

令和 3 年 5 月 22 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K10861

研究課題名(和文) 脊髄歩行中枢機能からスポーツ選手の「足の速さ」を説明できるか？

研究課題名(英文) Does the function in the spinal locomotor circuitry determine the sprint ability in sports athletes?

研究代表者

河合 一武 (Kawai, Kazutake)

日本大学・スポーツ科学部・教授

研究者番号：50214581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：スポーツ選手のスプリント能力を神経生理学から検証することを目的とした。ヒト腰髄にある脊髄歩行中枢を非侵襲的に歩行リズムで磁気刺激して以下の結果を得た。律動的な歩行様の両下肢運動を誘発するための刺激強度特性を調べた。低強度ではホッピング様運動が、高強度では歩行様運動が誘発され、ヒト腰髄に歩行とホップの異なる神経回路の存在を示唆した。

同法を用いてスポーツ選手を対象に腰部18か所を刺激して歩行様運動が誘発される部位を同定した脊髄機能地図を競技別に作成・比較し、運動経験・習慣のスプリント能力への影響を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、脊髄損傷後に損傷を免れた腰髄を硬膜外から電気刺激することで歩行機能を再建できる治療法が開発された。これには侵襲的に刺激電極を埋め込むため、軽度歩行障害の治療法には適さず、非侵襲的な方法が期待されていた。

本研究の目的は、経脊椎磁気刺激を用いて非侵襲的に歩行様運動を誘発するために必要な刺激強度を調べることにより、脊髄歩行中枢の神経回路が賦活されるメカニズムを明らかにするとともに、運動の習慣や介入によるこの神経回路への影響を検証することである。この目的が達成されるならば、本刺激法は、腰髄にある脊髄歩行中枢を賦活することができ、脊髄損傷等の歩行不全に対する革新的なりハビリテーション法になりうる。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate the sprint ability of athletes from a neurophysiological point of view, we firstly aimed to clarify the mechanism by which the neural circuitry of the spinal locomotor center is activated. We demonstrated that Transvertebral magnetic stimulation (TVMS) is capable of inducing multi-patterned locomotor-like behavior by changing stimulus intensity, and that walking-like behavior requires higher stimulus intensity than hopping-like behavior. These results imply existing distinct modules for hopping and walking in human spinal cord.

Using same method, we compared spinal cord function maps that identified areas where walking-like movements were induced by stimulating 18 lumbar areas in athletes, and elucidated the effect of sports experience on sprint ability.

研究分野：神経生理学

キーワード：脊髄歩行中枢 経脊椎磁気刺激 刺激強度 歩行様運動 脊髄機能地図

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトの「足の速さ」すなわちスプリント能力は、筋生理学や運動力学から解析されたものの、筋力や動きを制御している神経メカニズムについては未だ基礎的な神経基盤しかわかっていない。動物実験では、脊髄への電気刺激等により歩行運動が誘発されることから脊髄に歩行を生成する脊髄歩行中枢 (Central pattern generator) の存在が知られていた。

近年、脊髄損傷後に損傷を免れた腰髄を硬膜外から電気刺激することで歩行機能を再建できる治療法が開発された (Herkema et al., 2011; Angeli et al., 2018 他)。これには侵襲的に刺激電極を体内に埋め込むため、軽度歩行障害の治療法には適さず、非侵襲的な方法が期待されていた。一方、これまで大脳皮質を刺激することを目的に利用されていた磁気刺激装置を用いて、経脊髄にヒトの腰髄を持続的に磁気刺激することにより下肢に歩行様運動を誘発できることが健常成人での研究 (Gerasimenko et al., 2010) で示された。しかしながら、この研究での持続的な刺激による歩行様運動の誘発は 15% 程度と低確率であった。我々は、ヒトの腰髄への非侵襲的な歩行リズムでの連発磁気刺激により下肢の律動的な歩行様運動が高頻度で誘発されることを確認した (Sasada et al., 2014)。さらに、歩行様運動が誘発される部位を腰髄に特定することで、脳研究における基礎的な知見である大脳の「体部位再現」と同様、脊髄においても機能地図が描けることを見出ししていた。以上の研究背景から、我々はヒトの「足の速さ」を筋力や動きを制御する神経メカニズムの解明からアプローチすることに着目していた。

### 2. 研究の目的

- (1) 経脊髄磁気刺激を用いて非侵襲的に歩行様運動を誘発するために必要な刺激強度特性を調べることにより、ヒトの脊髄歩行中枢の神経回路が賦活されるメカニズムを明らかにする。
- (2) (1)と同法を用いてヒト腰髄を複数箇所刺激すると、歩行様運動が誘発された部位を特定することにより脊髄機能地図を作成できる。この脊髄機能地図の形成にスポーツ経験やトレーニング効果がどのように反映されるかを明らかにし、「足の速さ」を神経生理学から検証する。さらに、脊髄歩行中枢の機能を観ればスポーツタレントを把握できるか？ 脊髄歩行中枢にトレーニング効果があるか？ 脊髄歩行中枢に短期介入運動による可塑性が認められるか？ という観点から検証する。

### 3. 研究の方法

(1) 健常成人男性 10 名を対象とした。ベッド上で横臥位をとらせた研究対象者の両脚を免荷のため天井よりワイヤーで吊したホルダーまたはプレート上に置かせた (図 1)。研究対象者には片手親指の筋活動による随意的な磁気刺激の制御をいつつ、歩行様運動が最も誘発される腰髄の部位に対し、磁気刺激装置の最大刺激強度 10% ~ 70% の範囲を 10% 刻みで刺激した。

(2) 選択的歩行群として陸上競技・短距離、陸上競技・長距離、サッカーの 4 種目の選手を、両脚競技群としてバレーボール、重量挙げ、体操の 3 種目の選手を、コントロール群として同年代の主だった運動経験の無い成人を対象とした。いずれの種目・群においても健常成人男性 8 名程度とした。

研究対象者ごとに、歩行様運動を誘発する最適な刺激強度を調べ、一定強度で腰髄 18 か所を刺激した (図 2)。そして、各種目の研究対象者ごとに脊髄機能地図を作成した (図 4)。

(1)、(2)とも研究対象者には、片側の肩関節と腸骨稜、両足の太転子、膝関節、足関節および爪先に反射センサーを塗付し、誘発される下肢の運動をモーションキャプチャー装置で記録した。その記録データから両脚の位相差 (Phase difference: deg) などの下肢運動とキネマティクスとの関係を検証した (図 3)。また、両側の大殿筋、腸腰筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、ヒラメ筋から筋電図を導出し、誘発運動に関与する筋活動を調べた。なお、磁気刺激をする際には、験者が刺激プローブコイルを研究対象者の背側部腰髄椎間付近に当て経皮的に刺激した。

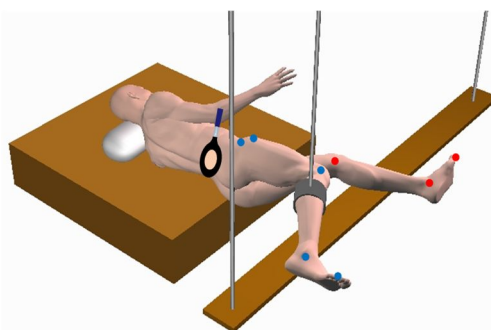


図 1 実験中の研究対象者の体勢と装置

Stimulus sites of magnetic stimuli

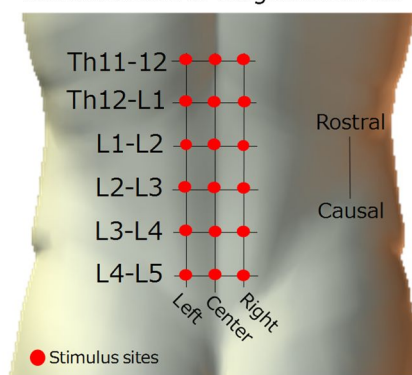


図 2 腰髄椎間 18 か所の磁気刺激部位

#### 4. 研究成果

(1) ヒト腰髄に磁気刺激を与えると両脚に locomotion 様の運動が誘発された。これを左右の脚の位相差 (Left-right Phase difference (deg) : 図3 縦軸) でみると、左右脚が同位相で動くホッピング様運動 (位相差 30 deg 未満) と逆位相で動く歩行様運動 (位相差 150 deg 以上)、さらには、どちらにも分類されない運動 (位相差 30 ~ 149 deg) の3種類の運動が誘発された (図3)。なお、誘発された運動の分類には、研究対象者に随意的なホッピング運動 (Hop) と歩行運動 (Walk) を実施させたコントロール実験における位相差の結果 (図3右) をもとに定義した。

刺激強度と誘発された下肢運動の関係を個人内で観ると、比較的低い刺激強度ではホッピング様運動が誘発され、刺激強度を増大させると歩行様運動が誘発される傾向が認められた。

本研究の結果から腰髄一か所への経脊髄的磁気刺激より、下肢にホッピング様運動と歩行様運動が誘発でき、それぞれの運動を誘発するために必要な刺激強度が異なることから、ホッピング様運動と歩行様運動は異なる神経メカニズムで駆動されている可能性が示唆された。

本刺激法は、腰髄にある脊髄歩行中枢を効果的に賦活することができ、脊髄損傷等の歩行不全に対する革新的リハビリテーション法になる可能性がある。

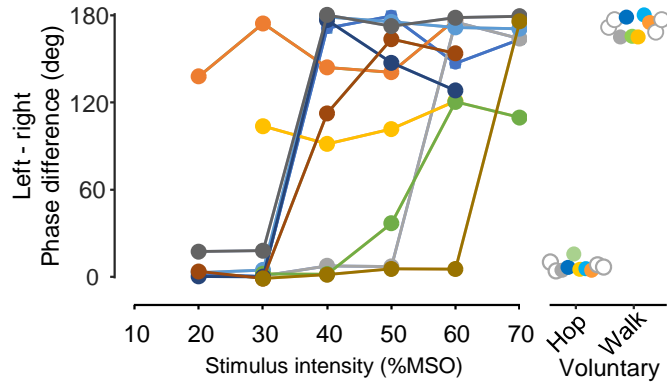


図3 研究対象者を色分けして示した刺激強度別の位相差 (左) 並びに随意的にホッピングと歩行をさせた際の位相差 (右)

(2) 脊髄機能地図に関する重量挙げ (Weightlifting)、バレーボール (Volleyball)、陸上競技・短距離 (Track & Field)、陸上競技・長距離 (Long-distance) の結果を研究対象者別に図4に示した。図4右側のカラースケールに示したように、濃い青がホッピング様運動 (位相差 30 deg 未満) を示し、明るい黄色が歩行様運動 (位相差 150 deg 以上) を示している。

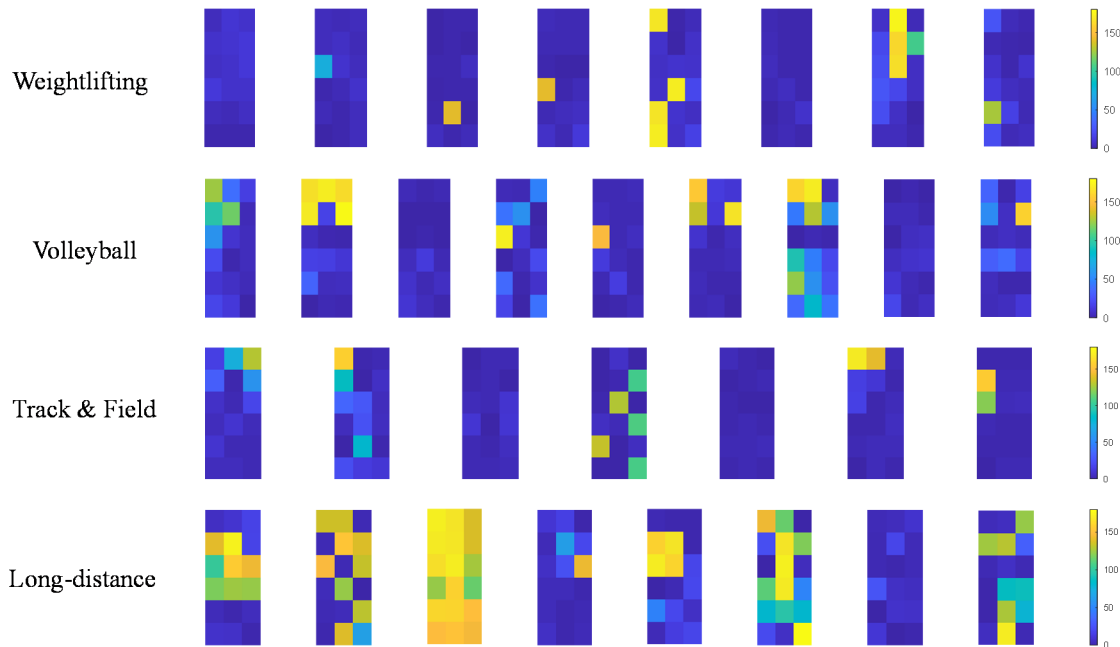
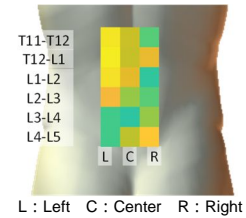


図4 4種目 (重量挙げ、バレーボール、陸上・短距離、陸上・長距離) の研究対象者ごとの脊髄機能地図

両脚競技群とした重量挙げでは2名の研究対象者に歩行様運動 (明るい黄色) が誘発されるも、8名中6名で歩行様運動が誘発されなかった。同じくバレーボールでは、9名中5名に歩行様運動が誘発されたものの、残りの4名には誘発されなかった。また、歩行様運動の誘発部位は比較的腰髄の上部であった。

選択的歩行群とした陸上競技・短距離、陸上競技・長距離では、短距離で8名中3名で歩行様運動が認められた。これに対して長距離では8名中6名に歩行様運動が認められ、他の競技種目とは歩行様運動の誘発において高頻度かつ多部位であった。

以上から、高いスプリント能力を要求されない長距離選手の練習方法や陸上・長距離の経験年数が脊髄機能に影響を与え、その脊髄機能地図に反映されたものと考えられる。このことは脊髄歩行中枢へスポーツ経験やトレーニングが影響を及ぼすことを示しており、歩行不全のリハビリテーション応用への可能性を示唆していた。

今後は、すでに実験を終えてデータ解析中である体操競技とサッカーおよび運動経験の少ないコントロール群の研究対象者を結果データに加え、今年度内に学会において発表する。さらには、コロナ禍で停滞している脊髄歩行中枢への短期介入運動による影響(可塑性)を検証する残り3名の実験とデータ解析を終了させたのち、学位論文として仕上げる予定である。

#### <引用文献>

- 1) Angeli CA, Boakye M, Morton RA, Vogt J, Benton K, Chen Y, Ferreira CK, Harkema SJ. (2018) Recovery of Over-Ground Walking after Chronic Motor Complete Spinal Cord Injury. *N Engl J Med.*, 379(13):1244-1250.
- 2) Gerasimenko YP, gorodnichev R, Machueva E, Pivovarov E, Semyenov D, Savochin A, Roy RR, Edgerton VR (2010) Novel and direct access to the human locomotor spinal circuitry. *J Neurosci* 30:3700-3708.
- 3) Harkema S, Gerasimenko Y, Hodes J, Burdick J, Angeli C, Chen Y, Ferreira C, Willhite A, Rejc E, Grossman RG, Edgerton VR (2011) Effect of Epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study. *Lancet* 377:1938-1947.
- 4) Sasada S, Kato K, Kadowaki S, Groiss SJ, Ugawa Y, Komiyama T, and Nishimura Y. Volitional Walking via Upper Limb Muscle-Controlled Stimulation of the Lumbar Locomotor Center in Man. *The Journal of Neuroscience*, 2014 August 13, 34(33):11131-11142. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4674-13.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 河合一武 田添歳樹 彼末一之 西村幸男	4. 巻 16
2. 論文標題 ヒト脊髄歩行中枢の入力出力関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 スポーツ科学研究	6. 最初と最後の頁 49 - 61
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 河合一武、田添歳樹、彼末一之、西村幸男
2. 発表標題 経脊椎磁気刺激法によるヒトのロコモーションを生成する神経回路の駆動
3. 学会等名 第97回日本生理学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河合一武、田添歳樹、彼末一之、西村幸男
2. 発表標題 経脊椎磁気刺激による脊髄歩行中枢駆動の刺激強度特性
3. 学会等名 次世代脳2018冬シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazutake Kawai, Toshiki Tazoe, Kazuyuki Kanosue, Yukio Nishimura
2. 発表標題 Activation of human spinal locomotor circuitry using transvertebral magnetic stimulation
3. 学会等名 日本神経科学会 第44回大会（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	西村 幸男  (Nishimura Yukio)  (20390693)	公益財団法人東京都医学総合研究所・認知症・高次脳機能研究分野・プロジェクトリーダー   (82609)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------