

# ウェアラブル小型電気刺激装置による筋疲労特性と筋肥大効果の検討

## Investigation of Neuromuscular fatigue and Muscular hypertrophy

### induced by wearable small size electrical stimulation device

(キーワード：ウェアラブル，小型，筋電気刺激，筋疲労，筋肥大)

(KEYWORDS: wearable, small size, electrical muscle stimulation, neuromuscular fatigue, muscle hypertrophy)

○川出周平、酒井未来（株式会社MTG）

## 1. はじめに

筋電気刺激 (Electrical Muscle Stimulation) は、古くから自発的に運動できない人々の代替的な運動手段として臨床応用されている。近年では、一般健常者でも運動不足の改善や健康維持の為、筋電気刺激が広く利用されるようになっており、市販の筋電気刺激装置も数多く登場している。しかしながら、その多くは本体・操作部・電極が独立していることや電源供給の必要性から、装置と運動者を多くのケーブルがつなぐこととなる。また、本体や操作部が大きい場合は、日常生活活動中や運動中の利用は困難である。電源供給を電池等で賄い“小型化”且つ“ウェアラブル化”された筋電気刺激装置であれば、運動者の拘束をなくすことができ、利便性を高めることができると考えられるが、刺激強度の低下に伴って誘発される筋出力の低下が懸念される。

## 2. 目的

小型化且つウェアラブル化された筋電気刺激装置を使用し、生理学的に筋疲労が誘発されるのか、さらに筋肥大効果が起こり得るのかを確認する。

## 3. 方法

### 実験① 筋疲労特性の検証

被験者は男性12名 (年齢:  $21.4 \pm 1.0$  歳, 身長:  $173.0 \pm 7.0$  cm, 体重:  $62.0 \pm 5.8$  kg, BMI:  $20.7 \pm 1.5$ ) であった。

実験は中京大学「人を対象とする研究に関する倫理審査」の承認を得て、被験者には事前に測定内容を説明し、書面でのインフォームドコンセントを得て実施した。

被験者は2回来室した。1回目に電気刺激、2回目に随意運動を実施した。1回目は、23分間の電気刺激を行い2回目は1回目の電気刺激で誘発されたものと同等の筋力発揮を随意運動(等尺性肘関節屈曲運動)で20分間行った。電気刺激および随意運動の前後に最大筋力発揮および最大下筋力発揮(最大筋力の50%を3秒間維持する課題)を行った(図1)。

電気刺激装置の刺激頻度は20Hzとし、3秒間の収縮を2秒間の弛緩を挟んで連続的に行った。刺激強度は被験者の耐えうる最大強度としたが、装置の最大刺激強度(40V)を上限とした。



図1. 実験①のプロトコル

随意運動における運動は3秒収縮2秒弛緩のリズムでの筋収縮であり、電気刺激時に記録した誘発された筋力の総和から目標となる運動強度を決定した。

1回目の来室時には実験①と同様の方法で、被験者の右腕を等尺性肘関節屈曲筋力測定装置(VINE社製)に固定し、骨格筋電気刺激装置(Body Fit, MTG社製)を貼付した。

上腕二頭筋近位部に表面筋電図電極(EM-272, Noraxon社製)(電極間距離2cm)を貼付し、表面筋電図を双極誘導で記録した(AB-611J, 日本光電社製)。



図2. 実験①のセットアップ

記録された筋電図は1000Hzでデジタル変換(Power lab, AD instruments社製)され、10-450Hzの帯域通過フィルタを通した。最大下筋力発揮中の、筋力が安定した2秒間をサンプリングし中央周波数を算出した。電気刺激および随意運動による筋疲労を評価するため、最大筋力および最大下筋力発揮中の中央周波数の運動前後における比率(運動後/運動前)を評価した。各パラメータの比率を電気刺激と随意運動との間でWilcoxonの符号付順位検定を用いて比較した。

## 実験② 筋肥大効果の検証

被験者は男女38名(電気刺激試行群19名、未試行群19名)であった。電気刺激試行群19名(男性:10名、女性:9名)の年齢は、46.3±5.7歳(男性:48.6±4.2歳、女性:43.7±6.2歳)、身長は165.2±8.0cm(男性:171.6±4.5cm、女性:158.1±3.8cm)、体重は64.2±9.8kg(男性:71.0±7.8kg、女性:56.7±5.2kg)であった。未試行群19名(男性:9名、女性:10名)の年齢は、48.6±5.3歳(男性:49.9±4.0歳、女性:47.5±6.2歳)、身長は164.0±7.0cm(男性:168.3±6.1cm、女性:160.2±5.5cm)、体重は66.5±7.6kg(男性:71.1±5.6kg、女性:62.4±6.9kg)であった。尚、試験はヘルシンキ宣言に基づく倫理的原則に準じて実施した。

電気刺激試行群は、腹部用の骨格筋電気刺激装置(Abs Fit, MTG社製)を1日1回(約20分間)継続して8週間使用した。電気刺激装置の刺激頻度は20Hzとし、3秒間の収縮を2秒間の弛緩を挟んで連続的に行った。刺激強度は被験者の耐えうる最大強度としたが、装置の最大刺激強度(40V)を上限とした。尚、電気刺激試行群、未試行群ともに試験期間中は試験開始以前と同様の生活環境(睡眠、食事、生活全般)を維持した。

検査項目はCTスキャン(日立EXA. CT Scanner System, 日立メディコ社製)を用い、臍位置の腹部断面を撮影。画像データから腹部CT写真による筋肉量(面積)を測定し、筋肥大効果の検討を行った。観察回数は、試行前、4週間後、8週間後の3回とし、各観察期それぞれについて、電気刺激試行群と未試行群とを対応のないt検定で統計解析を行った。

## 4. 結果

### 実験① 筋疲労特性の検証

23分間の電気刺激によって誘発された筋力は平均で最大筋力の9.7±3.0%であった。被験者毎に電気刺激時に誘発された筋力を目標値として随意運動を行ったが、随意運動では平均で最大筋力の12.3±4.2%の筋力が発揮された。このことは、随意運動で電気刺激相当以上の運動を実施させたことを意味する。

最大筋力の変化率(運動後/運動前)は電気刺激で71.9±5.0%、随意運動で93.2±4.2%であり、電気刺激の方がより大きく最大筋力が低下していた( $p < 0.05$ ) (図3)。

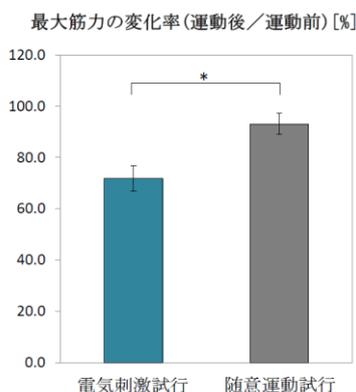


図3. 最大筋力の変化率 (運動後/運動前) [%]

最大下筋力発揮中の筋電図中央周波数の変化率(運動後/運動前)は87.0±15.7%、随意運動で105.5±9.2%であり、電気刺激の方がより大きく低下していた( $p < 0.05$ ) (図4)。

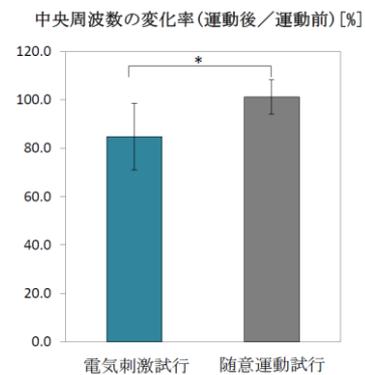


図4. 中央周波数の変化率 (運動後/運動前) [%]

### 実験② 筋肥大効果の検証

CTスキャンの撮影・画像解析の推移(相対値)について、図5に示した。

各観察時期の値を試行前の値で除した相対値(%)は、電気刺激試行群で、試行4週間後において108.0±7.3%、8週間後において111.9±7.9%であった。

未試行群で、試行4週間後において100.7±2.0%、8週間後において100.1±4.4%であった。

電気刺激試行群と未試行群の群間比較で試行4週間後( $p < 0.001$ )、8週間後( $p < 0.001$ )で有意差が認められた。

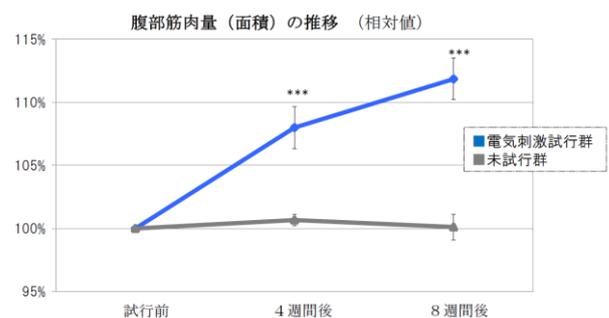


図5. 腹部筋肉量(面積)の推移(相対値)

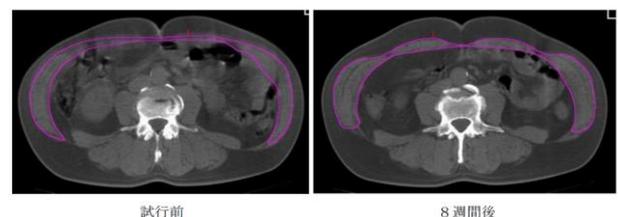


図6. 電気刺激試行群の腹部CTスキャン画像の例(50代男性)

## 5. 考察

最大筋力の低下は筋疲労の指標であることから、同等の筋出力であったにも関わらず、電気刺激では随意運動より疲労が亢進していたことを示唆する結果が得られた。

筋電図中央周波数の低下も、特に末梢（筋自体）における疲労を反映することが知られている。本研究では随意運動では中央周波数の低下は観察されなかった。このことは与えられた20分間の随意運動が、ほとんど末梢の疲労を誘発しない可能性を示すものである。

一方、そのような低強度の運動であるにも関わらず電気刺激では中央周波数の低下が観察された。このことは最大筋力の低下から示唆された随意運動に比較して電気刺激がより疲労を亢進させる可能性を電気生理学的な見解からサポートするものである。

最大筋力の10%程度の随意運動では、疲労はほとんど生じないことが本実験の結果からも確認できる。そのような非常に低強度な筋出力であるにもかかわらず電気刺激では疲労の亢進を反映する結果が得られた。このことは、随意運動と電気刺激では動員される運動単位もしくは筋線維が同一でないことに起因すると考えられる。

随意運動ではサイズの原理に従って、運動強度に依存して張力の低い疲労しにくい筋線維（いわゆる遅筋線維）から順に動員される。一方で、基本的には高い張力を持つ疲労しやすい筋線維（いわゆる速筋線維）は高強度の運動時にしか動員されない。骨格筋やそれを支配する運動神経もしくはその両方への電気刺激は、このサイズの原理に従わないランダムな運動単位の動員を生じさせることが知られている[1] [2]。

つまり、低強度の随意運動では動員されることのない速筋線維が電気刺激中には低強度の筋出力であっても動員されることとなる。このことが本研究で観察されたような、随意運動では疲労を生じさせない低強度の運動であっても電気刺激では疲労が亢進した原因であると考えられる。

また、筋肥大効果の検証結果より、電気刺激装置を使用して、腹部の筋肉量（面積）の増加が確認できた。速筋線維の方が遅筋線維よりも肥大しやすいという機能的な特徴があることから、電気刺激でのトレーニングにて速筋線維が動員され、継続的な電気刺激のトレーニングを行うことで、筋線維の断面積が大きくなり、筋肥大が起こったのだと考えられる。

## 5. まとめ

以上の結果から、小型化且つウェアラブル化された筋電気刺激装置を使用し、生理学的に筋疲労が誘発され、さらに筋肥大効果が起こり得ることが示唆された。

## 参考文献

- [1] Gregory CM, Bickel CS. Phys Ther 85:358-364,2005
- [2] Maffiuletti et al. Eur J Appl Physiol 111:2391-2397,2011