

博 士 論 文

微弱電流刺激処置が高強度運動後の  
筋機能に及ぼす影響およびそのメカニズム  
(要約)

令和6年9月

廣重 陽介

# 目次

第1章 緒言	1
1. 先行研究	1
A. 骨格筋の構造と収縮のしくみ	1
a-1. 骨格筋の構造	1
a-1-1. 筋鞘	1
a-1-2. 三つ組み構造	1
a-1-3. 筋小胞体	3
a-1-4. ミオシンフィラメント	3
a-1-5. アクチンフィラメント	4
a-2. 興奮・収縮連関	4
B. 伸張性収縮の特徴とその活用	5
b-1. 伸張性収縮の特徴	5
b-2. 伸張性収縮の活用	8
b-2-1. 競技スポーツ	8
b-2-2. リハビリテーション	8
b-2-3. サルコペニア	9
C. 伸張性収縮による筋疲労のメカニズム	9
c-1. メカニカルストレス	10
c-2. 酸化ストレス	10
c-3. $Ca^{2+}$ ストレス	12
D. 筋疲労の評価法および対処法	12
d-1. 筋疲労の回復過程の意義	12

d-2. 筋疲労の評価方法	14
d-2-1. 実験動物に対する評価法	14
d-2-2. ヒトに対する評価法	14
d-3. 筋疲労軽減・回復促進のための介入方法	15
d-3-1. 栄養的介入	15
d-3-2. プレコンディショニング	15
d-3-3. 微弱電流刺激	17
2. 先行研究における問題点と本研究の目的	18
A. 微弱電流刺激に関する先行研究における問題点	18
a-1. 微弱電流刺激が伸張性運動後の筋機能に及ぼす影響	18
a-2. 微弱電流刺激が瞬発性運動後の筋機能に及ぼす影響	20
a-3. 微弱電流刺激が筋力回復を誘起するメカニズム	20
B. 本研究の目的	21
第2章 微弱電流刺激が伸張性収縮後の筋機能および遅発性筋痛に及	
ぼす影響（実験1）	24
1. 目的	24
2. 方法	25
A. 対象者	25
B. 実験プロトコール	25
C. 伸張性収縮負荷	26
D. 微弱電流刺激処置	26
E. 等尺性最大随意張力の測定	26
F. 筋収縮特性の測定	29

G. 筋硬度の測定	31
H. クレアチンキナーゼ活性および乳酸脱水素酵素活性の測定	31
I. 自覚的筋痛の測定	31
J. 肘関節可動域の測定	33
K. 上腕周囲径の測定	33
L. 統計処理	33
3. 結果	34
A. 等尺性最大随意張力	34
B. TMG	34
C. 筋硬度	37
D. 血清クレアチンキナーゼおよび乳酸脱水素酵素活性	37
E. 自覚的筋痛	37
F. 肘関節可動域	41
G. 上腕周囲径	41
4. 考察	41
5. 要約	46

### 第3章 微弱電流刺激が高強度トレーニング後の筋機能に及ぼす影響

(実験2)	47
1. 目的	47
2. 方法	48
A. 対象者	48
B. 実験プロトコール	48
C. トレーニング	49

D. 微弱電流刺激処置	52
E. 等尺性最大随意張力の測定	52
F. ノルディックハムストリングによる伸張性最大張力の測定	52
G. 筋収縮特性の測定	55
H. 筋線維の羽状角の測定	55
I. ハムストリングの柔軟性の測定	58
J. ジャンプ能力の測定	58
K. 自覚的筋痛の測定	61
L. ウェルネススコアの測定	61
M. 統計処理	61
3. 結果	63
A. トレーニング負荷	63
B. 等尺性最大随意張力	63
C. ノルディックハムストリングによる伸張性最大張力	63
D. TMG	67
E. 筋線維の羽状角	67
F. ハムストリングの柔軟性	67
G. ジャンプ能力	71
H. 自覚的筋痛	71
I. ウェルネススコア	71
4. 考察	75
5. 要約	77

## 第4章 微弱電流刺激が伸張性収縮後の筋力に及ぼす影響 —そのメ

カニズムの解明— (実験3) . . . . .	79
1. 目的 . . . . .	79
2. 方法 . . . . .	80
A. 実験動物 . . . . .	80
B. 伸張性収縮 . . . . .	80
C. 微弱電流刺激処置 . . . . .	81
D. 等尺性張力の測定 . . . . .	81
E. 筋小胞体の $\text{Ca}^{2+}$ 取り込みおよび放出速度の測定 . . . . .	81
F. ミオシン ATPase 活性の測定 . . . . .	82
G. 総カルパイン活性の測定 . . . . .	83
H. プロテアソーム活性の測定 . . . . .	84
I. ウェスタンブロッティング . . . . .	84
J. 統計処理 . . . . .	85
3. 結果 . . . . .	85
A. 等尺性張力 . . . . .	85
B. SR $\text{Ca}^{2+}$ 取り込み・放出速度 . . . . .	87
C. ミオシン ATPase 活性 . . . . .	87
D. カルパインおよびプロテアソーム活性 . . . . .	87
E. SERCA のタンパク質量 . . . . .	91
F. RyR のタンパク質量 . . . . .	91
4. 考察 . . . . .	91
5. 要約 . . . . .	96

第5章 討論	98
1. スポーツ現場における微弱電融刺激処置の現状	98
2. 微弱電流刺激処置の実用性と実践的活用法	98
A. 実用性	98
B. 活用法	99
b-1. アスリートに対して	99
b-2. 一般の人に対して	99
3. 微弱電流刺激処置の社会的意義	100
A. アスリートに対して	100
B. 一般の人に対して	100
4. 微弱電流刺激処置がタンパク質の分解に及ぼす影響	101
5. 本研究の限界と今後の課題	102
第6章 総括	103
1. 微弱電流刺激が伸張性収縮後の筋機能および遅発性筋痛に及ぼす影響 (実験 1)	103
2. 微弱電流刺激が高強度トレーニング後の筋機能に及ぼす影響 (実験 2)	103
3. 微弱電流刺激が伸張性収縮後の筋力に及ぼす影響 —そのメカニズムの解明— (実験 3)	104
4. 結論	105
謝辞	106

参考文献 . . . . . 107

## 学位論文の要約

論文題目 微弱電流刺激処置が高強度運動後の筋機能に及ぼす影響および  
そのメカニズム

廣重 陽介

本研究では、(1) 実用的な微弱電流刺激 (microcurrent electrical neuromuscular stimulation: MENS) 処置によって、伸張性収縮 (eccentric contraction: ECC) を伴う高強度運動に起因して低下した筋機能の回復が促進されるか否かを、(2) また、有用な効果を持つのであれば、そのメカニズムを検討することを目的とし、以下の実験を行った。

### 1. 微弱電流刺激が伸張性収縮後の筋機能および遅発性筋痛に及ぼす影響 (実験 1)

本実験の目的は、MENS 処置が ECC 後の筋力および遅発性筋痛 (delayed onset muscle soreness: DOMS) に及ぼす効果を検討することであった。対象者を MENS 群と placebo 群に分け、全員の上腕屈筋群に ECC を負荷した。MENS 群の対象者の上腕前面に、ECC 負荷直後から 6 日後にかけて、1 日 1 回、1 回 20 分間の MENS 処置を施した。ECC 前、ECC 直後、1 日後、3 日後および 6 日後に、生理学的測定を中心とした分析を行い、以下の結果を得た。

- (1) ECC 直後では、張力が著しく低下すること、および ECC1 日後では、DOMS が発生することが観察された。
- (2) ECC6 日後では、これらは MENS 群においてのみ回復した。

以上の結果から、MENS 処置には、ECC 後の筋力および DOMS の回復を促進する効果があることが示された。

### 2. 微弱電流刺激が高強度トレーニング後の筋機能に及ぼす影響 (実験 2)

本実験の目的は、MENS 処置が実践的な高強度トレーニング後の筋機能に及ぼす影響を検討することであった。高強度トレーニング (スプリントトレーニングおよび筋力トレーニング) を負荷する期間 3 日間およびその後の回復期間 2 日間を設け、全対象者にトレーニングを行わせた。対象者を MENS 群と placebo 群に分け、MENS 群には、トレーニング実施中および回復期間中の 5 日間にわたり、大腿二頭筋に、1 日 1 回、1 回 20 分間の MENS 処置を施した。この 5 日間を 1 セットとした施行を 2 回行い、1 セット目で MENS 群であった対象者を 2 セット目では placebo 群に、1 セット目で placebo 群であった者を 2 セット目では MENS 群に割り振った。3 日間のトレーニング前、3

日目のトレーニング終了直後，回復 1 日目および 2 日目に，筋機能を中心とした測定を行い，以下の結果を得た．

- (1) 膝屈曲等尺性最大随意収縮張力は，回復期間中，placebo 群と比べ MENS 群で高値が観察された．
- (2) ノルディックハムストリングにおける膝屈筋伸張性最大張力は，回復期間中，placebo 群と比べ MENS 群で高値が認められた．
- (3) 大腿二頭筋長頭の収縮速度は，回復期間中，placebo 群と比べ MENS 群で高値が認められた．
- (4) DOMS は，回復 2 日目に，MENS 群においてのみ回復した．

以上の結果から，実践的なトレーニング後の回復過程において，トレーニングによって低下した筋力や収縮速度および発生した DOMS の回復が，MENS 処置によって促進されることが明らかとなった．

### 3. 微弱電流刺激が伸張性収縮後の筋力に及ぼす影響 —そのメカニズムの解明— (実験 3)

本実験の目的は，ECC が負荷された筋において，MENS 処置によって，張力の回復が促進されるメカニズムを検討することであった．Wistar 系雄性ラットを，MENS 処置を施す群 (MENS 群) と施さない群 (non-treated: NT 群) に分けた．全てのラットの片脚 (ECC 脚) 前脛骨筋に ECC を負荷し，その後，MENS 群には，MENS 処置を刺激直後から ECC 終了 3 日後まで 1 日 1 回，1 回 20 分間施した．3 日後に前脛骨筋を摘出し，生理学的・生化学的解析を行い，以下の結果を得た．

- (1) ECC 脚における張力は，ECC3 日後では，NT 群に比べ MENS 群で高値が示された．
- (2) ECC 脚における SR の  $\text{Ca}^{2+}$  放出速度は，ECC3 日後では，NT に群比べ MENS 群で高値が観察された．
- (3) ECC 脚におけるプロテアソーム活性は，ECC3 日後では，NT に群比べ MENS 群で低値が観察された．
- (4) ECC 脚における断片化したリアノジン受容体の量は，ECC3 日後では，NT 群に比べ MENS 群で低値が観察された．

以上の結果から，ECC が負荷された筋において，MENS 処置によって，筋力の回復が促進されるのは，リアノジン受容体の断片化が抑制されるためであることが示唆された．また，その抑制にプロテアソームが関与していることが推察される．

### 4. 結論

本研究の結果から得られた結論は，以下に示すとおりである．

- (1) 1 回数十分間の MENS 処置は、ECC に起因して低下した筋力および発生する DOMS の回復を促進する効果をもつ。
- (2) この効果は、実践的なトレーニング (スプリントトレーニングおよび筋力トレーニング) においてもみられる。
- (3) 骨格筋において、このような効果があるのは、MENS 処置によって、リアノジン受容体の断片化が抑制されるためである。
- (4) MENS 処置は、アスリートでは身体パフォーマンスを高めるうえでの、一般の人では運動を習慣化するうえでの一助となり得る。

## 論 文 目 録

ふ り が な ひろしげ ようすけ  
氏 名 廣 重 陽 介



### 学 位 論 文

#### 論文題目

- (和文) 微弱電流刺激処置が高強度運動後の筋機能に及ぼす影響およびそのメカニズム
- (英文) Effects of microcurrent electrical neuromuscular stimulation on muscle function after high intensity exercise and its mechanism

#### 公 表 の 方 法

広島大学学術情報リポジトリで全文を公表するほか、広島大学大学院人間社会科学部研究科紀要「総合科学研究」に要旨を公表し、次のとおり分割して公表する。

- 第2章 関係論文の2
- 第3章 Journal of Strength and Conditioning Researchに  
投稿予定(2024年10月)
- 第4章 関係論文の1

### 参 考 論 文

#### I 関係論文

- 1 著者名 : Yosuke Hiroshige, Daiki Watanabe, Chihiro Aibara, Keita Kanzaki, Satoshi Matsunaga, Masanobu Wada  
論文題目 : The Efficacy of Microcurrent Therapy on Eccentric Contraction-Induced Muscle Damage in Rat Fast-Twitch Skeletal Muscle  
雑誌名 : Open Journal of Applied Sciences  
Vol. 8 (No. 3), 89 頁-102 頁, 2018
- 2 著者名 : Yosuke Hiroshige, Akemi Sawai, Toshinao Kamikubo, Ryusei Yamaguchi, Kosaku Tanaka, Masanobu Wada

論文題目 : Microcurrent treatment promotes force recovery from  
high-intensity eccentric contraction-induced muscle damage in  
human skeletal muscle: a prospective double-blind  
randomized control study

雑誌名 : Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche  
in press

II その他  
なし