

疲労困憊に至る伸張-短縮サイクル運動が下腿三頭筋の収縮特性及び損傷指標に
及ぼす影響

田野聡¹⁾, 的場秀樹²⁾, 小原繁²⁾, 荒木秀夫²⁾, 野村昌弘²⁾, 佐竹昌之²⁾, 三浦哉²⁾

1) 徳島大学大学院人間・自然環境研究科, 橋本病院 2) 徳島大学総合科学部

**Effects of stretch-shortening cycle exercise to exhaustion on the contractile
properties of the triceps surae muscle and injury-related parameters**

Satoshi TANO¹⁾, Hideki MATOBA²⁾, Shigeru OBARA²⁾, Hideo ARAKI²⁾, Masahiro NOMURA²⁾,
Masayuki SATAKE²⁾ and Hajime MIURA²⁾

1) Graduate School of Human and Environmental Sciences, The University of Tokushima,
Tokushima 770-8502, Japan ; Hashimoto Hospital

2) The Faculty of Integrated Arts and Sciences, The University of Tokushima, Tokushima 770-8502,
Japan

ABSTRACTS

The repeated heel-raise is a typical stretch-shortening cycle (SSC) exercise. The exercise is not only performed in resistance training but also used for evaluating muscular strength in clinical settings. The present study was undertaken to investigate the effect of repeated heel-raise exercise to a volitional exhaustion on contractile properties of the triceps surae muscle and parameters reflecting muscle injury.

Five Healthy university students with no orthopedic disorders served as subjects. Each subject performed two exercises. In SSC condition, the subjects repeated the SSC exercise every 2 seconds to volitional exhaustion. In the ISO condition, they repeated the same number of an isometric exercise as that of the SSC exercise.

In the SSC condition, the subjects exhausted after repeating the exercise 28.6 times. At exhaustion, maximal torque developing capacity decreased significantly and the decrease was accompanied by a tendency of a lower median power frequency of the EMG signals. A significantly higher lactate concentration was also observed. On the other hand, the ISO exercise induced no significant changes in these parameters.

In the SSC condition, the decreased maximal torque developing capacity at exhaustion remained one

hour and even one day following the exhausting exercise. The circumference of the lower extremity became larger significantly at exhaustion as compared with the pre-exercise values and remained higher one hour and one day after the exercise. The pressure threshold for pain in the medial head of the gastrocnemius muscle and the muscle-tendon junction of the triceps surae muscle became significantly lower compared with pre-exercise value one hour or one day following the exercise. Muscle pain evaluated using visual analog scale fluctuated and the higher value was observed at exhaustion and one day after SSC exercise. In the ISO condition, no significant changes in these parameters were observed.

The results of the present study indicated that the SSC exercise had more profound effects on contractile properties, myo-electrical signals and injury-related parameters than the ISO exercise. Furthermore, the results suggest that, even in a relatively small number of repetitions, repeated heel-raise, a typical SSC exercise, induces a slight muscle injury.

Key words; heel-raise , stretch-shortening cycle (SSC) , muscle injury

I . 緒言

骨格筋の収縮様式は、生理学的には、等尺性収縮、短縮性収縮および伸張性収縮に分類される。しかし、日常生活やスポーツ活動中においては純粋な等尺性収縮や等張性収縮のみで運動が遂行されることはほとんどなく、等尺性収縮、短縮性収縮および伸張性収縮が複雑に組み合わせられて張力を発揮する場合が多い。その例として、伸張性収縮から瞬時に短縮性収縮へと切り変わる伸張－短縮サイクル(SSC:stretch shortening cycle)と呼ばれる収縮様式がある。SSCでは、伸張反射と弾性エネルギーの利用により、短時間でより大きな力を発揮することができる(マルガリア 1978 ; Komi 2003)。

SSC 運動における筋疲労に関するこれまでの研究では、ランニングが多く用いられてきた(Avela et al. 1999 ; Millet et al. 2002 ; Millet et al. 2003)。また、特別に製作した傾斜約 25° のスレッジを利用した連続リバウンドジャンプも Komi のグループによって用いられてきた(堀田 2000;Horita et al. 2003;Nicol & Komi 2003)。なお、これまでの研究における運動負荷の時間は、ランニングでは 30 分以上から数時間(Avela et al. 1999 ; Millet et al. 2002 ; Millet et al. 2003), リバウンドジャンプでは、3 分から 30 分が多かった(Horita et al. 2003;Kuitunen et al. 2002;Nicol et al. 2003)。一方、通常 1 分程度の短時間で疲労困憊に陥る踵上げ運動のような単純な SSC 運動による疲労の影響を検討した研究は、これまで報告されていない。このような短時間で局所的な SSC 運動は、長時間継続される運動に比べ、SSC 固有の生理的特性がより明確に現れると考えられる。

そこで、本研究では、筋力トレーニングや筋力評価によく用いられている SSC 運動である踵上げ運動を疲労困憊まで行わせることが、下腿三頭筋の収縮特性及び損傷指標にどのような影響を及ぼすかについて検討することを目的とした。

II . 方法

被験者は、本研究の主旨および内容を説明し書面にて同意の得られた、下肢に整形外科的疾患のない健康男性 5 名(年齢 22.6±1.7 歳, 身長 170.7±1.9cm, 体重 64.8±4.5kg)とした。同一被験者に対して、

SSC 条件と等尺性収縮(ISO 条件)の 2 条件で疲労負荷をかけた。

SSC 条件では、前足部を台上に乗せた片脚立位踵上げ運動を 2 秒に 1 回のリズムで疲労困憊まで行わせた(図1)。一方 ISO 条件では、長坐位にて等尺性の足底屈運動を SSC 条件と同じ回数だけ行わせた(図2)。



図1. SSCの疲労負荷法(SSC条件)

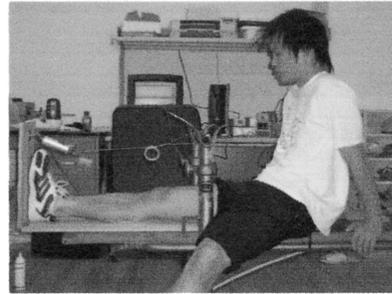


図2. 等尺性収縮の負荷法(ISO条件)

実験手順は、最初SSC条件の疲労負荷を行い、次いでISO条件で負荷を行った。なお、両条件は一週間の間隔を空け、測定肢も変更した。測定項目は、足底屈最大トルク値、超音波画像で求められる筋束長および羽状角、下腿周径囲の計測、主観的筋肉痛、圧痛閾値、血漿クレアチンホスホキナーゼ(CPK)活性及び血漿乳酸濃度とした。各項目の測定は、疲労負荷前、直後、1時間後、1日後の4回行った。加えて、両負荷条件時に筋電図測定を、SSC条件のみで足関節角度を測定した。

なお、表面筋電図の被験筋は、腓腹筋内側頭・外側頭、ヒラメ筋とし、電極間距離は 20mm とし、周波数帯域は15Hzから300Hzとした。得られた筋電波形の周波数解析には高速フーリエ変換法を用いた。分解能は 0.98Hz であった。周波数解析により得られたパワースペクトルより中間周波数(MDPF)を求めた。加えて、筋電図の積分値(IEMG)も算出した。

また、超音波画像はBモード法により表示し、プローブは腓腹筋内側頭の内外側幅の midpoint に置いた。得られた画像から、画像解析ソフト(ImageJ, NIH)を用いて筋束長および羽状角を測定した。

血漿クレアチンホスホキナーゼ(CPK)活性の測定には、市販のキットであるCPK II -テストワコー(和光純薬)を用いた。血漿乳酸濃度の測定には、LACTATE REAGENT(フナコシ TT5-73510)を使用し、YSI2327(5mM)を標準液として用いた。

統計は、ソフト Sigma Stat(Jandel Scientific)を用い、繰り返しのある二元配置分散分析(Two Way Repeated Measures ANOVA)を行った。分散分析で有意と判定された場合には、Student-Newman-Keulsの方法で多重比較を行った。

Ⅲ. 結果及び考察

A. 本研究で用いられた SSC 運動である片脚踵上げ運動の特徴

踵上げ運動は、筋力トレーニングの種目として行われる他、筋力評価においてもよく用いられている。例えば、徒手筋力検査法においては、床面より片脚踵上げ運動20回以上を足底屈筋群のグレード

5(Normal)と判定している(Hislop & Montgomery 2003)。完全な踵持ち上げ回数に関しては、アメリカ人の正常人で25回、日本人の健常成人においては右20回、左14回と報告されている(Lunsford & Perry 1995;山田ら 2000)。

本研究のSSC条件において疲労負荷に用いた踵上げ運動は、前足部を台上に乗せた姿勢で行われた。このため、踵を下ろしたときに足関節背屈位となって足関節の可動域が増し、一般的に行われている床面からの踵上げ運動よりも負荷強度が高かった。それにもかかわらず、本実験の被験者における疲労困憊までの踵上げ回数は 28.6 ± 4.0 回と日本人の健常成人の平均値を上回った。これは、本研究におけるすべての被験者は、スポーツ歴を有し、一般人よりも骨格筋がよく鍛錬されていたためと考えられる。

SSC条件における疲労負荷の時間帯を、負荷開始から疲労困憊までの反復回数(時間)を基に前期、中期、後期に分け、筋電図中間周波数を求めた。中間周波数は、SSC条件とISO条件との間に有意な差が見られた($P < 0.05$)。SSC条件では特に腓腹筋内側頭において、中間周波数は前期から中期、後期へと低下し続けた(図3)。この傾向は、ヒラメ筋及び腓腹筋外側頭でも認められたが、その程度は腓腹筋内側頭よりも少なかった。ISO条件では、いずれの筋あるいは測定部位においても、中間周波数の時間帯に伴う変化はほとんど見られなかった。

筋電図積分値については、SSC条件中の伸張局面(EC)では変化がなかったが、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭で短縮局面(CC)において増加傾向が見られた。また、ヒラメ筋では、後期には前期と比べて28.7%高い積分値を示した($P < 0.05$)(図4)。なお、筋電図積分値は腓腹筋内側頭、ヒラメ筋、腓腹筋外側頭の順に高かった。

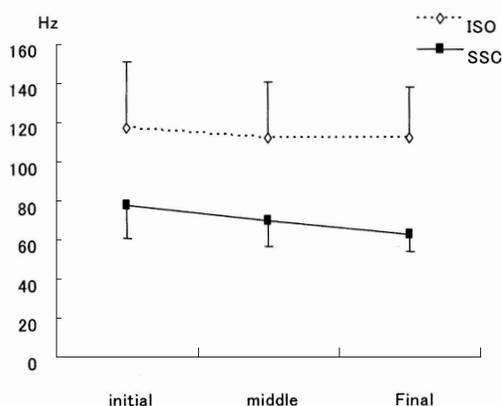


図3. 疲労負荷中のMDPF(腓腹筋内側頭)の変化

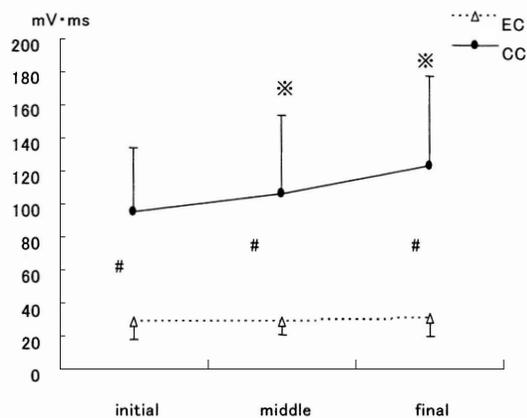


図4. 疲労負荷中のIEMG(ヒラメ筋)の変化

※ $P < 0.05$ vs. initial, # $P < 0.05$ EC vs. CC

今回の踵上げ動作は、膝伸展位で行っており、二関節筋である腓腹筋がより働き、また母趾球支持によるため、主に腓腹筋内側頭が他の線維に比べ選択的に活動し、疲労したものと考えられる。それを補償するためにtype I線維のヒラメ筋の活動が増加したものと考えられる。

B. 疲労負荷前から負荷1日後までの各測定指標の経時的変化

SSC条件で疲労負荷により低下した足底屈最大トルク値は、負荷直後、1時間後及び1日後において

も疲労負荷前の値に比べて有意に低下したままであった($P < 0.05$)(図5)。逆に、下腿周径囲は直後に増大し、その後、負荷1時間後及び1日後において徐々に低下傾向があったが、疲労負荷前の値に比べると有意に高い値を示した($P < 0.05$)(図6)。

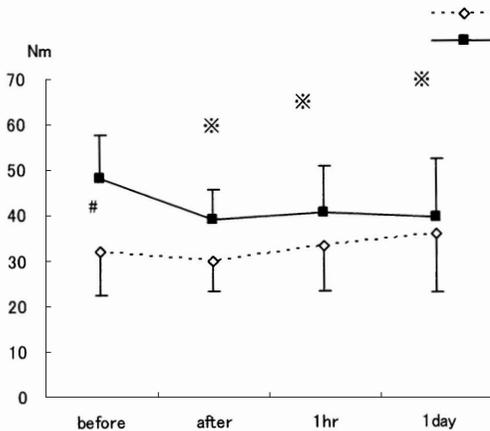


図5. 疲労負荷に伴う足底屈最大トルク値の変化
※ $P < 0.05$ vs. before, # $P < 0.05$ SSC vs. ISO

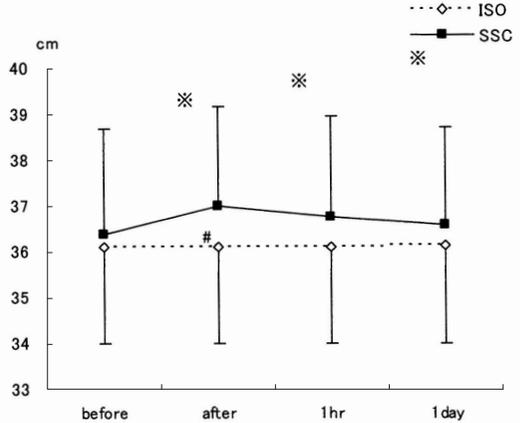


図6. 疲労負荷に伴う下腿周径囲の変化

SSC条件において、筋束長は、疲労負荷前に比べ直後、1時間後に減少傾向を示したが、有意な経時的変化は見られなかった。一方、羽状角は、疲労負荷前に比べ直後、1時間に有意な増大を示した($P < 0.05$)。

腓腹筋内側頭における圧痛閾値は、SSC条件では、疲労負荷前に比べて1日後に有意に低下し($P < 0.05$)、下腿三頭筋腱移行部における圧痛閾値は1時間後及び1日後に有意に低下した($P < 0.05$)。腓腹筋外側頭は、疲労負荷前に比べると低下を示したが、有意な経時的変化は見られなかった。筋線維別では、腓腹筋内側頭がより収縮したことが伺え、また、筋腱移行部の伸張が今回のSSC運動に関与したものと考えられる。

主観的筋肉痛の程度は、SSC条件では、疲労負荷前に比べて直後に有意に上昇した後($P < 0.05$)、1時間後に一旦疲労負荷前の値まで低下した。しかし、1日後には疲労負荷前の値よりも有意に高い値となった($P < 0.05$)(図7)。SSC条件による直後の痛みは急性疼痛であり、血流障害と筋内圧上昇によるものと思われる。一方、1日後における筋痛は、SSC運動によって生じた筋損傷に起因する遅発性筋痛の可能性が高い。

血漿乳酸濃度は、SSC条件では、疲労負荷前に比べ直後に有意な上昇が見られた($P < 0.05$)(図8)。一方、CPK活性は、疲労負荷前に比べ、SSC条件とISO条件とも有意な経時的変化は見られなかった。ISO条件では、血漿乳酸濃度、CPK活性とも、有意な経時変化は認められなかった。SSC条件においてCPK活性に有意な経時的変化が見られなかったことには、本研究の被験者が比較的良好に鍛錬された者であったことと関連する可能性がある。しかし、踵上げ運動は主にSSCで構成されるが、疲労困憊まで行った場合でも生じる筋損傷は軽度であり、このためCPK活性に有意な変化が認められなかったと考えられる。

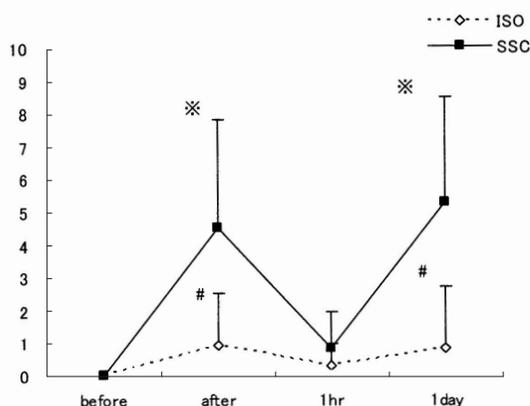


図7. 疲労負荷に伴う主観的筋肉痛レベルの変化

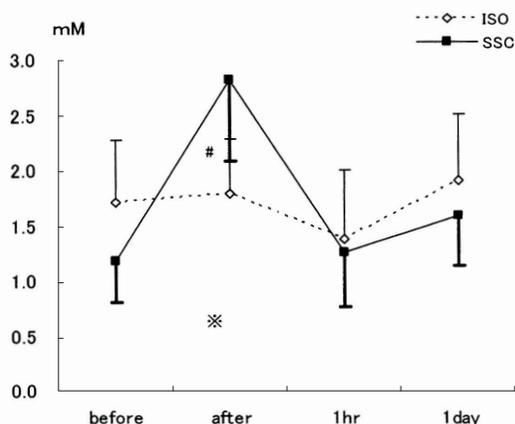


図8. 疲労負荷に伴う血漿乳酸濃度の変化

IV. まとめ

- 1) 本研究では、筋力トレーニングや筋力評価によく用いられている SSC 運動である踵上げ運動を疲労困憊まで行わせることが、下腿三頭筋の収縮特性及び損傷指標にどのような影響を及ぼすかについて検討した。
- 2) 被験者は、下肢に整形外科的疾患のない健常男性 5 名とした。同一被験者に対して、SSC 条件と等尺性収縮(ISO 条件)の 2 条件で疲労負荷をかけた。SSC 条件では片脚立位踵上げ運動を 2 秒に 1 回のリズムで疲労困憊まで行わせた。一方 ISO 条件では、等尺性の足底屈運動を SSC 条件と同じ回数だけ行わせた。
- 3) SSC 条件において、被験者は平均 28.6 回すなわち約 57 秒で疲労困憊に陥った。疲労困憊時には、足底屈最大トルクの有意な低下および血漿乳酸濃度の有意な上昇が見られた。また、この低下には、筋電図中間周波数の減少傾向を伴った。一方、ISO 条件ではこれらの測定項目に疲労負荷による変化は見られなかった。
- 4) SSC 条件で疲労負荷により低下した足底屈最大トルク値は、負荷 1 時間後及び 1 日後においても疲労負荷前の値に比べて低下したままであった。逆に、下腿周径囲は直後に増大し、その後、負荷 1 時間後及び 1 日後において徐々に低下傾向があったが、疲労負荷前の値に比べると有意に高い値を示した。腓腹筋内側頭における圧痛閾値は疲労負荷前に比べて 1 日後に有意に低下し、下腿三頭筋腱移行部における圧痛閾値は 1 時間後及び 1 日後に有意に低下した。主観的筋肉痛の程度は、疲労負荷前に比べて直後に有意に上昇した後、1 時間後に一旦疲労負荷前の値まで低下した。しかし、1 日後には疲労負荷前の値よりも有意に高い値となった。全ての測定項目において ISO 条件では、有意な経時変化は認められなかった。
- 5) SSC 条件は ISO 条件に比べ、筋張力発揮能力、筋放電及び筋損傷指標に対しより顕著な影響があった。さらに、今回の SSC 条件においては、負荷後 1 日後でも完全には負荷前の値には回復しない項目が多く見られた。

6) 本研究の結果は、SSCで構成される踵上げ運動は短時間であっても軽度な筋損傷を生じさせることを示唆する。

V. 文献

Avela J, Kyrolainen H, Komi PV, Rama D. Reduced reflex sensitivity persists several days after long-lasting stretch-shortening cycle exercise. *J Appl Physiol.*(1999), 86(4) : 1292-1300

Hislop HJ, Montgomery J. 新・徒手筋力検査法(第7版), 津山直一 訳. 協同医書出版社, 東京 (2003), pp.228-235

堀田朋基. 伸張から短縮への繰り返しジャンプによる疲労の影響. *体育の科学* (2000), 50(6) : 452-458

Horita T, Komi PV, Hamalainen I, Avela J. Exhausting stretch-shortening cycle (SSC) exercise causes greater impairment in SSC performance than in pure concentric performance. *Eur J Appl Physiol.* (2003),88(6) : 527-534

Komi PV. Stretch-shortening cycle. In: *The Encyclopaedia of Sports Medicine III. Strength and Power in Sport*, 2nd. edition, Blackwell Scientific Publications. (2003), pp.184-202.

Kuitunen S, Avela J, Kyrolainen H, Nicol C, Komi PV. Acute and prolonged reduction in joint stiffness in humans after exhausting stretch-shortening cycle exercise. *Eur J Appl Physiol.* (2002),88(1-2) : 107-116

Lunsford BR, Perry J. The standing heel-rise test for ankle plantar flexion: criterion for normal: *Phys Ther.* (1995),75(8) : 694-698

マルガリア R. ヒトの歩・走運動の力学, 金子公有 訳 身体運動のエネルギー, ベースボールマガジン社, 東京 (1978), pp.90-166

Millet GY, Lepers R, Maffiuletti NA, Babault N, Martin V, Lattier G. Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *J Appl Physiol.* (2002),92(2) : 486-492

Millet, G. Y., V. Martin, G. Lattier, and Y. Ballay. Mechanisms contributing to knee extensors strength loss after prolonged running exercise. *J Appl Physiol.* (2003),94 : 193-198

Nicol C, Komi PV. Stretch-shortening cycle fatigue and its influence on force and power production. In: *The Encyclopaedia of Sports Medicine III. Strength and Power in Sport*, 2nd. edition, Blackwell Scientific Publications. (2003), pp.203-228

Nicol C, Kuitunen S, Kyrolainen H, Avela J, Komi PV. Effects of long- and short-term fatiguing stretch-shortening cycle exercises on reflex EMG and force of the tendon-muscle complex. *Eur J Appl Physiol.* (2003),90(5-6) : 470-479

山田幸信, 藤澤宏幸, 高橋善雄. 健康人における立位踵上げテストの検討. *理学療法学* (2000),27(2) : 43-47 (2007年10月5日受理)

