

【実践研究】

ジャンプエクササイズ後の回復方法の違いが筋形状、血流量およびパフォーマンスに及ぼす影響

西村 里奈<sup>1)</sup>, 三浦 哉<sup>2)</sup>

1) 徳島大学大学院総合科学教育部 2) 徳島大学大学院社会産業理工学研究部

Effects of different recovery methods on muscle architectural features, blood flow and performance after jump exercise

Rina Nishimura<sup>1)</sup>, Hajime Miura<sup>2)</sup>

1) Graduate School of Integrated Arts and Science, Tokushima University

2) Laboratory for Applied Physiology, Faculty of Integrated Arts and Science, Tokushima University

要旨

運動後のリコンディショニングは、筋疲労回復に有効である。骨格筋電気刺激 (EMS) は、筋疲労を改善させる可能性があるが、筋疲労に関連する筋形状、血流量およびパフォーマンスについて十分に検討されていない。そこで、本研究の目的は、筋疲労誘発運動後の EMS が腓腹筋内側頭の筋束長、膝窩動脈の血流量および運動パフォーマンスに及ぼす影響を検討することとした。対象者は、健常成人男性 10 名であり、ドロップジャンプを 20 回と 2 分間の休息を 5 回反復する運動後に、安静にする条件 (CON 条件)、30% $\dot{V}O_{2max}$  で自転車こぎ運動を行う条件 (EX 条件)、EMS を行う条件 (EMS 条件) の各条件は無作為な順序にて選択し、異なる日程で各 15 分間実施した。腓腹筋内側頭の筋束長、膝窩動脈の血流量およびカウンタームーブメントジャンプ (CMJ) は、運動前、運動直後および運動終了 30 分後に測定した。EMS および EX 条件で運動直後と比較し、運動終了 30 分後に筋束長および血流量が増加した。さらに、運動 30 分後の筋束長および血流量は、EMS、EX 条件と CON 条件との間に有意な差を認めた。しかし、CMJ はすべての条件において有意な差はなかった。EMS は、筋の形状を改善し試合間、移動中に活用することで筋疲労回復に有効である可能性が示唆された。

キーワード

リコンディショニング、骨格筋電気刺激、有酸素性運動、筋疲労、回復

## I. 緒言

スポーツ競技者における運動後のコンディショニングの管理不足は、オーバーユース症候群を引き起こす。さらに、二次的障害を発生させ、スポーツ活動の継続が困難になる可能性がある (Meeusen et al. 2000)。オーバーユース症候群は、骨格筋への過剰な負荷、筋の柔軟性の低下などのメカニカルストレス、疲労の蓄積による慢性的な傷害につながることを懸念されており、傷害の受傷率を高めると報告されている (Dadebo et al. 2004, Ekstrand et al. 1983)。筋疲労とは、筋力、筋仕事量を最大限に発揮する能力の低下と定義される (Vøllestad. 1997)。特に跳躍、走行などのエキセントリック局面が多く、ストレッチングショートニングサイクル (Stretching shortening cycle: SSC) を用いる運動において、筋腱複合体に対して連続的に過剰な負荷を強い、筋・腱組織に部分的な断裂を引き起こす (Warren et al. 1993)。また、SSC を反復させるドロップジャンプ (Drop jump: DJ) の連続運動においては、筋疲労を誘発し腓腹筋内側頭の筋形状を変化させることが報告されている (Kositsky. 2019)。筋の形態学的変化を調査することは、末梢性疲労に起因する力学的な効率を高め、運動単位の減少を代償する可能性があり、筋疲労と関係する肉離れのメカニズムの解明の基礎的研究になりうる重要な知見である。

一般的なリコンディショニングの方法として有酸素性運動、ストレッチング、温熱療法などがあり (Johansson et al. 1999, 山本ら. 1993)、代謝産物の除去、運動パフォーマンスの維持、筋束長、筋腱移行部の移動量の増加などをもたらすことが報告されている (中村ら. 2015)。リコンディショニングの中でも有酸素性運動は、アスリート、トレーナーによって幅広く実施されており、代謝産物の除去を促進する効果が高いため、筋疲労回復に有効であるが骨格筋損

傷のリスクが懸念されている (Blom et al. 1987)。また、スポーツの公式試合では、ジョギングのような軽運動が行える場所、休息时间、セット間の短い連続した試合では、コンディショニングに必要な時間の確保が困難な場合が多い。従来の疲労回復方法は道具、場所、スタッフの技術、利用するアスリートのモチベーションが必要であり、時間的および環境的な問題により効果が不十分となる可能性がある。

近年、アスリートを中心にリコンディショニングの方法として注目されている骨格筋電気刺激 (Electrical muscle stimulation: EMS) は、運動パフォーマンスの向上 (Babault et al. 2011)、血中乳酸濃度の減少 (Bieuzen et al. 2014)、血流増加 (Miller et al. 2000) に加えて、骨格筋への損傷リスクも低く、移動、試合間などの短時間で実施可能であることから、スポーツ愛好家、アスリートと多岐にわたる年齢層に対して実施できる有効な筋疲労回復方法として期待される。しかし、EMS、有酸素性運動が筋形状、血流動態、運動パフォーマンスへの影響については十分に検討されていない。そこで、EMS を用いた筋疲労回復方法が、運動後のスポーツ競技者に対する効果的な筋疲労の回復方法になり得ると想定し、筋疲労誘発運動を実施した後に異なる 3 種類の筋疲労回復方法を実施した。本研究の目的は、筋疲労誘発運動後の EMS が腓腹筋内側頭の筋束長、膝窩動脈の血流量および運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討することとした。

## II. 方法

### A. 対象

対象者は、整形外科疾患のない健康な成人男性 10 名とした (年齢:  $22.9 \pm 3.1$  歳, 身長:  $170.1 \pm 3.9$  cm, 体重:  $63.8 \pm 4.4$  kg,  $\dot{V}O_{2max}$ :  $44.2 \pm 6.3$  ml/kg/min)。対象者のスポーツ種目は、陸上 3 名、サッカー 1 名、バレーボール 1 名、そ

の他 5 人については研究中にスポーツを実施していなかった。

本研究は、所属機関における研究倫理委員会の承諾 (受付番号:211) を得たものであり、対象者には事前に口頭にて研究の内容・趣旨、参加の拒否・撤回・中断などについて説明し、書面にて承諾を得た上で研究を開始した。

## B. 実験手順

対象者は、測定のために 5 回研究室を訪問し、実験 1 日目に最大運動負荷テスト、実験 2 日目に筋疲労誘発のため DJ エクササイズを練習した。実験 3, 4 および 5 日目に筋疲労誘発運動後に下肢に対する EMS を行う条件 (以下, EMS 条件), 最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) 時の最大 watts 数の 30% $W_{max}$  強度の有酸素性運動を行う条件 (以下, EX 条件) および腹臥位で安静にする条件 (以下, CON 条件) の 3 条件を無作為な順序にて選択, 異なる日程で各 15 分間実施した。なお, 対象者はほぼ同一時刻に研究室に来訪し, 各実験条件は 14 日以上の間隔を空け, 最大運動負荷テストから初回の運動条件は, 7 日以上の間隔を空けて実施した。

運動前, 運動直後および運動終了 30 分後に, 筋厚, 羽状角, 筋束長, 血管径, 平均血流速度, 血流量, 跳躍高および TQR (Total Quality Recovery: TQR) を測定した。

### 1. 最大運動負荷テストのプロトコール

一過性運動時の運動強度を設定するために,

自転車エルゴメータ (232C MODEL50: Combi社製) を使用し, 東大式の多段階負荷法を一部改訂し,  $\dot{V}O_{2max}$  を測定した。 $\dot{V}O_2$  の測定は, 呼吸ガス分析装置 (AR-1 Type-3: アルコシステム社製, 千葉, 日本) を使用した。対象者は, 自転車エルゴメータに座り 3 分間の安静後に 40watts の負荷から開始し, 1 分毎に 20watts 漸増させる最大運動負荷テストを実施した。なお, ペダルの回転数は毎分 60 回転に規定した,  $\dot{V}O_{2max}$  の決定には,  $\dot{V}O_2$  の leveling off, 予測最大心拍数 (220-年齢) 以上, 呼吸交換率が 1.2 以上および Borg scale が 19 以上のうち, 2 項目が該当することを条件とした (山地, 2001)。

### 2. 筋疲労誘発運動のプロトコール

対象者は, 最大下の SSC を繰り返し行わせることで腓腹筋内側頭の筋腱複合体に筋疲労を誘発させるために, Howatson et al. (2009) の運動様式を参考として, 台高 40cm または 50cm から前方に設置した同じ高さの台へ DJ を実施した。5 分間の準備運動を実施した後に, DJ を 20 回と 2 分間の休息を 5 回反復する運動を実施した。リズム統制は, 100 bpm (beats per minute) で設定し, メトロノーム音に合わせて実施した。DJ は, できるだけ接地時間は短くし, 全力で高く跳ぶことを意識するように指示をした。本プロトコールに関しては, 対象者間で顕著な差異が生じないように技術習得として, 実験 1 日目を終了後, 測定日とは別日をつけて事前に 20 回の DJ を 2 回実施した。

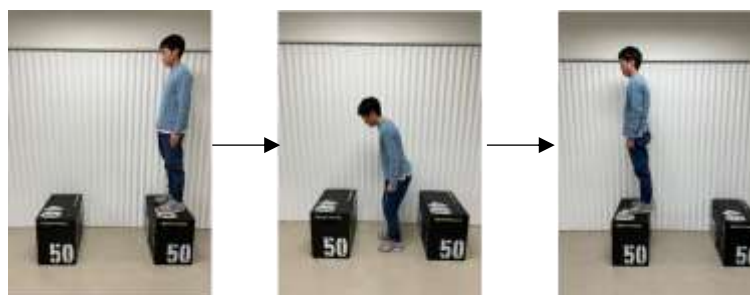


図 1. ドロップジャンプエクササイズによる筋疲労誘発運動

### 3. EMS

EMS は、理学診療用器具低周波治療器（ホーマーイオン研究所社製, G-TES 1000）を使用し、周波数4Hz, パルス幅250 $\mu$ s, 強度23~30mA, 指数関数的漸増波で実施した。EMS の刺激強度は疼痛, 筋疲労を感じない程度である最大耐性強度の50%で実施した。高周波のEMS では、骨格筋の強縮性収縮を誘発し、低周波のEMS と比較して筋疲労を起こしやすい特性があるために<sup>27)</sup>, 周波数4Hzを採用した。EMS は、ベルト電極（腰部: 5.3 × 93.3cm, 大腿部: 5.3 × 69.6cm, 足関節部: 5.3 × 54.6cm）に、ぬるま湯または水を十分に浸透させた電極シート（腰部: 5.5 × 37.0cm, 大腿部: 5.5 × 51.0cm, 足関節部: 5.5 × 37.0cm）を貼り付けたものを、腰部（臍上部）、両側大腿部（膝関節上部10cm）および両側足関節部（足関節上部10cm）の5ヶ所に電極を設置した。両側大腿部および下腿部の刺激周期は、同期されているために両側の下肢筋群が同時に刺激された。

#### C. 測定項目

##### 1. 筋厚, 羽状角および筋束長

腓腹筋内側頭の筋形状の変化を示すために、Howell et al. (1993) を参考に、超音波画像診断装置（Xario100 S Edition, キヤノンメディカルシステムズ）のBモードを用いて、腹臥位にて腓腹筋内側頭の筋厚, 羽状角および筋束長を測定した。測定部位は、膝窩から脛骨外果の近位30%の位置とし、その部分で最も腓腹筋内側頭の筋厚が厚くなる部分を測定した。プローブを皮膚面に対して垂直に保持し、皮膚に接触する超音波探触子面には超音波用ゼリーを塗布し、筋肉を圧迫しないように皮膚に軽く触れるようにして接触させ固定させた。測定データは、超音波画像診断装置に記録され、静止画および動画のデータをパーソナルコンピュータへ取り込んだ後、動画を毎分30コマ送りにし筋厚

が最大になる部位を選択した。解析は、画像解析ソフト image-J (NIH 1.51) を用いて、羽状角の測定は、腓腹筋内側等頭の深層腱膜と筋束のなす角度とした。また、筋厚の測定は、表層腱膜と深層腱膜の間で計測し、125 pixel を1cm に換算して長さを算出した。筋厚および羽状角の結果は、それぞれ3回測定した平均値を採用した。筋束長の推定には、以下の式を用い筋厚および羽状角から筋束長を算出した。

$$\text{筋束長} = \text{筋厚} \cdot \sin(\text{羽状角})^{-1}$$

なお、本実験に先立ち image-J の長さおよび角度測定の検者内信頼性を確認するために、Shrout ら (1979) の級内相関係数 ICC (1, 1) を用い、腓腹筋内側頭の筋厚, 羽状角および筋束長を測定した。筋厚は ICC=0.93, 羽状角は ICC=0.96, 筋束長は ICC=0.92 であり、検者内信頼性は確認済みであった。

##### 2. 膝窩動脈の血管径, 平均血流速度および血流量

血流動態を調査するために、超音波画像診断装置（ECCOCHEE/CX, 東芝製）にて膝窩動脈の流速波形を描出した。横断面像にて動脈の部位を確認し、縦断走査で血管走行と超音波のビームのなす角が60°以下になるように描出し、収縮期血管径が最も太く描出される最大断面の血管中央をサンプルポイントとした。測定は仰臥位で実施し、膝窩は軽く膝を立てた状態で背面からプローブを当てて実施し、超音波画像診断装置により得られた血管断面像と波形データより血流量を測定した。血流量の推定には、以下の式を用いて算出した。

$$\text{血流量 (ml/min)} = 60 \times \text{血管横断面積 (cm}^2\text{)} \times \text{平均血流速度 (cm/sec)}$$

### 3. パフォーマンス

パフォーマンスを測定するために、カウンタームーブメントジャンプ (Counter movement jump: CMJ) での跳躍高を測定した。測定には、マットスイッチおよびタイムカウンター (フォアアシスト社製) を用いた。CMJ は、立位姿勢から脚の反動動作を用い跳躍する運動で、腰に手を当てフォースプレート上でできるだけ高く行うように指示し、対象者間で顕著な差異が生じないように、事前に練習した。測定値には、CMJ を 3 回ずつ試行させ、その平均値を採用した。フォースプレートのチャージアンプから出力された電圧を、ソフトウェアを用いてパーソナルコンピュータへ、各垂直跳び時の滞空時間 (s) および接地時間 (s) が記録され、跳躍高は以下の式によって算出された。なお、g は重力加速度 (9.81m/sec<sup>2</sup>) を示す。

$$\text{跳躍高 (cm)} = 1/8 \times g \times (\text{滞空時間})^2$$

### 4. TQR

各条件前後の疲労回復度合いを測定するために、運動直後、運動 30 分後に TQR を測定した。TQR 項目は、6 (全く回復できていない) から 20 (非常によく回復できている) までの範囲の数値を指さして回答した。スコアが 13 以上 (合理的な回復) であれば、最低限の適切な回復状態を示す。

#### D. 統計処理

本研究の結果は、Shapiro-Wilk 検定によって、データの正規性の検定を行い正規分布を確認した。その後、各条件間における測定値の比較には、反復測定による二元配置の分散分析 (運動条件×時間) を行い交互作用および主効果の有無を検定した。二元配置の分散分析においては、Mauchly の球面性の検定を行い、球面性が仮定できなかった時には Greenhouse-

Geisser のイプシロンを用いて、自由度を修正した。反復測定による二元配置の分散分析により交互作用および主効果が認められた場合には、Bonferroni の方法を用いて多重比較検定を行った。なお、データの解析には、統計解析ソフト (SPSS ver.26.0, IBM 社製, 東京, 日本) を使用した。すべての測定値は、平均値および標準偏差 (Mean±SD) で示し、有意水準 5 % をもって統計学的有意とした。

## III. 結果

### A. 筋厚, 羽状角および筋束長

各条件の筋厚, 羽状角および筋束長の変化は、表 1 に示すとおりである。筋疲労誘発運動前後の筋厚において、すべての条件で有意な差は認められなかった。筋疲労誘発運動前後の筋束長は、交互作用および主効果を認め ( $F_{(4, 81)} = 20.7, p < 0.01$ ), 羽状角においても交互作用および主効果を認めた ( $F_{(4, 81)} = 15.3, p < 0.01$ )。すべての条件において、運動前と比較し運動直後に羽状角の増加および筋束長の減少がみられ、有意な差を認めた。EX 条件および EMS 条件では、運動直後と比較し運動終了 30 分後に、羽状角の減少および筋束長の増加がみられ、有意な差を認めた。また、運動終了 30 分後において EX 条件と CON 条件, EMS 条件と CON 条件との間にそれぞれ有意な差が認められたが、EX 条件と EMS 条件との間には有意差は認められなかった。

### B. 血管径, 平均血流速度および血流量

各条件の血管径, 平均血流速度および血流量の変化は、表 2. に示すとおりである。筋疲労誘発運動前後の血管径において、すべての条件で有意な差は認められなかった。筋疲労誘発運動前後の平均血流速度は、交互作用および主効果を認め ( $F_{(4, 81)} = 3.7, p < 0.05$ ), 血流量においても交互作用および主効果を認めた ( $F_{(4, 81)} =$

2.5,  $p<0.05$ ). すべての条件において, 運動前と比較し, 運動直後および運動終了30分後に平均血流速度および血流量の増加がみられ, 有意な差を認めた. EX および EMS 条件で運動直後と比較し, 運動終了30分後に平均血流速度および血流量の増加がみられ, 有意な差を認めた. また, 運動終了30分後において EX 条件と CON 条件, EMS 条件と CON 条件との間にそれぞれ有意な差が認められたが, EX 条件と EMS 条件との間には有意差は認められなかった.

C. パフォーマンス

各条件の疲労課題前後の CMJ の変化は, EMS 条件ではそれぞれ  $32.1\pm 8.1\text{cm}$ ,  $29.6\pm 7.6\text{cm}$ ,  $30.3\pm 7.5\text{cm}$ , EX 条件ではそれぞれ  $33.6\pm 7.5\text{cm}$ ,  $30.6\pm 7.6\text{cm}$ ,  $29.4\pm 7.7\text{cm}$  であり, CON 条件ではそれぞれ  $32.1\pm 8.5\text{cm}$ ,  $30.0\pm 6.7\text{cm}$ ,  $30.3\pm 6.7\text{cm}$  であった. すべての条

件で有意な差は認められなかった.

D. TQR

各条件前後の TQR の変化は, EMS 条件ではそれぞれ  $8.6\pm 1.3$ ,  $18.0\pm 1.6$ , EX 条件ではそれぞれ  $8.7\pm 1.0$ ,  $15.0\pm 2.3$  であり, CON 条件ではそれぞれ  $8.6\pm 1.3$ ,  $15.9\pm 1.9$  であった. 各条件前後の TQR は, 交互作用および主効果を認めた ( $F_{(2, 54)}=4.8$ ,  $p<0.05$ ). すべての条件で, 運動直後と比較し運動30分後に TQR の増加がみられ, 有意な差を認めた. また, 運動30分後において EMS 条件と EX 条件および CON 条件との間に有意な差が認められたが, EX 条件と CON 条件との間には有意差は認められなかった.

表1. 各条件における筋厚, 羽状角および筋束長の変化

|          |     | 運動前        | 運動直後        | 運動30分後                    |
|----------|-----|------------|-------------|---------------------------|
| 筋厚 (cm)  | EMS | 1.8 ± 0.1  | 1.9 ± 0.1   | 1.7 ± 0.2                 |
|          | EX  | 1.8 ± 0.1  | 1.9 ± 0.2   | 1.7 ± 0.2                 |
|          | CON | 1.8 ± 0.1  | 1.9 ± 0.1   | 1.8 ± 0.1                 |
| 羽状角 (°)  | EMS | 17.5 ± 1.3 | 19.1 ± 1.4* | 16.3 ± 0.7* <sup>ab</sup> |
|          | EX  | 17.7 ± 5.6 | 19.1 ± 1.2* | 16.4 ± 0.8* <sup>ab</sup> |
|          | CON | 17.5 ± 1.2 | 19.2 ± 1.3* | 18.1 ± 1.9*               |
| 筋束長 (mm) | EMS | 6.1 ± 0.2  | 5.7 ± 0.2*  | 6.6 ± 0.1* <sup>ab</sup>  |
|          | EX  | 6.1 ± 0.2  | 5.8 ± 0.2*  | 6.6 ± 0.2* <sup>ab</sup>  |
|          | CON | 6.1 ± 0.3  | 5.7 ± 0.5*  | 5.6 ± 0.3*                |

平均値±標準偏差

\*  $p<0.05$  v.s. 運動前 <sup>a</sup> $p<0.05$  v.s. 運動直後 <sup>b</sup> $p<0.05$  v.s. CON

表2. 各条件における血管径, 平均血流速度および血流量の変化

|               |     | 運動前         | 運動直後          | 運動30分後                      |
|---------------|-----|-------------|---------------|-----------------------------|
| 血管径 (mm)      | EMS | 5.0 ± 0.1   | 5.0 ± 0.1     | 4.9 ± 0.1                   |
|               | EX  | 5.0 ± 0.1   | 5.0 ± 0.1     | 4.9 ± 0.1                   |
|               | CON | 4.8 ± 0.4   | 4.7 ± 0.4     | 4.7 ± 0.2                   |
| 血流速度 (cm/sec) | EMS | 7.0 ± 0.9   | 9.1 ± 1.1*    | 11.9 ± 2.2* <sup>ab</sup>   |
|               | EX  | 7.1 ± 1.7   | 8.5 ± 0.8*    | 13.1 ± 2.3* <sup>ab</sup>   |
|               | CON | 6.7 ± 0.8   | 8.0 ± 1.3*    | 7.6 ± 0.7* <sup>a</sup>     |
| 血流量 (ml/min)  | EMS | 83.8 ± 11.2 | 106.0 ± 14.4* | 140.0 ± 20.4* <sup>ab</sup> |
|               | EX  | 88.7 ± 16.8 | 115.6 ± 38.9* | 156.9 ± 37.5* <sup>ab</sup> |
|               | CON | 75.0 ± 18.3 | 90.9 ± 11.6*  | 77.9 ± 16.7 <sup>a</sup>    |

平均値±標準偏差

\* p<0.05 v.s. 運動前    <sup>a</sup>p<0.05 v.s. 運動直後    <sup>b</sup>p<0.05 v.s. CON

#### IV. 考察

本研究では, EMS が運動後の疲労回復方法の一つになり得ることを想定し, 筋の形状が変化するか検討した. その結果, すべての条件において運動前と比較し, 運動直後に羽状角の増加し, 筋束長が減少した. また, EX 条件および EMS 条件においては, 運動直後と比較し, 運動終了30分後に羽状角の減少および筋束長の増加がみられ, CON 条件と比較して有意な差を認めた.

筋疲労誘発運動後の羽状角の増加および筋束長の減少は, SSC の繰り返しの持続した伸張刺激によって, 腱組織が伸長されることで生じたと考えられる. 腱の伸張は, クリーブ現象によるものであり, 筋内への体液の流入および蓄積によって筋内圧が上昇することで生じる結合組織, 細胞骨格要素の機械的特性の変化が原因と考えられる (Howell et al. 1993, Mademli et al. 2005). さらに, 関節周囲の結合組織の変化は, 膠原線維同士が近接するとともに滑動性が低下し, 線維間の架橋結合によって

生じるとされており, 組織の低酸素化は, 筋束長の短縮につながることを報告されている (Akeson et al. 1977, 沖田ら. 2000, 沖田ら. 2005). 筋疲労誘発運動により, 筋内圧が上昇, 低酸素化を生じさせたことで筋束長が減少したと示唆される.

本研究で最も重要な所見は, 運動30分後の EX 条件および EMS 条件において, CON 条件と比較し有意に筋束長が増加した点である. EMS を実施することは, 低酸素状態を緩和し, コラーゲンの線維化の進行を抑制することが報告されている (Yoshimura et al. 2017). さらに, EMS による持続的な骨格筋収縮が, 軟部組織内のコラーゲン線維の分子間架橋結合が組織の弾性に影響を及ぼすことが明らかとなっている (Gomes et al. 2005). このように, 筋形状を変化させるには, 粘弾性の増加が重要であり, 周囲組織の滑走作用が加わることで筋疲労回復に有効であった可能性がある.

また, EMS は, 筋ポンプ作用により代謝を促進させることで, 筋疲労回復につながると想

定し血流量の変化についても検討した。その結果、すべての条件において、運動直後に血流量が増加したが、運動30分後のEMS条件およびEX条件において、CON条件と比較し、血流量が有意に増加した。血流量の増加は、機械的刺激によって筋内圧の均衡が崩れ、筋原線維から一酸化窒素が放出されることで一時的に血管径が拡張し、血行動態が促進されたことが要因である (Clifford et al. 2004)。一般的に高強度運動後において、血流障害が生じることでATPの生成が抑制されるため、筋収縮状態から弛緩状態への円滑な移行が抑制される。さらに、 $H^+$ 濃度が上昇し、ATP再合成酵素の役割が阻害される。これにより、ATP濃度の減少が引き起こされ、それに続き $Ca^{2+}$ の除去に遅れ、筋収縮力が低下する (Allen et al. 2008)。代謝機能を高める有酸素性運動は、血流量が増加することにより、乳酸除去の促進し $H^+$ の蓄積を除去させることが報告されている (Markus et al. 2021)。EMSについても、骨格筋収縮による筋肉内圧のリズミカルな上昇および下降が、血流を増加させることが報告されている (加賀谷, 2001)。本研究で使用したEMSも、血流量を増加させ浮腫軽減、低酸素化の改善とともに、血中乳酸濃度の減少も筋形状を変化させた要因の一つであると考えられるが、血中乳酸濃度については測定できていないために本研究では追及できない。

運動パフォーマンスに関しては、EMSおよび有酸素運動後の腓腹筋内側頭の筋束長が増加したことにより、筋発揮力を高めパフォーマンスを維持することを想定していたが、すべての条件で有意な差がみられなかった。変化しなかった原因としては、腓腹筋内側頭の筋束長の増加および膝窩動脈の血流量増加が要因ではなく、CMJが複合的な動作であったことが要因として挙げられる。CMJは股関節屈曲筋、股関節伸展筋、膝関節伸展筋および足関節底屈筋

の同時収縮によって遂行される複合的なパフォーマンスである (相澤ら, 2010)。股関節伸展筋および膝関節伸展筋など腓腹筋以外の筋による代償運動がとられたと推察される。運動パフォーマンスは変化しなかったが、EX条件およびCON条件と比較し、EMS条件でTQRが有意に増加した。EMSは、対象者の自発的な運動がなく身体負荷が少ないことに加え、筋の柔軟性が向上し、循環動態を変化させたことから筋疲労を抑制した可能性がある。したがって、EMSは、運動後のリコンデショニングとして有効な方法となる可能性がある。

なお、本研究の限界として、筋疲労回復を目的としたリコンデショニングの方法を構築するために必要なEMSの刺激強度、刺激時間、周波数の違いなどについて未検討であり、生化学検査を行っていないために、筋疲労に影響を及ぼす乳酸、無機リン酸、ROSなどの産生量については不明である。

このようにいくつかの限界はあるものの、本研究の結果は、EMSにより筋束長の増加および血流量の増加に有効であることを示した。したがって、本研究の知見から、筋疲労後にEMSを実施することで、骨格筋への急性効果を与える可能性がある。有酸素運動は、悪天候の場合はジョギングが出来るほどの場所の確保、準備運動までにかかる時間の確保、自己管理が不十分な選手にはトレーナー、指導者の監視が必要であるが、EMSは5分ほどで装着が可能であり、アスリートのモチベーション、時間的、環境的な問題により十分な効果が得られていない場合に最適である。EMSを運動終了直後に使用することで、筋の柔軟性を向上させスポーツ競技者の傷害予防に寄与することが期待される。

## V. 結語

本研究では、筋疲労誘発運動後のEMSお



よび有酸素運動の回復方法の違いが筋の形状変化に及ぼす影響を調査した。このように、安静条件と比較してEMSおよび有酸素性運動において筋疲労誘発運動直後に減少した筋束長が、EMSおよび有酸素性運動後において増加し、それぞれの条件間で有意な差が認められた。このことは、EMSおよび有酸素運動をSSC運動後に行うことによる急性効果が認められたため、スポーツ競技者の疲労回復に寄与する可能性が示唆するものであった。

### 利益相反

開示すべき利益相反はない。

### 引用文献

- 相澤 高治, 松田 雅弘 (2010) 股関節屈曲・伸展筋力とジャンプ能力テストの関係性の検討. 理学療法科学, 25 : 889-892.
- Akeson W.H, Amie D.I, Mechanic G.L, Woo S.L, Harwood F.L, Hamer M.L (1977) Collagen cross-linking alterations in joint contractures: changes in the reducible cross-links in periarticular connective tissue collagen after nine weeks of immobilization. *Connect Tissue Res*, 5: 15-19.
- Allen D.G, Lamb G.D, Westerblad H (2008) Impaired calcium release during fatigue. *J. Appl. Physiol*, 104: 296-305.
- Babault N, Cometti C, Maffiuletti N.A, Deley G (2011) Does electrical stimulation enhance post-exercise performance recovery?. *Eur J Appl Physiol*, 111: 2501-2507.
- Bieuzen F, Borne R, Toussaint J.F, Hausswirth C (2014) Positive effect of specific low-frequency electrical stimulation during short-term recovery on subsequent high-intensity exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab*, 39: 202-210.
- Blom C, Costill D, Vollestad N (1987) Exhaustive running: inappropriate as a stimulus of muscle glycogen supercompensation. *Medicine. Science in Sports. Exercise*, 19 : 398-403.
- Clifford P.S, Hellsten Y (2004) Vasodilatory mechanisms in contracting skeletal muscle. *J. Appl. Physiol*, 97 : 393-403.
- Dadebo B, White J, George K.P (2004) A survey of flexibility training protocols and hamstring strains in professional football clubs in England. *Br. J. Sports Med*, 38: 388-394.
- Ekstrand J, Gillquist J (1983) The avoidability of soccer injuries. *Int. J. Sports Med*, 4: 124- 128.
- Gomes I, Mathur S.K, Espenshade B.M, Mori Y, Ackerman S.J, Varga J (2005) Eosinophil-fibroblast interactions induce fibroblast IL-6 secretion and extracellular matrix gene expression implications in fibrogenesis. *J. Allergy. Clin. Immunol*, 116: 796-804.
- Howatson G, Goodall S, Vansomerem K.A (2009) The influence of cold water immersions on adaptation following a single bout of damaging exercise. *Eur. J. Appl. Physiol*, 105 : 615-621.
- Howell N.J, Chleboun G, Conatser R (1993) Muscle stiffness, strength loss, swelling and soreness following exercise induced injury in humans. *J. Physiol*, 464: 183-196.
- Johansson P.H, Lindstrom L, Sundelin G, Lindstrom B (1999) The effects of preexercise stretching on muscular soreness, tenderness and force loss following heavy eccentric exercise. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 9: 219-225.
- 加賀谷淳子 (2001). 運動時の筋血流量. *体育学研究*, 46 : 429-422.
- Kositsky A, Kidgell DJ, Avela J (2019) Medial

- Gastrocnemius Muscle Architecture Is Altered After Exhaustive Stretch-Shortening Cycle Exercise. *Front Physiol*, 10: 1511.
- Mademli L, Arampatzis A (2005) Behaviour of the human gastrocnemius muscle architecture during submaximal isometric fatigue. *Eur. J. Appl. Physiol*, 94: 611-617.
- Markus, I, Constantini K, Hoffman J.R, Bartolomei S, Gepner Y (2021) Exercise-induced muscle damage: mechanism, assessment, and nutritional factors to accelerate recovery. *Eur. J. Appl. Physiol*, 121: 969-992.
- Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, Raglin J, Rietjens G, Steinacker J, Urhausen A (2013) Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med. Sci. Sports Exerc*, 45: 186-205.
- Miller B.F, Gruben K.G, Morgan B.J (2000) Circulatory responses to voluntary and electrically induced muscle contractions in humans. *Phys Ther. Jan*, 80: 53-60.
- Muro M, Nagata A, Sakuma C, Sakamoto K, Moritani T, Yona M (1986) Observation of high and low frequency muscle fatigue by means of <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance. *Ann. Physiol. Anthropol*, 5: 89-96.
- 中村 雅俊, 池添 冬芽, 梅垣 雄心, 市橋 則明 (2015) 超音波診断装置を用いたストレッチング研究のトピックス. *理学療法学*, 42 : 190-195.
- 沖田 実, 吉村 俊郎 (2000) 拘縮の病態とストレッチング. *理学療法探求*, 3 : 29-36.
- Shrout P.E, Fleiss J.L (1979) Intraclass correlations uses in assessing rater reliability. *Psychol. Bull*, 86: 420-428.
- 曾田 直樹, 石田 裕保, 池戸 康代 (2011) 疲労課題における外側広筋の形態学的変化について-羽状角, 筋厚, 筋束長の経時的変化-. *理学療法科学*, 26 : 781-784.
- Vøllestad N (1997) Measurement of human muscle fatigue, *Journal of Neuroscience. Methods.*, 74: 219-227.
- Warren G.L, Lowe D.A, Hayes D.A, Karwoski C.J, Prior B.M, Armstrong R.B (1993) Excitation failure in eccentric contraction-induced injury of mouse soleus muscle. *J. Physiol*, 468: 487-499.
- 山地 啓司 (2011) 最大酸素摂取量の科学, 改訂第2版, 杏林書院: 東京, pp3-55.
- 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 : 82-92.
- Yoshimura A, Sakamoto J, Honda Y, Kataoka H, Nakano J, Okita M (2017) Cyclic muscle twitch contraction inhibits immobilization-induced muscle contracture and fibrosis in rats. *Connect Tissue Res*, 58: 487-495

(令和5年12月7日受理)