

前腕筋群の疲労に対する 末梢神経電気療法の効果 —グリップ動作課題における握力と 筋電図積分値を用いた検討—

Effect of peripheral nerve electrotherapy on fatigue of the forearm
muscles—Study of muscle integrated value of EMG on a gripping task—

吉田隆紀*¹, 鈴木俊明*¹, 増田研一*²

キー・ワード : Grip, fatigue, electrotherapy
握力, 疲労, 末梢神経電気療法

【要旨】 本研究は筋疲労に対する TENS の効果を検討した。対象は健常男性 10 名である。疲労課題は最大握力の 30% で握力計を 3 分間把持する課題を 2 回実施する事とした。1 回目の課題を実施し、正中神経に TENS を施行した。その後 2 回目の課題を 1 回目と同条件で実施した。なお比較は、同一被験者に TENS を施行しない control 条件とした。検討内容は課題後の握力と課題中の前腕筋の筋電図積分値とした。2 回目の課題後において control 条件は TENS 条件より有意に握力が減少し、control 条件のみ尺側手根屈筋と橈側手根屈筋の筋電図積分値の有意な増加を認めた。TENS は前腕筋の疲労耐性に効果があると考えられた。

はじめに

野球競技のスポーツ障害において、投球障害肩や野球肘は頻発する障害である。特に野球肘は、成長期における投球の繰り返しによって生じるスポーツ障害として知られる。投球時の肘関節の障害では、投球動作の加速期において外反方向のストレスが生じ、肘内側への伸長ストレスや肘外側への圧迫ストレス¹⁾が問題とされる。Davidson ら²⁾は浅指屈筋や尺側手根屈筋の筋活動が内側側副靭帯の作用を補うとし、Hsu ら³⁾は橈側手根屈筋、尺側手根屈筋、円回内筋は肘関節の内反方向への作用があることを報告した。これら報告は、前腕筋群の活動には投球中の外反ストレスを軽減させる可能性があることを示唆している。また投

球開始前の握力低下と投球時のボールスピードの低下に相関がみられた報告⁴⁾があり、前腕筋群の疲労は投球時のパフォーマンスに影響を及ぼす。野球選手の投球側前腕筋群には、練習や試合によって疲労が蓄積していることが多く、肘関節周囲筋群の疲労は、障害発生要因やパフォーマンス低下の要因となる可能性があると考えられる。

疲労とは末梢性疲労と中枢性疲労に分類することができる。中枢性疲労における大脳皮質および皮質下の活動について、経頭蓋磁気刺激を用いた研究⁵⁾では、筋疲労によって大脳皮質の一次運動野の活動が低下することを明らかにしている。さらに最大下随意収縮課題遂行中の脳活動を機能的磁気共鳴像や陽電子放射線断層画像などのイメージング装置を用い明らかにした報告⁶⁾でも同様の結果を得ており、筋疲労における中枢神経系の関与を示唆させる。しかし現在のスポーツ選手における筋疲労に対するコンディショニングは、スト

*¹ 関西医療大学臨床理学療法教室

*² 関西医療大学整形外科

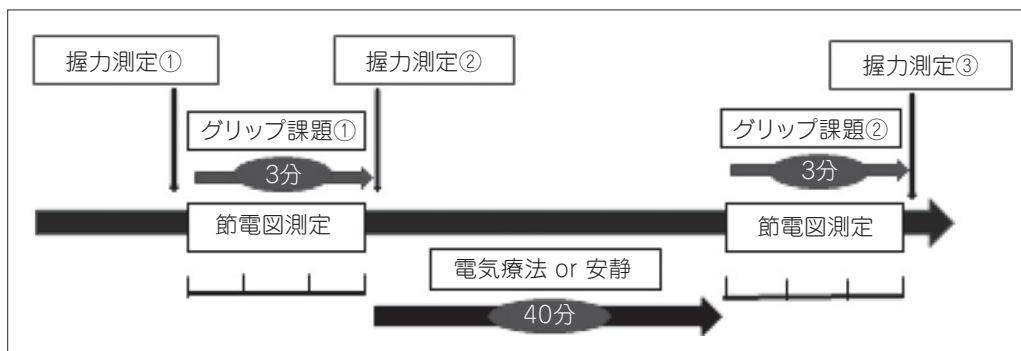


図1 実験プロトコール

握力測定①の実施後に3分間のグリップ課題①中の筋電図測定を行う。グリップ課題①終了後に左右の握力測定②を実施し、control条件は40分間の安静をとり、TENS条件は40分間の感覚閾値程度の電気刺激を前腕前面の遠位部に加えて安静を保つ。その後グリップ課題②を実施し、グリップ課題①と同様に筋電図測定と課題終了後の握力測定③を実施する。

レッチングやアイシングおよび交代浴を用いた末梢性疲労の回復を目的とした方法が主流である。今回、我々は近年の末梢神経への電気刺激によって大脳皮質運動野の興奮性が増大するという報告に着目した。Wuら⁷⁾は感覚閾値程度の強さで経皮的電気刺激療法（以下TENS）を施行することによって、刺激部位と関連する一次感覚野から一次運動野へと効果を波及させて、脳血流が増大することを確認している。また筋疲労によって生じる筋電図の特徴は、発生張力の低下、一定張力保持（負荷）に対する筋電図活動（振幅と頻度）の増加、筋電図周波数パワースペクトルの低周波帯域への移行（除波化）である⁸⁾。筋疲労の評価として、筋電図積分値や周波数解析等の指標が広く用いられている⁹⁾。そこで本研究は、把持動作を持続的に行う疲労課題に対して、中枢神経系へ影響を及ぼすと考えられるTENSが筋疲労の軽減に効果的であるかどうかを握力と筋電図積分値の変化によって検討した。

対象及び方法

対象は、上肢に整形外科的な既往のない健常男子大学生10名（身長 174.7 ± 5.2 cm、体重 65.2 ± 5.7 kg、年齢 21.3 ± 1.0 歳）（平均 \pm 標準偏差）である。測定の準備として、被験者の前腕筋に表面筋電図（キッセイコムテック）の測定のための電極を貼付した。対象筋は利き手（全員が右手）の腕橈骨筋、尺側手根屈筋、橈側手根屈筋、尺側手根伸筋、橈骨手根伸筋とした。被験者は、最大握力の計測のため仰臥位でスメドラ式握力計を用いて2回測

定し、同時に筋電図測定を行った。なお測定値の高い方を最大握力の採用値とした。握力測定が終了してから仰臥位で前腕部を枕において肘関節軽度屈曲位の姿勢を取り、最大握力の30%の力で継続的なグリップ動作を180秒間実施した（以下、グリップ課題①）。グリップ課題中は、握力計のメモリを目視で確認し、課題となる握力を保つように実施した。その後、前腕前面の遠位部の正中神経に感覚閾値程度のTENSを40分間継続して行った。電気刺激後に握力を計測し再度、初回に計測した最大握力の30%の力で180秒間の握力課題を実施した（以下、グリップ課題②）。グリップ課題終了後すぐに握力測定を実施し、課題終了とした（以下、TENS条件）。TENS条件に対する比較は、同じ対象者にTENS条件と同様の課題を実施し電気刺激を加えない条件（以下、control条件）とした（図1）。なおTENS条件とcontrol条件の順序は、乱数表に基づいて設定し、両条件は一週間以上間隔を空けて実施した。

統計学的検討には、グリップ課題①とグリップ課題②との0～60sec間、60～120sec間、120～180sec間の各筋電図積分値を各測定の初回時に得られた最大の握力発揮時の最も安定した1秒の筋電図積分値で正規化した値を採用した。統計学的方法は、各条件の課題中の0～60sec間、60～120sec間、120～180sec間の筋電図積分相対値の比較を2元配置分散分析で検討し、post hocテストで多重比較法Tukey-Kramerの方法を用いて実施した。危険率は5%未満とした。

本研究の実施にあたり、研究目的および方法を

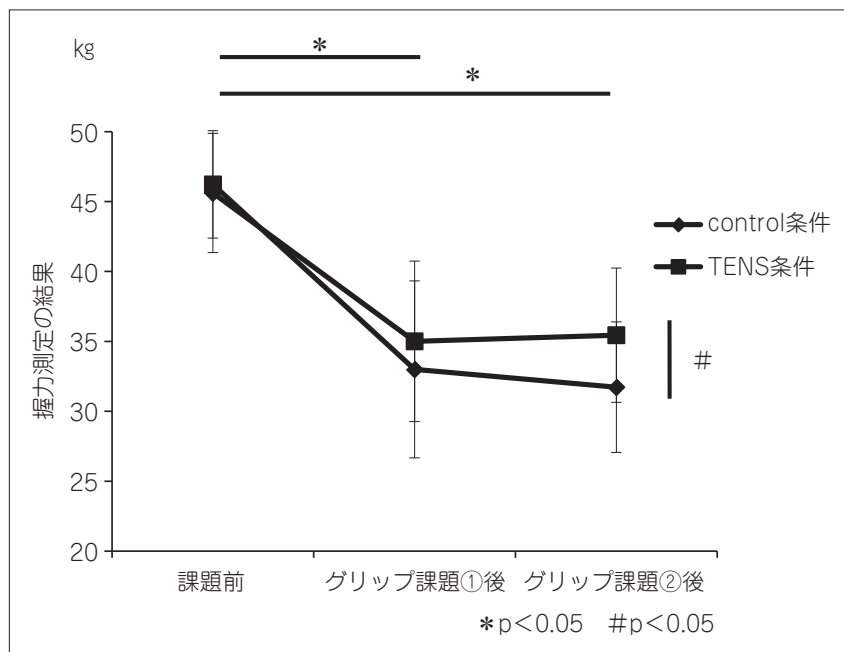


図2 握力測定の結果
2条件ともに課題前に比較して、グリップ課題①後及びグリップ課題②後に握力の有意な減少を認めた。また課題2回目後の条件間の比較において control 条件は TENS 条件より握力の有意な減少が認められた。

対象者に文章にて説明し、研究への参加について書面による同意を得た。また本研究は、関西医療大学倫理委員会承認されている。

結 果

1) 握力

被験者の課題前の握力は、TENS 条件 (右 45.6 ± 3.8kg, 左 46.8 ± 5.2kg), control 条件 (右 46.2 ± 4.3kg, 左 46.7 ± 4.8kg) であり、グリップ課題①後は TENS 条件 (右 35.0 ± 6.3kg, 左 45.9 ± 5.7kg), control 条件 (右 33.0 ± 5.7kg, 左 46.1 ± 5.7kg) となり、グリップ課題②後には TENS 条件 (右 35.4 ± 6.4kg, 左 45.1 ± 6.6kg), control 条件 (右 31.7 ± 4.8kg, 左 44.6 ± 6.2kg) であった。各条件の課題前とグリップ課題①後、グリップ課題②後の握力を比較すると、TENS 条件及び control 条件は課題前と比較してグリップ課題①後に握力は有意に減少し、課題前とグリップ課題②後との比較においても両条件に有意な握力の減少を認めた。また control 条件と TENS 条件の課題前と課題後および課題2回目後の比較において、課題2回目後では TENS 条件の握力より control 条件の握力に有意な減少が認められた (図2)。

2) 筋電図積分相対値解析

control 条件において、グリップ課題①とグリップ課題②の実施時 0~60sec 間と 60~120sec 間および 120~180sec 間までの3区間の筋電図積分相対値を比較した。結果は、0~60sec 間と 120~180sec 間の比較で 120~180sec 間の腕橈骨筋、橈側手根伸筋、尺側手根伸筋、橈側手根屈筋、尺側手根屈筋の筋電図積分相対値の有意な増加を認めた。またグリップ課題①の 60~120sec 間と 120~180sec 間の筋電図積分相対値の比較において 120~180sec 間の尺側手根伸筋の筋電図積分相対値の有意な増加を認めた (表1)。また control 条件におけるグリップ課題②は、0~60sec 間と 120~180sec 間の比較において 120~180sec 間の腕橈骨筋、橈側手根伸筋、尺側手根伸筋、橈側手根屈筋、尺側手根屈筋の筋電図積分相対値に有意な増加を認めた (表2)。

TENS 条件においても、control 条件と同様にグリップ課題①とグリップ課題②の実施時 0~60sec 間と 60~120sec 間および 120~180sec 間までの3条件を比較した。結果は、0~60sec 間と 120~180sec 間の比較において 120~180sec 間の腕橈骨筋、橈側手根伸筋、尺側手根伸筋、橈側手根屈筋、尺側手根屈筋の筋電図積分相対値に有意な増

表 1 control 条件 (グリップ課題①)

control 条件 (グリップ課題①)	0-60sec	60-120sec	120-180sec
腕橈骨筋	34.3±29.2	39.9±33.0	54.6±46.7*
橈側手根伸筋	31.1±16.9	32.0±16.7	39.8±17.3*
尺側手根伸筋	32.2±25.4	35.2±29.6	49.8±40.6*#
橈側手根屈筋	42.4±30.6	49.0±41.5	63.9±60.1*
尺側手根屈筋	35.9±29.6	43.0±33.1	57.9±44.2* (mv)

0-60sec vs 120-180sec : *p<0.05

60-120sec vs 120-180sec : #p<0.05

control 条件のグリップ課題①では、0-60sec 間と 120-180sec 間の筋電図積分相対値の比較において 120-180sec 間の測定した筋すべての筋電図積分相対値に有意な増加を認めた。また 60-120sec と 120-180sec の筋電図積分相対値の比較において 120-180sec 間の尺側手根伸筋の筋電図積分相対値に有意な増加を認めた。

表 2 control 条件 (グリップ課題②)

control 条件 (グリップ課題②)	0-60sec	60-120sec	120-180sec
腕橈骨筋	39.8±36.7	46.9±35.2	60.4±49.7*
橈側手根伸筋	30.1±25.1	33.3±24.2	38.8±24.6*
尺側手根伸筋	36.8±31.6	40.9±31.3	55.6±51.0*
橈側手根屈筋	43.6±40.8	54.4±47.5	64±46.9*
尺側手根屈筋	48.9±41.8	63.6±52.5	76.2±62.5* (mv)

0-60sec vs 120-180sec : *p<0.05

control 条件のグリップ課題②では、0-60sec 間と 120-180sec 間の比較において 120-180sec 間の測定した筋すべての筋電図積分相対値に有意な増加を認めた。

表 3 TENS 条件 (グリップ課題①)

TENS 条件 (グリップ課題①)	0-60sec	60-120sec	120-180sec
腕橈骨筋	36.2±12.9	42.8±11.7	52.2±21.4*
橈側手根伸筋	39.1±19.8	47.3±25.2	58.6±23.9*
尺側手根伸筋	36.1±15.0	40.3±23.6	50.1±31.8*
橈側手根屈筋	45.7±19.4	52.9±24.1	66.5±38.1*
尺側手根屈筋	38.9±27.2	50.4±24.6	62.6±35.9*

0-60sec vs 120-180sec : *p<0.05

TENS 条件のグリップ課題①では、0～60sec 間と 120～180sec 間の比較において、120～180sec 間の測定した筋すべての筋電図積分相対値に有意な増加を認めた。

加を認めた (表 3)。また TENS 条件におけるグリップ課題②は、0～60sec 間と 120～180sec 間の比較において 120～180sec 間の腕橈骨筋、橈側手根伸筋の筋電図積分相対値に有意な増加を認め、60～120sec 間と 120～180sec 間の比較において 120～180sec 間の尺側手根伸筋の筋電図積分相対値に有意な増加を認めた。しかし橈側手根屈筋お

よび尺側手根屈筋においてはグリップ課題②の課題中に筋電図積分相対値の有意差は認められなかった (表 4)。

control 条件と TENS 条件の比較において、グリップ課題②の 120～180sec 間時に control 条件の尺側手根屈筋と橈側手根屈筋の筋電図積分相対値に有意な増加が認められた (図 3, 4)。

表 4 TENS 条件 (グリッ課題②)

TENS 条件 (グリッ課題②)	0-60sec	60-120sec	120-180sec
腕橈骨筋	38.8 ± 14.7	43.5 ± 16.8	56.1 ± 24.4 *
橈側手根伸筋	37.4 ± 14.6	44.8 ± 16.8	44.5 ± 20.3 *
尺側手根伸筋	39.6 ± 15.5	44.7 ± 21.2	57.2 ± 24.4 #
橈側手根屈筋	36.8 ± 10.6	37.2 ± 13.2	42.4 ± 15.7
尺側手根屈筋	39.3 ± 18.9	43.5 ± 25.3	43.3 ± 25.3

0-60sec vs 120-180sec : *p<0.05

60-120sec vs 120-180sec : #p<0.05

TENS 条件のグリッ課題②では、0～60sec 間と 120～180sec 間の比較において 120～180sec 間の腕橈骨筋、橈側手根伸筋の筋電図積分相対値に有意な増加を認め、60～120sec 間と 120～180sec 間の比較では 120～180sec 間の尺側手根伸筋の筋電図積分相対値に有意な増加を認めたが、橈側手根屈筋および尺側手根屈筋においては課題中に有意差は認められなかった。

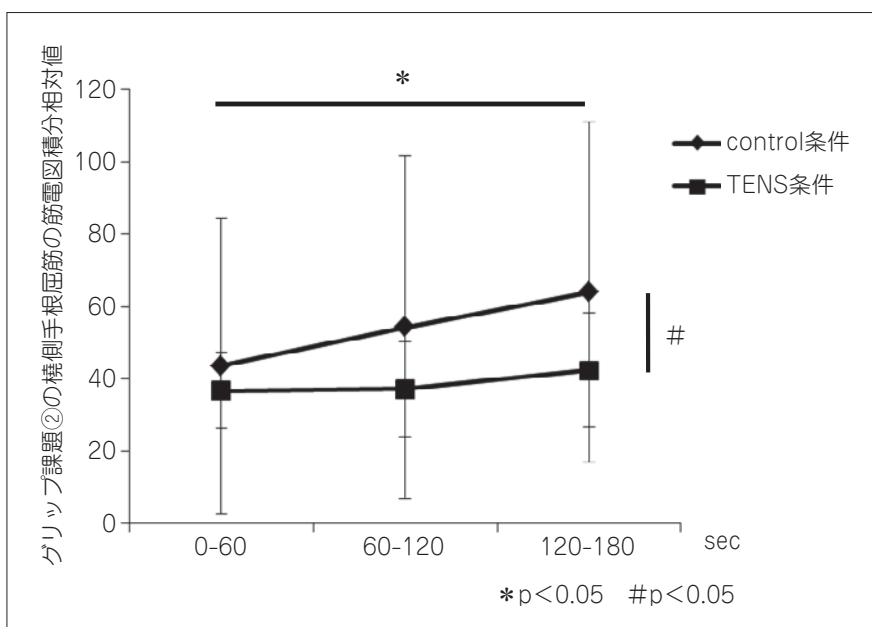


図 3 グリッ課題②の橈側手根屈筋の筋電図積分相対値

グリッ課題②では、control 条件の 0～60sec 間と 120～180sec 間の比較において 120～180sec 間の筋電図積分相対値に有意な増加が認められた。また条件間の比較において TENS 条件は control 条件より 120～180sec 間の筋電図積分相対値に有意な減少が認められた。

考 察

本研究では、グリッ課題において握力測定と筋電図測定で筋力および筋持久力を評価し、グリッ課題での握力、筋電図への影響を検討した。研究の結果、グリッ課題①では、課題中に計測した筋群すべての筋電図積分相対値が有意に増加していた(表 1, 図 2)。表面筋電図を用いた筋疲労の評価では、疲労の特徴は疲労課題中の筋電図積

分値の増大が特徴とされる¹⁰⁾。そのため本研究のグリッ課題における筋電図積分相対値の増大も筋疲労が影響したと考えられる。

次いでグリッ課題②では、課題前の握力に比較してグリッ課題②後に両条件の握力に有意な減少が認められたが、TENS 条件に比較して TENS を実施しなかった条件(control 条件)では、有意に握力の低下を認めた(図 2)。また筋電図測定では、グリッ課題②の control 条件において

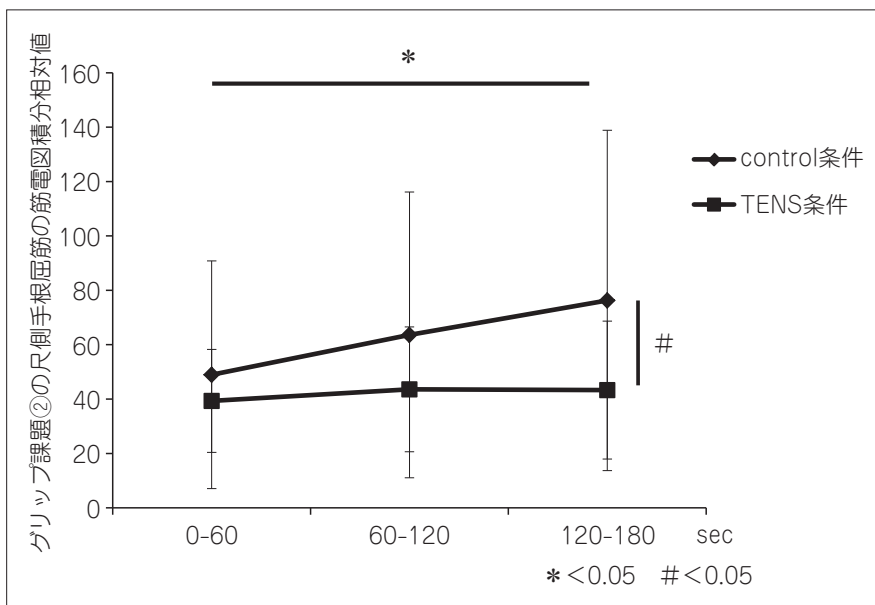


図4 グリップ課題②の尺側手根屈筋の筋電図積分相対値
グリップ課題②では、control条件の0～60sec間と120～180sec間の比較において120～180sec間の筋電図積分相対値に有意な増加が認められた。また条件間の比較においてTENS条件はcontrol条件より120～180sec間の筋電図積分相対値に有意な減少が認められた。

0～60sec間と120～180sec間の筋電図積分相対値の比較では、測定筋群のすべての筋電図積分相対値は有意な増加を認めたが、TENS条件の課題中の橈側手根屈筋および尺側手根屈筋の筋電図積分相対値には有意差が認められなかった(表2, 4)。さらに条件間の比較では、グリップ課題②の120～180sec時にTENS条件の尺側手根屈筋と橈側手根屈筋の筋電図積分相対値に有意な減少が認められた(図3, 4)。よってグリップ課題後に正中神経にTENSを実施すると握力低下が軽減し、尺側手根屈筋と橈側手根屈筋の筋電図積分値の上昇を抑制させることが確認された。

筋疲労とは力を産生する能力の減少と定義¹¹⁾され、筋疲労は末梢性疲労と中枢性疲労の両方の要因が関連する¹²⁾。末梢性疲労の原因として、Fletcherら¹³⁾は骨格筋の血流の制限によって嫌気性代謝は制限され、筋収縮を引き起こす乳酸の中和を防ぎ、結果として骨格筋の弛緩を障害することを挙げている。一方、血流を制限すると代謝産物が抑制されると同時に酸素が不足するために酸化的リン酸化が制限されるが、近年において乳酸は疲労の原因ではなく、疲労の抑制やエネルギーとして利用されることが報告されている¹⁴⁾。また中枢性疲労の原因については、課題遂行の時間経

過に伴う筋を虚血した状態の運動は、主観的な運動強度を増大させ、脳血流を低下させる報告¹⁵⁾がある。そのため筋疲労を回復させるためには中枢神経系の疲労についても考慮が必要と言える。本研究では、持続的なグリップ動作による筋疲労の回復手段としてTENSを用いた。Wuら⁷⁾の報告では正中神経へ電気刺激を連続で実施し、15分間隔で脳血流量の評価を実施して、30分から45分までの時間に電気刺激と関連する感覚野の脳血流が増大し始め、以降の時間は継続して電気刺激と関連する運動野へ興奮が伝導することを確認している。本研究では、グリップ課題中の正中神経にTENSを実施することで同支配神経である橈側手根屈筋に関連する大脳皮質の血流低下が軽減し、筋疲労耐性が得られた可能性があると考えられる。加えてグリップ課題中における前腕屈筋である尺側手根屈筋の負担を軽減させたと考えられる。しかしTENSの効果は、肘関節の屈筋である腕橈骨筋や前腕伸展筋である尺側手根伸筋や橈側手根伸筋に影響を及ぼすまでは至らなかったと推察する。

他の理学療法と筋疲労の回復についての研究では、大腿筋への疲労課題での筋電図周波数解析を用いた検討において、運動前に局所的な温熱刺激

を加えると筋疲労耐性を向上させる報告¹⁶⁾がある。また上腕筋による筋疲労課題での筋硬度を用いた検討において、アイシングが効果的であったとの報告¹⁷⁾や交代浴、ストレッチング、マッサージや振動刺激が筋疲労に効果的であることを報告^{18,19)}しているが、刺激の種類や強度の方法に詳しい見解はない。すなわち筋疲労の回復には、筋疲労のメカニズムや回復のための刺激の種類、強度の検討が重要であると考えられる。本研究の限界として、感覚神経の刺激は脊髄後根より脊髄前根に伝わり、 α 運動神経線維を興奮させるという報告²⁰⁾や視床から直接運動野への経路の存在²¹⁾を考慮すると、TENSがどのように作用したかを断定することはできないということが挙げられる。また他の運動療法や物理療法との比較やTENSの持続的な効果が検証できていないため、さらに検討する必要がある。

結 語

グリップ動作の疲労課題においてTENSは、前腕筋の疲労耐性に効果があると考えられた。

文 献

- 1) Ahmad, CS, ElAttache, NS: Valgus extension overload syndrome and stress injury of the olecranon. *Clin Sports Med* 23: 665-676, 2004.
- 2) Davidson, PA, Pink, M, Perry, J et al.: Functional anatomy of the flexor pronator muscle group in relation to the medial collateral ligament of the elbow. *Am J sports Med* 23: 245-250, 1995.
- 3) Hsu, JE, Peng, Q, Schafer, DA et al.: In vivo three-dimensional mechanical actions of individual. *J Appl Biomech* 24: 325-332, 2008.
- 4) 二瓶智樹, 佐藤 佑: 野球選手のボールスピード低下に及ぼす握力の影響. 仙台大学大学院研究論文集 4(3): 80-96, 2003.
- 5) Gandevia, SC, Allen, GM: Supraspinal factors in human muscle fatigue evidence for suboptimal output from motor cortex. *J Physiol* 490: 529-536, 1996.
- 6) Liu, JZ, Shan, ZY: Human brain activation during sustained and intermittent submaximal fatigue muscle contractions: an fMRI study. *J Neurophysiol* 90: 300-312, 2003.
- 7) Wu, CW, Gelderen, P, Hanakawa, T et al.: Enduring representational plasticity after Somatosensory stimulation. *Neuroimage* 27(4): 872-884, 2005.
- 8) 永田 晟: からだ・運動の科学. 不味堂出版, 東京, 1984.
- 9) 佐藤寿晃, 森 直樹, 千葉 登: 随意収縮および電気刺激による筋疲労後の筋電図学的解析. *Yamagata journal of health sciences* 6: 11-17, 2006.
- 10) 木村彰男: 疲労-筋疲労とその研究・検査方法を中心に. 総合リハ 15: 585-590, 1987.
- 11) Bigland, RB, Jones, DA: Central and peripheral fatigue in sustained maximum voluntary contraction of human quadriceps muscle. *Clin Sci Mol Med* 54: 609-614, 1978.
- 12) Candevia, SC: Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 81: 1725-1789, 2001.
- 13) Fletcher, WM, Hopkins, FG: Lactic acid in amphibian muscle. *J Physiol* 35(4): 247-309, 1907.
- 14) Dalsgaard, MK, Nybo, L, Cai, Y et al.: Cerebral metabolism is influenced by muscle ischaemia during exercise in human. *Exp Physiol* 88(2): 297-302, 2003.
- 15) 湯浅敦智, 吉田英樹: 運動前の温熱刺激が筋疲労に与える影響. 理学療法科学 27(6): 623-627, 2012.
- 16) 宇都宮雅博, 森下勝行, 鳥居 大ほか: 運動前の冷却刺激が中等度等尺性運動の継続時間に与える影響. 体力科学 58: 431-440, 2009.
- 17) 松原由未子, 栗井 瞳, 木村護郎ほか: 疲労に至る等尺性運動後の筋硬度回復に対する振動刺激の効果. 理学療法科学 19(14): 341-345, 2004.
- 18) 片平誠人, 山本利春: 異なる時間配分の交代浴が疲労した握力の回復に及ぼす影響. 福岡教育大学紀要 55: 31-34, 2005.
- 19) 山本正嘉, 山本利春: 激運動後のストレッチング, スポーツマッサージ, 軽運動, ホットパックが疲労回復に及ぼす効果. 体力科学 42: 82-92, 1993.
- 20) Forssberg, H, Hirschfeld, H: Phasic modulation of postural activation patterns during human walking. *Progress in Brain Research* 76: 221-227, 1988.
- 21) Andrews, AW: Distribution of muscle strength impairments following stroke. *Clin Rehabil* 14(1): 79-87, 2000.

(受付: 2014年11月10日, 受理: 2015年6月23日)

Effect of peripheral nerve electrotherapy on fatigue of the forearm muscles—Study of muscle integrated value of EMG on a gripping task—

Yoshida, T.^{*1}, Suzuki, T.^{*1}, Masuda, K.^{*2}

^{*1} Clinical Physical Therapy Laboratory, Kansai University of Health Sciences

^{*2} Department of Orthopedics Surgery, Kansai University of Health Science

Key words: Grip, fatigue, electrotherapy

[Abstract] The aim was to examine the effect of TENS on fatigue during a gripping task. The subjects were 10 healthy males. At first, subjects were asked to perform a gripping task using 30% of the maximum grip strength for 3 minutes. Subjects were then stimulated by TENS on the median nerve of the forearm and asked to perform the same task again. At the end, grip strength was measured. The stimulated and unstimulated conditions were compared in the same subjects. The examined data were EMG integral values of the forearm muscles during the gripping task and grip measurement. EMG showed a significant increase in muscle integral values of the flexor carpi radialis and flexor carpi ulnaris under control conditions. TENS was considered to be effective to promote fatigue resistance of the forearm muscles.