

高周波温熱刺激が筋収縮特性と筋出力の疲労回復に及ぼす効果

Effect of radiofrequency diathermy stimulation on muscle contractile properties and force output in recovery from muscle fatigue.

平塚和也 (国士舘大学大学院 スポーツ・システム研究科)

田中重陽 (国士舘大学 政経学部)

熊川大介 (国士舘大学 体育学部)

角田直也 (国士舘大学大学院 スポーツ・システム研究科)

和文抄録

本研究では、筋疲労後の高周波温熱刺激による筋収縮特性 (D_m : 最大変位量, T_c : 収縮時間, V_c : 収縮速度) 及び等尺性の随意最大筋力 (MVC) を回復させる効果が、受動的な回復方法より高いのではないかと仮説を立て、その効果を Tensiomyography (TMG) 法及び MVC 測定から検証した。被験者は 18 名とし、筋疲労課題後に高周波温熱刺激を行う条件と行わない条件で、同一被験者に計 2 回の測定を実施した。また、両条件ともに、筋疲労課題前 (pre)、筋疲労課題後 (post)、post から 30 分後 (rec30) 及び 60 分後 (rec60) に筋収縮特性及び MVC の測定をした。その結果、rec30 の刺激有り条件は刺激無し条件よりも MVC が有意に高値を示した。しかし、rec60 の MVC は刺激有り条件と刺激無し条件との間に有意な差が確認されなかった。また、筋収縮特性において、rec30 の刺激有り条件は刺激無し条件よりも D_m 及び V_c が有意に高値を示し、 T_c は有意に低値を示した。しかし、rec60 の D_m 、 T_c 及び V_c は刺激有り条件と刺激無し条件との間に有意な差が確認されなかった。これらのことから、筋疲労後の高周波温熱刺激は、筋収縮特性及び MVC の回復を一時的に促進させることが明らかとなった。

1. 緒言

筋疲労は、随意的な努力を維持しているにもかかわらず筋の出力が低下する現象と定義されている (Enoka and Stuart, 1992)。スポーツ選手は、競技力向上を目的として日常的に過酷なトレーニングを実施しているため、筋疲労の蓄積は避けられない。しかし、試合や競技会でより優れたパフォーマンスを発揮するためには、筋疲労状態から回復し、最良の状態で試合や競技会に臨むことが求め

られる。特に、1 日のうちに数回にわたる試合や競技を行うスポーツ選手においては、休憩中いかに筋疲労を早く回復させるか、ということが重要な課題である (山本・山本, 1993)。

これまでに様々な手法を用いて筋疲労の軽減を意図としたアプローチがなされてきた。その中の一つとして温熱刺激がある。温熱刺激は、加えられるエネルギーの性質によって深達性が異なる (Michelle, 2010) ため、皮膚の表層を直接温める表在性温熱 (ホットパック、温水など) と骨、関節、筋を温める深部性温熱 (高周波、超音波、超短波、マイクロ波など) に分類することができる (大森, 2004; 網本, 2008)。熱を加えることによる主な生理学的効果として、血流の増加 (Sekins et al., 1984)、代謝の促進 (Sekins et al., 1984)、軟部組織の伸展性の向上 (Robertson et al., 2005)、疼痛の軽減 (McCray and Patton, 1984) といった効果が報告されている。しかし、温熱刺激の効果は組織温度によって変化することが明らかにされており (Lehmann, 1990)、表在性温熱と深部性温熱ではその効果の度合いが異なる。例えば、表在性温熱のホットパックと深部性温熱の超短波ジアテルミーを用いて、筋組織内の循環動態について検討した Karasuno et al. (2005) によると、超短波ジアテルミーがホットパックより効果的に血流量を増加させることが報告している。また、表在性温熱よりも深部性温熱は効果的に軟部組織の伸展性を増加させることが報告 (Robertson et al., 2005) されている。このように、深部性温熱は、表在性温熱よりも生理学的効果が高いことからスポーツやリハビリテーション現場において広範囲な応用が期待できる。

筋疲労に対する温熱刺激の影響についてはこれまでに、筋力回復率の向上 (Nosaka et al., 2007)、関節可動域の増加 (Saga et al., 2008) 及び疼痛の軽減 (Evans et al., 2002) 等が報告されている。しかしながら、これらは筋疲労の予防や軽減を意図して運動前に深部性温熱を用いて

Kazuya HIRATSUKA (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

Shigeharu TANAKA (Faculty of Political Science and Economics, Kokushikan University)

Daisuke KUMAGAWA (Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

Naoya TSUNODA (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

受付日: 2020/7/23 受理日: 2020/9/25

刺激した結果である。一方、筋疲労状態から効果的な回復を図るための温熱刺激の効果を調べた研究(山本・山本, 1993)では、作業能力(仕事量)の回復に有効な効果を示さなかったことが報告されている。しかしながら、この研究は表在性温熱であるホットパックを用いて刺激しており、その刺激時間は短く、また、ホットパックの熱は、1~2cmの深達度(Lehmann et al., 1966)であるため、比較的深部の組織温度を上昇させることができず、それにより、作業能力の回復に有効な効果を示さなかった可能性が考えられる。つまり、筋疲労後に表在性温熱よりも生理学的効果が高い深部性温熱を用いれば、効果的に筋疲労を回復できる可能性が考えられる。加えて、これまでの筋疲労後に対する温熱刺激の回復効果に関しては、主に表在性温熱であるホットパックや温水を用いて検討した(山本・山本, 1993; Viitasalo et al., 1995; 片平・山本, 2005; Vaile et al., 2008; Mayer et al., 2006)ものが殆どであり、深部性温熱による筋疲労後の回復効果に関する詳細な検討はなされていない。

近年、筋疲労を筋収縮特性から評価する手法として、Tensiomyography (TMG) 法が用いられている。TMG法は、電気刺激装置を用いて筋上の体表面に電気刺激を与え、筋が収縮する際に、その径が側方へ変形するときに生じる変位を計測し、変位-時間曲線から筋の変位量、遅延時間、収縮時間、収縮速度及び弛緩時間を評価することができる。この手法は、自発的な努力を要せず、非侵襲性に加え、簡便性(Krizaj et al., 2008; Rey et al., 2012)及び再現性(Krizaj et al., 2008; Šimunič, 2012)に優れているため、被験者の負担が少なく、短時間の繰り返し測定が可能となる。つまり、スポーツやリハビリテーションなどの実践現場で手軽に利用できるものと考えられる。先行研究では、TMG法から得られるデータが、疲労(de Paula Simola et al., 2015; Macgregor et al., 2016)、筋損傷及び回復(Hunter et al., 2012; Šimunič et al., 2019)によって変化することがすでに報告されており、TMG法は筋疲労及びその回復過程を客観的に評価することが可能である。したがって、TMG法を用いることにより、筋収縮特性から有効な回復方法を探る上で有益な情報を得ることが期待できる。

そこで本研究では、深部性温熱の一種に分類される高周波を用いて、筋疲労後の高周波温熱刺激による筋収縮特性及び最大筋力を回復させる効果が、受動的な回復方法より高いのではないかと仮説を立て、その効果をTMG法及び筋力測定から検証した。

II. 方法

1. 被験者

本研究における被験者は、上肢の既往歴がない男子大学生18名(年齢: 20.3 ± 2.3 歳, 身長: 170.0 ± 4.9 cm, 体重: 64.8 ± 5.6 kg)とした。被験者には、測定期間中に筋疲労を伴うような運動を控えるように指示した。また、測定前に筋の状態を確認するため、運動実施状況、筋痛の有無及び最大努力での筋力発揮できる状態なのかを問診し、実験に支障がないことを確認した。なお、被験者に対して、研究の目的、実験方法及びその安全性について説明し、書面にて参加の同意を得た。本研究は国士舘大学研究倫理評価委員会に申請し、承認を得た後に実施した(受理番号18017)。

2. 主観的な疲労感の評価

主観的な疲労感の評価には、疲労感Visual Analogue Scale (VAS) を参考にした(日本疲労学会, 2011)。VASは100mmの直線を示し、左端には「疲労感がない」、右端には「最大の疲労感」と記載し、現在感じている疲労感が直線上のどの位置にあるかを記録した。また、測定に際して、被験者にはゆっくりと肘関節の屈曲伸張動作を行わせてからVASに記載した。VASの処理は左端からチェックした箇所の長さを1mm単位で計測して数値化した。

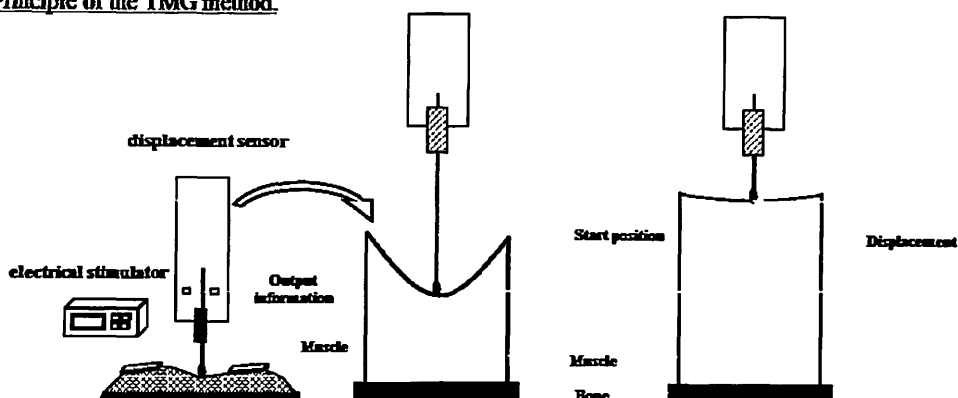
3. 体表面温度の測定

体表面温度(T_s)は、赤外線温度計であるサーモグラフィ(INFRA-EYE1200, 富士通社製)を用いて測定した。測定部位は、上腕二頭筋上とし、肩峰前部と肘頭窩を結んだ50%位置とした。赤外線カメラから測定部位までの距離は、各被験者とも50cmに統一した。測定時間は10秒とし、その平均値を T_s として採用した。

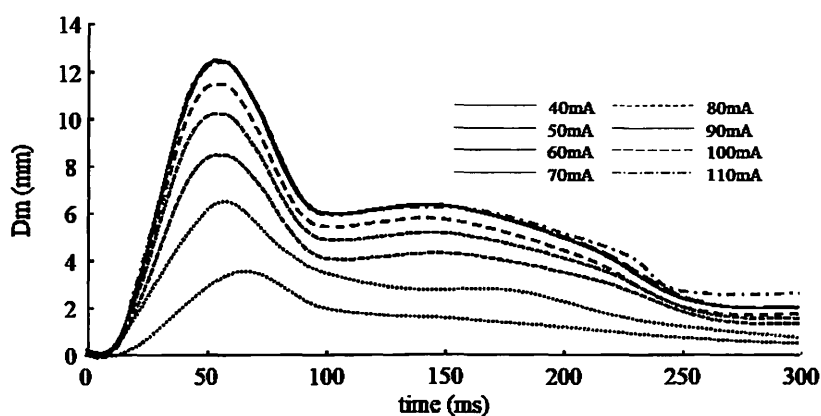
4. 筋収縮特性の測定

筋収縮特性は、TMG法(TMKG-100, TMG社製)を用いて測定した。TMG法の測定では、電気刺激装置を用いて筋上の体表面に電気刺激を与え、筋が収縮する際に、その径が側方へ変形するときに生じる変位を計測する(Fig.1-a)。変位の測定には、0.17N/mmのパネが組み込まれた変位センサーを使用した。被験筋は上腕二頭筋(Biceps brachii: BB)とし、変位センサーの位置は、肩峰と肘頭窩を結んだ50%位置(Hunter et al., 2012)とした。刺激電極は、変位センサーを中心に近位部と遠位部に貼付し、電極間距離は5cmとした。電気刺激における単一刺激のパルス幅は1msとした。電気刺激範囲は40mAから110mAとし、対象とした筋の最大変位が

a. Principle of the TMG method



b. Typical incremental progression of displacement-time curves



c. TMG parameter definition

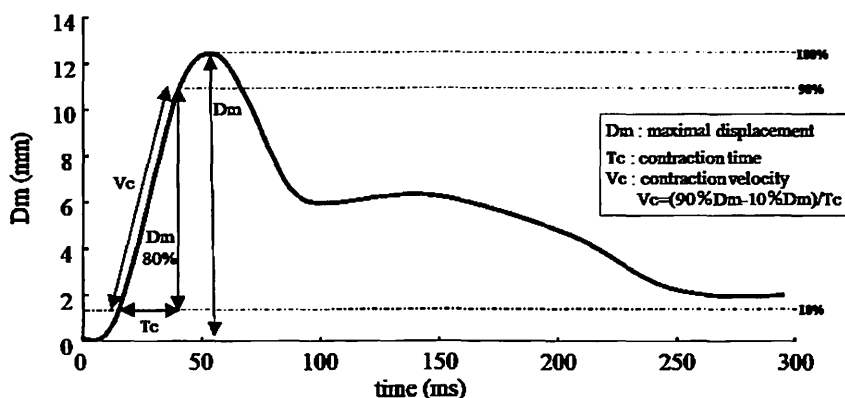


Fig.1 Principle of the TMG method (a), displacement-time curves with stimulation amplitude (b) and definitions of contractile properties (c). (a):Electrical twitch evokes muscle contraction resulting also in thickening of the muscle belly that is measured by the displacement sensor. Displacement sensor is positioned perpendicularly to the skin surface above the muscle belly and the tip of the sensor is pressed to the muscle, slightly deforming the muscle belly. (b):The increase in curve magnitude is induced by an increase in stimulation amplitude (typically up to 40–110 mA). Peak displacement is identified by a plateau in displacement curves, despite increased stimulation amplitude. (c): Dm corresponds to the maximal radial movement of the muscle belly. Tc corresponds to the time lapse from 10% to 90% of Dm. Vc can be calculated as the rate of Dm between 10 and 90% relative to Tc. Dm: maximal displacement, Tc: contraction time, Vc: contraction velocity.

発現するまで10 mAずつ増加させた(Fig.1-b)。測定姿勢は座位姿勢とし、上体をベルトで固定した。また、上腕を体幹に沿わせ、肘関節屈曲角度が90度になるように肘を台の上に置き、前腕をベルトで固定した。分析項目は、最大変位量(Maximal displacement: Dm)及び収縮時間(Contraction time: Tc)とした。Dmは、筋収縮時における変位量の最大値であり、筋硬度を示す指標として報告(Hunter et al., 2012; de Paula Simola et al., 2015; Macgregor et al., 2016)されている。Tcは、Dmの10%から90%に至るまでの時間を示す値であり、筋線維組成に関連することが報告(Dahmane et al., 2001; Simunič et al., 2011)されている。また、de Paula Simola et al. (2015)の算出方法を用いて収縮速度(Contraction velocity: Vc, $Vc = (90\% Dm - 10\% Dm) / Tc$)を算出した(Fig.1-c)。これらの測定項目における再現性は、先行研究(Krizaj et al., 2008; Šimunič, 2012)と同様に級内相関係数(intraclass correlation coefficient: ICC)によって確認した。その結果、Dmが $ICC = .921$ ($p < 0.01$)、Tcが $ICC = .910$ ($p < 0.01$)、Vcが $ICC = .886$ ($p < 0.01$)であり高い再現性を示した。

5. 等尺性による随意最大筋力の測定

等尺性による随意最大筋力は総合筋力測定装置(Biodex System3, Biodex社製)を用いて測定した。測定姿勢は座位にて肘関節屈曲角度を90度の状態とし、肘関節の中央をダイナモメータの回転軸に合わせ、上下への動きを抑えるために専用の肘当て台と付属のストラップを用いてアタッチメントに固定した。その後、被験者には必ずウォーミングアップ実施させ、肘関節屈曲による5秒間の等尺性による随意最大筋力発揮を20秒間の休息をはさんで2回行わせた。得られたデータの最大値(MVC)を分析の対象とした。

6. 筋疲労課題

筋疲労課題は、総合筋力測定装置(Biodex System3, Biodex社製)を用いて等尺性による最大努力での肘関節屈曲筋力発揮とした。最大努力での筋力発揮は5秒間とし、1秒間の休息を挟み、連続して50回行わせた。

7. 高周波温熱刺激

高周波温熱刺激は、高周波治療器(Tecnosix Red Coral Sixtus社製)を用いた。この装置は、電磁波エネルギーが体内の水分や細胞分子などを振動させることにより、ジュール熱(摩擦熱)を発生させ、深部温度を上昇させる(大森, 2004; Piolani et al., 2009)ことができる。また、プローブと本体が小型軽量であり、持ち運びが容易である。そのため、スポーツやリハビリテーションなど

の実践現場で手軽に利用することが可能である。被験者の姿勢は仰臥位にさせ、肘関節及び手関節は解剖学的正位とした。照射部位は上腕前部とし、上腕後部に板状の戻し電極を設置した。照射電極であるプローブにクリームを塗布し、刺激周波数は0.75MHz、照射出力を60Wとした。照射方法はストローク法とし、照射速度はメトロノームを用いて、2秒間に照射部位である上腕前部を1往復するように設定した。照射時間は15分とした。なお、照射方法及び照射時間は先行研究(佐藤ほか, 2015)を参考にした。

8. 測定手順

本研究では、同一被験者に対して筋疲労課題後に、高周波温熱刺激を行う条件(H-c)と、行わない条件(N-c)による測定を2週間の間隔をあけてそれぞれ実施した。H-cとN-cの測定を行う順序は、被験者に応じてランダムに設定した。各条件ともに、筋疲労課題前(pre)、筋疲労課題直後(post)、postから30分後(rec30)及び60分後(rec60)にVAS、Ts、MVC及び筋収縮特性の測定を実施した。Pre測定後には15分間の休憩を挟んで筋疲労課題を実施させた。N-cではpost測定後に被験者を椅座位姿勢で25分間安静にさせ、H-cではpost測定後に15分間の高周波温熱刺激を実施し、その後に椅座位で10分間安静にさせた。全被験者には、1回目の測定と2回目の測定が同一条件となるよう測定時間及び室内温度(24℃)を統一した。なお、本研究では全て利き腕を対象とした。

9. 各測定項目の算出について

各測定項目の筋疲労及び回復過程を評価するために、preに対する相対値を算出した。また、MVC(ΔMVC)及び筋収縮特性(ΔDm , ΔTc , ΔVc)における各測定間の差分を算出した。各測定間の差分において、preとpost間の差は $post - pre$ 、postとrec30間の差は $rec30 - post$ 、rec30とrec60間の差は $rec60 - rec30$ とした。

10. 統計処理

本研究における全ての測定値を平均値±標準偏差で示した。各測定項目において、高周波温熱刺激の効果とVAS、Ts、MVC及び筋収縮特性の経時的変化を観察するために、被験者内要因を刺激の有無(刺激有り条件・刺激無し条件)及び時間(pre・post・rec30・rec60)とする2要因分散分析(反復測定)を行った。有意な交互作用が認められた場合は単純主効果の検定及び多重比較検定を行った。また、各測定間における ΔMVC と ΔDm , ΔTc 及び ΔVc との関係は、Pearsonの積率相関係数を用いて検定した。解析には統計解析ソフト(SPSS Statistics ver. 26, IBM)を用いた。なお、すべての統計処理におい

て5%水準未満をもって有意と判定した。

III. 結果

I. 経時的变化

両条件におけるすべての分析項目の経時的变化を Table 1 に示した。各分析項目において2要因分散分析を行った結果、交互作用(刺激の有無×時間)がそれぞれ有意であった(VAS: $p = .000$, Ts: $p = .000$, MVC: $p = .019$, Dm: $p = .001$, Tc: $p = .005$, Vc: $p = .000$)。

VASは、両条件共に pre から post にかけて増加し、その後低下した。また、両条件共に pre と post, rec30 及び rec60 の間、post と rec30 及び rec60 の間、rec30 と rec60 の間にそれぞれ有意な差が確認された。

Ts において、H-c は pre から rec30 にかけて上昇し、rec30 から rec60 にかけて低下した。pre と post, rec30 及び rec60 の間、post と rec30 の間、rec30 と rec60 の間にそれぞれ有意な差が確認された。一方、N-c は pre と post, rec30 及び rec60 の間、post と rec30 及び rec60 の間にそれぞれ有意な差が確認された。

Dm において、H-c は pre に対して post で有意に低下し、その後 rec30 及び rec60 では増加した。有意な差が確認されたのは、pre と post, rec30 及び rec60 の間、post と rec30 及び rec60 の間であった。一方、N-c の Dm は、pre に対して post で有意に低下し、post から rec60 にかけて増加した。pre と post, rec30 及び rec60 の間、post と rec60 の間にそれぞれ有意な差が確認された。Tc は両条件共に pre から rec60 にかけて増加を示す傾向にあり、

Table 1 The time course of VAS, Ts, Dm, Tc, Vc and MVC for H-c and N-c.

	Condition	pre	post	rec30	rec60	Multiple comparison test
VAS (mm)	H-c	8.2 ± 5.6	86.7 ± 11.5	48.5 ± 11.0	37.2 ± 10.3	pre < post, rec30, rec60 post > rec30, rec60 rec30 > rec60
	N-c	5.8 ± 3.9	88.5 ± 10.3	73.6 ± 13.9	62.2 ± 15.7	pre < post, rec30, rec60 post > rec30, rec60 rec30 > rec60
Ts (°C)	H-c	32.6 ± 0.7	33.8 ± 0.9	35.8 ± 0.5	34.2 ± 0.7	pre < post, rec30, rec60 post < rec30 rec30 > rec60
	N-c	32.9 ± 0.6	34.0 ± 0.6	33.5 ± 0.4	33.3 ± 0.5	pre < post, rec30, rec60 post > rec30, rec60
Dm (mm)	H-c	15.0 ± 2.1	10.7 ± 2.2	12.8 ± 2.0	13.1 ± 2.5	pre > post, rec30, rec60 post < rec30, rec60
	N-c	15.5 ± 2.6	11.0 ± 1.9	11.3 ± 1.8	12.4 ± 1.6	pre > post, rec30, rec60 post < rec60
Tc (ms)	H-c	26.4 ± 1.7	27.1 ± 2.5	27.1 ± 3.0	29.6 ± 4.3	pre < rec60 post < rec60 rec30 < rec60
	N-c	25.8 ± 1.7	27.8 ± 3.3	28.7 ± 3.0	29.1 ± 4.0	pre < post, rec30, rec60
Vc (mm/s)	H-c	457.8 ± 71.9	319.6 ± 70.8	382.2 ± 70.7	362.6 ± 90.1	pre > post, rec30, rec60 post < rec30, rec60
	N-c	484.1 ± 97.3	322.4 ± 69.1	317.2 ± 57.4	346.6 ± 63.3	pre > post, rec30, rec60
MVC (Nm)	H-c	59.7 ± 8.1	38.2 ± 5.3	47.8 ± 6.4	46.6 ± 10.1	pre > post, rec30, rec60 post < rec30, rec60
	N-c	60.7 ± 10.2	38.5 ± 7.8	42.1 ± 9.4	43.6 ± 9.8	pre > post, rec30, rec60

VAS: visual analogue scale, Ts: skin temperature, Dm: maximal displacement, Tc: contraction time, Vc: contraction velocity, MVC: maximal voluntary contraction, H-c: heat stimulation condition, N-c: non-heat stimulation condition. *Significant difference between H-c and N-c ($p < 0.05$).

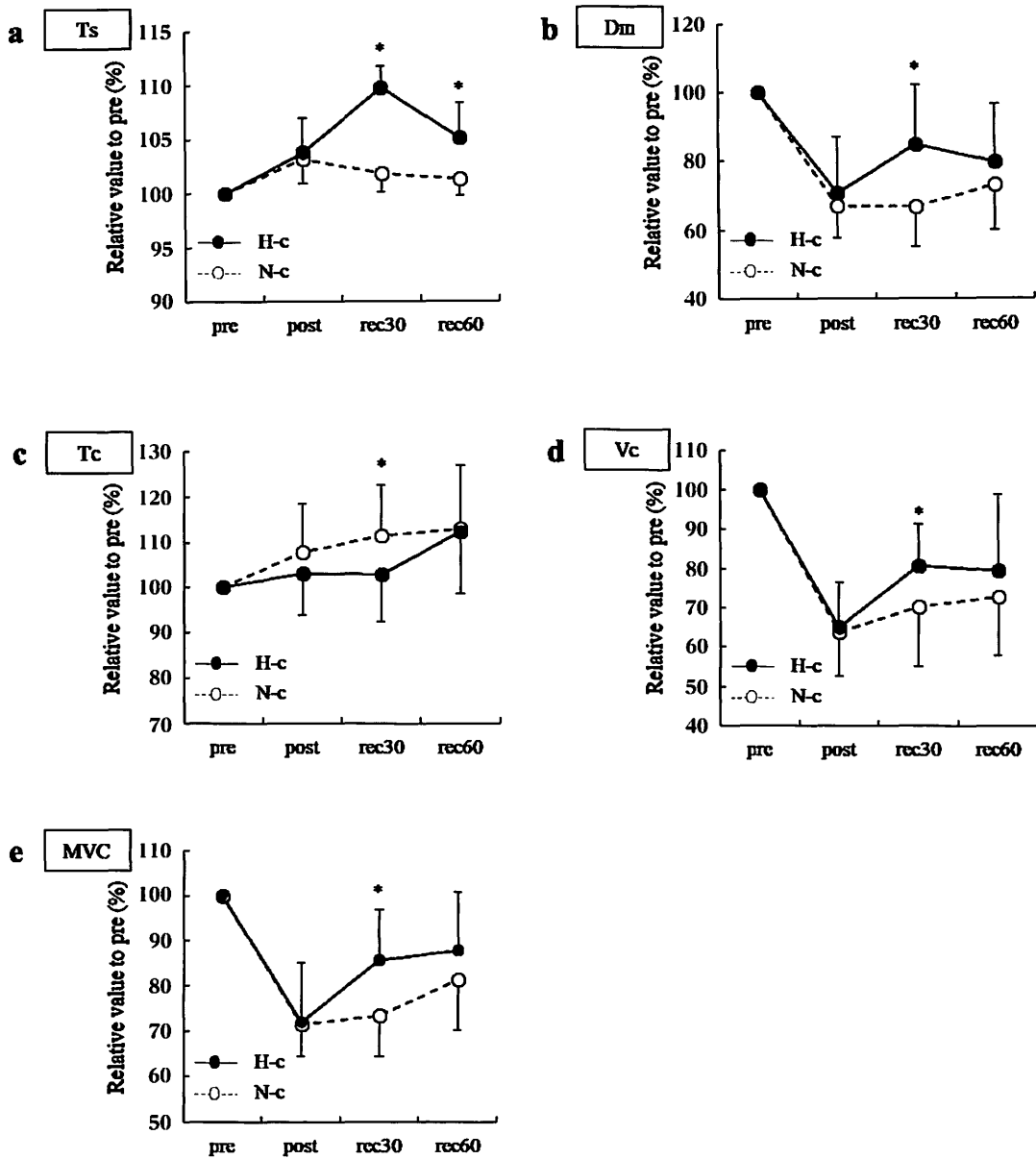


Fig.2 Relative value to pre in Ts, Dm, Tc, Vc and MVC. Relative value was assessed pre and post exercise as well as at 30 (rec30) and 60 (rec60) minutes post-exercise. Ts: skin temperature, Dm: maximal displacement, Tc: contraction time, Vc: contraction velocity, MVC: maximal voluntary contraction, H-c: heat stimulation condition, N-c: non-heat stimulation condition. *Significant difference between H-c and N-c ($p < 0.05$).

H-cではpreとrec60の間、postとrec60の間及びrec30とrec60の間、N-cではpreに対してpost、rec30及びrec60の間でそれぞれ有意な増加が確認された。Vcにおいて、両条件共にpreに対してpostで有意な減少が確認され、H-cではpostに対してrec30で有意に増加したものの、rec60では再び減少する傾向を示した。これに対してN-cではpostからrec30の間で低下し、rec60で増加する傾向

を示したものの、いずれも有意な差は確認されなかった。

MVCにおいて、両条件共にpreとpost、rec30及びrec60の間、postとrec30及びrec60の間にそれぞれ有意な差が認められ、特に筋疲労課題後にはMVCの著しい低下が確認された。また、H-cでは、筋疲労課題後のpostに対してrec30及びrec60ではMVCの有意な増加が認められたが、N-cではそのような傾向は確認されなかつ

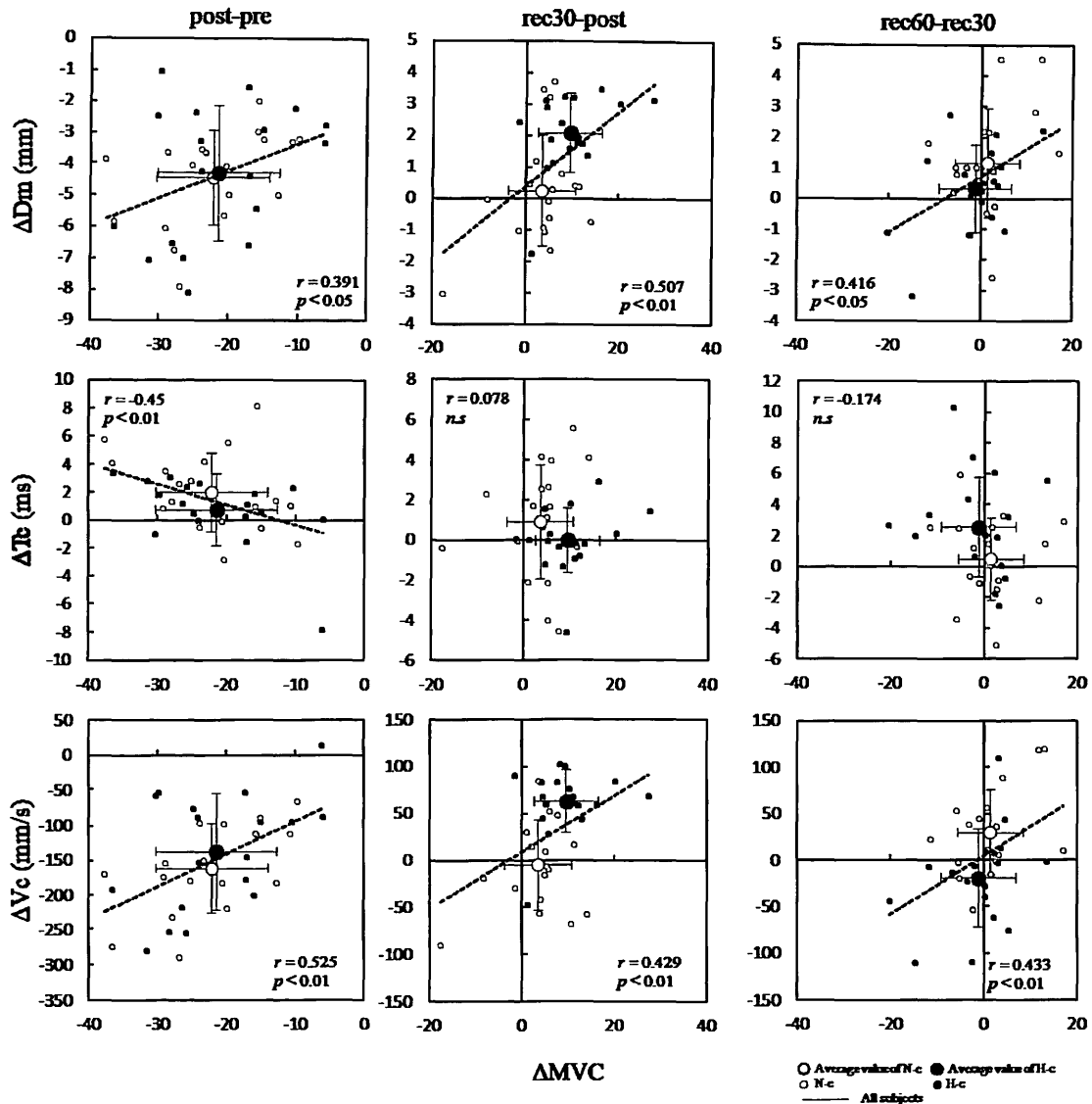


Fig.3 Relationships between muscle contraction properties (ΔDm , ΔTc , ΔVc) and MVC (ΔMVC) in all subjects.

た。

分析項目において、それぞれ両条件間で比較したところ、rec30はすべての分析項目で有意な差が確認された。rec30のTs, Dm, Vc及びMVCはH-cがN-cよりも有意に高値を示し、VAS及びTcではH-cがN-cよりも有意に低値を示した。また、rec60で有意な差が確認されたのはVAS及びTsであった。

2. preに対する相対値

両条件におけるすべての分析項目のpreに対する相対値の変化をFig.2に示した。各分析項目において2要因分散分析を行った結果、交互作用(刺激の有無×時間)がそれぞれ有意であった(Ts: $p = .000$, MVC: $p = .024$, Dm: $p = .002$, Tc: $p = .005$, Vc: $p = .000$)。

Tsにおいて、postでは条件間の有意差は確認されなかったが、rec30及びrec60ではN-cよりもH-cが有意に高い値を示した(Fig.2-a)。筋収縮特性において、Dmではpost及びrec60で有意な差は認められなかったが、rec30ではN-cよりもH-cで有意に高値を示した(Fig.2-b)。Tcのpreに対する相対値は、rec30のみ条件間で有意な差が確認され、N-cよりもH-cが低値を示した(Fig.2-c)。次に、Vcの相対値は、post及びrec60では条件間の有意差は確認されなかったものの、rec30では、H-cがN-cよりも有意に高い値を示した(Fig.2-d)。MVCにおいて、post及びrec60は条件間で有意な差が確認されなかった。しかし、rec30ではN-cよりもH-cが有意に高い値を示した(Fig.2-e)。

3. MVCと筋収縮特性との関係性

各測定間における Δ MVCと Δ Dm, Δ Tc及び Δ Vcとの相関関係をFig.3に示した. post - preでは, Δ MVCと Δ Dm ($p < 0.05$), Δ Tc ($p < 0.01$) 及び Δ Vc ($p < 0.01$) との間に有意な相関関係が確認された. rec30 - postにおいて, Δ MVCは Δ Dm ($p < 0.01$) 及び Δ Vc ($p < 0.01$) との間に有意な相関関係が確認されたが, Δ MVCと Δ Tcとの間には有意な相関関係が確認されなかった. また, rec60 - rec30も同様な結果 (Δ Dm : $p < 0.05$, Δ Vc : $p < 0.01$) を示した.

IV. 考察

本研究では, 筋疲労後の高周波温熱刺激による筋収縮特性及び最大筋力を回復させる効果が, 受動的な回復方法より高いのではないかと仮説を立て, その効果をTMG法及びMVC測定から検証した. 主な結果として, rec30のMVCはH-cがN-cよりも有意に高い値を示した. しかし, rec60のMVCはH-cとN-cとの間に有意な差は確認されなかった. また, 筋収縮特性において, rec30のH-cはN-cよりもDm及びVcが有意に高値を示し, Tcは有意に低値を示した. しかし, rec60のDm, Tc及びVcはH-cとN-cとの間に有意な差は確認されなかった. これらのことから, 筋疲労後の高周波温熱刺激は, 筋収縮特性及びMVCの回復を一時的に促進させることが明らかとなった.

1. 筋疲労課題によるMVC及び筋収縮特性の変化

本研究では, 全被験者に対して50回の連続的な等尺性肘関節屈曲運動を筋疲労課題として実施させた. 筋疲労は, 随意的な努力を維持しているにもかかわらず筋の出力が低下する現象と定義されている(Enoka and Stuart, 1992). 伸張性収縮や等速性収縮による筋疲労課題を実施した先行研究では, その課題によって約20%の筋力低下が報告されている(米津ほか, 2016; 出村ほか, 2000). 本研究では, H-c及びN-c共にpreと比較してpostで有意なMVCの低下を示し, その低下率は約36% (H-c : $35.0 \pm 11.4\%$, N-c : $36.2 \pm 11.1\%$)であった. したがって, 本研究の筋疲労課題は, 先行研究の結果以上の低下率を示しており, 一過性の筋疲労を引き起こすには十分な疲労課題であったことが確認された.

本研究では, 筋疲労課題前後における筋収縮特性の変化についてTMG法により検証した. Dm及びVcにおいて, 両条件共にpreに対してpostで有意に減少し, また, Tcは, 両条件共にpreに対してpostで増加する傾向を示した. Dmの減少は, 筋硬度(筋の硬さ)の増加(Hunter et al., 2012; de Paula Simola et al., 2015; Macgregor

et al., 2016)を意味し, Tcの増加は筋収縮時間の遅延(Hunter et al., 2012), また, Vcの減少は筋収縮速度の低下(de Paula Simola et al., 2015)をそれぞれ意味するものである. 筋疲労に伴うDm, Tc及びVcの変化を調べた先行研究はいくつか存在する. このうちレジスタンス運動前後の筋収縮特性を検討したde Paula Simola et al. (2015)によると, 運動後にDm及びVcは低下することが報告されている. また, 肘関節屈筋群に対する伸張性収縮を肘関節角度90度(屈曲位)から180度(伸展位)の範囲で, 角速度30deg/secにて60回行い, 筋疲労前後の筋収縮特性を検討したHunter et al. (2012)によると, 伸張性収縮によってDmが低下し, Tcは増加することが明らかにされている. 本研究の結果は, 先行研究を支持するものであり, TMG法による筋疲労後の収縮特性を評価できたものと推察された.

2. 高周波温熱刺激の効果について

本研究では, 筋疲労後の高周波温熱刺激による体表面温度の変化について検証した. 高周波温熱刺激を用いて体表面温度を計測した研究(佐藤ほか, 2015)によると, 刺激後に体表面温度が上昇することが報告されている. 本研究では, 高周波温熱刺激によって体表面温度が約2℃上昇(post-rec30間)し, その後有意な低下(rec30-rec60間)が確認された. また, 両条件間の比較では, rec30及びrec60でH-cがN-cよりも有意に高い値を示した. したがって, 筋疲労後の高周波温熱刺激は体表面温度を上昇させ, その効果は40分程度(高周波温熱刺激終了時から)残存することが明らかとなった. しかしながら, 高周波温熱刺激によって深部温度が上昇したのかは不明である. 先行研究では, 温熱刺激の深達性は周波数に反比例することが報告(川口, 2016)されている. 温熱刺激の周波数の違いが深達性に及ぼす影響について検討したDraper et al. (1995)によると, 3MHzでの照射は約1.5cmの深さまで, 1MHzでの照射は約5cmの深さの組織まで温熱効果を発揮することが報告されている. また, 高周波刺激と同じ深部性温熱に分類される超短波ジアテルミーを用いて, 経時的に筋温度を評価した研究(Draper et al., 1999)によると, 筋温度最大値は照射開始から15分で認められ, 約3~4℃上昇したことを報告している. 本研究における高周波刺激の周波数は0.75MHzであり, 照射時間は15分であったことを考慮すると, 本研究の照射条件は深部温度を高めるには十分であったものと推察された.

次に, 高周波温熱刺激によるMVCの変化について検証した. 表在性温熱の温水浴を用いて, 筋疲労後の回復過程における最大筋力の変化を検討した片平・山本(2005)の報告では, 温水浴直後の最大筋力の回復率は受

動的な回復方法よりも高い値を示すものの、有意な差は確認されていない。つまり、温水浴は最大筋力の即時的な回復効果を示さないか、もしくはその効果はわずかであると考えられる。本研究では、筋疲労課題後に高周波温熱刺激を用いた結果、rec30において、H-cはN-cよりも有意なMVCの増加が認められた。一方、rec60におけるMVCは両条件間に有意な差が確認されなかった。このことから、筋疲労後の高周波温熱刺激によってMVCは一時的に増加することが明らかとなった。本研究と先行研究の結果が異なる要因として、刺激方法の違いによるものだと考えられる。本研究の高周波温熱刺激は、ジアテルミー (diathermy) とも呼ばれ、深部性温熱に分類される。高周波温熱刺激は、電磁波エネルギーが体内の水分や細胞分子などを振動させることにより、ジュール熱 (摩擦熱) を発生させることで深部温度を上昇させる (大森, 2004; Piolani et al., 2009) ことができる。温熱刺激の生理学的効果の度合いは、組織温度に依存することが報告されていることから (Lehmann, 1990)、生理学的効果が高い (Karasuno et al., 2005; Robertson et al., 2005) 深部性温熱である高周波温熱刺激を使用したため、受動的な回復方法よりもMVCの回復に参与した可能性が考えられる。また、その他の可能性として疲労感の軽減によってMVCが回復したことも考えられる。本研究ではVASの変化について検証した結果、rec30及びrec60において、H-cはN-cよりも有意なVASの低下が確認された。このことから、高周波温熱刺激による温感や刺激感が心理的なプラス効果として働き、VASを低下させ、MVCの回復に影響した可能性も考えられる。

次に、本研究では、高周波温熱刺激による筋収縮特性の変化について検証した。筋疲労課題直後 (post) から30分後のrec30にかけては、高周波温熱刺激を行うことにより有意なDmの増加、Tcの低下及びVcの増加が認められた。高周波温熱刺激によって筋収縮特性が変化した要因として、主に深部温度の上昇による循環系の改善と軟部組織の伸展性の増大が影響している可能性がある。一般的に筋疲労は、まず代謝要因によって生じ、さらに筋疲労が進行するにつれて興奮収縮連関が阻害され、それによって収縮機能が低下 (福永, 2002) する。また、筋疲労後は、筋内水分量に伴う筋内圧の増加や筋線維の構造変化によって、筋硬度が増加することが報告 (Murayama et al., 2000) されている。超短波ジアテルミーを用いて筋組織内の循環動態について検討したKarasuno et al. (2005) によると、超短波ジアテルミーを照射することで深部温度が上昇し、血管を拡張させ、それに伴って筋組織内のヘモグロビン量が増加することを報告している。また、Giombini et al. (2007) によると深部性温熱は、局所の血流を増加させATPの再合成を促進させることを指摘し

ている。さらに、深部温度を上昇することにより、軟部組織の伸展性を増大させることを報告 (Robertson et al., 2005; 佐藤ほか, 2015) している。これらの指摘と本研究の結果を併せて考えると、筋疲労後の高周波温熱刺激は、深部温度を上昇させ、それに伴って血流が改善し、代謝物の除去、酸素運搬の増加、筋内圧の低下及び軟部組織における伸展性の増大に貢献した可能性が考えられる。これらが複合的に関与することで筋の硬さや筋収縮阻害の緩和が起これ、その結果、筋収縮特性が改善され、最終的にはMVCの増加に寄与したのではないかと推察された。一方、postから60分後 (高周波温熱刺激終了時から40分後) のrec60ではDm、Tc及びVcにおける両条件間の有意差は確認されなかったが、H-cのTcはrec30-rec60間に有意な遅延が認められ、体表面温度についても有意な低下が確認された。この結果は、筋温度の低下が筋の収縮機能を阻害 (単収縮における張力のピーク到達時間の遅延) するという先行研究 (Davies and Young, 1983) を支持するものであった。

3. 筋収縮特性とMVCとの関係性について

これまでに、最大筋力の変化とTMG法を用いた筋収縮特性の変化との関係性について検討した先行研究 (Hunter et al., 2012; de Paula Simola et al., 2015) によると、運動前後のMVCとDm及びVcとの間にそれぞれ有意な相関関係が成り立つことが報告されている。加えて、Hunter et al. (2012) は、この相関関係が筋疲労後から4日間 (1日目: $r=0.55$, $p<0.05$, 2日目: $r=0.56$, $p<0.05$, 3日目: $r=0.68$, $p<0.01$, 4日目: $r=0.67$, $p<0.05$) 継続して確認されたことを報告している。本研究ではMVCの変化 (Δ MVC) と筋収縮特性の変化 (Δ Dm, Δ Tc, Δ Vc) との関係性を検討した結果、 Δ MVCと Δ Dm及び Δ Vcは全ての測定間で有意な相関関係が確認された。先行研究の指摘 (Hunter et al., 2012; de Paula Simola et al., 2015) と本研究の結果を考慮すると、MVCの筋疲労前後及びその回復過程においてTMG法を用いて評価した筋収縮特性の変化が影響していることが示され、即ち、筋収縮特性が改善されたことによってMVCの回復に参与しているのではないかと考えられる。

以上のことから、本研究では、筋疲労後の高周波温熱刺激の効果について検討した結果、筋収縮特性やMVCを一時的に回復させる効果が認められ、筋疲労回復の手段として、その有効性が示唆された。

4. 本研究の現場的意義について

本研究によって得られた知見を実際の現場に生かす場合、次のことが考えられる。スポーツ選手は、試合や競技会でより優れたパフォーマンスを発揮するために、筋疲

労状態から回復し、最良の状態です試合や競技会に臨むことが求められる。そのため、一日のうち数回にわたる試合及び競技を行い、次の試合や競技まで短時間で、かつ最大筋力が要求されるスポーツ競技（例えば、レスリング、アームレスリング競技など）において、照射するタイミングを考慮し、高周波温熱刺激を利用すれば戦略的な筋疲労回復手段として活用することができるのではないかと思われる。

5. 本研究の限界について

本研究は、TMG法という比較的新しい方法を用いて、筋疲労前後及びその回復過程を筋収縮特性 (Dm, Tc, Vc) 及びMVCから評価したところ、一貫した結果が得られ、高周波温熱刺激の回復効果が明らかとなった。本研究の限界として、被験者側及び検者側にブラインド化できていないこと、深部温度を測定していないことであり、この点については今後検証する必要がある。

V. 結論

本研究は、筋疲労後の高周波温熱刺激による筋収縮特性及びMVCを回復させる効果が、受動的な回復方法より高いのではないかと仮説を立て、その効果をTMG法及びMVC測定から検証した。その結果、筋疲労後の高周波温熱刺激は筋収縮特性及びMVCの回復を一時的に促進させることが明らかとなり、筋疲労回復の手段として、その有効性が示唆された。

付記

本研究は東京体育学会の研究助成を得て行われた研究結果の一部である。

VI. 文献

網本和. (2008) 物理療法学 (第3版). 網本和・菅原憲一「編」. 医学書院, 東京. pp50-93.

Davies, C. T., Young, K. (1983). Effect of temperature on the contractile properties and muscle power of triceps surae in humans. *Journal of Applied Physiology*, 55(1), 191-195.

Dahmane, R., Valenčič, V., Knez, N., Eržen, I. (2001). Evaluation of the ability to make non-invasive estimation of muscle contractile properties on the basis of the muscle belly response. *Medical and biological engineering and computing*, 39(1), 51-55.

出村慎一・山次俊介・長澤吉則・小林秀紹・南雅樹・豊島慶男 (2000) 激運動後の等速性筋力発揮の回復に

及ぼす直線偏光処理近赤外線照射の効果. *体力科学*, 49(4), 459-468.

de Paula Simola, R. Á., Harms, N., Raeder, C., Kellmann, M., Meyer, T., Pfeiffer, M., Ferrauti, A. (2015). Assessment of neuromuscular function after different strength training protocols using tensiomyography. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(5), 1339-1348.

Draper, D. O., Castel, J. C. Castel, D. (1995). Rate of temperature increase in human muscle during 1 MHz and 3 MHz continuous ultrasound. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 22(4), 142-150.

Draper, D. O., Knight, K., Fujiwara, T., Chris Castel, J. (1999). Temperature change in human muscle during and after pulsed short-wave diathermy. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 29(1), 13-22.

Enoka, R. M., Stuart, D. G. (1992). Neurobiology of muscle fatigue. *Journal of applied physiology*, 72(5), 1631-1648.

Evans, R. K., Knight, K. L., Draper, D. O., Parcell, A. C. (2002). Effects of warm-up before eccentric exercise on indirect markers of muscle damage. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(12), 1892-1899.

福永哲夫. (2002) 筋の科学辞典. 福永哲夫「編」. 朝倉書店. pp152-160.

Giombini, A., Giovannini, V., Cesare, A. D., Pacetti, P., Ichinoseki-Sekine, N., Shiraiishi, M., Maffulli, N. (2007). Hyperthermia induced by microwave diathermy in the management of muscle and tendon injuries. *British medical bulletin*, 83(1), 379-396.

Hunter, A. M., Galloway, S. D., Smith, I. J., Tallent, J., Ditroilo, M., Fairweather, M. M., Howatson, G. (2012). Assessment of eccentric exercise-induced muscle damage of the elbow flexors by tensiomyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(3), 334-341.

Karasuno, H., Morozumi, K., Fujiwara, T., Goh, A. C., Yamamoto, I., Senga, F. (2005). Changes in intramuscular blood volume induced by continuous shortwave diathermy. *Journal of Physical Therapy Science*, 17(2), 71-79.

片平誠人・山本利春 (2005) 冷水浴・温水浴・交代浴が疲労した握力の回復過程に及ぼす影響. *福岡教育大学紀要*. 54, 33-38.

川口浩太郎 (2016) コンディショニング・ケアのための

- 物理療法実践マニュアル. 川口浩太郎「編」. 文光堂. pp64-118.
- Križaj, D., Šimunič, B., Žagar, T. (2008). Short-term repeatability of parameters extracted from radial displacement of muscle belly. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(4), 645-651.
- Lehmann, J. F., Silverman, D. R., Baum, B. A., Kirk, N. L., Johnston, V. C. (1966). Temperature distributions in the human thigh, produced by infrared, hot pack and microwave applications. *Arch Phys Med Rehabil*, 47, 291-299.
- Lehmann JF. (1990). Therapeutic heat and cold. Lehmann JF (Eds.) Baltimore: Williams & Wilkins. pp. 416-581.
- Macgregor, L. J., Ditroilo, M., Smith, I. J., Fairweather, M. M., Hunter, A. M. (2016). Reduced radial displacement of the gastrocnemius medialis muscle after electrically elicited fatigue. *Journal of sport rehabilitation*, 25(3), 241-247.
- Mayer, J. M., Mooney, V., Matheson, L. N., Erasala, G. N., Verna, J. L., Udermann, B. E., Leggett, S. (2006). Continuous low-level heat wrap therapy for the prevention and early phase treatment of delayed-onset muscle soreness of the low back: a randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 87(10), 1310-1317.
- McCray, R. E., Patton, N. J. (1984). Pain relief at trigger points: a comparison of moist heat and shortwave diathermy. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 5(4), 175-178.
- Michelle H (2010) EBM 物理療法. Michelle H「編」原著第3版. 医歯薬出版. 東京. pp159-162.
- Murayama, M., Nosaka, K., Yoneda, T., Minamitani, K. (2000). Changes in hardness of the human elbow flexor muscles after eccentric exercise. *European journal of applied physiology*, 82(5-6), 361-367.
- 日本疲労学会. (2011). 抗疲労臨床評価ガイドライン. <https://www.hirougakkai.com/> (参照日2017年6月8日)
- Nosaka, K., Muthalib, M., Lavender, A., Laursen, P. B. (2007). Attenuation of muscle damage by preconditioning with muscle hyperthermia 1-day prior to eccentric exercise. *European journal of applied physiology*, 99(2), 183-192.
- 大森豊明 (2004) 生物物理刺激と生体反応. 大森豊明「監」フジ・テクノシステム, 東京. pp501-593.
- Piolani, S., Soldadi, A., Speziale, F., Bonifacci, P., Cuzzani, T., Scacchetti, M., Masotti, A., Alberti, S., Cagnani, M., Marzovillo, R., Garulli, A., Poletti, G. (2009). Effective therapies that Reduce healing time: Evaluation of the effect of multi-frequency capacitive diathermy treatment. *Sport & Medicine*, 1,43-49.
- Rey, E., Lago-Peñas, C., Lago-Ballesteros, J. (2012). Tensiomyography of selected lower-limb muscles in professional soccer players. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(6), 866-872.
- Robertson, V. J., Ward, A. R., Jung, P. (2005). The effect of heat on tissue extensibility: a comparison of deep and superficial heating. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 86(4), 819-825.
- Saga, N., Katamoto, S., Naito, H. (2008). Effect of heat preconditioning by microwave hyperthermia on human skeletal muscle after eccentric exercise. *Journal of sports science & medicine*, 7(1), 176.
- 佐藤慎也・長谷川正哉・田中聡 (2015) 高周波治療器による温熱刺激が足関節柔軟性と軟部組織硬度に与える影響について. *運動器リハビリテーション: 日本運動器科学会誌*, 26(3), 332-337.
- Sekins, K. M., Lehmann, J. F., Esselman, P., Dundore, D., Emery, A. F., Nelp, W. B. (1984). Local muscle blood flow and temperature responses to 915MHz diathermy as simultaneously measured and numerically predicted. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 65(1), 1-7.
- Šimunič, B. (2012). Between-day reliability of a method for non-invasive estimation of muscle composition. *Journal of electromyography and kinesiology*, 22(4), 527-530.
- Simunič B., Degens H., Rittweger J., Narici M., Mekjavić IB., Pišot R. (2011). Noninvasive estimation of myosin heavy chain composition in human skeletal muscle. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 43(9), 1619-25.
- Šimunič, B., Koren, K., Rittweger, J., Lazzar, S., Reggiani, C., Rejc, E., Degens, H. (2019). Tensiomyography detects early hallmarks of bed-rest-induced atrophy before changes in muscle architecture. *Journal of applied physiology*, 126(4), 815-822.
- Vaile, J., Halson, S., Gill, N., Dawson, B. (2008). Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *European journal of applied physiology*, 102(4), 447-455.
- Viitasalo, J. T., Niemelä, K., Kaappola, R., Korjus, T.,

Levola, M., Mononen, H., Rusko, H., Takala, T. (1995). Warm underwater water-jet massage improves recovery from intense physical exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(5), 431-438.

山本正嘉・山本利春 (1993) 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およぼす効果—作業能力および血中乳酸の回復を指標として—. *体力科学*, 42(1), 82-92.

米津貴久・稲見崇孝・齋藤輝・久保孝史・福林徹 (2016) 大腿四頭筋に対する伸張性収縮後の MRI T2 値と超音波エラストグラフィによる筋硬度の関係について. *日本運動生理学雑誌*, 23(2), 37-44.

連絡責任者

住所：〒206-8515 東京都多摩市永山7-3-1

国士館大学多摩キャンパス

氏名：平塚 和也

電話番号：042-339-7273

E-mail：hiratsuk@kokushikan.ac.jp