

遅発性筋肉痛と運動形態の関連性

早稲田大学 栗原俊之
(共同研究者) 同 川上泰雄
同 宮本直和
早稲田大学大学院 佐久間 淳

Relationship Between Delayed Onset Muscle Soreness and Movement Form of Exercise

by

Toshiyuki Kurihara, Yasuo Kawakami, Naokazu Miyamoto

Waseda University,

Faculty of sport sciences

Jun Sakuma

Waseda University,

Graduate school of sport sciences

ABSTRACT

This study examined whether the movement velocity of calf raise exercise might affect the magnitude of delayed onset muscle soreness and changes of muscle functions. In order to achieve this aim, the subjects were instructed to execute controlled one-legged calf raise exercise and tempo of each repetition was regulated to two different conditions, fast (2Hz) and slow (0.5Hz). The ankle angle range of each repetition was set from dorsiflexed 15 deg to plantar flexed 20 deg. Muscle soreness was evaluated using a visual analog scale when the plantar flexors were palpated or stretched. Measurements for muscle soreness, maximum voluntary contraction (MVC), and ankle range of motion (ROM) were executed before, immediately after, and 1, 2, 3, 4 days after each exercise. There was no

significant difference in muscle soreness between two conditions throughout the sessions. Similarly, no significant changes between two conditions in muscle soreness, MVC and ROM were observed except for MVC immediately after the exercise. The time course changes in MVC and ROM did not coincide with the changes in muscle soreness. These results suggest that the magnitude of muscle soreness and changes of muscle functions are not related to the movement velocity of exercise.

要 旨

本研究では、異なる動作速度のカーフレイズ運動によって遅発性筋肉痛を生じさせ、筋肉痛と等尺性筋力および関節可動域を経時的（事前、直後、1、2、3、4日後）に測定し、動作速度が筋肉痛や筋機能に及ぼす影響について検討した。動作速度は2Hzあるいは0.5Hzとし、関節角度を背屈15度から底屈20度までに規定した片足カーフレイズを1セット20回の10セット行わせた。カーフレイズ運動中の床反力ならびに筋放電量において2Hz条件の方が有意に大きかった。しかし、運動後から生じた筋肉痛には動作速度間で有意な差がなかった。等尺性筋力では0.5Hz条件の運動直後のみ動作速度間で有意差があったが、1日後以降では動作速度間の差はなかった。関節可動域では最大底屈角度、最大背屈角度ともにすべての測定日において有意な差がなかった。以上のことから、回数と可動域を規定したカーフレイズ運動によって引き起こされる筋肉痛は、カーフレイズ運動の動作速度の影響を受けないことが示唆された。また、運動から1日後以降の筋力および関節可動域の変化は、筋肉痛やカーフレイズ運動の動作速度の影響を受けないことが示唆された。

緒 言

伸張性運動後あるいは運動中に、筋線維がダメージを受け、その結果、運動直後から数日間にわたり、筋力が低下する^{7, 17, 18, 30, 34}。筋力の低下

とともに筋肉痛（muscle soreness）が引き起こされる。この筋肉痛は運動から1日ないし2日遅れてピークになるため、遅発性筋肉痛と呼ばれている。遅発性筋肉痛の程度は、年齢、運動の種類、運動強度、運動に対する慣れなど様々な要因によって決まるとされている^{1, 14-16, 19, 21}。ここで、運動強度は負荷と動作速度が関与し、動作速度が速いと運動強度も大きくなることが考えられる。しかしながら、運動強度を変えるために、負荷を一定にして動作速度の影響をみた報告は少ない^{4, 13, 26}。

至適な動作速度でのカーフレイズ時に、腱弾性を利用して、運動がより効率的になることが知られている³³。すなわち、カーフレイズの動作速度を変えると、腱弾性の影響により筋の動態が変わる。このことから、カーフレイズ運動における筋肉痛の程度は動作速度の影響を受けることが推察される。したがって、異なる動作速度のカーフレイズ運動を行った後の筋肉痛の程度を比較することにより、動作速度と筋肉痛の関係について新たな知見が得られると期待される。

先行研究では、筋肉痛の程度を客観的に評価する指標として、等尺性筋力と関節可動域がよく用いられている^{2, 5, 20, 22, 28}。しかしながら、等尺性筋力と関節可動域は筋の機能を表わすものである。また、筋肉痛は痛覚で感じるものであり、主観的なものであるため、本研究では、筋肉痛として主観的筋肉痛を数値化したものを用い、等尺性筋力と関節可動域は筋肉痛に付随して起こる筋の機能

変化であると考える。

本研究の目的は、異なる動作速度のカーフレイズ運動により遅発性筋肉痛を生じさせ、発生した筋肉痛と等尺性筋力ならびに関節可動域を経時的に測定し、動作速度が筋肉痛や筋機能に及ぼす影響について検討することである。

1. 方法

1. 1 被験者

被験者は、下肢において既往症歴がなく、定期的な運動習慣を持たない健常成人男性10名（年齢 23 ± 2 歳，身長 171 ± 8 cm，体重 67 ± 8 kg）であった。被験者を速い速度条件（周期2Hz，0.5秒で一往復）と遅い速度条件（周期0.5Hz，2秒で一往復）の2群に分けた。被験者のうち2名が両速度条件の実験に参加したため、どちらの群も6名ずつであった。両群間の年齢，身長，体重には有意差が無いように配慮した。両速度条件に参加する被験者は、筋肉痛の繰り返し効果を避けるために、実験間に6か月以上の間を空けた²⁴⁾。被験者には、実験に先立ち、実験の趣旨，内容，測定中に起こりうる危険性に関する説明を十分に理解させた上で、書面により実験参加についての同意を得た。なお、本研究は、早稲田大学スポーツ科学学術院倫理委員会の承認を得て行われた。

1. 2 運動課題

75度に傾けたスレッジ台の底面にフォースプレート（9281B，Kistler社製，スイス）を取り付け、被験者の身体をスレッジ台のすべり台部分に上下方向のみに移動できるよう固定しフォースプレート上で右片足のカーフレイズ運動を行わせた。足関節と膝関節にゴニオメータ（SG110/A，SG150，Biometrics社製，イギリス）を取り付け、運動中の足・膝関節の角度を液晶画面に映し、被験者にフィードバックした。足関節の可動域は背屈15度から底屈20度までと規定し、被験者には、

膝関節を屈曲させないように、また、カーフレイズ中の足関節可動域と動作速度を遵守するように指示した。

2Hz，0.5Hzのどちらの速度条件においても、1セット20回のカーフレイズを10セット行わせた。ただし、0.5Hz条件においては、足関節可動域が達成できなくなった被験者が3名いたため、その被験者については途中のセットから10回に回数を減らし、それでも達成できなくなったところで運動を打ち切った（1名が160回，2名が170回で終了）。セット間には3分間の休憩を取り、休憩中は逆足で体重を支えてもらった。

腓腹筋外側頭（MG），腓腹筋内側頭（LG），ヒラメ筋（SOL）および前脛骨筋（TA）の4筋から表面筋電図を導出した。表面電極（Blue Sensor N，直径11mm，Ambu社製，デンマーク）を電極間距離2cmで各筋の筋腹中央付近に貼付した。筋放電量はマルチテレメータシステム（WEB-5000，日本光電社製，日本）を用いて、フォースプレート，ゴニオメータの出力と同期させてA/D変換器（Power lab/16SP，ADInstruments社製，オーストラリア）を介してパーソナルコンピュータに16bit，1kHzで記録した。

1. 3 事前測定ならびに事後測定

事前測定（プレ）ならびにカーフレイズ運動直後（30分以内），1日後，2日後，3日後，4日後に、筋肉痛と筋機能の変化を定量するため、以下の測定を行った。

1. 3. 1 筋肉痛

筋肉痛は、検者の手により下腿後面を強く圧迫された時および仰臥位姿勢にて検者の手により受動的に足関節を背屈された時の痛みを、10cmの線上に示す視覚的アナログスケール（VAS：visual analog scale）法によって数値化した。4日後以降も筋肉痛が残っている被験者は、筋肉痛が

完全に消失するまで筋肉痛の測定を行った。

1. 3. 2 等尺性筋力

足関節底屈の随意最大筋力 (Maximum voluntary contraction; MVC) を測定した。被験者の姿勢は仰臥位、膝関節完全伸展および足関節90度とし、筋力計のアタッチメントに被験者の足部を固定した。MVC発揮中に電気刺激により足底屈筋群の筋活動水準を測定した (Twitch interpolation 法)。電気刺激には、アイソレーター (SS-2046, 日本光電社製, 日本) を接続した刺激装置 (SEN-3301, 日本光電社製, 日本) を用いた。刺激電極は陽極 (4×5cm) を膝蓋骨上端部に、陰極 (直径5mm) を膝窩部に貼付し、脛骨神経に電気刺激 (duration 500 μs, interval 20ms, 3 trains の矩形波) を加えた。

刺激強度は、刺激電圧の増加に伴う筋力の上昇が観察されなくなった強度の1.2倍の電圧とした。筋活動水準の算出には以下の式を用いた³⁾。

筋活動水準 (%activation)

$$= \{1 - (\text{誘発トルク} / \text{単収縮トルク})\} \times 100$$

被験者には、プレ測定で十分に練習を行わせプロトコルに慣れさせた上で、毎回のMVC発揮前に最大下での力発揮を数回練習させてから行った。

表面筋電図をカーフレイズ中と同様にMG, LG, SOL, TAの4筋から記録した。表面筋電図は、筋力計の出力と同期させA/D変換器を介してパーソナルコンピュータに記録した。

1. 3. 3 関節可動域

足関節可動域の測定は、足関節にゴニオメータ (SG110/A, Biometrics 社製, イギリス) を取り付け、仰臥位、膝関節完全伸展の姿勢で、本人が努力できる範囲で足関節を最大底背屈してもらった。

1. 4 データの分析

パーソナルコンピュータに保存されたデータは

分析用ソフトウェア (Chart5.5, ADInstruments 社製, オーストラリア) を用いて分析した。MVCは足底屈トルク発揮の最大値とした。MVC中の筋放電量の分析では、全波整流後、最大値 (MVC) を含み、トルクが安定している0.5秒間の平均値 (mEMG@MVC) を求め、安静時に加えた電気刺激の最大M波の値で正規化した。カーフレイズ運動中の筋放電量の分析では、全波整流後、動作が安定している5周期分の平均値 (mEMG@CR) を求めた後に、運動直前に行わせたMVCの平均値 (mEMG@MVC) で正規化した。カーフレイズ運動中の床反力のデータは、各被験者の体重に重力加速度を乗じた値で正規化し、安定した5周期の中での最大値を求めた。

1. 5 統計処理

各データは、平均値±標準偏差で表した。カーフレイズにおけるすべてのパラメータについて、二元配置の分散分析 (動作速度とセット数) を行い、事前測定ならびに事後測定におけるすべてのパラメータについて、二元配置の分散分析 (動作速度と測定日) を行った。多重比較はTukey's HSD法を用いた。有意水準は5%未満とした。

2. 結果

図1にはカーフレイズ運動中の床反力、関節角度、筋電図の出力の典型例 (左:0.5Hz条件, 右2Hz条件) を示した。

図2には両動作速度でのカーフレイズ1セット目と最終セットにおける床反力の最大値 (各被験者の体重で正規化した値) ならびにMG, LG, SOL, TAの筋放電量 (mEMG@CR) を示した。床反力の最大値は、動作速度間で有意差があったが、同速度における1セット目と最終セット間には有意な差が認められなかった。筋放電量では、1セット目のMGとSOL, 最終セットのMGに動作速度間で有意差があった。同速度における1セ

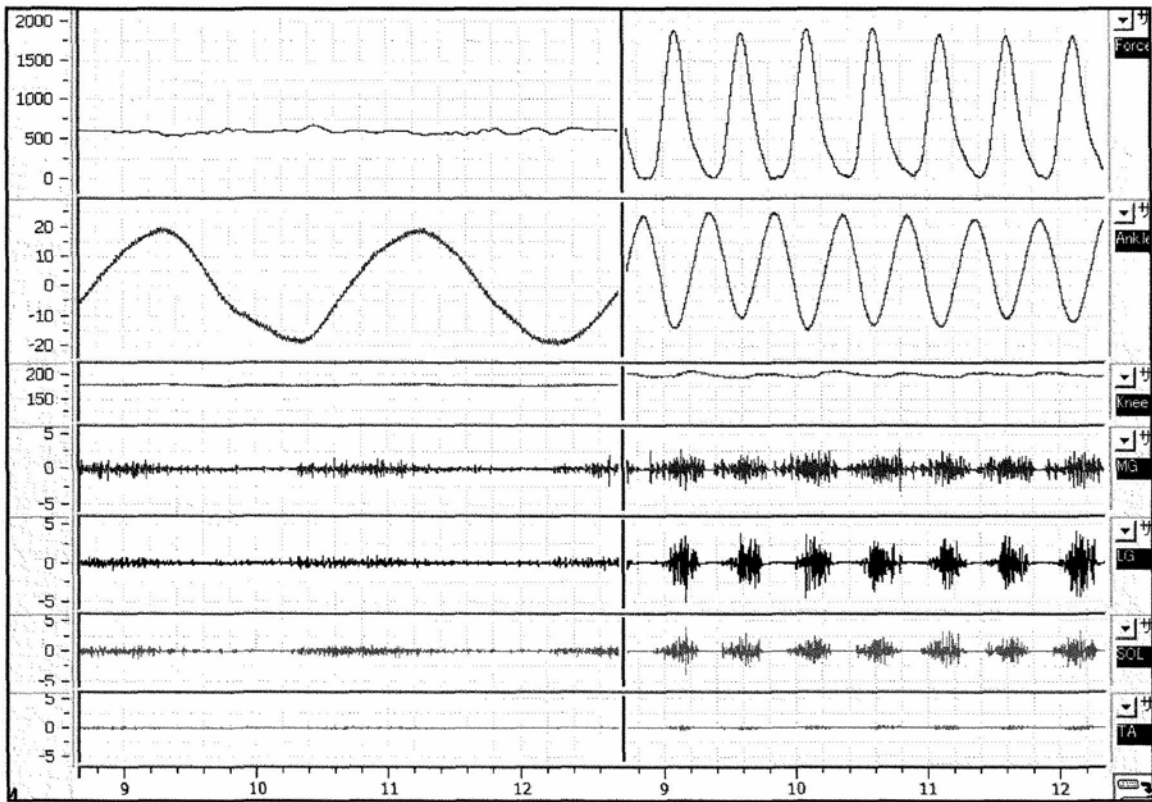


図1 カーフレイズ運動中の床反力，足関節角度，膝関節角度，表面筋電図波形（MG，LG，SOL，TA）の典型例。
左:0.5Hz条件，右:2Hz条件

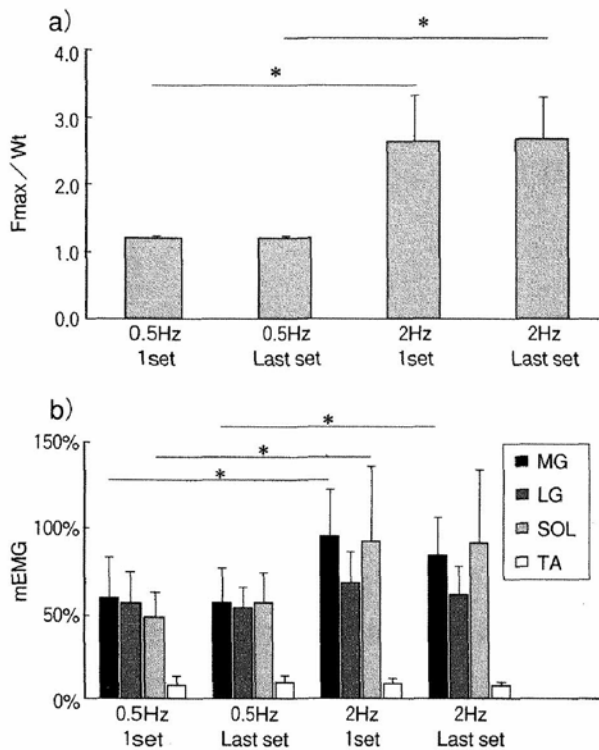


図2 a) カーフレイズ運動中の床反力の最大値 (Fmax/Wt) 単位：体重 (N) で正規化して表示
b) カーフレイズ運動中の筋放電量 (mEMG@CR) 左から順に0.5Hz条件の1セット目，0.5Hz条件の最終セット，2Hz条件の1セット目，2Hz条件の最終セット *: $p < 0.05$ vs 0.5Hz条件

ット目と最終セットにおける筋放電量は，いずれの筋においても有意な差が認められなかった。

図3にはVASの変化を示した。いずれの項目のVASも2日目～3日目にピークを迎え，それ以降は減少した。測定期間を通じてすべてのVAS項目が常に0となる被験者はおらず，すべての被験者において筋肉痛が発生したことが確認された。すべてのVAS項目において，測定日によらず，

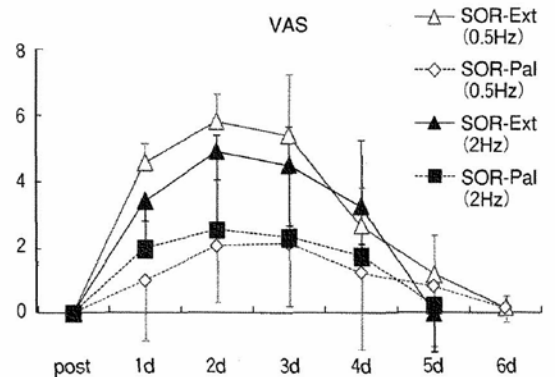


図3 下腿後面の圧迫および受動的な背屈による主観的筋肉痛 (VAS) の経時変化
SOR-Pal：圧迫時の筋肉痛 (VAS)，SOR-Ext：受動背屈時の筋肉痛 (VAS)

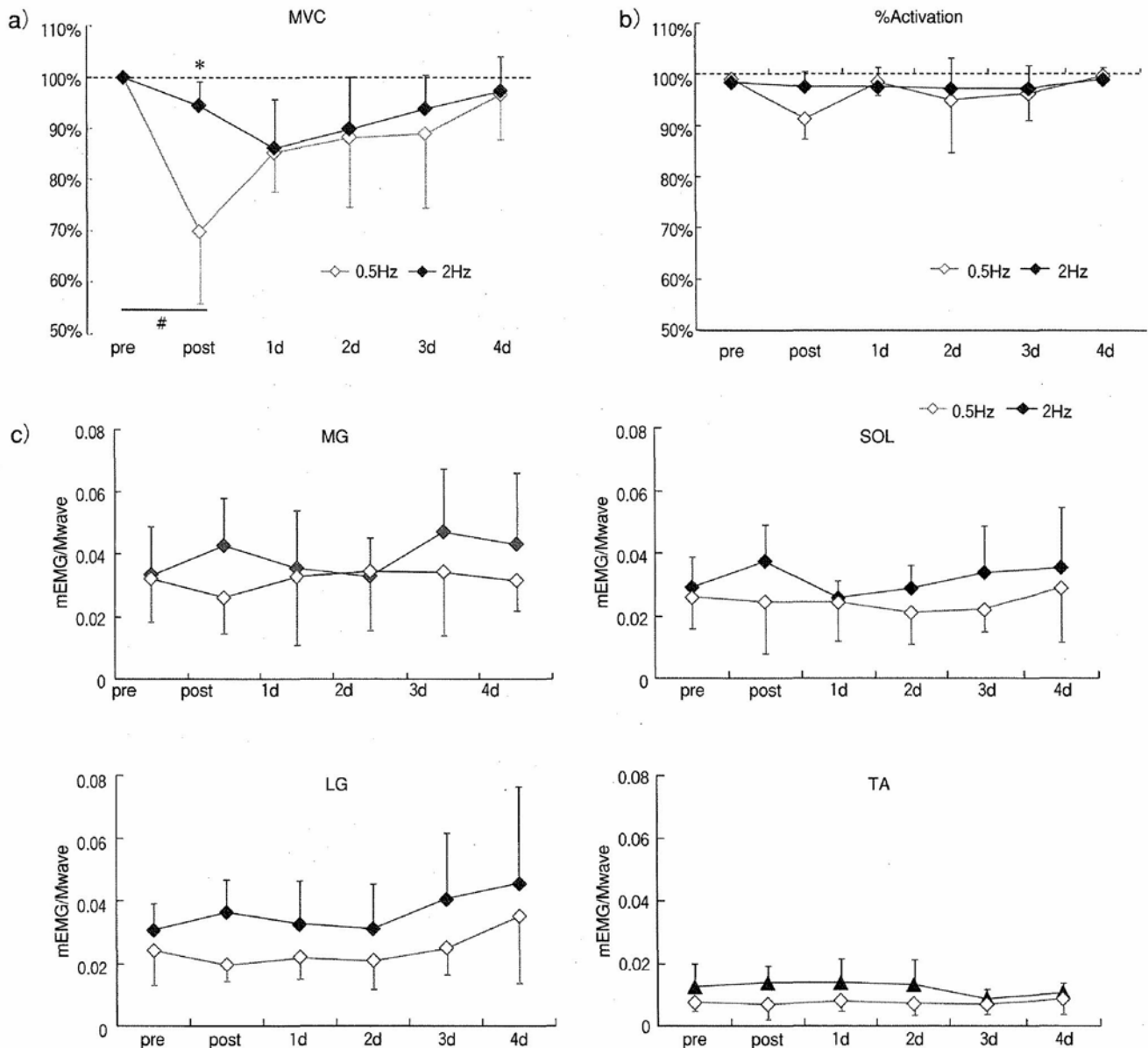


図4 a) 等尺性筋力 (MVC) の経時変化 b) 筋活動水準 (%activation) の経時変化 c) 腓腹筋内側頭 (MG), 腓腹筋外側頭 (LG), ヒラメ筋 (SOL), 前脛骨筋 (TA) における MVC 発揮中の筋放電量 (mEMG@MVC) の経時変化
 単位: 最大M波の値で正規化して表示 * : p<0.05 vs 2Hz 条件, # : p<0.05 vs Pre

動作速度間の有意な差は認められなかった。

図4には等尺性筋力の変化(図4a), 筋活動水準の変化(図4b), MVC発揮中の筋放電量(mEMG@MVC)の変化(図4c)を示した。等尺性筋力はプレのMVCの値で正規化して示した。運動直後の等尺性筋力に動作速度間で有意な差があり, 2Hz条件では95±5%となったが, 0.5Hz条件では69±14%まで低下した。1日後から4日後にかけて, 等尺性筋力は徐々に回復し, 1日後以降では動作速度間の有意な差は認められなかった。0.5Hz条件の運動直後の筋活動水準は91±

4%とプレの値と比べて低い傾向を示したが, 筋活動水準には両動作速度ともすべての測定日において有意な低下は認められなかった。MVC発揮中の筋放電量は, 測定日によらず, どちらの動作速度でもすべての筋において有意な差は認められなかった。

図5には足関節可動域の変化を示した。運動直後の背屈角度, 1日後の底屈角度において動作速度間で異なる傾向がみられたが, 有意な差は認められなかった。また, 2日後の背屈角度において

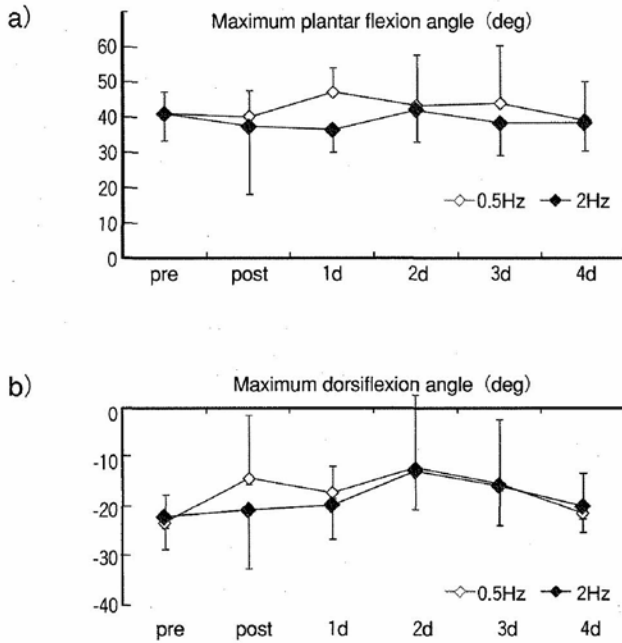


図5 足関節可動域の経時変化
a) 最大底屈角度 b) 最大背屈角度

どちらの動作速度においてもプレの値より小さくなる傾向がみられたが、有意な差は認められなかった。足関節底屈角度では、すべての測定日において有意な差が認められなかった。

3. 考 察

本研究では、運動後に発生する筋肉痛に動作速度が及ぼす影響を明らかにするために、カーフレイズ運動を2Hzおよび0.5Hzの異なる2つの動作速度で行わせた。本研究の結果から、カーフレイズ運動中の床反力ならびに筋放電量において2Hz条件の方が有意に大きく、動作速度の速い条件では運動強度が大きいことが確認された。しかし、運動後から数日後にかけて生じた筋肉痛には動作速度間で有意な差が認められなかった。

本研究で用いた課題は、片足での体重負荷によるカーフレイズであった。体重負荷は一定であり、可動域と回数を規定したことから課題全体での仕事量はほぼ同じになる。このことから、運動後に発生する筋肉痛は運動強度に依存せず、仕事量に依存する可能性が示唆された。動作速度を変えて動作時間を一定にした研究では、動作速度の速い

試行の方が、筋肉痛が大きいと報告している⁴⁾。しかしながら、彼ら⁴⁾の実験では、試行間で動作速度、運動強度、仕事量のすべてが異なる。また、動作速度を同じにして回数を変えた研究では、回数によらず主観的筋肉痛の程度は同じであると報告している²³⁾。しかしながら、彼ら²³⁾の実験でも回数が異なるため、仕事量は異なる。本研究では回数を規定したことにより、仕事量はほぼ同じであったが、動作速度を変えることで、動作時間が異なっていた。以上のように、筋肉痛に及ぼす影響因子は相互に関連しているため、そのメカニズムは複雑である。これを明らかにし、筋肉痛発生のメカニズムを解明するためには、動作速度、動作時間ならびに動作回数を体系的に検討した研究が必要である。

運動後の筋力低下には、筋損傷による力発揮ポテンシャルの低下、興奮収縮連関の機能不全や、筋放電量の低下、筋活動水準の低下などの中枢性疲労、そのほかに代謝系の影響などの要因が考えられる^{8, 29, 31, 32)}。本研究の結果では、1日後以降でのMVCには動作速度間の有意な差が認められなかった。中枢性あるいは代謝性などの末梢性疲労は運動から時間が経つとすぐに回復するので、2日後から3日後に生じる筋力低下は筋損傷によるものが主因であると考えられる³¹⁾。したがって、本研究の運動課題で引き起こされた筋損傷の程度は動作速度間で同程度であったと考えられる。また、運動直後で0.5Hz条件においてのみ、筋力が約30%低下し、筋活動水準も低下する傾向がみられた(約10%)。この筋活動水準ではMVCの低下を説明できるほどではなく、MVC発揮中の筋放電量もプレの値と比べて有意な差が認められなかった。これらのことから、本研究で0.5Hz条件において直後にみられたMVCの低下は、上述した中枢性疲労によるものではなく、動作時間が長くなったことによる代謝性などの末梢性疲労の影響が大きいと考えられる。動作速度を変えて

動作時間を同じにした研究では、動作速度の速い試行の方が筋力の低下が大きいと報告している⁴⁾。また、動作速度を同じにして回数を変えた研究では、回数の多い被験者群の方が有意に筋力は低下したと報告している²³⁾。これらの研究では、運動強度の大きな群、あるいは仕事量の大きい群ほど有意に筋力が低下していたことになる。本研究では、運動の仕事量がほぼ同じであったため、1日後以降では動作速度間で筋力の低下に有意差が認められなかった可能性が示唆される。

関節可動域の減少は遅発性筋肉痛の評価法として用いられている^{5, 7)}。本研究では、先行研究に報告されているほどの顕著な変化は認められなかった。しかし、筋肉痛がピークとなった2日後～3日後に最大背屈角度が低下する傾向がみられた。一方、最大底屈角度は両動作速度とも測定日によらず変わらなかった。これは、筋肉痛発生後の筋力低下により関節可動域が低下するという先行研究⁷⁾の知見と異なり、筋肉痛および関節可動域の経時変化と筋力低下の経時変化が一致しなかったことを意味する。関節可動域の低下には、筋力低下だけでなく、関節スティフネスの増加も影響する。伸張性運動後に受動張力が増加するという報告^{31, 35, 36)}から、筋やその他の組織のスティフネスが増加する可能性もある。また、痛みや痛み感受性による影響³⁰⁾により本人の意志で可動域を達成できなかった可能性も無視できない。本研究の結果では、筋肉痛と関節可動域変化の関係を探ることは困難であるが、筋肉痛が発生した後の筋力低下と関節可動域変化には関係がないことは示唆される。

先行研究で筋肉痛の研究に用いられている筋群は上腕屈筋群が多い^{6, 7, 17, 20, 26, 27)}。本研究の運動課題であるカーフレイズの主動筋は下腿三頭筋である。下腿三頭筋は、上腕屈筋群と比べて抗重力筋であること、長い外部腱組織（アキレス腱）があること、主導筋が紡錘状筋と羽状筋という筋形

デサントスポーツ科学 Vol. 30

状に違いがあること、さらに協働筋間で筋線維組成が大きく異なること¹⁰⁾、などの機能的、形態的、組織学的な違いがある。上腕屈筋群と膝伸展筋群を比較したJamurtasらの研究⁹⁾では、上腕屈筋群の方で筋損傷が大きく、筋力の回復も遅かったと報告している。Jamurtasら⁹⁾は上肢の筋群に比べて、下肢の筋群は抗重力筋であり、日常的に使用されていることで筋肉痛が起きにくいと考察している。形態的な要因としての長い外部腱組織の存在は無視できず、腱組織の持つ弾性によって筋線維の短縮と腱組織の伸長とが相互に作用し、筋力発揮時の筋線維の収縮動態が大きく影響される^{11, 12, 25)}。このことから、アキレス腱の存在が今回の結果に与える影響は無視できないと考えられる。一方、運動課題による違いも考えられる。本研究で用いた体重負荷のカーフレイズでは、筋力ではなく体重により負荷が決定される。そのため、筋への相対的な負荷には個人差がある。このことが、筋肉痛の程度に差を生んでいた可能性がある。この影響をなくすためには、カーフレイズ運動による実験では被験者の筋力に見合った分の重りを背負わせるなどして、相対負荷を一定とするなどの工夫が必要であろう。

4. 結 論

今回の結果から、回数と可動域を規定したカーフレイズ運動によって引き起こされる筋肉痛は、カーフレイズ運動の動作速度の影響を受けないことが示された。また、運動から1日後以降の筋力および関節可動域の変化は、筋肉痛やカーフレイズ運動の動作速度の影響を受けないことが示された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼を申し上げます。また、研究に快

く参加していただいた被験者の皆様に深謝いたします。

文 献

- 1) 野坂和則: 遅発性筋肉痛のメカニズムと意義と予防・対処法. 上原記念生命科学財団研究報告集, 19: 77-79 (2005)
- 2) 川岡臣昭, 小野寺昇 and 詫間晋平: 遅発性筋肉痛および運動に伴う筋損傷研究における文献的知見—被験者特性の違いに着目して—. 川崎医療福祉学会誌, 16: 365-372 (2006)
- 3) Allen G.M., Gandevia S.C. and McKenzie D.K.: Reliability of measurements of muscle strength and voluntary activation using twitch interpolation. *Muscle Nerve*, 18: 593-600 (1995)
- 4) Chapman D., Newton M., Sacco P. and Nosaka K.: Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *Int. J. Sports Med.*, 27: 591-598 (2006)
- 5) Chen T.C., Nosaka K. and Sacco P.: Intensity of eccentric exercise, shift of optimum angle, and the magnitude of repeated-bout effect. *J. Appl. Physiol.*, 102: 992-999 (2007)
- 6) Child R.B., Saxton J.M. and Donnelly A.E.: Comparison of eccentric knee extensor muscle actions at two muscle lengths on indices of damage and angle-specific force production in humans. *J. Sports Sci.*, 16: 301-308 (1998)
- 7) Clarkson P.M., Nosaka K. and Braun B.: Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24: 512-520 (1992)
- 8) Enoka R.M. and Duchateau J.: Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *J. Physiol.*, 586: 11-23 (2008)
- 9) Jamurtas A.Z., Theocharis V., Tofas T., Tsiokanos A., Yfanti C., Paschalis V., Koutedakis Y. and Nosaka K.: Comparison between leg and arm eccentric exercises of the same relative intensity on indices of muscle damage. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 95: 179-185 (2005)
- 10) Johnson M.A., Polgar J., Weightman D. and Appleton D.: Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J. Neurol. Sci.*, 18: 111-129 (1973)
- 11) Kawakami Y., Kubo K., Kanehisa H. and Fukunaga T.: Effect of series elasticity on isokinetic torque-angle relationship in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 87: 381-387 (2002)
- 12) Kawakami Y., Muraoka T., Ito S., Kanehisa H. and Fukunaga T.: In vivo muscle fibre behaviour during counter-movement exercise in humans reveals a significant role for tendon elasticity. *J. Physiol.*, 540: 635-646 (2002)
- 13) Kulig K., Powers C.M., Shellock F.G. and Terk M.: The effects of eccentric velocity on activation of elbow flexors: evaluation by magnetic resonance imaging. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 196-200 (2001)
- 14) Lavender A.P. and Nosaka K.: Comparison between old and young men for changes in markers of muscle damage following voluntary eccentric exercise of the elbow flexors. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 31: 218-225 (2006)
- 15) Lavender A.P. and Nosaka K.: Fluctuations of isometric force after eccentric exercise of the elbow flexors of young, middle-aged, and old men. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 100: 161-167 (2007)
- 16) Lavender A.P. and Nosaka K.: Changes in markers of muscle damage of middle-aged and young men following eccentric exercise of the elbow flexors. *J. Sci. Med. Sport*, 1: (2007)
- 17) Newham D.J., Jones D.A. and Clarkson P.M.: Repeated high-force eccentric exercise: effects on muscle pain and damage. *J. Appl. Physiol.*, 63: 1381-1386 (1987)
- 18) Newham D.J., Mills K.R., Quigley B.M. and Edwards R.H.: Pain and fatigue after concentric and eccentric muscle contractions. *Clin. Sci. (Lond.)*, 64: 55-62 (1983)
- 19) Nosaka K. and Clarkson P.M.: Influence of previous concentric exercise on eccentric exercise-induced muscle damage. *J. Sports Sci.*, 15: 477-483 (1997)
- 20) Nosaka K., Clarkson P.M., McGuiggin M.E. and Byrne J.M.: Time course of muscle adaptation after high force eccentric exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 63: 70-76 (1991)
- 21) Nosaka K. and Newton M.: Concentric or eccentric training effect on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34: 63-69 (2002)
- 22) Nosaka K., Newton M. and Sacco P.: Muscle damage and soreness after endurance exercise of the elbow flexors. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34: 920-927

- (2002)
- 23) Nosaka K., Newton M. and Sacco P.: Delayed-onset muscle soreness does not reflect the magnitude of eccentric exercise-induced muscle damage. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 12: 337-346 (2002)
 - 24) Nosaka K., Sakamoto K., Newton M. and Sacco P.: How long does the protective effect on eccentric exercise-induced muscle damage last? *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 1490-1495 (2001)
 - 25) Oda T., Himeno R., C Hay D., Chino K., Kurihara T., Nagayoshi T., Kanehisa H., Fukunaga T. and Kawakami Y.: In vivo behavior of muscle fascicles and tendinous tissues in human tibialis anterior muscle during twitch contraction. *J. Biomech.*, 40: 3114-3120 (2007)
 - 26) Paddon-Jones D., Keech A., Lonergan A. and Abernethy P.: Differential expression of muscle damage in humans following acute fast and slow velocity eccentric exercise. *J. Sci. Med. Sport*, 8: 255-263 (2005)
 - 27) Paddon-Jones D., Leveritt M., Lonergan A. and Abernethy P.: Adaptation to chronic eccentric exercise in humans: the influence of contraction velocity. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 85: 466-471 (2001)
 - 28) Philippou A., Bogdanis G.C., Nevill A.M. and Maridaki M.: Changes in the angle-force curve of human elbow flexors following eccentric and isometric exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 93: 237-244 (2004)
 - 29) Prasartwuth O., Allen T.J., Butler J.E., Gandevia S.C. and Taylor J.L.: Length-dependent changes in voluntary activation, maximum voluntary torque and twitch responses after eccentric damage in humans. *J. Physiol.*, 571: 243-252 (2006)
 - 30) Prasartwuth O., Taylor J.L. and Gandevia S.C.: Maximal force, voluntary activation and muscle soreness after eccentric damage to human elbow flexor muscles. *J. Physiol.*, 567: 337-348 (2005)
 - 31) Proske U. and Allen T.J.: Damage to skeletal muscle from eccentric exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 33: 98-104 (2005)
 - 32) Proske U. and Morgan D.L.: Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *J. Physiol.*, 537: 333-345 (2001)
 - 33) Takeshita D., Shibayama A., Muraoka T., Muramatsu T., Nagano A., Fukunaga T. and Fukashiro S.: Resonance in the human medial gastrocnemius muscle during cyclic ankle bending exercise. *J. Appl. Physiol.*, 101: 111-118 (2006)
 - 34) Whitehead N.P., Allen T.J., Morgan D.L. and Proske U.: Damage to human muscle from eccentric exercise after training with concentric exercise. *J. Physiol.*, 512: 615-620 (1998)
 - 35) Whitehead N.P., Morgan D.L., Gregory J.E. and Proske U.: Rises in whole muscle passive tension of mammalian muscle after eccentric contractions at different lengths. *J. Appl. Physiol.*, 95: 1224-1234 (2003)
 - 36) Whitehead N.P., Weerakkody N.S., Gregory J.E., Morgan D.L. and Proske U.: Changes in passive tension of muscle in humans and animals after eccentric exercise. *J. Physiol.*, 533: 593-604 (2001)