

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02999

研究課題名(和文) 仙骨部表面電気刺激による歩行推進と歩行障害治療に関する研究

研究課題名(英文) effects of sacral surface electrical stimulation on locomotive activities in human

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) 9,600,000円

研究成果の概要(和文)：仙骨表面電気刺激(SES)による歩行と足こぎ車いす(C-WC)駆動への推進効果を調べた。その結果、健常者、歩行障害者双方で最大速度が有意に増加した。そして、ハムストリング筋と腓腹筋の筋放電が増加し、C-WC駆動では、股関節伸展・膝関節屈曲のトルクの増大が認められ、SESの推進効果の一因と考えられた。

脳卒中片麻痺者にC-WC走行中SESを与えると、両下肢の踏込み加速度の不均等性が直ちに均等になった。これは麻痺下肢の筋収縮プロセスが正常に近づいたことを示す。以上より、SESはその求心性神経活動によって、歩行運動に関連する中枢神経回路網に神経修飾効果をもたらしたと考えられた。

研究成果の概要(英文)：We investigated the propulsive effect on walking and walking wheelchair (C-WC) drive by sacral surface electrical stimulation (SES). As a result, the maximum locomotion speed increased significantly in both healthy and walking disabled people. Here, muscle discharge of hamstring muscle and gastrocnemius muscle increased, and in C-WC driving, an increase in torque of hip joint extension and knee joint flexion was recognized, and it was considered to contribute to the promotion effect of SES.

When SES was given to stroke hemiplegics during C-WC driving, the unevenness of the depression acceleration of both lower limbs was immediately equalized. This indicates that contraction process of the paralyzed limb muscles approaches normal. From the above results, it was considered that SES caused neuromodulation effect on the central nervous system networks related to locomotion by its afferent neural activities.

研究分野：生体医工学

キーワード：仙骨表面電気刺激 歩行機能推進 足こぎ車いす ニューロモジュレーション CPG

1. 研究開始当初の背景

(1) 我々は、蓄尿障害、月経困難症などの骨盤内臓機能障害に対し、仙骨部表面電気刺激法 (Sacral surface electrical stimulation : SES) を開発し、優れた治療効果があることを発表してきた。このうち蓄尿障害のある脳卒中片麻痺者に SES を適用したところ、歩行障害の顕著な改善が認められた。そこで、SES を歩行障害者と健常者に適用したところ、SES を与えると腰が後ろから押される感じがあり、歩行を開始すると歩行速度が増加することが判明した。また3か月間の長期訓練をおこなうと自力歩行の明らかな改善があることが判明したため、その歩行機能推進・改善のメカニズム解明と臨床への応用が可能であることが示唆された。

(2) 歩行がほとんど困難な重度歩行障害者でも、我々が開発した足こぎ車いす (C-WC) を適用するとそれを駆動して長距離・高速で移動することが判明している。足こぎ車いすの搭乗者は体幹が座面とバックレストにある程度固定され安定姿勢にあるとともに、クランク長が一定のペダル漕ぎ運動を行う。そのため体幹や手の運動とはほとんど関係なく、下肢の運動が主体で駆動できることと、走行速度はクランク回転トルクに依存するため、SES による効果をより精緻に解析することが可能となると考えられる。これらのことが背景にあり、研究を開始する動機となっている。

2. 研究の目的

(1) SES の歩行推進機能について、健常被験者および歩行障害者において 10m 最大歩行速度測定と歩行動作解析、脊柱アラインメントの画像医学的解析、機能解剖学的解析、筋電図学的解析などを行い SES の歩行推進のメカニズムを明らかにし、さらに臨床応用への可能性を探る。

(2) 足こぎ車いす駆動時の、非刺激時から SES を与えた際の 10m 最大走行速度、下肢関節トルクおよび下肢の踏み込み加速度の変化を調べ、歩行運動推進のデータも考慮に入れてペダル踏み運動推進のメカニズムを総合的に解明する。

3. 研究の方法

(1) SES の歩行推進効果の被験者

①健常被験者 22名 (男性10名、女性12名) 平均年齢 37.4歳

②歩行障害者 被験者属性 (表1)

症例	患者	性	年齢	疾病	経過月数
1	SO	f	86	脳梗塞	3
2	YC	m	84	脳梗塞	5
3	AS	m	48	くも膜下出血	12
4	KT	m	74	脳塞栓	11
5	IS	m	68	脳梗塞	3
6	SS	f	57	急性軟性脳脊髄炎	12
7	HM	m	71	脳梗塞	2
8	TI	m	66	脳出血	55
9	KI	m	54	急性軟性脳脊髄炎	20
10	YO	f	77	脳出血	27
11	RK	m	47	脳梗塞	17
12	KK	m	66	脳出血	11
13	KO	f	85	パーキンソン病	6
14	SN	m	51	脳出血	25
15	MM	f	49	脳出血	87
16	YO	m	22	脳性麻痺	264
17	KS	f	70	脳梗塞	72
18	IK	f	20	脳出血	16

表1 歩行障害者属性

(2) 実験項目と方法

①電気刺激法

電気刺激波として、1ms 内に 5kHz の双極性矩形状波を包含するパルスを 30Hz の刺激周波数として用いた。刺激は、仙骨皮膚表面上刺激

(SES) のほかに、傍脊柱部刺激 (PVS)、臀部刺激 (GMS) を用いた。

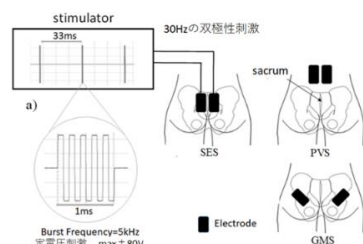


図1 刺激パラメータと刺激部位

(図1)。

②10m 最大歩行速度 (10mMWS)

10mMWS を電気刺激なし (noES)、SES、PVS、GMS で各3回行い最大値を比較した。

③脊柱 alignment の CT 画像変化

noES と SES、PVS、GMS 印加中において、CT 画像を撮影した。被験者は、45 歳以上で子供を欲しない健常男性 5 名で行った。ステージ上では左側臥位とした。

④下肢の表面筋電図計測

歩行関連筋のうち大腿直筋、ハムストリング筋、腓腹筋の表面筋電図を、静止立位時と歩行時、noSES と SES 印加中に計測した。

⑤C-WC10m最大走行速度 (10mMDS)

10m MDS を noES、SES、PVS、GMS で各3回行いその最大値を比較した。

⑥C-WC 駆動時の関節トルク計測

固定型 C-WC 駆動時の股関節伸展、膝関節屈曲トルクを脳卒中片麻痺者 5 名で計測した。

⑦C-WC 駆動時の両下肢踏み込み加速度を計測し比較検討した。

4. 研究成果

(1) 10mMWS に対する電気刺激効果の比較 (図2)

図2-a は健常被験者代表例のスティックピクチャである。その結果、SES 歩行の場合ストライド長が最も長く、歩行速度も最も速かった。次いで noES、PVS、GMS の順にストライド長が短く、速度が遅くなるのが認められた。また、片麻痺による歩行障害をビデオで解析すると、noES ではストライド長が短く、上肢の前後の振りも小さく、また体幹は十分伸展せず不安定性があったが、SES による歩行では、ストライド長が長くなり、上肢

の振りの振幅も大きくなり、背筋がのびて歩行姿勢が著明に改善し、安定した歩容によるより速い歩行が得られることが判明した。

図 2-b, c は、それぞれ健常被験者 15 名、歩行障害者 7 名における刺激部位毎の 10MWS 平均値と標準誤差を示す。健常被験者、歩行障害者のいずれでも、SES 歩行の速度が noES、PVS、GMS よりも有意に大きかった。また健常被験者では、noES と PVS 間には有意差はなく、GMS 歩行速度は他の部位刺激より有意に小さかった。

また、歩行障害者において、1 回 20 分週 2 回の SES 歩行訓練を行った。その結果、6 名の歩行障害者で SES 歩行速度が有意に増加するのがみられた。

(2) 脊柱 alignment に対する刺激効果の CT 画像解析(図 3)

図 3 は健常被験者 (男 47 歳) の noES と各刺激時の脊柱 alignment 変化を示す。GMS では非刺激時 (黄色破線) の脊柱が前方変位するとともに、仙骨の後傾と恥骨の前上方変位が認められ、骨盤の後傾を伴った股関節伸展が生じた(a)。PVS では脊柱全体が前方に変位した (b)。一方 SES では、第 4、5 腰椎の前上方変位と仙骨の前傾が見られた (c)。D) -1, 2 は、SES による腰仙角および前弯角の変化を示したものである。腰仙角は第 5 腰椎の棘突起をほぼ回転中心として、前方方向に上下に開く角度変化を起こしている。これは、第 5 腰椎は前上方回旋し、仙骨は前下方回旋すなわち前傾していることを示し、下部腰椎の伸展と骨盤の前傾が生じているといえる。

図 2 刺激部位の違いによる 10m 最大歩行速度 (MWS)

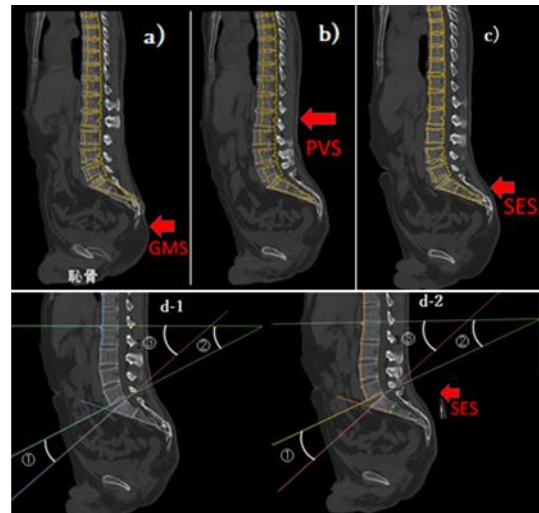
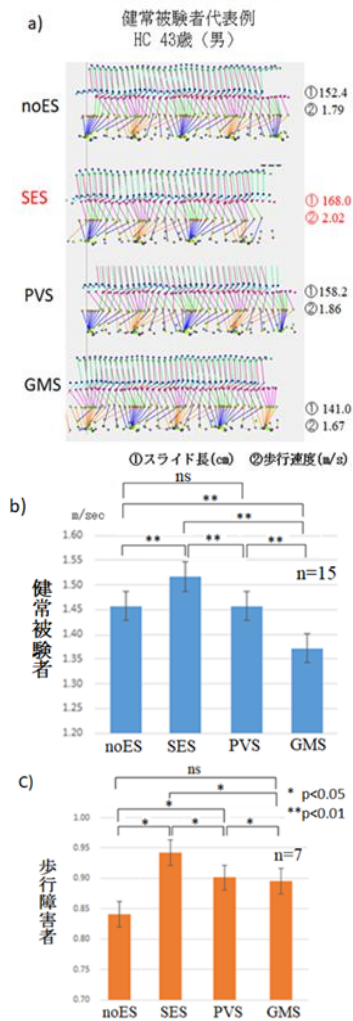
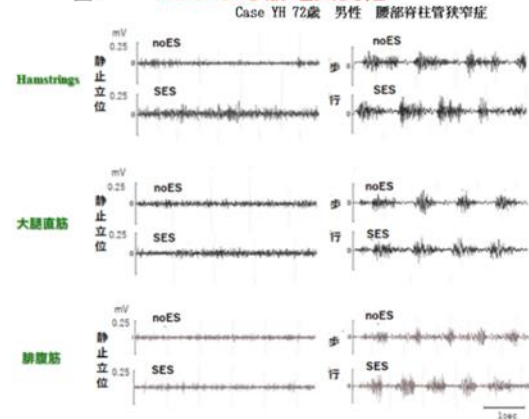


図 3 a)GMS、b)PVS、c)SES を与えた時の脊柱 alignment の変化。黄色の破線は刺激なし (noES) での脊柱 d)腰仙角・前弯角の noSES と SES での比較
腰仙角は noES で 14.5 度、SES で 17 度に増加
前弯角 (L1/L5) は noES で 27 度、SES で 24 度に減少
前弯角 (L1/S1) は noES で 41 度、SES で 39.5 度に減少

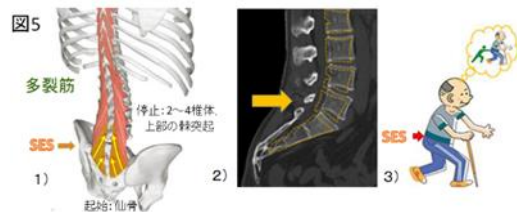
(3) SES による筋電図解析 (図 4)

図 4 は、静止立位時と歩行時に SES を与えた場合の筋電図変化を示す。静止立位時に SES を与えると、ハムストリング筋で顕著な筋放電の増加認められ、大腿直筋、腓腹筋では認められなかった。一方歩行時に SES を与えると、ハムストリング筋と腓腹筋で筋放電が増加し、歩行推進に大きな役割を果たしていることが判明した。

図 4 SES による筋電図変化



(4) 歩行における SES 効果のメカニズム



SES は仙骨上部皮膚から与えられるが、この皮下で最も刺激されていると考えられるのは多裂筋である。仙骨に起始し 2, 3 椎体上の棘突起基部に停止する腰仙部の多裂筋は最も太く発達し、脊柱下部において強力な脊

柱伸展トルクを発生する。このため、SESにより後ろから押された感覚が起こり、実際歩きだしそうになる感覚をもたらすものと思われる(図5)。

(5) 足こぎ車いす 10mMDS に対する電気刺激効果の比較 (図6)

健康被験者 15名、歩行障害者 6名で 10mMDS を測定した。その結果、健康被験者、障害者群のいずれも全員で SES により有意($p < 0.01$)に速度が増加した。

また、頸髄損傷 C4 不全四肢麻痺者(男、51歳)に対し、C-WC での SES 効果を調べた。受傷後 7年目に始めて C-WC を自力で漕ごうとしたが全く駆動できなかった。しかし SES を与えると自力走行が可能となった。その後週に 1度の C-WC 訓練を行っているが、訓練 1 か月程度から自力走行が可能となってきている。

(6) C-WC 駆動時の関節トルク計測 (図7)

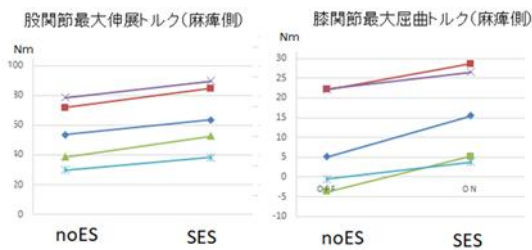


図7 関節トルクに対するSES効果

図7は、脳卒中片麻痺者5名が固定型C-WCを駆動した際の麻痺側下肢股関節伸展、膝関節屈曲トルクを示したものである。全例で、SESにより股関節伸展トルクおよび膝関節屈曲トルクが増加することが判明した。C-WCではクランク長が一定であり、それらトルクの増加はクランク回転トルクの増大をもたらし、結果として走行速度の増加につながったと考えられる。

(7) C-WC 駆動時の両下肢踏み込み加速度のSESによる変化 (図8)

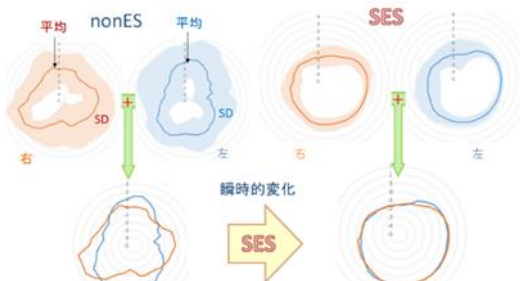


図8 C-WC駆動の踏み込み加速度へのSES効果

図8は、脳出血により右片麻痺を呈した症例の両下肢踏み込み加速度のレーダーチャートを示す。図中、赤、青の実線はそれぞれ左右下肢の踏み込み加速度の平均値であり、上段の実線周囲の塗りつぶしはその標準偏差(SD)

を示す。刺激なしの状態では非麻痺側と麻痺側の平均値の軌跡は大きく異なり、SDも大きい。ここにSESを加えると、時間をおかずに瞬時に左右の踏み込み加速度平均値の軌跡はほとんど重なり、SDも極めて小さくなった。このことは、ペダル踏みに関わる筋の時間的・空間的収縮パターンが瞬時に左右同一のものになったと考えられる。

(8) まとめと考察

仙骨表面からの電気刺激は、電極直下の皮膚や筋・関節などより知覚性の神経活動を誘発するとともに、後仙骨孔を通して仙骨神経根に含まれる体性感覚性および固有感覚性の神経活動を引き起こし、歩行や姿勢制御に関連する脳脊髄内の中枢神経回路網に入力されると思われる。これによって、CPGを含む中枢神経回路網に Neuro-modulation 効果が生じ、歩行運動推進作用が発現されるものと推察される(図9)。

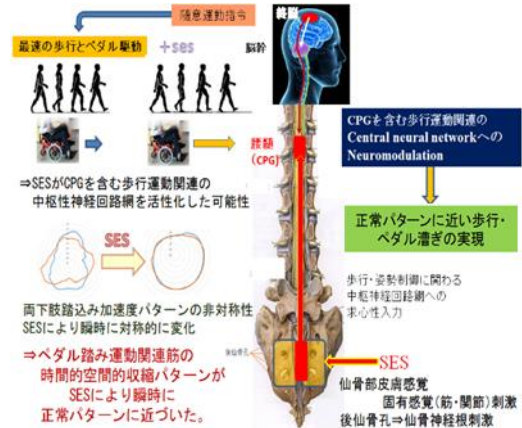


図9 SES のメカニズム

また、SES の効果は刺激をやめれば即時的に消失するものではなく、Carry over 現象があり暫時継続するため、週1~2回程度のSES歩行訓練により歩行障害の改善が見込めるものであり、歩行障害者へのリハビリテーション効果が見込まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① Handa Y, Seki K, Mitsuhasi K, Futami R, Takase S. Effect of sacral surface electrical stimulation on locomotive function. Proc. IFESS (査読なし) 2017, 109

[学会発表] (計5件)

① 福川愛委美、中里和史、三橋幸聖、二見亮弘、高瀬貞夫、関和則、半田康延
仙骨表面電気刺激による歩行推進効果の解析研究、第32回日本ニューロモジュレーション学会、2018

② 中里和史、福川愛委美、三橋幸聖、二見亮弘、高瀬貞夫、関和則、半田康延

足こぎ車いす駆動における仙骨表面電気刺激（SES）の効果とそのメカニズム解析第32回日本ニューロモジュレーション学会、2018

③北澤功圭、高橋澄枝、福川愛委美、中里和史、高瀬貞夫、三橋幸聖、二見亮弘、関和則、半田康延。仙骨表面電気刺激による歩行推進効果 第2報：健常被験者への応用、第43回日本リハビリテーション医学会東北地方会、2018

④Handa Y, Seki K, Mitsuhasi K, Futami R, Takase S. Effect of sacral surface electrical stimulation on locomotive function. IFESS 2017 (London) 2017

⑤半田康延、中枢および末梢運動ニューロンに対する歩行推進装置の応用と効果、第4回歩行リハビリテーション研究、2017

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称： トレーニング方法およびトレーニング装置

発明者：半田康延、関和則、吉澤 誠
杉田典大

権利者：東北テクノアーチ、医療法人和康会

種類：特許

番号：PCT/ JT2017 / 009659

出願年月日：2017年 3月10日

国内外の別： 国外

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

関和則 (SEKI Kazunori)
東北大学・医学系研究科・准教授
研究者番号：20206618

(3) 連携研究者

三橋 幸聖 (MITSUHASHI Kousei)
昭和大学・保健医療学部・講師
研究者番号：20747589

二見亮弘 (HUTAMI Ryoukou)
福島大学・共生システム理工学類・教授
研究者番号 20156938

吉澤 誠 (YOSHIZAWA Makoto)
東北大学・サイバーサイエンスセンター・教授

研究者番号：60166931

杉田 典大 (SUGITA Norihiro)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：90396458