

[研究助成 (A)]

経皮的脊髄刺激による下肢筋協調パターンの変調： 動作向上のニューロモジュレーション

2241016

研究代表者
(助成金受領者)

東京工科大学 医療保健学部

講師

斎藤 寛樹

共同研究者

東京大学

助教

金子 直嗣

東京大学

助教

佐々木 睦

[研究の目的]

本研究の目的は下肢筋協調パターンを誘発する脊髄の局在を解明し、運動障害の患者やアスリートのパフォーマンスを劇的に向上させる脊髄電気刺激の介入方法を確立することである。対象者の動作能力を向上するためには反復練習による運動学習や筋力トレーニングによって筋力向上を行うのが主流である。しかし効果を得るためには長期間に及ぶ介入が必要となるため、ドロップアウトやトレーニング効果が停滞する事例も珍しくない。近年、神経科学の発達によって、運動制御を司る中枢神経系へ直接変調を起こし動作の遂行能力を短期間で向上させる介入が盛んに行われている。中でも脊髄電気刺激は神経活動の変調（ニューロモジュレーション）を起こすため、脊髄損傷者などにおいて下肢の筋機能を高める有用な介入であるとされている。一方で、既存の電気刺激ではヒトの複雑な動きに関わる複数の筋群への介入は行われていない。今回、ヒトの複雑な動作の筋協調パターンを経皮的脊髄刺激で変調することで、動作を劇的に向上させる電気刺激法を開発する。これにより、病気や怪我で動くことに困る人々の支援を目指し、より快適な社会の実現を追求する。

この目的に向け、本研究は3つの研究を段階的に積み上げる構成とした。まず、ジャンプ動作を支える筋協調パターンと、それを効果的に

鍛えるトレーニングを同定し（研究1）、次に、そのトレーニングで強化される協調パターンを経皮的脊髄刺激（tSCS）で再現するために標的とすべき脊髄節レベルを特定し（研究2）、最後に、同定した脊髄節レベルへのtSCSが脊髄および皮質脊髄路の興奮性を実際に変調し得るかを生理学的に検証した（研究3）。すなわち「動作を支える筋協調の同定→それを誘発する刺激部位の特定→その刺激が神経興奮性に及ぼす効果の検証」という一連の流れである。

[研究の内容、成果]

研究1：ジャンプ動作の筋シナジーと効果的トレーニングの同定

本研究シリーズの出発点として、研究1ではまず、向上の標的となる「ジャンプ動作を支える筋協調パターン」そのものと、それを効果的に鍛え得るトレーニング種目を明らかにした。研究1ではジャンプ動作に必要な筋協調パターンの抽出とそれを効果的に高めるトレーニングの検討を行った。健康な成人男性14名を対象に、垂直跳び（Vertical Jump: VJ）および8種類の選択的機能的運動（Select Functional Movement: SFM）を実施させ、筋活動の解析を行った。VJの平均跳躍高は 49.0 ± 8.6 cmであり、SFMにはアクティブ・ストレートレッグレイズ、膝の伸展／屈曲、股関節の伸展／外転、足関節の底屈、体幹の伸展／屈曲が含まれた。筋

電図 (EMG) は、下肢および体幹の 16 筋 (広背筋, 脊柱起立筋, 外腹斜筋, 腹直筋, 大腿筋膜張筋, 中臀筋, 大臀筋, 外側広筋, 大腿直筋, 長内転筋, 半腱様筋, 大腿二頭筋長頭, 前脛骨筋, 内側腓腹筋, ヒラメ筋, 長腓骨筋) から無線収集された。得られた筋活動データから, 非負値行列因子分解 (NMF) を用いて筋シナジーを抽出し, k-means 法によりクラスタリングを行った。VJ におけるシナジーと SFM におけるシナジーとの関連性を評価するために, 以下の 2 つの方法を採用した。(1) VJ シナジークラスタ重心と SFM シナジークラスタ重心との類似性 (Similarity Profile: SP) を算出し, SP が 0.70 以上の場合は「直接一致」と判定した。(2) VJ シナジーを複数の SFM シナジーの線形結合として非負最小二乗法により再構成し, 2 つ以上の SFM シナジーがスケール係数 0.2 以上かつ全体の SP が 0.70 以上である場合を「統合的再構成」と判断した。結果として, VJ の動作中には 5 つのシナジークラスタが同定された。1 つ目は「プッシュオフモジュール」であり, 足関節底屈筋, 膝伸展筋, 股関節伸展筋の共収縮を特徴とした。2 つ目と 3 つ目は体幹の安定化に関与する「腹筋系モジュール」と「背筋系モジュール」であった。

4 つ目の「スラストモジュール」は, 大腿二頭筋 (BF), 内転筋 (ADD), 中臀筋 (Gmed), 大腿筋膜張筋 (TFL) の活動を反映していた。5 つ目の「着地制御モジュール」では, 前脛骨筋 (TA) および背筋の活動が主であった。SFM との比較において, スラストモジュールおよび体幹安定化モジュール (腹筋・背筋) は, SFM で得られた股関節伸展, 体幹屈曲, 体幹伸展の各シナジーと高い類似性 ($SP > 0.7$) を示し, 直接一致が確認された (図 1)。一方, プッシュオフモジュールと体幹安定化モジュール (背筋) は, SFM における複数のシナジー (股関節伸展, 膝伸展, 足関節底屈) を統合することで良好に再構成された。なお, 着地制御モジュールについては, いずれの SFM シナジー

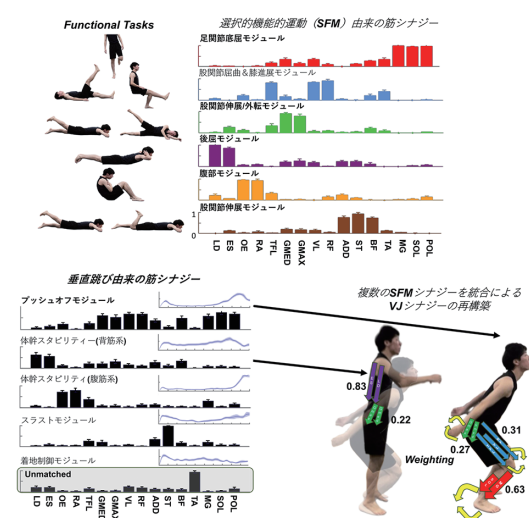


図 1 垂直跳び (VJ) から抽出した筋シナジーと選択的機能的運動 (SFM) 由来シナジーとの類似性。VJ で同定された 5 つのシナジークラスタ (プッシュオフ・腹筋系・背筋系・スラスト・) と各 SFM シナジーとの SP を示す。スラスト・体幹安定化モジュールは SFM シナジーと高い類似性 ($SP > 0.7$) を示して直接一致し, プッシュオフ・背筋系モジュールは複数の SFM シナジーの統合的再構成で説明された。

とも一致せず, 独自の筋活動パターンであることが示唆された。今回の結果から, ジャンプ能力を向上させるための効果的なトレーニング戦略が明らかとなり, そのトレーニング中に脊髄刺激を併用することが有効である可能性が示された。そこで次の研究 2 では, このトレーニングで強化される協調パターン (トレーニングシナジー) を, 脊髄刺激の側から再現できるか, また再現するにはどの脊髄節を狙えばよいかを検討した。

研究 2: トレーニングシナジーを誘発する脊髄節レベルの同定

研究 1 では, ジャンプを支える筋協調パターン (トレーニングシナジー) と, それを鍛える SFM が同定された。これを受けて研究 2 では, 研究シリーズの第 2 段階として, 同定したトレーニングシナジーを「行動 (トレーニング) 側」だけでなく「刺激側」からも再現できるか, すなわち tSCS によってどの脊髄節レベルがこれらの協調パターンを誘発するかを検討し, 刺

激の標的部位を定めることを目的とした。これにより、トレーニング効果を増強するために刺激すべき最適な脊髄節レベルを特定する。

【方法】 健常者8名を対象とした。各被験者に対し、研究1と同一の8種類のSFMを実施させて運動由来のシナジーを取得するとともに、安静状態で5つの脊髄節レベル（L2-3, L1-2, Th12-L1, Th11-10, Th10-9）に対して経皮的脊髄刺激を順次行い、誘発された筋応答を記録した。研究1との比較を厳密にするため、研究1と同一の下肢・体幹筋群から筋電図（EMG）を導出し、非負値行列因子分解（NMF）により各刺激レベルで誘発される筋シナジーを抽出した。抽出した刺激由来シナジーと、トレーニング（SFM）由来シナジーとの対応関係を、研究1と共通の指標であるSPで評価し、 $SP > 0.7$ を一致の基準とした。これにより、各脊髄節レベルの刺激が、ジャンプに必要な股関節・膝関節・足関節の伸展に関わる協調パターンをどの程度再現するかを定量的に照合した。

【結果】 脊髄刺激によって誘発された筋応答から、ジャンプに関与する下肢の筋協調パターンを抽出できることが確認された（ $SP > 0.7$ ）（図2）。これは、研究1で同定した、トレーニングで強化される協調パターンが、脊髄分節レベルへの刺激によっても賦活され得ることを示している。一方で、これらの伸展協調パターンを特異

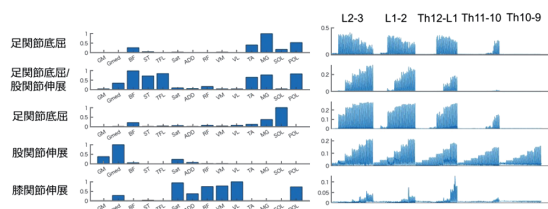


図2 各脊髄節レベルへの経皮的脊髄刺激（tSCS）で誘発された筋シナジーと、トレーニング（SFM）由来シナジーとの類似性。5つの脊髄節レベル（L2-3, L1-2, Th12-L1, Th11-10, Th10-9）の刺激で誘発されたシナジーと、ジャンプに必要な股関節・膝関節・足関節の伸展に関わるトレーニングシナジーとのSPを示す。伸展協調パターンは複数の節レベルにまたがって誘発され（ $SP > 0.7$ ）、効率的な賦活にはTh12-L1より下位レベルの刺激が適することを示す。

的に引き起こす単一の脊髄節レベルは存在せず、各パターンは複数の節レベルにまたがって誘発された（協調パターンと脊髄節レベルが1対1で対応するわけではない）。ただし誘発効率の観点では、ジャンプに必要な下肢伸展パターンを効率よく賦活するためには、Th12-L1レベルより下位（尾側）の刺激が最適であることが示された。

研究3：tSCSによる脊髄および皮質脊髄路の興奮性の変調

研究シリーズの最終段階である研究3では、研究2で同定した脊髄節レベルへのtSCSが、脊髄および皮質脊髄路（corticospinal tract）の興奮性に与える生理学的効果を、刺激介入の前後で検証した（代表例1名）。大腿直筋から表面筋電図を記録し、tSCSによる脊髄誘発反射（後根筋反射；脊髄分節の興奮性の指標）と、経頭蓋磁気刺激（TMS）による運動誘発電位（MEP；皮質脊髄路の興奮性の指標）を、tSCS介入（約21分）の前（PRE）・直後（POST0）・10分後（POST10）に各約15回計測した。

その結果、tSCS誘発脊髄反射の振幅は介入後に明瞭に増大した。効果は介入直後よりむしろ10分後に大きく（PRE比+30%, Kruskal-Wallis検定 $p < 10^{-6}$ ）、一過性ではなく持続的に脊髄の興奮性が高まっていた（図3-1, 図3-2左）。一方、皮質脊髄路を反映するMEPは介入前後で不変であった（図3-2右）。すなわち、tSCSは脊髄分節レベルの興奮性を選択的かつ持続的に増大させ、皮質脊髄路の興奮性には影響を及ぼさないことが示された。

脊髄の興奮性が増大し皮質脊髄路は不変であった生理学的機序

tSCSは脊髄後根（Ia群求心性線維）を主に興奮させ、後根-運動ニューロン間のシナプス伝達効率、シナプス前抑制、介在ニューロン回路といった脊髄分節レベルの興奮性を調整する。tSCS誘発反射はこの脊髄反射弓の興奮性

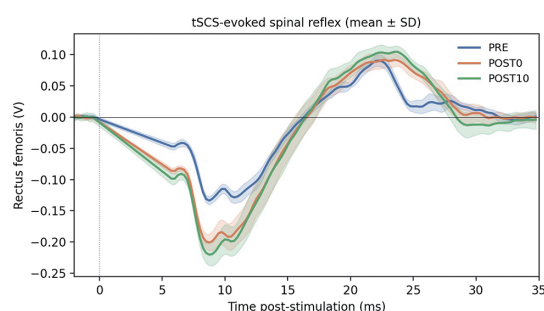


図3-1 tSCS 誘発脊髄反射の誘発波形（全試行の平均±標準偏差）。介入後（POST0・POST10）に反射応答が増大しており、脊髄分節の興奮性増大を示す。

を反映するため、その増大は脊髄分節レベルの興奮性が高まったことを示す。効果が介入直後よりも10分後に大きかったことは、刺激中・刺激後にシナプス可塑性的な持続的変化（脊髄レベルでの神経変調）が生じたことを示唆する。

一方、MEPは大脳皮質運動野→皮質脊髄路→脊髄運動ニューロン→筋という経路全体の興奮性を反映する。tSCSは皮質や皮質脊髄路を直接賦活しないため、これら上位中枢の興奮性は変化せず、MEPは不変であった。さらに、もしtSCSが脊髄運動ニューロンプール全体の興奮性を一様に高めていたのであれば、共通の出力段である運動ニューロンを介してMEPも増大するはずである。MEPが不変であった事実は、tSCSの作用が運動ニューロンプール全体に対する一様な賦活ではなく、求心性入力から脊髄反射回路に至る分節性の経路に選択的に働いたことを示している。以上より、本介入による神経変調は脊髄分節レベルに局在することが生理学的に裏づけられた。

以上、3つの研究を通じて、ジャンプを支える筋協調パターンの同定（研究1）、その協調を誘発する脊髄分節レベルの特定（研究2）、そして当該レベルへのtSCSが脊髄分節の興奮性を選択的・持続的に高めるといふ生理学的効果の実証（研究3）が一貫して示された。これは、トレーニングとtSCSを組み合わせで動作能力

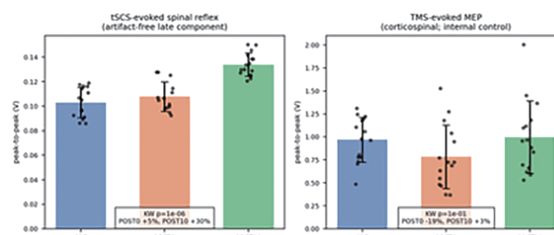


図3-2 誘発応答の振幅（peak-to-peak, 各点=1試行）。左：tSCS 誘発脊髄反射は介入後に増大し、10分後に最大となった。右：皮質脊髄路を反映するMEPは介入前後で不変であった。

を高める介入法の確立に向けた、行動から神経生理に至る一連の基盤を提供するものである。

[成果の発表、論文など]

斎藤寛樹：スポーツ動作を支えるファンクショナルムーブメントと筋協調パターン—効率的な障害予防エクササイズ構築に向けて—, 体育の科学, 76, 2, 2026.

斎藤寛樹：運動障害に関連する筋協調パターンの変化とそのリハビリテーションへの応用, シンポジウム「Neuroplasticity and Neuromodulation — Maximizing Human Movement Potential (神経可塑性とニューロモジュレーション—ヒトの運動能力を最大化する)», 2025.

Saito H, Endo N, Sugawara R, Tashiro Y, Miura R, Wada N, Matsushita K, Oonishi-Ito S, Otsudo T, Nakayama T: Neuromechanical Contributions of Single-Joint Focused Movement Synergies to Vertical Jump Performance: Implications for Targeted Exercise Selection, 30th Annual Congress of the European College of Sport Science, 2025.

Oonishi-Ito S, Matsushita K, Kakehata G, Nakayama T, Otsudo T, Saito H: A Pilot Study on Knee and Ankle Muscle Co-Contraction Index During Single Leg Drop Jump After People Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction, 30th Annual Congress of the European College of Sport Science, 2025.

Saito H, Yamano A, Suzuki N, Matsushita K, Yokoyama H, Van Cant J, Nakazawa K: Muscle Synergies in Single-Leg Hops: Neuromuscular Adaptations for Increased Hop Distance, J Appl Biomech, 41, 5, 418–426, 2025.

Saito H, Yamano A, Suzuki N, Matsushita K, Yokoyama H, Van Cant J, Nakazawa K: Neuromechanical strategies for longer forward jumps: A muscle synergy analysis of single-leg hops, 29th Annual Congress of the European College of Sport Science, 2024.