

Original Article

対側制御による機能的電気刺激は手指の機能を即時的に改善する

村田昇平,^{1,3} 小池康晴,² 粕川雄司,³ 齊藤公男,⁴
岡田幸樹,² 工藤大輔,³ 島田洋一,⁵ 宮腰尚久³

¹市立角館総合病院整形外科

²東京工業大学科学技術創成研究院

³秋田大学大学院医学系研究科医学専攻機能展開医学系整形外科学講座

⁴秋田大学医学部附属病院リハビリテーション科

⁵地方独立行政法人秋田県立療育機構

要旨

Murata S, Koike Y, Kasukawa Y, Saito K, Okada K, Kudo D, Shimada Y, Miyakoshi N. Contralaterally controlled functional electrical stimulation immediately improves hand function. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2022; 13: 26–30.

【目的】本研究の目的は、脳卒中患者の上肢機能に対する対側制御による機能的電気刺激 (CCFES) の即時効果を検討することである。

【方法】発症から4週以降の脳卒中患者13例を対象として、CCFES、ついでミラーセラピー (MT) による訓練を施行した。それぞれのリハビリテーション訓練は24時間以上の十分な間隔をあけて行った。治療前、それぞれの訓練直後に、握力、Fugl-Meyer Assessment (FMA) の上肢運動機能 (FMA-UE) と FMA-UE の肩/肘/前腕、手関節、手指、協調性の各項目を評価した。

【結果】握力、FMA-UE および FMA-UE の肩/肘/前腕、手関節、協調性の各項目は、治療前に比べ CCFES 後および MT 後で有意差はなかった。FMA-UE 手指は、治療前に比べ、MT 後では有意な変化はなかったが、CCFES 後では有意に改善した ($p = 0.013$)。

【結論】上肢に対する CCFES は手指機能を即時的に改善させ、患者のリハビリテーション治療に対する意欲の維持や向上に有効な効果をもたらすことが期待できる。

キーワード：脳卒中、機能的電気刺激、対側制御、即時効果、手指機能

はじめに

脳卒中患者の約75%は上肢の運動機能障害を有して

著者連絡先：村田昇平
市立角館総合病院整形外科
〒014-0394 秋田県仙北市角館町岩瀬3
E-mail: 2gori2@gmail.com
2021年12月29日受理

利益相反：本研究において一切の利益相反はありません。

いるとされ [1]、上肢の運動機能障害は、日常生活活動 (ADL) を妨げる大きな要因となっている。そのため、脳卒中患者の ADL の向上には、上肢機能の回復が重要であり [2]、Zheng ら [3] は、手関節背屈機能の早期回復は、上肢機能の向上だけでなく、ADL の向上にも寄与すると報告している。手指・手関節の機能を回復するためのリハビリテーション治療として、治療的電気刺激 (Therapeutic Electrical Stimulation: TES)、機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation: FES) がある。脳卒中などの上位運動ニューロン障害による麻痺では、下位運動ニューロンおよびこれにより支配される筋に正常な電氣的興奮性が残存していることが多いため、TES により筋力回復、随意性促進、筋萎縮進行抑制・改善、痙縮緩和、関節可動域改善などが、FES により麻痺肢の運動機能を再建して機能障害ならびに能力障害の改善が期待できる [4–6]。FES・TES システムは、使用する電極により表面電極、経皮的埋め込み電極、完全埋め込み電極の3種類に分けることができる [5]。近年は、電極埋め込みの手術が不要な表面電極を利用する FES システムが使用可能で、表面電極型 FES NESS H200 ハンド・リハビリテーション・システム (NESS H200[®], Bioventus LLC, NC, USA) は、脳卒中後の上肢機能を改善したことが報告されている [7]。

一方、これまでの FES 治療に加えて対側制御による FES (contralaterally controlled functional electrical stimulation: CCFES) が、脳卒中後の麻痺した上肢の機能を改善するための方法として提唱された [8]。CCFES は、非麻痺側の筋制御信号を用いて、麻痺側の筋に与える電気刺激の強さを調整する方法であり、特徴として、単に麻痺した筋や四肢を電氣的に刺激するだけではなく、患者が主体的に参加することが可能となる。Shen ら [9] は、亜急性期の脳卒中患者を対象に CCFES と従来の FES の効果を比較し、長期的に CCFES のほうがより高い改善効果があることを示した。

過去の報告より CCFES は、脳卒中患者の上肢機能改善に有用と考えられるが [10]、これまでの装置では貼付する表面電極の位置をそのつど設定する必要があり準備に時間を要した。そこで、われわれはワイヤレス筋電計を用いた新しい CCFES 装置を開発した。また、脳卒中患者の上肢機能障害に対する CCFES は、

長期的な上肢機能の改善効果は報告されている [9] が、その即時的効果は明らかになっていない。

そこで本研究の目的は、脳卒中患者の上肢機能に対するこの新しい装置を用いた CCFES の即時効果を検討することである。

対象と方法

1. 対象

2020年4月から2021年3月にかけて、入院治療を行った脳卒中患者のうち発症から4週以降経過し、研究に同意を得られた13例（男性6例、女性7例、年齢中央値71歳）を対象とした。

適格基準は、(i) コンピュータ断層撮影 (CT) または磁気共鳴画像 (MRI) を用いて脳卒中と診断された、(ii) 脳卒中と診断されてから1か月以上が経過している、(iii) 年齢が20~80歳、(iv) 麻痺側の上肢 Brunnstrom ステージがⅢ以下とした。

除外基準は、(i) 進行性の脳卒中中で不安定な状態にあるもの、(ii) 重度の認知障害やコミュニケーション障害のために治療指示に従えないもの、(iii) ペースメーカーが埋め込まれているもの、(iv) インフォームドコンセントが得られないものとした。

すべての対象者は、研究前に書面によるインフォームドコンセントを得た。

2. CCFES 装置

われわれはワイヤレス筋電図を併用した新しい CCFES 装置を開発した。本装置では、手袋型の記録用電極を用いて帯域周波数 4.8 Hz~452 Hz の筋電を計測した。装着した患者に、非麻痺側の手指を自発的に伸展させ、伸展位を保持させながら全波整流処理を

行った後、単位時間あたりの積分値 (iEMG) として算出し、その記録を無線でコンピュータ (dynabook B65/J, Dynabook Inc., Tokyo) に送信した。電気刺激装置 (SEN-8203, Nihon Kohden Co., Tokyo) と NESS は有線で接続し、短母指伸筋、総指伸筋に刺激用電極を装着し、あらかじめ患者ごとに刺激強度 (刺激周波数 40 Hz, パルス幅 0.2 ms) を麻痺側の指が伸展し始める値を最小値、完全に指が伸展する値を最大値として設定した。

NESS はコントロールユニットを除いた装具および刺激電極を使用した。非麻痺側の手指が伸展し、筋電が設定閾値に達すると、麻痺側に電気刺激が出力され、麻痺側の手指が伸展するようにプログラムを作成した (図 1)。

本装置は非麻痺側の筋活動を筋電計にて計測し麻痺側にフィードバックすることで、随意的に麻痺上肢を制御することが可能であり、あらかじめ決められた定型的な訓練ではなく、患者自身の自由なタイミングで麻痺側上肢に刺激を与えることができる。また、既存の CCFES に関する報告 [10] と異なり本システムの筋電計測は装具を用いたワイヤレスシステムを採用しており、患者の上肢の肢位を限定させず、患者のより自由な意思でリハビリテーション治療を行うことが可能である。

3. 方法

治療開始前に評価を行い (治療前)、通常の作業療法によるリハビリテーション治療 (20分×1回) 後、CCFES による訓練を20分間施行し、終了後評価を行った (CCFES 後)。その後24時間以上経過してから、通常の作業療法によるリハビリテーション治療 (20分×1回) 後、ミラセラピー (以下 MT) [11]

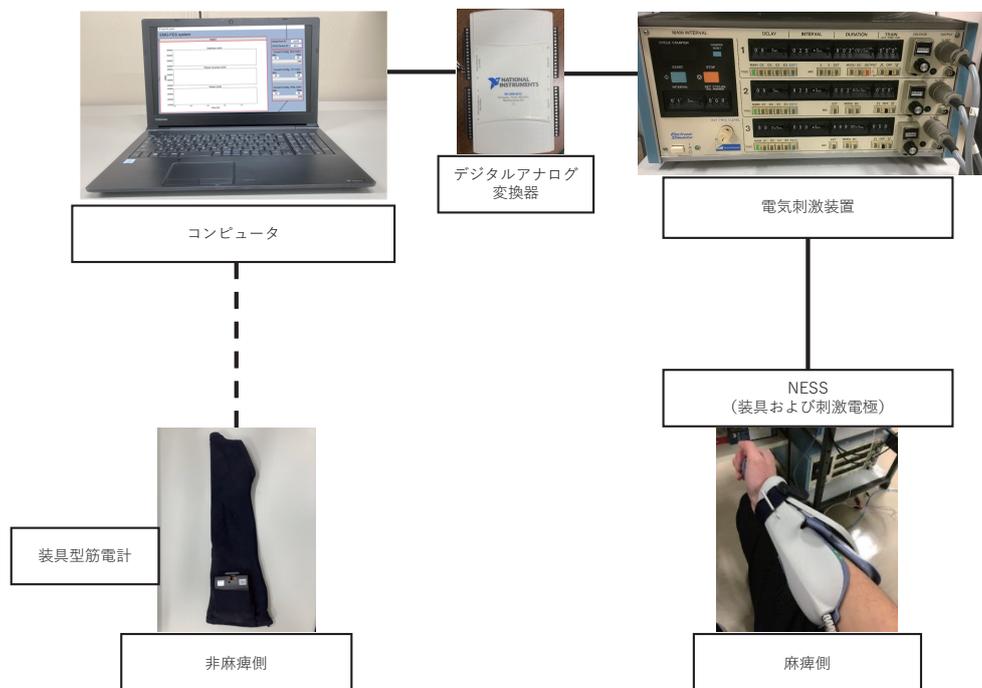


図 1. ワイヤレス筋電図を併用した新しい CCFES

非麻痺側の装具型ワイヤレス筋電計で検知した随意筋電をコンピュータ上で解析し、筋電に比例した電気刺激を患側に与える。

を20分間施行し、終了後に再度評価を行った（MT後）。CCFESによる訓練は、対象者に自由なタイミングで、両手関節背屈、手指伸展するように指示した。非麻痺側の運動による電気信号によって刺激されながら、麻痺側の手関節、手指を背屈、伸展させ、3秒間静止することを繰り返した。作業療法士は対象者に対し訓練中、麻痺側を注視するように指導した。

MTは、鏡に映った非麻痺側の手を麻痺側の手のように意識させ、できるだけ左右対称の動作となるように手関節背屈、手指伸展するように指示した。作業療法士は訓練中に非麻痺側の運動に合うように麻痺側の手を他動的に屈曲伸展させた。CCFES、MTともに1分間に10回程度の運動を目標に、患者の集中力や麻痺の程度に応じて作業療法士が適宜指導しながら実施した。

評価項目は握力、Fugl-Meyer Assessment (FMA) の上肢運動機能 (FMA-UE) と FMA-UE の肩/肘/前腕、手関節、手指、協調性の項目についておのおのの点数を算出した。評価は治療前、CCFES後、MT後に行った。統計解析は、握力、FMA-UE およびその各項目の点数について、治療前と CCFES 後、および治療前と MT 後の有意差を Wilcoxon 検定にて検討した。すべての統計解析は JMP® 14.2.0 (SAS, Cary, NC) を用いた。有意水準は 0.05 未満とした。本研究は秋田大学医学部附属病院倫理委員会の承認を得て施行された (approval number 1967)。

結果

脳卒中発症から治療開始までの期間は中央値で 86 日、対象者の診断は、脳梗塞が 8 例、脳出血が 5 例で、運動麻痺は、上肢 Brunnstrom stage II が 7 例、III が 6 例であった (表 1)。

握力は各治療前後で有意差はなかった (表 2)。FMA-UE、FMA-UE の肩/肘/前腕、手関節、協調性の各項目は、CCFES および MT 治療前後で有意差はなかった。FMA-UE の手指機能は、治療前に比べ MT 後では有意な変化はなかったが、CCFES 後では有意に改善した ($p = 0.013$)。

有害事象は認められなかった。

考察

本研究で脳卒中片麻痺患者に対して新しく開発した CCFES を使用した訓練によって、治療前と比べ CCFES 後、および MT 後では握力、FMA-UE の有意な改善は認められなかった。FMA-UE の手指に関する項目のみ、治療前と比べ MT 後では有意な変化はなかったが、CCFES 後では有意に改善していた。

近年、CCFES は患者自身の意思を反映するより能動的なトレーニングとして開発され、非麻痺側の動きを計測し、麻痺側での左右対称かつほぼ同時の動きを作り出すことを目的としている。CCFES の有効性については、2016 年に Knutson ら [10] が行った RCT 研究で検討されている。彼らは 80 人の発症後 6 か月以上の慢性期脳卒中患者を CCFES 群と神経筋電気刺激 (neuromuscular electrical stimulation: NMES) 群に無作為に割り付け、12 週間の CCFES 療法が同等量の NMES よりも手指の器用さを改善することを明らかにした。さらに、Shen ら [9] は患者に対する CCFES と NMES の効果を比較し、上肢機能の改善において CCFES が NMES よりも優れていることを明らかにした。しかし、CCFES の即時効果についての検討はわれわれが渉猟しうる限り、これまで行われていなかった。本研究では、脳卒中患者における CCFES による手指機能の即時的な改善効果が示された。

Zheng ら [3] は発症早期脳卒中患者において、CCFES は手関節背屈機能を改善し、FMA による上肢機能も改善すると報告しており、また、Kim ら [12] は慢性期の脳卒中患者において、CCFES は手関節背屈機能と手指の把持力を改善したと報告している。本研究では手関節の背屈機能については即時的な改善を認めなかったが、手関節背屈筋群への CCFES は、即時の効果として手指機能の改善を促し、訓練を継続することで、手関節や上肢全体の長期的な機能改善につながると考えられる。

また、リハビリテーション治療の即時効果について、下肢における FES 後の即時的な歩行速度の改善は、療法士や患者の治療の目標設定や動機づけに有用であるとの報告がある [13]。さらに、脳卒中患者においてリハビリテーション治療へモチベーションを向上し維持させるためには、訓練による身体機能の向上、成功体験、多様な種類の訓練の提供が重要であると報告さ

表 1. 対象者背景

年齢, 中央値 (QR)	71 (64.3-74.5)
性別, <i>n</i> (%)	<i>n</i> =13
男性	6 (46.2)
女性	7 (53.8)
発症からの期間 (日), 中央値 (QR)	86 (64-140)
診断	
脳梗塞	8
脳出血	5
上肢 Brunnstrom stage	
II	7
III	6

QR: quartile range; 四分位範囲

表 2. 握力と Fugl-Meyer Assessment

	治療前	CCFES 後	MT 後	<i>p</i> -Value 治療前 vs CCFES 後	<i>p</i> -Value 治療前 vs MT 後
握力 (kgf)	2.5 (0-3.5)	3 (1-4.25)	2.5 (0-3.75)	0.174	0.354
FMA-UE (点)	11 (5-18)	15 (7-23)	11 (5-20)	0.118	0.354
FMA-UE 肩 / 肘 / 前腕 (点)	5 (4-8)	5 (4-8)	5 (4-8)	1.000	1.000
FMA-UE 手関節 (点)	2 (0-4)	3 (0-6)	2 (0-5)	0.246	0.364
FMA-UE 手指 (点)	5 (1-6)	8 (3-9)	6 (1-7)	0.013	0.063
FMA-UE 協調性 (点)	0 (0-0)	0 (0-0)	0 (0-0)	1.000	1.000

中央値 (四分位範囲) ; *p*-Value by Wilcoxon 検定.

FMA, Fugl-Meyer Assessment ; FMA-UE, FMA 上肢運動機能 ; CCFES, 対側制御機能的電気刺激 ; MT, ミラーセラピー.

れている [14]. 今回の研究において, 新たな装置を使用した CCFES により即時的な手指機能の改善が認められたことから, 従来の訓練に加えて, CCFES による訓練を行うことは, リハビリテーション治療の種類に多様性をもたせ, 即時的な機能改善による成功体験を起し, 患者のリハビリテーション治療への積極性を高める上で, 良い影響を与えることが期待される.

一方, 本研究で比較検討した MT は, 脳卒中患者の長期的な運動機能改善のために有用であることが報告されている [15]. また, CCFES も亜急性期の脳卒中患者の上肢機能に対し, 長期的な改善効果が証明されている [9]. 今回, MT に比べ CCFES のほうが手指機能に対する即時効果を認めたことから, CCFES は MT よりも有効である可能性が示唆されたが, 長期的な効果の比較については今後の検討が必要である.

本研究の限界として, 症例数が少ないこと, CCFES と MT 実施の順序を変更した群がないことがあげられる. 今後は症例数を増やし, さらに CCFES の長期的な効果についても MT と比較検討する予定である.

結論

脳卒中患者の上肢に対する CCFES は手指機能を即時的に改善させた. CCFES による訓練を行うことで脳卒中患者のリハビリテーション治療に対する意欲の維持や向上に有効な効果をもたらすことが期待できる.

謝辞

研究を実施するにあたり, ご参加いただいた対象者様とご協力いただいた療法士の皆様に厚く御礼申し上げます.

文献

- Lloyd-Jones D, Adams RJ, Brown TM, Carnethon M, Dai S, De Simone G, et al. Heart disease and stroke statistics—2010 update: a report from the American Heart Association. *Circulation* 2010; 121: e104.
- Wilson RD, Page SJ, Delahanty M, Knutson JS, Gunzler DD, Sheffler LR, et al. Upper-limb recovery after stroke: a randomized controlled trial comparing EMG-triggered, cyclic, and sensory electrical stimulation. *Neurorehabil Neural Repair* 2016; 30: 978–87.
- Zheng Y, Mao M, Cao Y, Lu X. Contralaterally controlled functional electrical stimulation improves wrist dorsiflexion and upper limb function in patients with early-phase stroke: a randomized controlled trial. *J Rehabil Med* 2019; 51: 103–8.
- Shimada Y, Sato K, Abe E, Kagaya H, Ebata K, Oba M, et al. Clinical experience of functional electrical stimulation in complete paraplegia. *Spinal Cord* 1996; 34: 615–9.
- Matsunaga T. Functional electrical stimulation (1). *Rinsho Nouha* 2007; 49: 584–8. Japanese.
- Handa Y, Ohkubo K, Hoshimiya N. A portable multi-channel FES system for restoration of motor function of the paralyzed extremities. *Automedica* 1989; 11: 221–31.
- Alon G, Levitt AF, McCarthy PA. Functional electrical stimulation enhancement of upper extremity functional recovery during stroke rehabilitation: a pilot study. *Neurorehabil Neural Repair* 2007; 21: 207–15.
- Knutson JS, Harley MY, Hisel TZ, Chae J. Improving hand function in stroke survivors: a pilot study of contralaterally controlled functional electric stimulation in chronic hemiplegia. *Arch Phys Med Rehabil* 2007; 88: 513–20.
- Shen Y, Yin Z, Fan Y, Chen CF, Dai W, Yi W, et al. Comparison of the effects of contralaterally controlled functional electrical stimulation and neuromuscular electrical stimulation on upper extremity functions in patients with stroke. *CNS Neurol Disord Drug Targets* 2015; 14: 1260–6.
- Knutson JS, Gunzler DD, Wilson RD, Chae J. Contralaterally controlled functional electrical stimulation improves hand dexterity in chronic hemiparesis: a randomized trial. *Stroke* 2016; 47: 2596–602.
- Zeng W, Guo Y, Wu G, Liu X, Fang Q. Mirror therapy for motor function of the upper extremity in patients with stroke: a meta-analysis. *J Rehabil Med* 2018; 50: 8–15.
- Kim JH, Lee BH. Mirror therapy combined with biofeedback functional electrical stimulation for motor recovery of upper extremities after stroke: a pilot

- randomized controlled trial. *Occup Ther Int* 2015; 22: 51-60.
13. Park SJ, Wang JS. The immediate effect of FES and TENS on gait parameters in patients after stroke. *J Phys Ther Sci* 2017; 29: 2212-4.
14. Yoshida T, Otaka Y, Osu R, Kumagai M, Kitamura S, Yaeda J. Motivation for rehabilitation in patients with subacute stroke: a qualitative study. *Front Rehabil Sci* 2021; 2: 664758.
15. Thieme H, Mehrholz J, Pohl M, Behrens J, Dohle C. Mirror therapy for improving motor function after stroke. *Cochrane Database Syst Rev* 2012; 2012 (3): CD008449.