minute (BPM) (約 1.7-1.9 Hz) のリズムカルな聴覚刺激を付与することで CPG を誘発できる可能性を示唆している<sup>7, 8, 9)</sup>。そのため、メトロノームを用いた歩行訓練は、FOG の改善に有効な介入となり得る。一方で、PD 患者は歩行中の転倒頻度が多く、転倒による骨折のリスクが高い<sup>10)</sup>。転倒

の多さから、メトロノームを用いた在宅での自主的な歩行練習は現実的でない可能性がある。

そこで我々は、手指への介入が安全なニューロリハビリテーションになる可能性について着目を行った。手指のすくみ現象 (すくみ指) は手指タッピング運動でも確認されることが報告されている<sup>11, 12, 13)</sup>。加えて、手指タッピング課題の成績低下と FOG の重症度に相関が示される<sup>14)</sup>。手指のすくみ現象と FOG は、大脳基底核の機能不全という共通の病態を持つ可能性が示唆されている<sup>15)</sup>。さらに、ヒトの四肢運動は神経的に独立しておらず、歩行中の腕振り運動と下肢の運動は、脊髄レベルの CPG を介してリズムカルに協調していることが知られている。この上肢と下肢の神経的連携を考慮すると、リズムカルな手指運動が、歩行を制御する神経回路に影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで本研究は、「EC を用いた手指のリズムカルな運動は、上肢・下肢の神経連携を介して歩行リズムを改善する」という仮説のもと、その即時効果を検証することを目的とした。

## II. 症例紹介

症例は 70 歳代の女性。PD を約 6 年前に発症した。PD の進行度や重症度を評価する指標の Hoehn and Yahr 分類はⅢ。Hoehn and Yahr 分類Ⅲは、日常生活は行えるが姿勢

反射障害の出現により転倒リスクが高まる時期となる。転倒不安感尺度<sup>16)</sup>は25/40点と、本症例も歩行中の転倒恐怖感を感じられていた。L-Dopaの服薬時間は5時、10時、12時、18時で、本介入はON状態の11時に実施した。ON状態でのFOGは転倒の重要な原因<sup>17)</sup>なため、ONの時間帯を本介入対象時間とした。FOGの評価は日本語版 Characterizing Freezing of Gait questionnaire<sup>18)</sup>を行った。Section IのFOGの特徴として、FOGの出現頻度は平均3-5回/日、FOGの持続時間は3-5秒であった。FOGの出現する時間帯は不定期で、服薬の有無によらずFOGが出現した。Section IIのFOGを生じさせる状況では、症例は歩きはじめにFOGが出現しやすいと言われた。Section IIIのFOGを改善するために用いられるリハビリテーションがどの程度有効と感じるかについての質問では、数を数える、メトロノームのリズムに合わせて足を運ぶリハビリテーションが最も有効と答えられた。これらのことから、本症例は歩き初めにFOGを感じやすいとされ、FOGに対してECを用いた介入は効果的な印象を持たれていた。そこで、本研究ではECを用いた介入を行うこととなった。本研究は、舞鶴赤十字病院倫理委員会から承認を得て実施した。

### III. 方法論

本研究では、聴覚刺激を用いて母指と示指を交互に前方方向にタッピングする運動を『ゆび歩き練習』と定義する。ゆび歩き練習では、メトロノームを用いて100BPM(約1.67 Hz)の聴覚刺激を付与した。聴覚刺激に合わせて自身の大腿部の上で1分間繰り返しゆび歩き練習を実施した(図1)。

プロトコルについて(図2)、手指のタッピング能力を評価するために、Hatic Skill Logger(テック技販社製)<sup>19)</sup>を行った。本機器の触覚ゆびセンサは3軸加速度計が内蔵されており、手指タッピング中の動きを捉えることが可能となる。触覚ゆびセンサは対象側の母指と示指に装着した。そして、母指と示指のタッピングを10回連続的に実施し、実施時間と加速度を計測した。サンプリング周波数は1000 Hzとした。運動課題前後に左右の手指でそれぞれ2回行った。パーキンソン病に対する歩行速度評価として、



図1 ゆび歩き練習

100BPMに合わせてゆび歩き練習を1分間実施していただいた

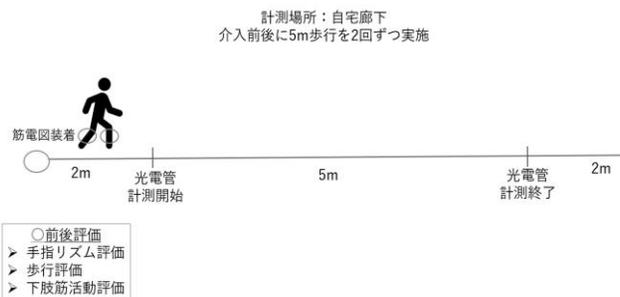


図2 プロトコル

5 m歩行を用いた<sup>20)</sup>。八谷ら<sup>21)</sup>は、パーキンソン病患者18名に対する5 m歩行速度を計測している。Bland-Altman分析を用いて系統誤差の有無を検討した結果、加算誤差および比例誤差のいずれも認められなかったと報告している。本症例に対しても、歩行速度検査中の系統誤差を最小限にするために5 m歩行を採用した。歩行速度は通常歩行速度とした。5 m歩行は光電管(S-001 シングルトレーニングバージョンワイヤレスレーザータイマー：Dongguan Xuanying Sports Technology社製)を用いて歩行時間を計測した。計測開始線と計測終了線の2 mに助走期間を設定し、合計9 mの距離とした。また、5 m歩行中の下肢筋活動を評価するために、TS-MYO(トランクソリューション社製)を用いて計測した。計測では、5 m歩行を2回実施し、光電管の計測に合わせて下肢の筋活動を手動で計測した。電極の貼付位置は、Surface ElectroMyoGraphy for the NonInvasive Assessment of Muscles (SENIAM)<sup>22)</sup>ガイドラインに準拠した。脛骨外側顆と外顆の近位1/3にある前脛骨筋と腓腹筋内側最大ボリュームにある腓腹筋に筋電計を両側にあてた。入力インピーダンスを減らすために研磨用ペースト(日本光電社製)で皮膚を研磨後にアルコール綿で拭いた。アルコールが乾燥した後、筋線維の方向と平行にマークされた場所に電極を貼付した。増幅された筋電信号は、A/D変換機を介して12 bitの解像度で、iPadのTS-MYO専用アプリに取り込まれ記録した。サンプリング周波数は1000 Hzとした。

### IV. 解析方法

手指タッピング能力評価として、課題実施時間の平均値および標準偏差を算出した。また、課題実施中の加速度を折れ線グラフとして図示した(視覚的分析)。

下肢筋活動の筋電図解析にはTS-MYO専用アプリを用いた。5 m歩行10秒間の連続データに対してバンドパスフィルター(50-450 Hz)をかけた後に、50 msで二乗平均平方根(Root Mean Square)の平均振幅を算出し、波形を平滑化した。得られたデータは折れ線グラフとして図示した。

5 m歩行速度は、m/sにて処理を行った。2回実施時の平均値および標準偏差を算出し、介入前後で比較した。

### V. 結果

介入前後における歩行速度および手指タッピング能力

表1 介入前後における歩行速度および手指タッピング能力の比較

	介入前	介入後
Hatic Skill Logger (秒)		
右	11.09±0.71	7.94±0.64
左	14.84±0.92	6.69±0.85
5m歩行 (m/s)	0.27±0.13	0.32±0.06

の測定結果を表1に示す。手指タッピング課題の実施時間については、右手は介入前の11.09±0.71秒から介入後には7.94±0.64秒に、左手は介入前の14.84±0.92秒から介入後には6.69±0.85秒へとそれぞれ短縮した。5m歩行速度は、介入前の平均0.27±0.13m/sから、介入後には平均0.32±0.06m/sへと向上が認められた。

手指タッピングの加速度波形について、介入後は介入前と比較して規則的なピークが明瞭となり、リズムの安定性が示唆された(図3)。同様に、下肢筋活動においても、介入前には不明瞭であった前脛骨筋と腓腹筋の拮抗的な活動パターン(位相)が、介入後には周期的に観察された(図4)。

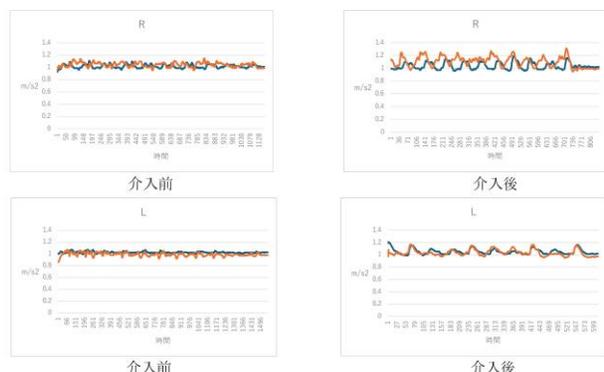


図3 介入前後における手指タッピングの加速度波形

本図は、右手(R)および左手(L)のタッピング運動における介入前後の加速度変化を示す。横軸は時間(ミリ秒)、縦軸は加速度(m/s<sup>2</sup>)である。青色の線は母指、橙色の線は示指の加速度をそれぞれ示している。

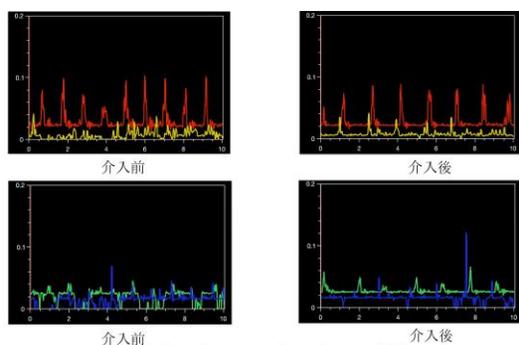


図4 介入前後における5m歩行中の下肢筋活動

本図は、介入前後における5m歩行中の下肢筋活動の筋電図波形を示す。横軸は時間(秒)、縦軸は筋活動量(二乗平均平方根:単位はμV)である。上のグラフが右脚で黄色線が腓腹筋、赤色線が前脛骨筋の活動をそれぞれ示している。下のグラフが左脚の結果で青色線が腓腹筋、黄緑色線が前脛骨筋の活動をそれぞれ示している。

## VI. 考察

本症例は、PDによりFOGを呈し転倒恐怖感が生じていた。そこで本研究では、FOG改善を目指して、症例の歩行リズムに合わせたゆび歩き練習の効果について検証をした。

手指タッピング課題について、FOGは普段は無意識な歩行を意識的に行うことで認知的負荷が過剰となり、下肢交互運動が困難となる<sup>4,5)</sup>。介入前の手指タッピング課題の結果から、下肢のみならず手指のリズム形成におい

ても認知的負荷が生じ、すくみ指を呈している可能性が考えられた。聴覚刺激を利用したECは、運動前野や小脳が賦活し、大脳基底核でリズム形成が行えない代償機構として働く<sup>23,24)</sup>。本介入で用いられた聴覚刺激は、運動のタイミングを外部から提供することで、患者自身の内的なリズム生成にかかる認知的負荷を軽減し、運動の自動性を促進した結果、手指と歩行双方のパフォーマンスが改善したと考えられる。

5m歩行時の下肢筋活動について、介入後では、腓腹筋と前脛骨筋の筋活動の位相が順に生じるようになった。腓腹筋と前脛骨筋が位相に働くのはCPG構築に寄与するとされる<sup>24)</sup>。約100-112BPM(約1.7-1.9Hz)のリズミカルな聴覚刺激を付与することでCPGを誘発できる可能性がある<sup>8,9)</sup>。加えて、PDに対するゆび歩き練習は、歩行中に生じる前頭葉の認知的活動を抑制することが報告されている<sup>26)</sup>。これらのことに加え、本介入が下肢の筋活動パターンを改善させた要因として、ECによるCPGの賦活に加え、上肢と下肢の神経的な連携(Interlimb Coordination)が考えられる。リズミカルな上肢の運動は、脊髄レベルの神経回路を介して、下肢の歩行リズムを生成するCPGの活動を賦活することが報告されている<sup>15)</sup>。したがって、本研究で行った手指のタッピング運動が、単に認知的な負荷を軽減しただけでなく、より直接的に脊髄の歩行制御ネットワークに働きかけ、下腿拮抗筋の協調性を改善させた可能性が示唆される。

5m歩行について、本介入後に5m歩行速度は向上を認めた。これは、上述の歩行中の認知制御の軽減や、歩行リズムの改善が影響を及ぼしたと考える。そして、ECを付与した歩行訓練では、ケイデンスやストライド長を有意に改善させることが報告されている<sup>27)</sup>。本症例もECを利用したゆび歩き練習によりケイデンスやストライド長が向上し、歩行速度が向上したと考えた。PDに対する5m歩行速度の最小可検変化量は、0.6秒以上で真の変化と判断される<sup>21)</sup>。本症例は秒換算すると約2.9秒歩行速度が向上しており、本介入効果は誤差では無い可能性が示唆された。このことから、ECを用いたゆび歩き練習は、ECを用いた歩行練習同様に歩行速度を改善させる可能性が考えられた。これは、PDにとって安全に歩行練習ができる新たなニューロホームエクササイズになりうる可能性を意味する。本研究で検証した『ゆび歩き練習』は、転倒のリスクを伴わずに歩行リズムの改善が期待できる点で、従来の歩行訓練とは一線を画す。特に、転倒への恐怖感が強い患者や、身体機能が低下し立位での訓練が困難な患者にとって、安全かつ有効な在宅ニューロリハビリテーションの選択肢となりうる可能性を秘めている。

## VII. 今後の課題

本研究は、シングルケースデザインであり本介入の結果が偶然の可能性は否定できない。今後は統計的な解析を行い、その効果について深く検証していく必要がある。

また、本研究の筋電図を用いた評価は視覚的分析のみにとどまっている。今後は、本研究結果を参考にメイン周波数帯域を量的に算出していく必要があると考えた。最後に、本研究は即時性の検証のみである。本介入の適正な介入時間や介入回数はわからない。また、効果の持続時間についても不明なところが多い。本介入の効果について、縦断的に評価していく必要がある。

#### 【参考・引用文献】

- 1) Giladi N, Kao R, Fahn S: Freezing phenomenon in patients with parkinsonian syndromes. official journal of the Movement Disorder Society. 12 (3) : 302-305, 1997.
- 2) Li KP, Zhang ZQ, Zhou ZL, et al : Effect of music-based movement therapy on the freezing of gait in patients with Parkinson's disease : A randomized controlled trial . Frontiers in aging neuroscience. 14 : 924784, 2022.
- 3) Weiss D, Schoellmann A, Fox MD, et al : Freezing of gait : understanding the complexity of an enigmatic phenomenon. Brain. 143 (1) : 14-30, 2020.
- 4) 岩田 真一：すくみ足。児島純心女子大学看護栄養学部紀要, 27 : 1-41, 2023.
- 5) Abe K, sai Y, Matsuo Y, omura T, et al : Classifying lower limb dynamics in Parkinson's disease. Brain research bulletin. 61 (2) : 219-226, 2003.
- 6) Yanagisawa N, Hayashi R, Mitoma H : Pathophysiology of frozen gait in Parkinsonism. Advances in neurology. 87 : 199-207, 2001.
- 7) Lim I, van Wegen E, de Goede C, et al : Effects of external rhythmical cueing on gait in patients with Parkinson's disease : a systematic review. Clinical rehabilitation. 19 (7) : 695-713, 2005.
- 8) Former-Cordero A, Pinho JP, Umemura G, et al : Effects of supraspinal feedback on human gait : rhythmic auditory distortion. Journal of neuroengineering and rehabilitation. 16 (1) : 159, 2019.
- 9) Huang LZ, Qi Z : Neurobiological mechanism of music improving gait disorder in patients with Parkinson's disease : a mini review. Frontiers in neurology. 15 : 1502561, 2025.
- 10) Allen NE, Canning CG, Almeida LRS, et al : Interventions for preventing falls in Parkinson's disease. The Cochrane database of systematic reviews. 6 (6) : CD011574, 2022.
- 11) Nutt JG, Bloem BR, Giladi N, et al : Freezing of gait : moving forward on a mysterious clinical phenomenon. The Lancet Neurology. 10 (8) : 734-744, 2011.
- 12) Almeida QJ, Wishart LR, Lee TD : Bimanual coordination deficits with Parkinson's disease : the influence of movement speed and external cueing . Movement disorders : official journal of the Movement Disorder Society. 17 (1) : 30-37, 2002.
- 13) Nieuwboer A, Vercruyse S, Feys P, et al : Upper limb movement interruptions are correlated to freezing of gait in Parkinson's disease. The European journal of neuroscience. 29 : 1422-1430, 2009.
- 14) Vercruyse S, Spildooren J, Heremans E, et al : Abnormalities and cue dependence of rhythmical upper-limb movements in Parkinson patients with freezing of gait. Neurorehabilitation and neural repair. 26 (6) : 636-645, 2012.
- 15) Zehr EP, Duysens J : Regulation of arm and leg movement during human locomotion. The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry. 10 (4) : 347-361, 2004.
- 16) Tinetti ME, Richman D, Powell L : Falls efficacy as a measure of fear of falling. Journal of gerontology. 45 (6) : 239-243, 1990.
- 17) Okuma Y, Silva de Lima AL, Fukae J, et al : A prospective study of falls in relation to freezing of gait and response fluctuations in Parkinson's disease. Parkinsonism & related disorders. 46 : 30-35, 2018.
- 18) 近藤 夕騎, 望月 久, 藤 太郎ら : 日本語版 Characterizing Freezing of Gait questionnaire (C-FOGQ) の作成. The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, 58 (2), 208-214, 2021.
- 19) 仲谷 正史, 副 智行 : 触感の感性評価ツール : ウェアラブル触動作センサ HapLog. 本ロボット学会誌, 30 (5), 499-501, 2021.
- 20) 白岩 加代子, 村田 伸, 安彦 鉄平, 他 : 高齢者における歩行調整能力の違いによる身体的特徴. ヘルスプロモーション理学療法研究, 8 (4) : 169-173, 2019.
- 21) 八谷 瑞紀, 村田 伸, 大田尾 浩, 他 : パーキンソン病患者を対象とした歩行能力評価法の信頼性の検討. ヘルスプロモーション理学療法研究. 10 (2) : 85-89, 2020.
- 22) Surface ElectroMyoGraphy for the NonInvasive Assessment of Muscles (SENIAM) ガイドライン. <http://www.seniam.org/> (令和7年11月10日引用)
- 23) Morris ME, Martin CL, Schenkman ML : Striding out with Parkinson disease : evidence-based physical therapy for gait disorders. Physical therapy. 90 (2) : 280-288, 2010.
- 24) 木村 大輔 : パーキンソン病患者のすくみ足における内的リズム形成障害と遂行機能の関連, 高次脳機能研究. 40 (3) : 348-353, 2020.
- 25) 沼田 純希, 土屋 順子, 立本 将士ら : 両側足関節の反復運動における位相の違いが皮質脊髄路興奮性に与える影響. 本基礎理学療法学雑誌, 20 (2) : 44-50,

2017.

- 26) Nakano H, Murata S, Odama T : Effect of Rhythmic Finger Movement Training on Freezing of Gait and Electroencephalography Activity in People With Parkinson Disease : Topics in Geriatric Rehabilitation. 39 (3) : 185-190, 2023.
- 27) Spaulding SJ, Rober B, Colby M, et al : Cueing and gait improvement among people with Parkinson's disease : a meta-analysis . Archives of physical medicine and rehabilitation. 94 (3) : 562-570, 2013.