

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K12050

研究課題名(和文) 足こぎ車いすと仙骨部表面電気刺激を活用した重度歩行困難者の機能再建に関する研究

研究課題名(英文) A Study on the Functional Restoration of the Severely Walking-Disabled Persons Using the Cycling Wheelchair and Sacral Surface Electrical Stimulation

研究代表者

半田 康延 (Handa, Yasunobu)

東北大学・医学系研究科・名誉教授

研究者番号：00111790

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)：第11胸椎-仙骨間表面電気刺激(T-SES)の歩行推進機能への効果について、仙骨および第11胸椎の単独表面刺激(各SES、T11ES)と比較した。その結果、健常者、歩行障害者ともに最大歩行速度、最大足漕ぎ車いす走行速度がT-SESで最も速く、TUGは健常者半数で、歩行障害者全員でT-SESのTUGが短縮した。また、T-SES訓練導入前に比し導入3か月後にはTUGが短縮した。脊柱配列CT分析ではT-SESで仙骨前傾角が最も大きかった。刺激なしでは下肢筋放電は見られず、T-SESで筋放電の増強が認められた。これはSESとT11ESの組み合わせ同時刺激が脊髄歩行関連回路を賦活した可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

仙骨(SES)と第11胸椎(T11ES)を組み合わせた同時表面電気刺激が、それぞれの単独刺激に比しより歩行推進効果をもたらすことが判明した。これは仙骨神経根求心性線維活動が脊髄を上行して脊髄歩行関連回路(CPG)に入力するとともに、T11ESにより第2腰椎にあるCPGを直接刺激することによる相乗的CPG賦活効果が得られたものと思われる。このことは従来の学説に新しい知見を加えたものであり学術的意義は高い。また、臨床医学的にT-SES訓練により歩行障害者の歩行推進機能を高めることが判明しており、その臨床医学的、社会学的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The effect of the 11th thoracic-sacral surface electrical stimulation (T-SES) on the gait propulsion function was compared with the single surface stimulation of the sacrum and the 11th thoracic vertebra (SES, T11ES, respectively). As a result, the maximum walking speed and maximum pedaling wheelchair running speed were the fastest in T-SES for both healthy and disabled people. The TUG of T-SES was shortened in half of the healthy people and all the walking disabled people. In addition, TUG was shortened 3 months after the introduction of T-SES training compared to before the introduction in the walking disabled. In the spinal alignment CT analysis, the sacral anteversion angle was the largest in T-SES. No lower limb muscle discharge was observed without stimulation, and T-SES induced muscle discharge of the hamstrings. It is possible that the combined simultaneous stimulation of SES and T11ES activated the spinal cord gait-related circuit.

研究分野：リハビリテーション医工学

キーワード：仙骨・胸椎間表面電気刺激 仙骨表面電気刺激 歩行速度 歩行障害者 足こぎ車いす

## 1. 研究開始当初の背景

高齢化が進むと、多かれ少なかれ歩行機能が劣化してくることが避けられない。また、脳卒中や腰部脊柱管狭窄症のような疾患も高齢者で増加し、歩行困難者の割合が増えてきている。このことは、各個人個人の問題に加え社会活動の低下を招く結果をもたらしている。

我々は、仙骨部表面電気刺激（SES）が健常者や歩行障害者の歩行機能を明らかに向上させることを発表してきた<sup>1)</sup>。一方、多くの研究者が脊髄歩行関連回路（central pattern

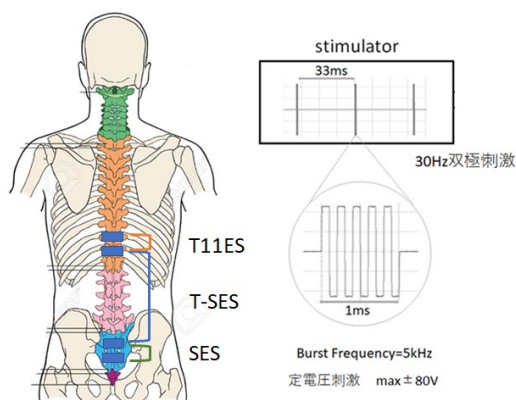


図1 刺激パラメータと刺激部位

generator: CPG) のある第2腰髄への硬膜外刺激や経皮的電気刺激が歩行機能の再建効果をもたらすことを報告している<sup>2,3,4)</sup>。このような歩行の劣化を改善する電気刺激法が今後の高齢化社会において日常生活と社会活動の活性化をもたらすものとして注目されてきている。

## 2. 研究の目的

ヒトは半自動的に歩行運動を行う。これには第2腰髄レベルにあるCPGがパターン化された交代性の歩行運動指令を両下肢に送っていることによる。Gerasimenkoら<sup>5)</sup>は健常被験者での一側下肢を宙づりし、第2腰髄を経皮的に電気刺激することにより歩行関連動作が得られると述べている。そしてそれに頸髄や下部腰髄への電気刺激を加えると、歩行関連動作がさらに増強されることを報告している。このことはCPG以外の髄節からの求心性入力CPGの活動度をmodulationしている可能性を示唆している。

今回、われわれは、歩行能力を向上させるSESに加えて仙骨とT11棘突起間の双極性刺激(TSES)の歩行機能を解析し、その歩行推進効果のメカニズムについて検討するとともに、臨床応用の可能性について明らかにすることを目的として研究を行った。

## 3. 研究の方法

(1) 対象：健常被験者および歩行障害者を被験者として、TSESとSESおよびT11棘突起刺激(T11)を与えた際の歩行機能と足漕ぎ車いす駆動機能について調べた。

(2) 電気刺激パラメータと刺激部位

図1に我々が作製した1channel電気刺激装置の刺激パラメータと刺激部位を示す。10kHzのキャリア周波数で満たされた、持続時間が1msの双極性矩形波刺激とし、刺激電圧は、痛覚閾値の80%に設定した。刺激周波数は30Hzに固定され、被験者ごとにあらかじめ設定した一定の電圧で持続的に刺激電極に与えた。

(3) 電極

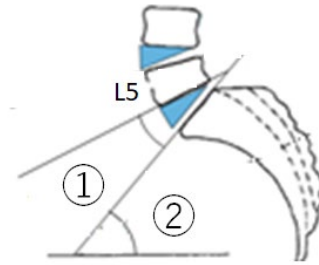
電極は、第11胸椎棘突起と第10胸椎棘突起に貼付し、この間の刺激をT11とした。また、両側の第1後仙骨孔に跨ぐ電極と両側第3～4後仙骨孔を跨ぐ電極を貼付し、その間の刺激をSESとした。さらに、T11棘突起の電極と第一後仙骨孔の電極間の刺激をTSESとした。

(4) 筋電図計測

作製した筋電計には、筋電図に含まれる5kHz高周波搬送波ノイズと刺激電極の動きなどから発生する低周波ノイズを除去する10Hz～100Hzのバンドパスフィルターを内蔵した。また、AC電源からの50Hzのハムを除去するために20msの遅延時間を持つデジタルコムフィルター回路を設けた。これによって刺激電極近傍の筋からも筋電図を安定して計測することができた。

(5) 脊椎アラインメントの CT 解析

CT 画像を使用して、非刺激時 (nES)、TSES、SES および T11 印加時の脊椎アラインメント変化を 5 名の健常被験者で分析した。各被験者は、CT スキャナーステージの右側臥位に横たわるように指示された。これは立位では避けられない体幹の不安定な揺らぎを最小にするための措置である。CT 画像で腰椎仙骨角 (LSA) と仙骨前傾角 (SHA) を測定した (図 2)。



① 腰仙角(L5/S1)  
② 仙骨前傾角

図 2 脊柱の角度計測

4. 研究成果

(1) TSES、SES および T11 を与えた際の 10m 最大歩行速度

(10mMWS) を健常被験者 16 名で測定した (図 3)。その結果、nES 時の歩行速度に比し他の刺激法での歩行でのすべてで 10mMWS が増加した。そして、TSES での歩行で最も速度が速く、次いで SES、T11 の歩行速度が有意に小さいことが判明した。図 4 は、腰部脊柱管狭窄症により歩行障害を呈している 72 歳男性の 10m 最大歩行速度を示したものである。ここでも、健常被験者と同様の結果が得られている。

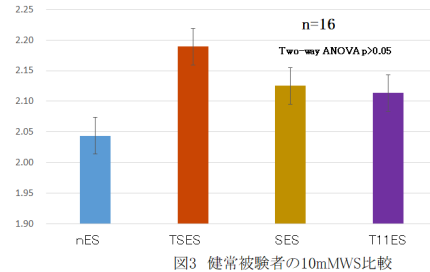


図3 健常被験者の10mMWS比較

(2) 図 5 は、健常被験者 8 名、歩行障害者 5 名における Timed Up & Go テスト (TUG テスト) の結果を示したものである。TUG テストとは、人が椅子から立ち上がって 3 メートル歩き、180 度回転し、椅子に戻って、180 度回転しながら座るのにかかる時間を測るものである。健常被験者(a)では、TSES、SES および T11 の TUG の所要時間は nES より有意に短い結果となった。その中でも TSES の TUG が最も短い値を示した。一方、歩行障害者(b)でも TSES、SES および T11 の TUG の所要時間は nES より有意に短い結果となっている。しかし、そのうち SES での TUG 所要時間が TSES より短い傾向が示されたが、統計学的に有意な差ではなかった。

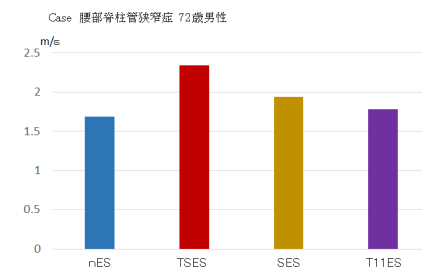


図4 歩行障害者の10m最大歩行速度比較

(3) 脊髄小脳変性症患者 2 名で TUG テストを行った。2 名とも小脳失調性の歩行困難があり、歩行器歩行を行っている。図 6 は、電気刺激訓練開始前の nES、TSES、SES を与えている際の TUG の所要時間を調べたものである。いずれの症例でも nES の TUG 所要時間よりも TSES、SES

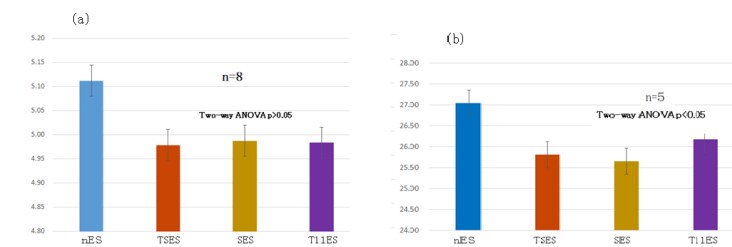


図5 健常被験者(a)および歩行障害者(b)におけるTUGテスト比較

(3) 脊髄小脳変性症患者 2 名で TUG テストを行った。2 名とも小脳失調性の歩行困難があり、歩行器歩行を行っている。図 6 は、電気刺激訓練開始前の nES、TSES、SES を与えている際の TUG の所要時間を調べたものである。いずれの症例でも nES の TUG 所要時間よりも TSES、SES



図6 T-SES訓練前TUG所要時間

図7 TUG所要時間とT-SES訓練期間

で短くなっており、TSES での所要時間は SES よりも短かった。図 7 は、これら 2 名の脊髓小脳変性症に TSES 訓練を 1 回 15 分週 2 回を与えた際の訓練前と訓練 180 日後の TUG 所要時間を計測したものである。2 名とも 180 日訓練経過後の TUG 所要時間が短くなっている。2 名とも 180 訓練後の歩行時に、「歩行速度が上がるのに加え足の運びがスムーズで楽になった」とコメントしている。

(4) nES、TSES、SES および T11 における脊椎アライメントの CT 画像代表例を図 8 に示した。図 8-a は、nES での脊柱アライメントを黄色破線でトレースし、TSES、SES および T11 の CT 画像に重ね合わせたものである。ここに示すように前弯は T11、TES、SES の順に大きくなっている。

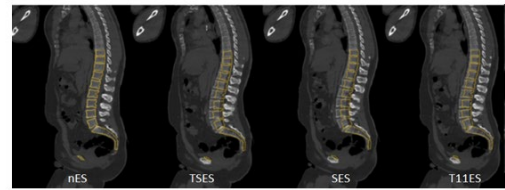


図8 各刺激における脊柱アライメント変化

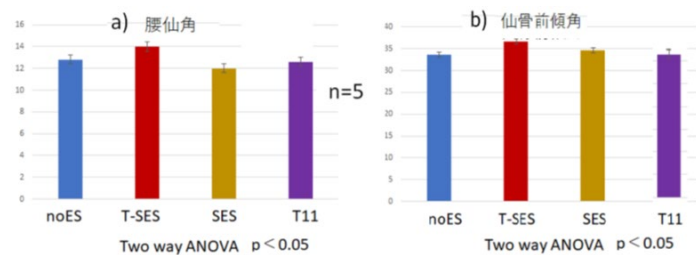


図9 各刺激条件における腰仙角(a)および仙骨前傾角(b)

一方、図 2 に示した要領で

nES、TSES、SES および T11 の腰仙角および仙骨前傾角計測のための CT 画像を図 8-b に示す。この中で腰仙角および仙骨前傾角のいずれも TSES で最も大きいのが見て取れる。

(5) 健常被験者 5 名における nES、TSES、SES および T11 での腰仙角と仙骨前傾角の平均値と標準誤差を図 9 に示す。いずれの場合も TSES での値が他の刺激条件より大きいことが判明した。

(6) 図 10 は、静止立位時と歩行中における右の内側ハムストリングス、大腿四頭筋、腓腹筋、前脛骨筋の筋電図を nES と TSES の条件で記録したものである。静止立位時において、nES では筋放電が極めて小さいか認められていないが、TSES では大腿直筋以外で明らかな筋放電が見られた。歩行中の筋電図を見ると、内側ハムと腓腹筋で筋放電量が軽度増加しているのが認められた。さらに筋放電と筋放電の間隔が狭くなっていた。

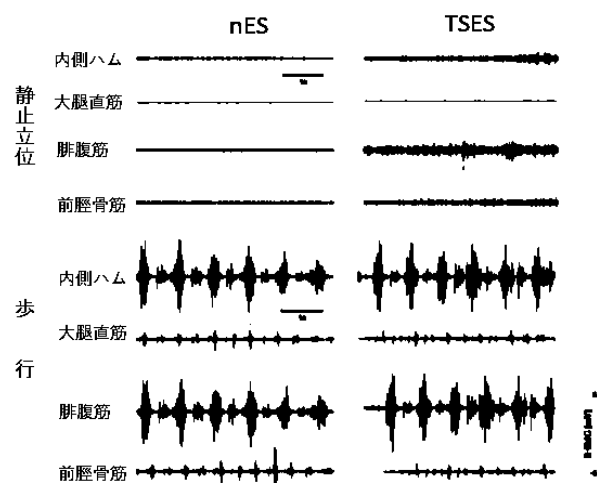


図10 静止立位時と歩行時におけるnESとTSESの筋電図比較

(7) 健常者における 10m 最大足漕ぎ車い

す走行速度 (10mMDS) を求めた。その結果、TSES で最も速く次に T11、SES の順で速くなった。ただしこの実験では被験者数が少ないためさらに被験者数を増やす必要がある。

(8) 20 年前動静脈奇形による脳出血で重度の四肢麻痺を呈した 44 歳女性に 1 年半前の 2020 年 11 月より TSES と足漕ぎ車いす訓練を開始した。訓練開始直前の診察では、左上下肢は弱い筋収縮のみで、右上下肢は関節運動がほとんどできず ADL は全介助であった。図 12、13 は TSES および SES 付加時の足漕ぎ車いす走行速度の時系列変化を示している。TSES、

SES のいずれにおいても訓練開始後 77 日目の計測で走行速度が増加しており (図 12)、TSES に注目すると訓練開始後 6 か月には開始時の約 2.3 倍速度が増加していた (図 13)。それに加え、長距離・長時間の駆動が可能となってきており、それが実生活の場において、足漕ぎ車いす使用で大型店舗での買い物ができるようになってきている。このことが本人の QOL 向上にも繋がっていることも大きな成果である。

#### (8) まとめ

TSES は、歩行、足漕ぎ走行のいずれでも大部分で速度が最も速かった。これには、仙骨の前傾角が TSES で最も大きいという物理的要因が関与していると思われる。また、TSES による内側 hamstrings や腓腹筋の筋放電を増加させ立脚期での股関節伸展トルクを増加させていること、さらに、TSES により CPG の直接刺激と CPG 近傍の神経根求心性活動による CPG 活性化に加え、仙骨部刺激による仙骨神経根求心性線維に生じた神経活動が CPG を相加的に活性化する neuromodulation 効果をもたらしている可能性があることも速度増加の要因であると思われる。

今回の結果を臨床医学的にみると、長期的 TSES 訓練が歩行機能、足漕ぎ車いす走行機能の改善に繋がっており、今後のリハビリテーション医療の有力な手段になりうると思われる。

#### <引用文献>

- (1) Kitazawa et al., Effects of Sacral Surface Electrical Stimulation on Locomotion in Healthy Subjects. (in preparation)
- (2) Dimitrijevic et al.. Evidence for a spinal central pattern generator in humans. *Ann N Y Acad Sci.* 1998; 86
- (3) Minassian K et al., Human lumbar cord circuitries can be activated by extrinsic tonic input to generate locomotor-like activity. *Hum Mov Sci.* 2007; 26:275-295.
- (4) Harkema S et al., Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: A case study. *Lancet.* 2011;377:1938-1947.
- (5) Gerasimenko Y et al., Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans. *J Neurophysiol.* 2015; 113:834-842.

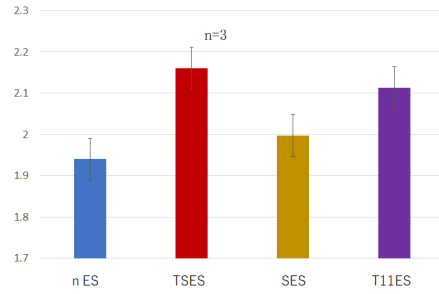


図11 健康被験者の10mMDS比較

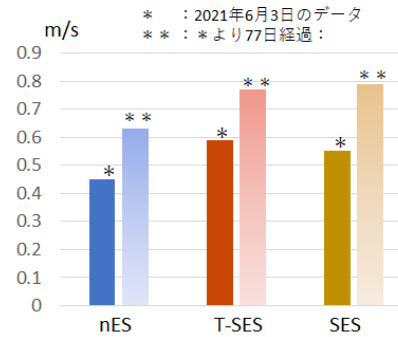


図12 各刺激条件での足漕ぎ車いす走行速度の時間変化

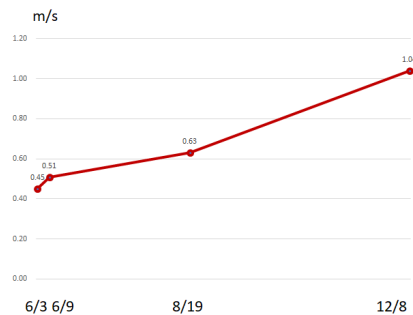


図13 長期的T-SES訓練に伴う足漕ぎ車いす自走速度の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋澄江、半田康延、三橋幸聖、二見亮弘、関 和則 他4名
2. 発表標題 第11胸椎棘突起-仙骨間表面電気刺激の歩行機能への効果
3. 学会等名 日本ニューロモジュレーション学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 半田 康延, 高橋 澄枝, 二見 亮弘, 三橋 幸聖, 高瀬 貞夫, 関 和則, 福川 亜委美, 斎藤 愛美, 日向 菜月, 北澤 功圭, 千葉 秀樹
2. 発表標題 第11胸椎棘突起-仙骨間電気刺激 (T-SES) の 歩行推進効果
3. 学会等名 日本リハビリテーション医学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 トレーニング方法及びトレーニング装置	発明者 半田康延	権利者 (株)和康会
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-504259	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電気刺激装置および歩行促進装置	発明者 半田康延	権利者 (株)和康会
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-134549	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	関 和則  (Seki Kazunori)  (20206618)	東北大学・医学系研究科・大学院非常勤講師    (11301)	

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
---------	---------