

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K17616

研究課題名（和文）局所的な温冷交代刺激による筋疲労改善メカニズムの検証

研究課題名（英文）Investigation of the mechanism for muscle fatigue improvement using local alternating heat and cold stimulation

研究代表者

澤田 智紀（SAWADA, Tomonori）

慶應義塾大学・医学部（信濃町）・研究員

研究者番号：70867697

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では繰り返しの収縮によって惹起させた筋疲労に対して局所的な温冷交代刺激を行い、生理学的評価指標をもとに生体へ及ぼす影響を検証し、筋疲労改善メカニズムを明らかにすることを目的として実施した。その結果、局所的な温冷交代刺激により主観的な疲労の改善とともに、近赤外線分光法を用いた標的筋組織内の循環動態、心拍変動解析を用いた自律神経活動、H反射を用いた脊髄興奮性といった筋疲労の改善を裏付けるような評価指標に影響を及ぼすことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

交代浴はリハビリテーション領域やスポーツ現場で広く活用されているが、大きな浴槽が2つ必要であること、温度管理が難しいこと、複数名が使用する際に衛生面に問題があることなどの欠点が存在していた。本研究によって局所的な温冷交代刺激の生理学的効果が明らかとなりその有効性が示された。また、従来の交代浴と比較して場所を選ばず簡便に実施できることから、本研究で用いた温冷交代刺激が筋疲労に対する新たな予防的治療手段となり得る可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to examine the effects of local alternating heat and cold stimulation on muscle fatigue induced by repetitive contraction and to understand the mechanism of the muscle fatigue improvement of based on physiological evaluation parameters. As a result, the local alternation of heat and cold stimulation improved not only subjective fatigue, but also affected the following parameters that supported the improvement of muscle fatigue: circulatory dynamics in the target muscle tissue using near-infrared spectroscopy, autonomic nervous activity using heart rate variability analysis, and spinal excitability using the H-reflex.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：筋疲労 温冷交代刺激 筋硬度 筋組織循環動態 近赤外線分光法 自律神経活動 心拍変動 H反射

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

交代浴は温水と冷水へ交互に浸かることで血管の拡張と収縮を促し、疲労や損傷した筋組織の浮腫および炎症の軽減、リラクゼーション効果などを期待してリハビリテーション分野やスポーツ領域で広く利用されている。一方、交代浴の実施には、大きな浴槽や容器が必要であること、浸かるたびに水温が変化するため温度管理が大変であること、また複数の人が使用する際の衛生面への問題などが指摘されていた。近年、ペルチェ素子を用いることで温冷刺激の制御およびプロトコル組みが可能なウェアラブルサーモデバイスが開発され、生体に対して局所的な温熱および冷却刺激をより簡便かつ正確に与えることが可能になった。これまでの当該デバイスの想定使用用途は局所を冷やす、もしくは温めるのみであったが、我々は交代浴と同様の用途として応用できる可能性を感じ、当研究を着想するに至った。さらに、小型でウェアラブルという特性を活かし、従来の交代浴が実施しにくい頸部や肩関節周囲筋に対しても適用可能であることに着目した。

そこで我々はこれまでに疲労を惹起させた肩関節周囲筋に対して同デバイスを用いた温冷交代刺激を実施し、正確に皮膚表面温度の増減が繰り返されていることを確認するとともに、温冷交代刺激により主観的な疲労の改善ならびに筋硬度計で測定した筋硬度が低下することを明らかにしてきた (Sawada et al., *J Physiol Anthropol.* 2022)。また、温冷刺激のうち、特に冷却時の温度変化が大きいほど僧帽筋上部の筋硬度の改善が得られることを証明した。すなわち、温熱単独の刺激よりも温冷交代刺激が表在部の血流増加ならびに筋組織を含む軟部組織の粘弾性改善に長けた介入である可能性が示唆された。一方、筋硬度計による筋硬度評価は体表面から加圧して測定するため、皮膚や皮下組織、隣接筋、骨などの影響を受ける。そのため、ターゲットとなる筋自体にどの程度作用しているかは不明であった。

### 2. 研究の目的

交代浴に期待されている生理学的効果として、筋組織内の血流と酸素供給の増加があげられる。また、骨格筋の局所循環の制御には自律神経活動も関与している可能性がある。さらに、生体における筋肉の粘弾性には中枢性の筋緊張調整機構の影響も加味されていることが想定された。

以上の背景から、本研究は局所的な温冷交代刺激が生体に及ぼす影響に対して、近赤外線分光法を用いた筋組織循環動態、心拍変動解析による自律神経活動、筋緊張(脊髄興奮性)の指標とされる H 反射による客観的評価指標をもとに検証し、筋疲労改善メカニズムを明らかにすることを目的として実施した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 局所的な温冷交代刺激が筋組織循環動態と自律神経活動に及ぼす影響

健常若年成人 20 名(男性:13、女性:7名、年齢:21.4±3.2 歳)を対象に、介入に先立ちノート PC によるタイピング課題 (Horikawa, *Appl Ergon* 2001) を 15 分実施し、肩関節周囲筋に疲労を惹起させた。その後、僧帽筋上部線維上にウェアラブル温冷刺激装置 (REON POCKET; ソニーグループ株式会社) 機能検査オキシメータ (NIRO-200NX; 浜松ホトニクス株式会社) のプローブ、胸部に心拍計 (MWT-001; アームエレクトロニクス株式会社) を装着し、温刺激 3 分冷刺激 1 分の交代刺激を 5 セット実施した。評価項目は筋硬度計 (NEUTONE TDM-Z2, 有限会社トライオール) で測定した僧帽筋上部線維の筋硬度、オキシメータで記録した僧帽筋上部線維組織の循環動態パラメータ (酸素化ヘモグロビン濃度変化量: OxyHb、脱酸素化ヘモグロビン濃度変化量: DeoxyHb、総ヘモグロビン濃度変化量: TotalHb、組織酸素化指標: TOI) および心拍計の QRS 波から RR 間隔を抽出し最大エントロピー法による心拍変動解析を用いて算出した自律神経活動を反映する心拍変動パラメータ (高周波成分: HF、低周波成分: LF、LF と HF の比: LF/HF) とした。評価項目に関して、刺激前後で値を比較するとともに、筋硬度、組織循環動態パラメータ、心拍変動パラメータの変化量 (刺激後 - 刺激前) との関係性を検証するために単相関分析を実施した。

#### (2) 局所的な温冷交代刺激が筋緊張に及ぼす影響

健常若年成人者 20 名(男性:13名、女性:7名、年齢:20.9±1.3 歳)を対象に、介入に先立ち片脚立位での踵上げ運動 (Vuillerme and Boisgontier, *Eur J Appl Physiol.* 2010) を動作が遂行できなくなるまで実施し、下腿三頭筋に疲労を惹起させた。その後、下腿後面にウェアラブル温冷刺激装置を装着し (REON POCKET; ソニーグループ株式会社) 温刺激 3 分冷刺激 1 分の交代刺激を 5 セット実施した。評価項目は主観的症狀 (痛み、張り感、疲労感)、下腿三頭筋の筋硬度に加えて、定電流刺激装置 (DS7R; Digitimer Ltd) を用いて後脛骨神経を刺激し、筋電図システム (Delsys trigno; Delsys Inc) からヒラメ筋の H 反射を計測し記録した H 反射と M 波の各最大振幅 (Hmax、Mmax) とその比 (H/M ratio) とした。評価姿勢は安静腹臥位とし、ベースライン、疲労課題後、交代刺激後の 3 回行い、各評価項目に関して各時期で値を比較した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 局所的な温冷交代刺激が筋組織循環動態と自律神経活動に及ぼす影響

###### 介入前後での比較

僧帽筋上部線維の筋硬度に関して、刺激介入前と比較して介入後に有意に低下し ( $1.38 \pm 0.15$  N vs.  $1.31 \pm 0.14$  N,  $p < 0.01$ ,  $d = 0.97$ )。介入により体表から触知可能な筋肉を含む軟部組織が柔らかくなったことが示唆された。また、僧帽筋上部線維組織の循環動態パラメータに関して、**OxyHb**、**TotalHb**、および**TOI**は介入前と比較して介入後に有意に増加した(図1 a, b)。これらの結果は、介入により酸素化ヘモグロビンを含む血液灌流がターゲットとする僧帽筋上部線維組織内で増加し、酸素化が促進されたことを示唆した。

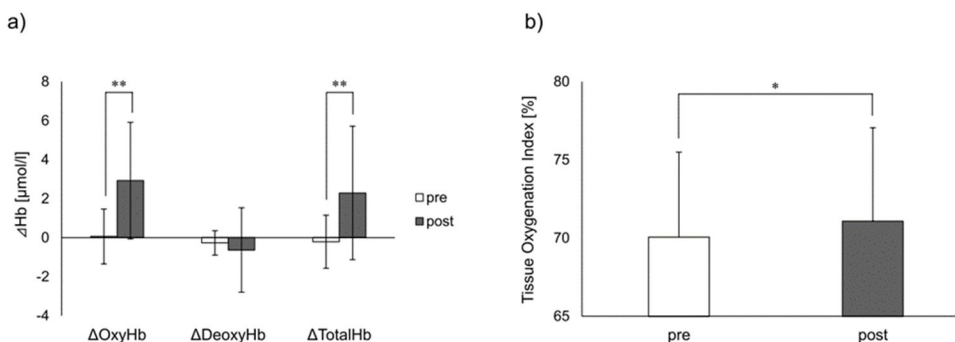


図1. 僧帽筋上部線維の循環動態パラメータの変化

心拍変動パラメータに関して、**LF**、**LF/HF**、**CVRR**は介入前と比較して介入後に有意に増加した(図2 a, b)。一方、**HF**は介入前後で有意な差は認めなかった。これらの心拍変動パラメータの変化は、温冷交互刺激により交感神経活動が亢進したことを示唆する結果となった。

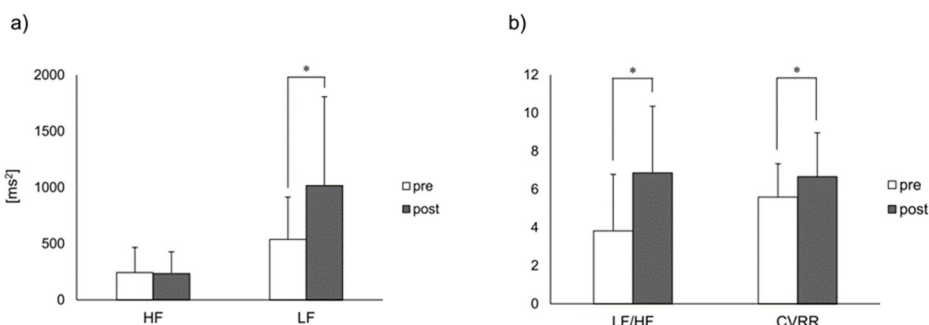


図2. 心拍変動パラメータの変化

###### 介入による各パラメータ間の変化との関連性

はじめに、介入前後の筋硬度の変化と循環動態パラメータまたは心拍変動パラメータの変化との相関を検討した。その結果、筋硬度の変化と有意な相関関係を認める循環動態パラメータまたは心拍変動パラメータはなかった。一方、介入前後の循環動態パラメータの変化と心拍変動パラメータの変化のうち、**TOI**の変化と**LF/HF**の変化との間に有意な正の相関を認め ( $r = 0.50$ ,  $p < 0.05$ )。温冷交代刺激による僧帽筋上部線維内の組織酸素化指標の増加と交感神経活動の亢進との間にはある一定の関連性を認めることが示唆された。

(1)の研究結果は表在性の局所的な温冷交代刺激が疲労した筋組織の循環動態と自律神経活動に影響を与えることを実証した初めての研究である。得られた知見は従来使用されている交代浴の生理学的効果に関して科学的根拠を裏付け、理解を深めるとともに、筋疲労に対する新たな汎用性を有した予防的治療手段となり得る可能性を示す結果となった。

(1)の結果は **Sawada et al.: Local alternating heat and cold stimulation affects hemodynamics and oxygenation in fatigued muscle tissue and autonomic nervous activity: a single-arm interventional study. J Physiol Anthropol. 2024;43:11** にて発表した内容をもとに作成した)

##### (2) 局所的な温冷交代刺激が筋緊張に及ぼす影響

主観的症状(張り感、疲労感)と筋硬度は疲労課題前と比較して疲労課題後に有意に上昇し、疲労課題後と比較して交代刺激後に有意に低下した(図3, 4)。また、H反射パラメータに関して**Hmax**と**H/M ratio**は疲労課題後と比較して交代刺激後に有意な低下を認めた(図5 a, b, c)。

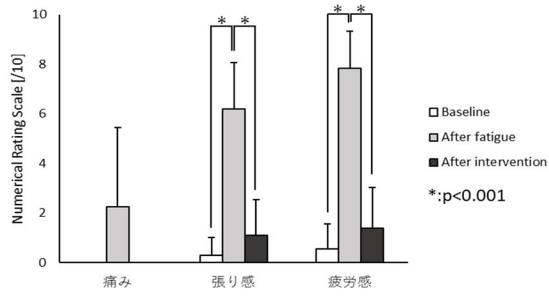


図 3. 主観的症狀の変化

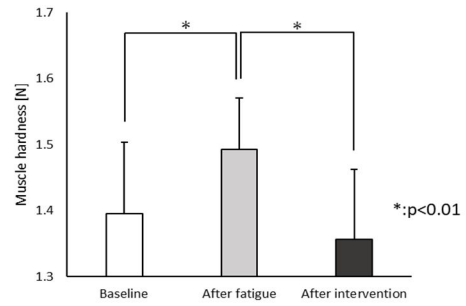


図 4. 筋硬度の変化

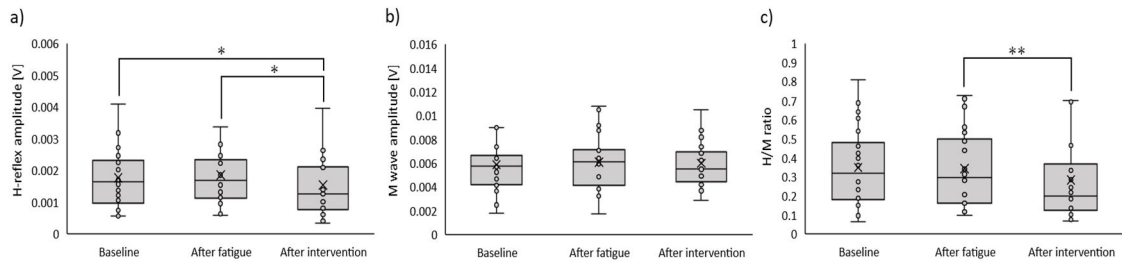


図 5. H 反射パラメータの変化

a) Hmax ; b) Mmax ; c) H/M ratio, \*: p<0.01, \*\*: p<0.05

**H** 反射の振幅は筋緊張や脊髄興奮性の指標として用いられている。本研究により疲労した下腿三頭筋に局所的な温冷交代刺激を実施することで、筋硬度ならびに筋緊張が低下することが示され、筋疲労に対して有効な介入となり得ることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sawada Tomonori, Okawara Hiroki, Nakashima Daisuke, Aoki Kentaro, Namba Mira, Iwabuchi Shuhei, Katsumata Yoshinori, Nakamura Masaya, Nagura Takeo	4. 巻 43
2. 論文標題 Local alternating heat and cold stimulation affects hemodynamics and oxygenation in fatigued muscle tissue and autonomic nervous activity: a single-arm interventional study	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Physiological Anthropology	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40101-024-00358-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 澤田智紀、大川原洋樹、中島大輔、岩淵修平、松本守雄、中村雅也、名倉武雄
2. 発表標題 ウェアラブル温冷刺激装置を用いた局所的な温冷交代刺激が筋組織血流動態に及ぼす影響
3. 学会等名 第33回日本運動器科学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤田智紀、大川原洋樹、中島大輔、岩淵修平、中村雅也、名倉武雄
2. 発表標題 局所的な温冷交代刺激が筋硬度と自律神経活動に及ぼす影響
3. 学会等名 第49回日本臨床バイオメカニクス学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤田智紀、大川原洋樹、中島大輔、中村雅也、名倉武雄
2. 発表標題 局所的な温冷刺激が僧帽筋上部線維の筋組織酸素動態と筋硬度に及ぼす影響
3. 学会等名 第34回日本運動器科学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澤田智紀、大川原洋樹、中島大輔、中村雅也、名倉武雄
2. 発表標題 局所的な温冷交代刺激による僧帽筋の筋硬度変化と筋組織循環動態の変化との関連性の検証
3. 学会等名 第50回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澤田智紀、大川原洋樹、中島大輔、中村雅也、名倉武雄
2. 発表標題 局所的な温冷交代刺激が筋組織循環動態と自律神経活動に及ぼす影響
3. 学会等名 第28回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関