

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 1 日現在

機関番号：22101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16359

研究課題名(和文) 脊髄損傷者の呼気筋麻痺に対する腹壁電気刺激療法の開発

研究課題名(英文) Development of abdominal functional electrical stimulation training for the paralysis of expiratory muscles in the patients with spinal cord injury

研究代表者

瀬高 裕佳子 (Setaka, Yukako)

茨城県立医療大学・保健医療学部・助教

研究者番号：20404767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、脊髄損傷者における呼気筋の回復を図るため、腹壁電気刺激療法を開発した。治療法の開発および導入にあたって、まず、健常者を対象に腹壁電気刺激療法を最大3か月間行って、基礎データを評価して、その効果を検証した。そして、臨床応用に向けた治療プロトコルを開発して脊髄損傷者を対象に腹壁電気刺激療法を実施した。その結果、安全かつ簡便に行える治療法として臨床にも活用できる可能性が示された。一方、呼吸・咳嗽機能の著しい改善は認められなかったことから、今後はプロトコルの再考が必要と考える。

研究成果の概要(英文)：I have developed a training of abdominal functional electrical stimulation (AFES) in order to improve the recovery of expiratory muscles for patients with spinal cord injury. At first, I had normal subjects take the AFES training up to 3 months, measured the basic parameters, and verified the effects. The second, I developed the clinical protocol which was later applied to the patients with spinal cord injury. As a result, it was suggested that AFES be possibly applied to the clinical practice as a safe and convenient training. However, not perceived was remarkable improvement upon pulmonary and cough functions. Accordingly, this protocol is in need of reconsideration.

研究分野：呼吸理学療法

キーワード：腹壁電気刺激 脊髄損傷 呼吸機能 咳嗽能力

### 1. 研究開始当初の背景

全国労災病院脊髄損傷者データベース作成研究の第3次調査<sup>1)</sup>によると、わが国の脊髄損傷者における死因の1位は肺炎であり、頸髄損傷がその87%を占めている。

特に高位脊髄損傷者では、呼吸筋の麻痺によって咳嗽機能が低下し、痰や唾液などの気道内分泌物や誤嚥による異物を排出しづらくなる。この状態が続くと、肺炎や無気肺などの呼吸器合併症を罹患しやすくなる。しかし、この予防を図るような呼吸筋トレーニングは確立されておらず、介入されないケースがほとんどである。

腹壁筋への電気刺激療法(以下、腹壁電気刺激療法)は、呼吸に合わせて腹部に適切な強度の電気刺激を行い、腹筋群を収縮させて腹圧を高める治療法として知られている。脊髄損傷者において、咳嗽機能の向上が期待されている一方で、その効果は未だ十分に検討されていないのが現状である。

そこで我々は、この治療法に着目して、健常者を対象に基礎研究を行ってきた。これまでに、電気刺激強度の増加に伴って最大呼気流速(Peak expiratory flow; PEF)および平均呼気流速(Mean expiratory flow; MEF)が有意に増加することが明らかとなった<sup>2)</sup>。また、姿勢の変化が腹壁電気刺激に及ぼす影響についても検証したところ、立位よりも背臥位にて一回換気量の増加が認められた<sup>3)</sup>。このように、健常者に対する腹壁電気刺激では咳嗽機能の向上が認められたことをふまえると、今後は、これを実際の治療法として開発し、臨床応用につなげる段階にある。脊髄損傷者に起こる呼吸筋の麻痺に対して、腹壁電気刺激療法を導入することで、麻痺の回復を図るとともに咳嗽機能が向上し、機能回復に有効との仮説を立てた。

### 2. 研究の目的

本研究では、脊髄損傷者を対象とした腹壁電気刺激療法の開発に向けて、健常者を対象に腹壁電気刺激療法を2か月間行って、基礎データを測定するとともに、介入前後の効果を検証すること(実験1)、そして臨床応用に向けた治療プロトコルおよび評価方法を確立させたい。脊髄損傷者を対象に、2か月間の腹壁電気刺激療法を導入し、介入前後における効果を検証すること(実験2)を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### [実験1]

#### 1) 対象者

健常な成人女性7名とした。年齢は20.4±0.53歳、身長155.1±7.84cm、体重51.6±6.22kgであった。なお、対象者には本研究の趣旨を説明し、同意を得たうえで測定を行った。

### 2) 介入方法

表面がジェル状の電極(5×13cm, PALS 895250, AXELGAARD, USA)を使用した。電極の貼付位置はLimらの方法<sup>4)</sup>を参考とした(図1)。前部の電極は肋骨縁に平衡になるように肋骨弓から約2cm離れた部分に、上前腸骨棘に向かって貼付した。後背部の電極は中腋窩線から上後腸骨棘に向かって貼付した。

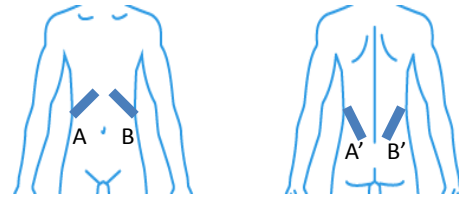


図1 電極の配置

電気刺激の周波数は50Hzとし、5秒オン/7秒オフ、パルス幅は200μs、強度は25~60mAの範囲で設定して25mAから徐々に強度を増加するように指示した。対象者は当プロトコルで1回30分を週3回、最大3か月間まで介入を行った。なお、介入日ごとに刺激強度と実施時間を日誌に記録した。

### 3) 評価項目

介入前と介入1、2、3か月後に、肺機能・呼吸筋力、咳嗽時呼気流速、腹壁筋の筋厚を測定した。

#### (1) 肺機能・呼吸筋力測定

MultiFunctionalSPIROMETER HI-801(CHEST, Japan)を用いて、肺活量(VC)、%肺活量(%VC)、努力性肺活量(FVC)、1秒量(FEV<sub>1.0</sub>)、1秒率(%FEV<sub>1.0</sub>)、強制呼気流速(PEF)、呼吸筋力測定では、最大吸気口腔内圧(PImax)、最大呼気口腔内圧(PEmax)を測定した。

#### (2) 咳嗽時呼気流速測定

呼気流速は、フェイスマスクに取り付けた呼吸抵抗管(Respiratory Flowheads MLT300L, ADInstruments, Australia)を介して呼吸アンブ(AR-601G, 日本光電, Japan)で増幅した後のアナログ信号をA/D変換器(PowerLab/16SP, ADInstruments, Australia)を介してデジタル変換された。Flow信号は、PC上の時系列解析アプリケーションソフト(LabChart, ADInstruments, Australia)を用いて、サンプリング周波数1kHzで同期させて記録した。

随意咳嗽時の呼気流速は、端座位で測定した。測定前に口頭で説明し、デモンストレーションを見せたうえで、3回の練習を実施した。測定では「大きく吸って」との声かけ後、自由なタイミングで咳嗽を行わせた。咳嗽は3回行わせ、測定間には1分間程度の休憩を設けた。

得られた流速波形の解析は、Pittsらの方法<sup>5)</sup>を参考にして、吸気相時間(inspiratory

phase duration: IPD)、最大吸気流速 (inspiratory peak flow: IPPF)、圧縮相時間 (compression phase duration: CPD)、呼気立ち上がり時間 (expiratory rise time: EPRT)、最大咳嗽流速 (cough peak flow: CPF)、咳嗽加速度 (cough volume acceleration: CVA) を算出した (図 2)。

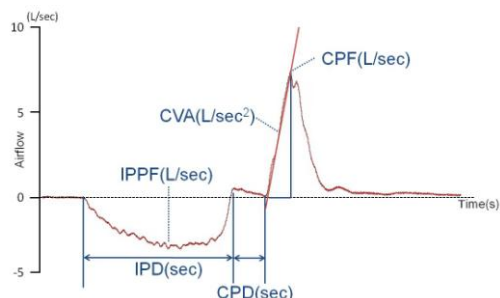


図 2 随意咳嗽における流速波形の解析指標

### (3) 腹壁筋の筋厚測定

腹壁筋の筋厚測定は、12.0MHz のリニア型プローブを装着した超音波画像診断装置 (LOGIQ IM, GE ヘルスケアジャパン, Japan) を用いて、端座位にて行った。

測定部位は、金子らの方法<sup>6)</sup>を参考とし、右前腋窩線上における肋骨辺縁上と腸骨稜の中央部とした。プローブ長軸が右前腋窩線と直交し、プローブの中央が右前腋窩線上に置いた状態で、外腹斜筋 (external oblique: EO)、内腹斜筋 (internal oblique: IO)、腹横筋 (transversus abdominis: TA) の筋厚を測定した。測定は安静呼吸と強制呼気による最大呼気努力 (maximal expiratory effort: MEE) の 2 条件で行い、安静呼吸では、安静呼気 (Resting expiration: Rex)、MEE では筋厚が最大になった瞬間の筋厚を測定した。

すべての測定は同一検者が行い、3 回の測定結果の最大値を各筋の代表値とし、3 筋の合計を腹壁筋の筋厚とした。

### (4) 統計処理

各肺機能・呼吸筋力、咳嗽時呼気流速、腹壁筋の筋厚の実測値を介入前、介入 1 か月後、2 か月後、3 か月後で比較した。統計的処理ではフリードマン検定を用いた。なお、有意水準は 5% 未満を有意とした。

#### [実験 2]

##### 1) 対象者

入院中の頸髄損傷者 2 名とした。対象者には本研究の趣旨を説明し、同意を得たうえで介入を行った。

##### 症例 1

68 歳男性、身長 170.0cm、体重 66.2kg。高位判定は C4、ASIA Impairment Scale: C で、研究開始時点で受傷から 6 ヶ月が経過していた。介入前の肺機能および呼吸筋力は、VC2.05L、%VC60.3%、FEV<sub>1.0</sub>2.04L、%FEV<sub>1.0</sub>83.6%、PImax38.0cmH<sub>2</sub>O、PEmax49.3cmH<sub>2</sub>O であった。

##### 症例 2

80 歳男性、身長 160.0cm、体重 56.3kg。高位判定は C5、ASIA Impairment Scale: B で、研究開始時点で受傷から 16 年が経過していた。介入前の肺機能および呼吸筋力は、VC0.85L、%VC28.4%、FEV<sub>1.0</sub>0.45L、%FEV<sub>1.0</sub>80.3%、PImax23.4cmH<sub>2</sub>O、PEmax26.3cmH<sub>2</sub>O であった。

### 2) 介入方法

電極の貼付位置は実験 1 と同様とした。周波数は 50Hz とし、4 秒オン/4 秒オフ、パルス幅は 200 μs、強度は被験者の耐えられる最大の強度で行った。具体的には 40-70mA の範囲内であった。介入時間は 1 回 20 分を平均週 3 回、最大 3 ヶ月間とした。介入後は電極の貼付部位に発赤やかぶれなど皮膚障害が生じていないことを確認した。

### 3) 評価項目および解析方法

介入前と介入 1、2、3 か月後に、肺機能・呼吸筋力、咳嗽時呼気流速、腹壁筋の筋厚を測定した。測定方法は実験 1 と同様に行った。そして、各因子を介入前、介入開始から 1 ヶ月後、2 ヶ月後、3 ヶ月後で比較した。

## 4. 研究成果

### [実験 1]

#### 1) 腹壁電気刺激療法の実施状況

研究協力者へ定期的な声掛けなどを行い、動機づけを行いながら実施状況を確認した。各対象者とも、週 3 回のペースで 30 分ずつ、最大 3 ヶ月間行っていた。また介入中、電極貼付部分の発赤や湿疹などの皮膚障害も起きなかった。刺激強度の平均は 39.6 ± 9.5mA であった。

#### 2) 腹壁電気刺激療法による肺機能・呼吸筋力の変化

肺機能では VC、%VC にわずかな増加がみられたが、FEV<sub>1.0</sub>、%FEV<sub>1.0</sub> の改善は認められなかった (図 3)。呼吸筋力では、PImax が介入前 68.2 ± 16.9cmH<sub>2</sub>O から介入 3 ヶ月後において 91.6 ± 14.3cmH<sub>2</sub>O まで増加した。PEmax も介入前 68.6 ± 22.8cmH<sub>2</sub>O から介入 3 ヶ月後では 84.4 ± 20.1cmH<sub>2</sub>O へ増加した (図 4)。なお、いずれの項目において有意差は認められなかった。

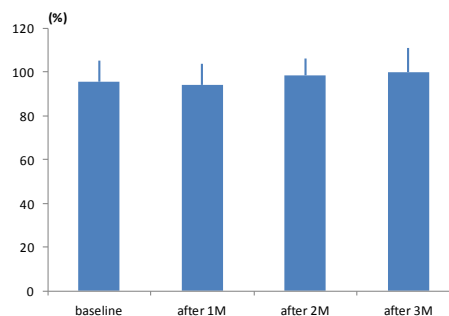


図 3 %VC の変化

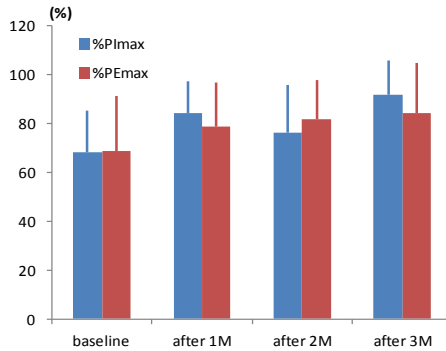


図4 呼吸筋力の変化

### 3) 咳嗽機能の変化

IPD は介入前  $1.52 \pm 0.54 \text{sec}$  から介入 3 か月後には  $1.08 \pm 0.21 \text{sec}$  と有意に短縮した ( $P < 0.05$ )。IPPF は介入前  $1.34 \pm 0.43 \text{L/sec}$  から介入 3 か月後には  $1.86 \pm 0.36 \text{L/sec}$  へ徐々に増加した。CPD は介入前  $0.46 \pm 0.16 \text{sec}$  から介入 3 か月後には  $0.28 \pm 0.14 \text{sec}$  へ徐々に短縮した。CPF は介入前  $6.59 \pm 1.03 \text{L/sec}$  から介入 3 か月後  $6.88 \pm 2.06 \text{L/sec}$ 、CVA は介入前  $141.5 \pm 57.3 \text{L/sec}^2$  から介入 3 か月後  $144.7 \pm 71.6 \text{L/sec}^2$  と変化したものの、著しい改善は認められなかった(図5、図6)。

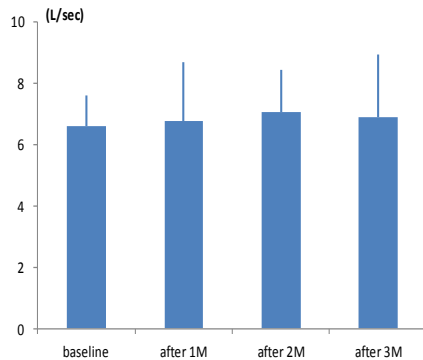


図5 CPF の変化

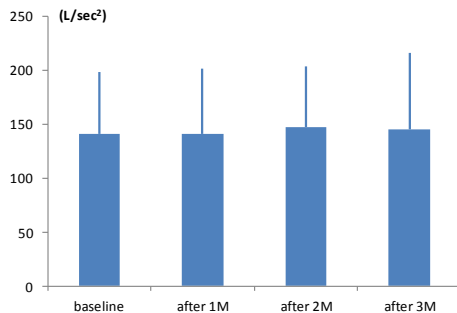


図6 CVA の変化

### 4) 超音波画像による腹壁筋厚の変化

Rex では介入前  $1.62 \pm 0.31 \text{cm}$  から介入 3 か月後  $1.87 \pm 0.50 \text{cm}$  へ有意に増加した ( $P < 0.05$ )。MEE は介入前  $2.17 \pm 0.76 \text{cm}$  から介

入 3 か月後  $2.19 \pm 0.74 \text{cm}$  と変化はほとんどみられなかった。

### [実験 2]

#### 1) 症例 1

肺機能では、特に VC と  $\text{FEV}_{1.0}$  において、介入 3 ヶ月後に増加が認められた(介入 3 か月後: VC  $2.59 \text{L}$ 、 $\text{FEV}_{1.0}$   $2.43 \text{L}$ )。FVC においても介入後は増加が認められた(介入前:  $2.44 \text{L}$ 、介入 3 か月後:  $2.80 \text{L}$ )。呼吸筋力では、特に PEmax において増加が認められた(介入 3 か月後: PEmax  $60.5 \text{cmH}_2\text{O}$ )。

咳嗽機能では、IPD において延長がみられた(介入前:  $1.38 \pm 0.14 \text{sec}$ 、介入 3 か月後:  $1.78 \pm 0.43 \text{sec}$ )。一方、CPF と CVA においては、著しい変化が認められなかった(介入前: CPF  $6.25 \pm 0.88 \text{L/sec}$ 、CVA  $56.8 \pm 3.21 \text{L/sec}^2$ 、介入 3 か月後: CPF  $6.15 \pm 1.35 \text{L/sec}$ 、CVA  $61.6 \pm 4.38 \text{L/sec}^2$ )。

腹壁筋の筋厚においても、介入後は特に変化が認められなかった。

#### 2) 症例 2

本症例は、入院期間の影響で 1 ヶ月間のみの介入となった。

肺機能では、特に  $\text{FEV}_{1.0}$  において、介入 1 ヶ月後では  $0.54 \text{L}$  まで増加が認められた。FVC においても介入後は増加が認められた(介入前:  $0.53 \text{L}$ 、介入 3 か月後:  $0.63 \text{L}$ )。しかし、呼吸筋力では、介入後も特に変化は認められなかった。

咳嗽機能では、IPD において延長がみられた(介入前:  $1.4 \pm 0.21 \text{sec}$ 、介入 3 か月後:  $2.3 \pm 0.36 \text{sec}$ )。一方、CPF と CVA においては、著しい変化が認められなかった(介入前: CPF  $0.95 \pm 0.13 \text{L/sec}$ 、CVA  $9.64 \pm 6.38 \text{L/sec}^2$ 、介入 3 か月後: CPF  $1.00 \pm 0.25 \text{L/sec}$ 、CVA  $9.83 \pm 3.94 \text{L/sec}^2$ )。

腹壁筋の筋厚においても、介入後は特に変化が認められなかった。

以上、健常者を対象とした 3 ヶ月間の介入研究(実験 1)では、介入前と比較して%VC と呼吸筋力、腹壁筋の筋厚が改善したが、いずれも有意差は認められなかった。咳嗽機能では、IPD の延長および IPPF の増加が認められた一方、CPF および CVA において著しい改善は認められなかった。健常者では、元々、十分な呼吸機能を有しているため、著明な改善が認められなかったことが推測される。

また、脊髄損傷者を対象とした介入研究(実験 2)では、2 名ともに共通して  $\text{FEV}_{1.0}$  と FVC において増加が認められた。また、3 か月間の介入が可能であった症例 1 では、さらに PEmax の増加が認められた。一方、CPF および腹壁筋の筋厚において、2 名ともに著しい改善は認められなかった。

今回の結果より、腹壁電気刺激療法は長期間にわたる介入であっても、臨床において簡便かつ安全に行えた一方、特に咳嗽能力の著しい改善は見込めなかった。このことから、

治療プロトコルを見直して効率の良い刺激条件を特定する、あるいは電気刺激療法と他のトレーニングを組み合わせることを検討していく必要がある。

#### <引用文献>

- ① 内田康夫、医歯薬出版、脊髄損傷者の死因と標準化死亡比。脊髄損傷の outcome—日米のデータベースより—。2001、187-202.
- ② Yoko Sewa, Kazuhide Tomita, Yukako Okuno, et al.: Functional electrical stimulation of the human abdominal muscles to enhance expiratory flow and volume during tidal breathing. 12<sup>th</sup> international congress of the Asian confederation for physical therapy, 2013.
- ③ 瀬和瑠子、富田和秀、奥野裕佳子、ほか：腹壁筋への電気刺激療法におけるティルトアップ姿勢の違いが呼気流速に与える影響。第 49 回日本理学療法学会、2014.
- ④ Julianne Lim, Robert B. Gorman, Julian P. Saboisky, et al.: Optimal electrode placement for noninvasive electrical stimulation of human abdominal muscle. *J appl Physiol*, 102, 2007, 1612-1617.
- ⑤ Teresa Pitts, Donald Bolser, John Rosenbek, et al.: Voluntary Cough Production and Swallow Dysfunction in Parkinson's Disease. *Dysphagia*, 23, 2008, 297-301.
- ⑥ 金子秀雄、佐藤広徳、丸山仁司、超音波診断装置を用いた側腹筋厚測定の信頼性、理学療法科学、20 巻、2005、197-201.

#### 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 3 件)

- ① Yukako Okuno, Ryoichi Takahashi, Yoko Sewa, Hirotaka Ohse, Shigeyuki Imura, Kazuhide Tomita: Functional electrical stimulation to the abdominal wall muscles synchronized with the expiratory flow does not include muscle fatigue. *The Journal of Physical Therapy Science*, 29, 2017, 484-486. 査読有. DOI: 10.1589/jpts.29.484
- ② 奥野裕佳子、遠藤 愛、日賀野和貴、富田和秀、測定肢位の違いが随意咳嗽に及ぼす影響、理学療法いばらき、査読有、

20 巻、2016、1-4

- ③ Yoko Sewa, Kazuhide Tomita, Yukako Okuno, Hirotaka Ohse, Shigeyuki Imura: Respiratory flow and vital signs associated with the intensity of functional electrical stimulation to human abdominal muscles during quiet breathing. *The Journal of Physical Therapy Science*, 28, 2016, 3337-3341. 査読有. DOI: 10.1589/jpts.28.3337

##### [学会発表] (計 4 件)

- ① 奥野裕佳子、瀬和瑠子、大瀬寛高、富田和秀、長座位における腹壁筋への電気刺激療法が呼気流速に与える影響、第 51 回日本理学療法学会、2016 年
- ② Yukako Okuno, Sayuri Horikawa, Hirotaka Ohse, Kazuhide Tomita: Abdominal Functional Electrical Stimulation training to improve peak cough flow. ERS INTERNATIONAL CONGRESS, 2016.
- ③ 吉川芙美子、遠藤 愛、奥野裕佳子、水上昌文、富田和秀、頸髄損傷者に対する随意咳嗽能力の評価～呼吸流速波形を用いた機能障害別 3 症例での比較～、第 19 回茨城県理学療法士学会、2015 年
- ④ 奥野裕佳子、遠藤 愛、吉川芙美子、竹内亮子、六崎裕高、水上昌文、富田和秀、流速波形を用いた脊髄損傷者における随意咳嗽の評価、第 25 回日本呼吸ケア・リハビリテーション学会学術集会、2015 年

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

奥野 裕佳子 (OKUNO, Yukako)  
茨城県立医療大学・保健医療学部・助教  
研究者番号：20404767