運動前の2種類の異なる電気刺激が 上肢運動パフォーマンスとピンチ力に与える影響

Effect of Two Different Types of Electrical Stimulation on Upper-limb Motor Skill and Pinch Grip

宮田 一弘^{1,2)} 臼田 滋²⁾

KAZUHIRO MIYATA^{1,2)}, RPT, SHIGERU USUDA²⁾, RPT, PhD

¹⁾ Rehabilitation Center, Hidaka Hospital: 886 Nakaomachi, Takasaki-shi, Gunma 370-0001, Japan.
TEL+81 27-362-6201 E-mail: ipukazuhiro@yahoo.co.jp

²⁾ Gunma University Graduate School of Health Sciences

Rigakuryoho Kagaku 29(2): 315-319, 2014. Submitted Oct. 4, 2013. Accepted Nov. 20, 2013.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to investigate the effect on motor skill and pinch grip of two different types of electrical stimulus, targeting the muscles and nerves, before exercise. [Subjects] The subjects were 8 healthy adults. [Method] We used a task of rotating a wooden ball in the palm of the hand. When subjects' performance had stabilized after practice, we applied the electrical stimulus. The electrical stimulus was delivered to the ball of the thumb (100 Hz, 120 sec) and to the ulnar nerve (centrally, 10 Hz, 60 min). Pinch grip strength and the number of ball rotations were measured before and after the electrical stimuli. [Results] For both stimuli, a significant increase in the number of rotations was found after stimulation, when compared to before, and in the comparison of percentage change, the muscle stimulation showed a significantly higher value. However, no change was found in pinch grip. [Conclusion] The results suggest the possibility that, compared to ulnar nerve stimulation, short-term muscle stimulation is a useful method for raising motor skill.

Key words: electrical muscle stimulation, peripheral nerve sensory stimulation, exercise task

要旨:〔目的〕運動前に筋と神経を対象とした2種類の異なる電気刺激が運動パフォーマンスとピンチ力に与える影響を検討することである。〔対象〕健康成人8名とした。〔方法〕木球を掌で回す課題を用い、事前に練習を行いパフォーマンスが安定したところで電気刺激を加えた。電気刺激は、筋刺激（母指球筋、周波数100 Hz、120秒）と末梢神経刺激（正中・尺骨神経、周波数10 Hz、60分）を実施した。電気刺激前後での回転数とピンチ力を測定した。〔結果〕両刺激とも電気刺激前と比較し刺激後に有意な回転数の増加が認められ、変化率を比較すると筋刺激が有意に高値を示した。一方、ピンチ力に変化は認められなかった。〔結語〕短時間の筋刺激は末梢神経刺激に比べて運動パフォーマンスを向上させる方法として有用である可能性が示唆された。

キーワード: 筋刺激, 末梢神経感覚刺激, 運動課題

¹⁾ 日高病院 回復期リハビリ室: 群馬県高崎市中尾町886 (〒370-0001) TEL 027-362-6201

²⁾ 群馬大学大学院 保健学研究科

I. はじめに

リハビリテーションを行う対象は多岐に渡るが、なかでも脳卒中における上肢運動麻痺は日常生活に大きな影響を与える。脳卒中ガイドライン2009¹⁾において、課題指向型練習やイメージ訓練、麻痺肢強制使用法などが推奨されているが、その適応は限定されており、かつ治療に長時間を要するものが多い。

Sharmaら²⁾により、脳卒中者に対する運動介入リハビリテーションを実施する際に運動実行前に脳の準備状態を作ることで、運動学習がより促進される可能性があることが示されている。身体末梢からの体性感覚入力は、脳内で処理が行われると同時に、直接あるいは間接的に運動関連領域へ神経信号を到達され、結果的に運動領域の神経活動を修飾することができる³⁾。体性感覚入力的手法としては、振動、触覚刺激および古くから筋力増強や疼痛緩和のために使用されている電気刺激がある。

近年、感覚神経に対する求心性入力を目的とした電気刺激の手法として、Riddingら⁴⁾やKaelin-Langら⁵⁾が健常者を対象とした末梢神経感覚刺激(peripheral nerve sensory stimulation; 以下PNS)を報告している。PNSは、大脳皮質運動野の興奮性を増大させ、長期増強の状態を引き起こすことができると考察されている。また、PNSは脳卒中者の治療介入に応用されており、上下肢の運動機能改善^{6,7)}、歩行速度の向上⁷⁾、ピンチ力の向上⁸⁾などの効果が報告されている。Ikunoら⁹⁾は、亜急性期の脳卒中患者を対象にし、PNSと課題指向型練習と組み合わせを行うことでPNSなしと比較して上肢機能が有意に改善することを報告している。これらの先行研究から、PNSは脳卒中後の上下肢機能障害に対する新たな物理療法として有益である可能性が高いと考えられた。しかしながら、Mckayら¹⁰⁾の報告では、45分以上の連続電気刺激で運動誘発電位の振幅が有意に増大したことより、PNSにより大脳皮質運動野の興奮性を変化させるには長時間の刺激が必要であることが示唆された。脳卒中者を対象にした介入研究^{6-8,9,11)}では、1～2時間のPNS刺激時間を要しているものが多く、臨床的な観点からは有意義な手段とは言い難いともいえる。

一方、運動閾値下の強度で筋刺激(electrical muscle stimulation; 以下EMS)を行った先行研究¹²⁾では、90秒の短時間刺激でも刺激部位に関連した脳領域に変化が見られたことが報告されている。また、筋刺激直後に運動を行うことで運動学習がプラトーに達した状態から脱却でき、さらなる技能や学習の向上が期待できることが示唆されている¹³⁾。

現在、電気刺激の方法は多種多様であり、その効果の違いや実行可能性は十分に検証されていない。長時間の刺激を必要とするPNSによる運動パフォーマンスに及ぼす効果と比較して、短時間の刺激であるEMSによるそ

の効果がほぼ同程度あるいはより優れていることが検証できれば、リハビリテーションの臨床における電気刺激の普及を促進できる可能性がある。そこで、本研究は、健常者に対する運動前のEMSとPNSの2種類それぞれの異なる電気刺激が上肢運動パフォーマンスとピンチ力に与える影響を比較検討した。

II. 対象と方法

1. 対象

健常成人8名(男性5名、女性3名、23-28歳)、計16手を対象とした。被験者はEdinburghの利き手検査¹⁴⁾にて全て右利きであった。全例、神経学的疾患の既往はなかった。本研究は当学医学部疫学研究に関する倫理審査委員会の承認を得た(承認番号24-10)。その上で、全ての被験者に研究の内容について説明後、同意を得た。

2. 方法

運動課題は、閉眼にて2つの木球(φ40 mm, 30 g)を掌でできるだけ多く回す巧緻課題(図1)を用いた¹⁵⁾。事前に左右の手で練習を行い運動パフォーマンスの変化を検者が確認した。被験者には木球を配布し、1日に最低15分間練習するように指示した。また、学習効果は2日に1度の頻度で15秒3セットの課題遂行での回転数にて確認した。今回は、運動パフォーマンスが安定したことの定義として最大値が出現しなくなること、試行間の変動が少ないこと(3回転以内)、自覚的に限界を感じたこととした。実験開始前に、運動課題遂行時の運動パフォーマンスを評価し、全ての被験者において顕著なパフォーマンスに変化が生じない状態にあることを確認し、電気刺激を加えた。

電気刺激は、全ての被験者にEMSとPNSの2種類を別日に実施した。各刺激間は約1カ月あるが、数日前より運動課題が定常状態にあることを確認した。左右の手に対する刺激は、EMSは同日、PNSは別日に実施した。EMSは低周波治療器(伊藤超短波製、トリオ300)を用い、刺激電極は母指球筋に貼付した。刺激パラメーターは、Ueharaら¹³⁾の研究を参考にして、周波数100 Hz、パルス幅100 μ s、刺激時間は120秒とした。強度は運動閾値以下(3-6 mA)として、関節運動は起こらないが筋収縮が僅かに認められる強度とした。PNSは超音波・低周波治療器(酒井医療社製、COMBI200)を用い、刺激電極は、前腕部で正中・尺骨神経を覆うように貼付した。刺激パラメーターは、Ikunoら⁹⁾の研究を参考にして、単相矩形波、周波数10 Hz、パルス幅1 ms、バースト周波数1 bps(500 ms刺激、500 ms休止)、刺激時間は60分とした。強度は感覚閾値上(2-6 mA)として、被験者が電極添付場所の皮膚に電気刺激を僅かに感じる強度とした。刺激時間中は休息や読書などによりストレスがない

図1 運動課題

図2 電気刺激プロトコル(上段:EMS、下段:PNS)

よう楽に過ごすこととした。

実験手順としては、運動課題は1試行につき15秒、全10回実施した。両刺激のプロトコルは、EMSでは前半5試行は運動課題のみを実施し、後半はEMS直後に運動課題を行うことを1試行とし、5試行繰り返した。PNSは電気刺激前に5試行を行い、60分の刺激後に5試行を実施した(図2)。

評価は、運動課題の様子をビデオカメラで撮影し、回転数を測定した。その他に、電気刺激の有無に関する内省報告を聴取し、運動課題に対する円滑さをvisual analog scale (VAS) にて評価した。100 mmの水平な直線を用い、左端点を円滑性不良とし、右端点を円滑性良好とした。また、電気刺激側母指-示指の指腹ピンチ力をピンチ力計(酒井医療社製, EG-220)にて測定した。測定は1回最大測定とした。VASとピンチ力は運動課題の前半5試行後と後半5試行後に計測した。

データ解析として、運動課題は前半と後半5試行それぞれの被験者ごとの平均値を算出しEMSとPNSの効果を比較した。また、VASとピンチ力は電気刺激前後での平均値を算出し、比較した。統計解析は、電気刺激の前後(pre, post)と電気刺激の種類(EMS, PNS)の2要因による反復測定二元配置分散分析を行った。交互作用の認められたものについては、電気刺激における変化率を算出し、対応のあるt検定を行った。変化率は、電気刺激後から電気刺激前を引いた値を電気刺激前の値で除した値とした。また、運動パフォーマンスの変化と内省

の変化の関係を調査するため、Spearmanの順位相関を行った。有意水準は5%未満とした。検定にはDr. SPSS II for Windows (IBM社製)を用いた。

III. 結果

運動課題の安定までには7-10日間の期間を要した。今回、利き手と非利き手で電気刺激前に差は認められなかった。各評価の電気刺激前後での測定結果を表1に示す。運動課題は2要因による反復測定二元配置分散分析の結果、電気刺激の有無で、交互作用が有意であり($p < 0.05$)、変化率を比較するとEMSが有意に高値を示した($p < 0.05$)。また、EMSでは1手、PNSでは5手で電気刺激によって回転数の減少が認められた。VASによる円滑さは2要因による反復測定二元配置分散分析の結果、電気刺激の有無で、交互作用が認められ、変化率を比較すると両刺激に有意差は認められなかった($p > 0.05$)。また、電気刺激に対する内省報告では、「指が動かしやすくなった」、「疲れなくなった」などの肯定的なもの以外にも、運動課題で回転数の減少を認めた被験者で「感覚が分からなくなった」という否定的なものも得られた。全被験者で電気刺激による疲労や不快感の訴えはなかった。ピンチ力は2要因による反復測定二元配置分散分析の結果、電気刺激の有無で、交互作用、主効果が有意でなかった($p > 0.05$)。運動課題とVASの変化率は、EMSでは 7.3 ± 6.1 (平均値 $\pm$ 標準偏差)%, $61.3 \pm 72.2\%$ で

表1 各群における電気刺激前後での測定結果

	群	pre	post	交互作用	変化率
運動課題 (回)	EMS	27.4 ± 4.2	29.2 ± 3.7	*	7.3 ± 6.1%*
	PNS	27.9 ± 2.7	28.7 ± 2.9		3.2 ± 5.7%
VAS (mm)	EMS	52.8 ± 16.9	75.9 ± 12.7	*	61.3 ± 72.2%
	PNS	54.3 ± 19.2	67.3 ± 17.9		38.7 ± 57.5%
ピンチ力 (kgf)	EMS	4.5 ± 0.8	4.5 ± 0.9		
	PNS	4.7 ± 1.1	4.7 ± 0.6		

平均 ± 標準偏差, *: $p < 0.05$.

あり $r_s = 0.74$, PNSでは $3.2 \pm 5.7\%$, $38.7 \pm 57.5\%$ であり $r_s = 0.67$ であった. 運動課題の回転数とVASによる内省の間には, 両刺激ともに有意な正の相関が認められた ($p < 0.05$).

IV. 考察

運動パフォーマンスの向上や運動学習において, 運動野の可塑性変化は重要な役割を握っている. 逆に言えば, 運動野の可塑性を積極的に誘導することができれば, ヒトの運動学習に多大な恩恵を与えることができると考えられる. このような発想に基づき, 運動野をターゲットとして, 積極的にその可塑性を誘導しながら運動学習を促進しようとする研究が行われている. 反復経頭蓋磁気刺激や経頭蓋直流電気刺激などの非侵襲的大脳皮質刺激が, その大部分を担っているが, 末梢からの体性感覚入力のみでも誘導できることが示されている³⁾.

本研究では, EMSとPNSという2種類の異なる電気刺激方法を用いて, 上肢運動パフォーマンスとピンチ力に与える影響を検討した. EMSは, 母指球筋を対象として, 短時間の刺激を行い, PNSは前腕遠位部で正中・尺骨神経を対象として刺激を行った. 運動課題に関しては, 運動パフォーマンスに変化が見られなくなった停滞状況に対して, 運動前に電気刺激を行うことで即時的に回転数が増加することが確認された. この結果は, EMS, PNSともに先行研究を支持するものであった. EMSは120秒程度の短時間刺激であっても, 運動パフォーマンスが向上し, さらに円滑さに関する内省の変化も認められた. これは, 運動課題練習に付加的価値を与えられるものであると考えられる. Ueharaら¹³⁾は, 同様の現象に関して, 加速度計を用いた行動学的分析を行っている. それにより, 手指の運動周波数が即時的に増大し, 同時に課題実行中の手指の運動変位量が減少していることが明らかとなり, 余計な運動成分の抑制, つまりは効率的な運動制御の促進がその背景に関わっている可能性を示唆している. PNSは, 脳卒中者に対する先行研究^{9,11)}と同様のパラメータを用いており, 健常者においても同様の作用があることが確認された. この背景には, 末

梢からの電気刺激による大脳皮質運動野の興奮性変化や同部位が長期増強の状態となっている可能性が考えられる^{4,5,10)}. しかし, 本結果では, 数例で課題の成績が変化しないもしくは低下する現象も認められ, Koeslerら¹⁶⁾の健常者に関するタッピング課題を用いた研究でも同様の結果が示されている. 運動課題や刺激パラメーターが異なるため, PNSの効果に関しては, 個人差の影響も考慮し検討していくことが重要であると考えられる. また, 電気刺激のパラメーターに関しては, 研究により刺激強度や周波数, 刺激時間は様々であり, 2011年にChipchase¹⁷⁾が報告したシステムティックレビューでも統一には至っていないのが現状であり, 今後更なる検証が必要である.

ピンチ力に関しては, 本研究の結果ではEMS, PNSともに変化が認められなかった. このことから, 両刺激が筋力に与える遠心性入力の影響は小さく, 大脳皮質に与える求心性入力などの要因が強く関係している可能性が示唆された. しかし, Klaiputら⁸⁾の研究では, 慢性期の脳卒中患者に対してPNSを行うことで, ピンチ力の向上が認められたとの報告もあり, 健常者と脳卒中者で効果の違いなども考えられる. また, VASによる運動課題に対する内省の変化の結果から, 電気刺激は主観的にも変化を捉えやすい治療方法であるといえる. また, 疲労や不快感の訴えがなかったことから, 副作用の危険性が少なく, 今回用いた両刺激方法は臨床使用に耐え得るものであることが分かった.

今回のEMSに関する臨床応用としては, 軽度の運動麻痺者を対象とし課題志向型練習などと併用することで効率的な運動技能の向上が期待できる. しかし, 脳卒中者においては, 感覚障害や高次脳機能障害などを有していることが多く, 対象者の選定には注意が必要である. また, 本研究の限界として, 対象者数が少ないことと前後比較デザインで対照群を設けていないためエビデンスレベルが低いことが挙げられる. また, 運動課題を学習終了した時点からの変化と見ているため, 同様の手法を用いて運動学習初期や後期の段階での変化も検討する必要がある. また, 今回使用したEMSのプロトコルは常に刺激直後に運動課題を実施しており, 刺激の効果残存

に関しては検討できていない。この点は、臨床的にEMSが使用可能なものであるか考える上で必要不可欠である。本研究は、健常者に対する運動パフォーマンスを確認した行動学的検討のみであったため、背景にある神経生理学的メカニズムは不明である。PNSは数多くの先行研究から大脳皮質レベルで変化が想定されるが、EMSでも類似した変化が生じているのか検証する必要がある。

引用文献

- 1) 日本脳卒中学会：脳卒中ガイドライン2009. <http://www.jsts.gr.jp/jss08.html> (閲覧日平成25年9月23日)。
- 2) Sharma N, Cohen LG: Recovery of motor function after stroke. *Dev Psychobiol*, 2010, 54(3): 254-263.
- 3) 内藤栄一, 上原信太郎, 村田 哲・他: 感覚刺激と運動学習。理学療法ジャーナル, 2012, 46(1): 25-35.
- 4) Ridding MC, Brouwer B, Milles TS, et al.: Changes in muscle responses to stimulation of the motor cortex induced by peripheral nerve stimulation in human subjects. *Exp Brain Res*, 2000, 131(1): 135-143.
- 5) Kaelin-Lang A, Luft AR, Sawaki L, et al.: Modulation of human corticomotor excitability by somatosensory input. *J Physiology*, 2002, 540(2): 623-633.
- 6) Clenik P, Hummel F, Harris-Love M, et al.: Somatosensory stimulation enhances the effects of training functional hand tasks in patients with chronic stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 2007, 88(11): 1369-1376.
- 7) Ng SS, Hui-Chan CW: Transcutaneous electrical nerve stimulation combined with task-related training improves lower limb functions in subjects with chronic stroke. *Stroke*, 2007, 38(11): 2953-2959.
- 8) Klaiput A, Kitisomprayoonkul W: Increased pinch strength in acute and subacute stroke patients after simultaneous median and ulnar sensory stimulation. *Neurorehabil Neural Repair*, 2009, 23(4): 351-356.
- 9) Ikuno K, Kawaguchi S, Kitabeppu S, et al.: Effect of peripheral sensory nerve stimulation plus task oriented training on upper extremity function in patients with subacute stroke: a pilot randomized crossover trial. *Clin Rehabil*, 2012, 26(11): 999-1009.
- 10) McKay D, Brooker R, Giacomini P, et al.: Time course of increased human motor cortex excitability by nerve stimulation. *Neuroreport*, 2002, 13(10): 1271-1273.
- 11) 生野公貴, 北別府慎介, 那野浩司, 他: 脳卒中患者に対する1時間の末梢神経電気刺激と課題指向型練習の組み合わせが上肢機能に与える影響。理学療法学, 2010, 37(7): 485-491.
- 12) Uehara S, Nambu I, Matsumura M, et al.: Prior somatic stimulation improves performance of acquires motor skill by facilitating functional connectivity in cortico-subcortical motor circuits. *J Behav Brain Sci*, 2012, 2(3): 343-356.
- 13) Uehara S, Nambu I, Tomatsu S, et al.: Improving human plateaued motor skill with somatic stimulation. *PLoS ONE*, 2011, 6(10): e25670.
- 14) Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 1971, 9(1): 97-113
- 15) Kawashima R, Yamada K, Kinomura S, et al.: Regional cerebral blood flow changes of cortical motor areas and prefrontal areas in humans related to ipsilateral and contralateral hand movement. *Brain Res*, 1993, 623(1): 33-40.
- 16) Koesler IB, Dafotakis M, Ameli M, et al.: Electrical somatosensory stimulation modulates hand motor function in healthy humans. *J Neurol*, 2008, 255(10): 1567-1573.
- 17) Chipchase LS, Schabrun SM, Hodges PW: Peripheral electrical stimulation to induce cortical plasticity: a systematic review of stimulation parameters. *Clin Neurophysiology*, 2011, 122(3): 456-463.