

スロースピードの自重スクワットによる疲労困憊時の生理的応答

八田有洋^{*1}・櫻井克明^{*2}・山田 洋^{*3}・小河原慶太^{*3}・内山秀一^{*3}

Physiological responses to fatiguing squat exercises using slow speeds

by

Arihiro Hatta, Katsuaki Sakurai, Hiroshi Yamada, Keita Ogawara and Shuichi Uchiyama

Abstract

The aim of this study was to investigate acute physiological responses to fatiguing squat exercises using different movement speeds (normal speed vs. slow speed). Six healthy young adults participated in this study. The subjects performed two types of squat exercises using their own bodyweight after a seven-day interval: a normal-speed squat exercise (NS: 1 s lifting and 1 s lowering) and a slow-speed squat exercise (SS: 3 s lifting and 3 s lowering). Subjects in each exercise repeated the movements at constant speed and frequency with the aid of a metronome until they were no longer able to continue. Electromyograms (EMGs) were recorded from the right vastus lateralis (VL), biceps femoris (BF), tibialis anterior (TA), and medial gastrocnemius (MG) during each squat exercise. In addition, blood lactate concentration, heart rate, and blood pressure were measured before and immediately after exercise. In the early phase of each squat exercise, EMGs of VL and TA activation levels were significantly lower during SS than during NS ($p < 0.001$), whereas no such changes were observed in the late phase of each squat exercise. Immediately after SS, both blood lactate concentration and heart rate were significantly lower than those after NS ($p < 0.05$). However, there was no significant difference in blood pressure after both SS and NS. Physiological responses and muscle activation levels appear altered by different movement speeds.

I. 緒言

筋発揮張力維持法を用いたスロートレーニングは、低負荷強度であっても筋肥大^{1,2)}と筋力増加^{1,2,3,4)}が認められており、運動のスピードを変

化させることにより、通常の筋力トレーニングとほぼ同等の効果が得られることが明らかにされた。特に、自重によるスクワット動作の場合、筋活動水準は最も活動している筋で等尺性最大随意収縮(MVC: maximum voluntary contraction)の約

* 1 東海大学体育学部生涯スポーツ学科

* 2 東海大学大学院体育学研究科修士課程

* 3 東海大学体育学部体育学科

30 %に相当する⁵⁾。近年、中高年者を対象に自重スクワット運動を16週間実施し、介入後に膝伸展筋力が有意に増加することが報告された³⁾。本来、筋肥大や筋力増加のトレーニング効果を得るには60 % MVC以上、あるいは1回最大挙上重量(1 RM: repetition maximum)の65 %に相当する65 % 1 RM以上の強度が必要であることを考慮すると、スロートレーニングはトレーニング初心者やリハビリテーションとして⁶⁾、さらに、中高年者や心血管疾患リスク保持者にとって有効なトレーニング法である^{2,3)}。

一方、自重負荷を用いた一過性のスクワット運動に関して、スロートレーニングと通常トレーニングの動作速度の違いが、疲労困憊時の生理的応答に及ぼす影響について詳細に検討した報告は見られない。本研究では、動作速度の異なる自重負荷によるスクワット運動の疲労困憊時の生理的応答について、筋電図及び生理的指標を用いて比較検討した。

Ⅱ. 研究方法

1. 被験者

被験者は健康な大学生男女6名(年齢: 21.9 ± 0.6 歳, 身長: 165.2 ± 3.6 cm, 体重: 61.1 ± 3.4 kg)であり、本研究の内容と趣旨を説明し、実験参加の同意を得た。本研究は、東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の承認を得て行われた(承認番号: 16030)。

2. スクワット運動

被験者は、動作速度の異なる2種類のスクワット運動(通常トレーニング, スロートレーニング)を実施し、実施順序による影響を排除するため、7日以上間隔を開けてカウンターバランスをとった。スクワット運動を実施する際、足は肩幅に広げ、つま先はまっすぐ平行にして下降の際には膝関節を90度屈曲させた。60回/分のテンポにメトロノームを設定し、いずれのスクワット運動も疲労困憊まで実施し、メトロノームのテンポに合わせてスクワット運動ができなくなった時点疲労困憊とした。

1) 通常スクワット

通常トレーニング(以後、通常トレ)では、60回/分テンポのメトロノームのリズムに合わせて1秒で下降(遠心性収縮)し、次の1秒で上昇(求心性収縮)するよう指示した。通常トレの下降相では膝関節を90°屈曲させ、上昇相では膝を完全に伸展させた。

2) スロースクワット

スロースクワット(以後、スロトレ)では、60回/分テンポのメトロノームのリズムに合わせて3秒で下降(遠心性収縮)し、3秒で上昇(求心性収縮)するよう指示した。スロトレの下降相では膝関節を90°屈曲させ、上昇相では石井ら^{1,2,3,7)}が推奨する方法に基づき膝を完全に伸展させないよう指示した。膝を完全伸展させないことでより厳密に筋発揮張力を維持することが可能となり、スロートレーニングの効果を高めることが期待される。スロトレ実施の際には、呼吸法も取り入れ、下降時にはゆっくりと息を吸い、上昇時にゆっくりと息を吐く呼吸法⁷⁾を用いた。

3. 測定手順

1) 筋電図

筋電図は、BioLog DL-3000(S&ME社製)を用いて記録し、スクワット運動中は左右差が認められないと仮定して、利き足と非利き足の区別なく、被験筋は右下肢の外側広筋(vastus lateralis: VL)、大腿二頭筋(biceps femoris: BF)、腓腹筋内側(medial gastrocnemius: MG)、前脛骨筋(tibialis anterior: TA)とした。各被験筋の皮膚表面をアルコール清拭綿で処理した後にActive電極(DL-141, S&ME社製)を筋腹に貼付し、筋電図を記録した。スクワット運動遂行前に各被験筋のMVCを記録した。また、スクワット運動時の下降相と上昇相を判別するため、ゴニオメーター(S700, 株式会社フォーアシスト)を右膝外側に装着し、膝関節角度を計測した。

2) 血中乳酸濃度

血中乳酸濃度は、ラクテート・プロ2(アークレイ)を用いて測定し、安静時(運動前)とスクワット運動直後に単回使用自動ランセット(ニプロ)を用いて指先より穿刺し、血液を約5μl採取

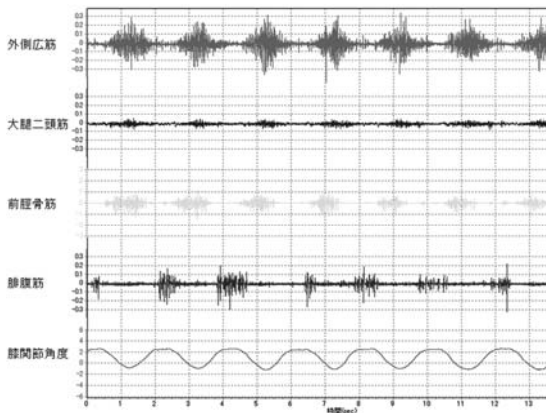


図1 通常トレ前半の筋電図波形

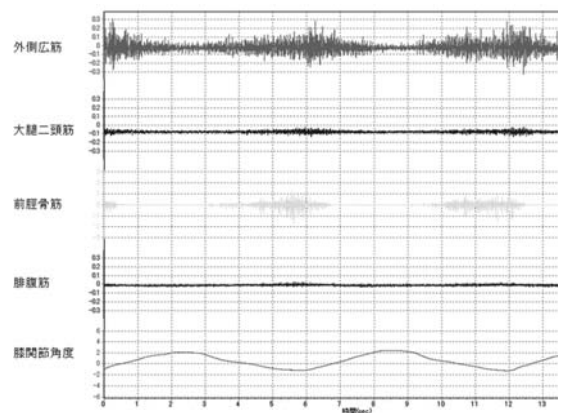


図2 スロトレ前半の筋電図

した。

3) 血圧及び心拍数

血圧及び心拍数は、安静時（運動前）とスクワット運動直後にオムロンデジタル自動血圧計（HEM-637IT, オムロン）を左手首に装着し、心臓位で測定した。

Ⅲ. 解析及び統計処理

筋電図のサンプリング周波数は 1kHz で記録し、筋電図のデータをフィルタ処理後に全波整流を行った。各筋の MVC は最大値を基準として、前後各 5 ms を含む区間の平均振幅を正規化し、スクワット運動中の各筋の活動水準を相対値（% MVC）として評価した。

スクワット運動の下降・上昇の 1 周期を分析区間とした。スロトレ、通常トレのそれぞれ前半（疲労前）と後半（疲労困憊直前）の 5 回試行分の筋電図波形を加算平均し、Wilcoxon 符号付き順位検定法を用いて分析を行った。血中乳酸濃度、血圧、心拍数については、動作速度（通常トレ、スロトレ）と時間（運動前、運動直後）の二要因反復測定分散分析を行った。両要因間で交互作用が認められたときは、Bonferroni の下位検定を行った。統計ソフトは、IBM 社製 SPSS statistics 21 を用いた。

Ⅳ. 結果

1. 筋電図

図1と図2は、それぞれ通常トレの前半とスロトレの前半の筋電図の典型例を示す。疲労前の前半において、通常トレの外側広筋と前脛骨筋の活動水準が、スロトレのそれよりも有意に大きい値を示した（表1, $p < 0.001$ ）。疲労困憊直前の後半においては、通常トレとスロトレの間に差は得られなかった。一方、大腿二頭筋と腓腹筋内側の活動水準については、前半、後半ともに通常トレとスロトレの間に差は得られなかった（表1）。

2. 血中乳酸濃度

血中乳酸濃度は、動作速度（通常トレ、スロトレ）の要因で主効果が得られた（ $F = 8.34$, $p < 0.05$ ）。また、時間（運動前、運動直後）の要因でも主効果が得られた（ $F = 77.66$, $p < 0.001$ ）。さらに、両要因間で交互作用が認められ（ $F = 4.09$, $p < 0.05$ ）、運動直後において、スロトレの血中乳酸濃度が通常トレのそれよりも有意に低い値を示した（表2, $p < 0.05$ ）。

3. 血圧及び心拍数

収縮期血圧と拡張期血圧は、時間（運動前、運動直後）の要因に主効果が得られたが、動作速度（通常トレ、スロトレ）の要因には主効果が得られなかった。また、両要因間で交互作用が認めら

表 1 通常トレとスロトレの前半と後半における各被験筋の活動水準 (% MVC)

被験筋	前半		後半	
	通常トレ	スロトレ	通常トレ	スロトレ
外側広筋	26.8±11.2***	21.9±7.5	30.1±11.9	26.9±7.2
大腿二頭筋	20.1±10.6	23.3±9.2	21.3±10.8	23.2±9.2
前脛骨筋	18.8±6.8***	13.0±4.7	14.1± 8.2	11.9±6.3
腓腹筋	11.3±8.8	9.8±9.0	10.8± 5.1	11.3±9.0

***p<0.001: 通常トレ vs. スロトレ

表 2 通常トレとスロトレの運動前後における血中乳酸濃度, 収縮期血圧, 拡張期血圧及び心拍数の変動

測定項目	運動前		運動直後	
	通常トレ	スロトレ	通常トレ	スロトレ
血中乳酸濃度 (mmol/L)	1.8±0.5	1.8±0.5	9.2±3.0###	5.9±1.2###.*
収縮期血圧 (mmHg)	102.8±6.6	98.3±6.5	119.2±13.2##	112.7±15.5##
拡張期血圧 (mmHg)	59.5±4.2	56.7±6.1	68.2±12.5##	66.8±8.2##
心拍数 (拍/分)	72.0±11.9	73.8±7.7	140.0±12.7###	106.7±9.1###.**

##p<0.01, ###p<0.001: 運動前 vs. 運動直後

*p<0.05, **p<0.01: 通常トレ vs. スロトレ

れなかった。

心拍数は、動作速度（通常トレ，スロトレ）の要因で主効果が得られた（ $F=12.69$, $p<0.05$ ）。また、時間（運動前，運動直後）の要因においても主効果が得られた（ $F=175.82$, $p<0.001$ ）。さらに、両要因間で交互作用が認められ（ $F=12.29$, $p<0.05$ ），運動直後において，スロトレの心拍数が通常トレのそれよりも有意に低い値を示した（表 2, $p<0.01$ ）。

V. 考察

本研究の目的は、動作速度の異なるスクワット運動の疲労困憊時の生理的応答について明らかにすることであった。

1. 筋電図

スロトレと通常トレの動作速度の違いにおいて差が得られたのは、スクワット前半の外側広筋と

前脛骨筋であった。大腿二頭筋と腓腹筋については、動作速度の違いに差は得られなかった。スロートレーニングは、通常の筋力トレーニングよりも筋活動量が小さく¹⁾，運動開始時には type I 線維のみが活動しているが，運動の持続時間が長くなると，徐々に type I 線維のみでは負荷に抗し得なくなり，大きな張力を発揮できる type II 線維も同時に活動するようになると考えられている^{1,6)}。本研究においても通常トレの前半において，速筋線維の割合が高い外側広筋の活動水準がスロトレよりも有意に大きい値を示した。一方，疲労困憊までスクワット運動を持続させると，後半ではスロトレにおいても type II 線維が動員されて筋活動量も増加し，動作速度の違いに差は得られなかったと考えられる。

高井ら⁵⁾は，自重によるスクワット動作における筋活動水準を調べ，下肢筋群で最も高い筋活動水準を示したのは前脛骨筋であったと報告してい

る。本研究では、スロトレと通常トレのいずれにおいても外側広筋の活動水準が最も大きい値を示し、順に大腿二頭筋>前脛骨筋>腓腹筋であった。また、スクワット運動中のハムストリングスの筋活動は、ほとんど認められない⁸⁾とするもの、大腿四頭筋とわずかに共収縮することで脛骨を後方に引っ張り、膝関節の安定性を高める役割をもつ^{8,9)}などさまざまな報告がある。本研究では、通常トレとスロトレにおける大腿二頭筋の活動水準は、約 20~23 % MVC 程度であった。スクワット中の筋活動に関して、被験筋の活動水準の見解が一致しない要因として、運動負荷強度や運動速度、運動中の関節角度など運動様式や測定方法の違いが考えられる。

2. 血中乳酸濃度

本研究では、運動直後の疲労困憊時において、スロトレの血中乳酸濃度が通常トレのそれよりも有意に低い値を示した。加圧トレーニングやスロトレでは、筋内が低酸素状態となり、無酸素性代謝物である乳酸や水素イオンが多量に発生すると考えられており、血中乳酸濃度が大きく増加すること、成長ホルモン、テストステロンなどの内分泌系活性を亢進させる^{2,10)}。

スロトレと同じ負荷強度の通常法では、血中乳酸濃度はわずかな変動しか生じない¹⁾。Tanimoto et al.²⁾は、55~60 % 1 RM の運動負荷強度で 3 秒遠心性収縮 + 3 秒求心性収縮のスロトレと 80~90 % 1 RM の運動負荷強度で 1 秒遠心性収縮 + 1 秒求心性収縮の通常トレによる一過性運動直後の血中乳酸濃度を測定し、スロトレと通常トレのいずれも血中乳酸濃度が 10 mmol/L 以上の高値を示し、両運動様式に差は得られなかったと報告している²⁾。一方、Hunter et al.¹¹⁾は、スーパースロートレーニング（4 秒遠心性収縮 + 10 秒求心性収縮）と通常のレジスタンストレーニング直後の血中乳酸濃度を比較し、スーパースロートレーニング後の血中乳酸濃度が有意に低い値を示したと報告しており、先行研究において見解は一致していない。本研究において、自重スクワットを疲労困憊まで実施すると、通常トレのスクワット回数がスロトレよりも大幅に多く、筋活動量

の絶対量が大きいことも血中乳酸濃度が有意に高値を示した要因であると考えられる。

3. 血圧及び心拍数

本研究では、スクワット運動の前後で収縮期血圧と拡張期血圧は、それぞれ有意に上昇したが、高負荷強度の筋力トレーニング時のような著しい急上昇はみられなかった。また、スロトレと通常トレの動作速度の違いにおいて収縮期血圧と拡張期血圧の変動に差は得られなかった。運動中の血圧応答は、運動強度や持続時間及び筋活動量と関連があることが知られている^{12,13)}。本研究は、いずれも自重負荷によるスクワット運動であり、運動強度と筋活動量も低いことが結果に反映されたものと考えられる。

本研究の運動直後において、スロトレの心拍数が通常トレよりも有意に低い値を示し、先行研究^{11,14)}と一致するものであった。心拍数は、呼吸と大きな関わりがあり、吸気時には副交感神経活動が抑制されて心拍数が増加し、呼気時にはその抑制が解除されることにより心拍数が減少するという呼吸リズムがみられる^{15,16)}。本研究のスロトレでは一定の呼吸法を設定し、3 秒間かけて吸気し、3 秒間かけて呼気を行ったため、通常トレと比較して呼気相が長いことが副交感神経系を亢進させ、心拍数の増加が抑制された可能性が考えられる。

VI. まとめ

スロースピードの自重スクワットは、通常スピードの自重スクワットよりも疲労困憊時の血中乳酸濃度が低値を示し、呼気相の長い呼吸法を併用すると副交感神経系が亢進され、心拍数の著しい増加も生じないことから、若年の低体力者や女性などに適用可能な安全性の高い筋力トレーニング法であるといえる。

引用文献

- 1) Tanimoto M, Ishii N (2006) Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *J. Appl. Physiol.*, 100 : 1150-1157

- 2) Tanimoto M, Sanada K, Yamamoto K, Kawano H, Gando Y, Tabata I, Ishii N, Miyachi M (2008) Effects of whole-body low-intensity resistance training with slow movement and tonic force generation on muscular size and strength in young men. *J. Strength Cond. Res.*, 22 : 1926-1938
- 3) Watanabe Y, Tanimoto M, Oba N, Sanada K, Miyachi M, Ishii N (2015) Effect of resistance training using bodyweight in the elderly : Comparison of resistance exercise movement between slow and normal speed movement. *Geriatr. Gerontol. Int.* 2015 doi : 10.1111/ggi.12427
- 4) 岡本孝信・増原光彦・生田香明 (2007) スローレジスタンストレーニングは動脈コンプライアンスを低下させる？第22回健康医科学研究助成論文集. pp.7-15
- 5) 高井洋平・杉崎範英・竹下香寿美・川上泰雄・福永哲夫 (2005) 自重によるシットアップ及びスクワット動作における筋活動水準. *スポーツ科学研究*. 2, pp.9-19
- 6) 真鍋芳明・横澤俊治・島田一志・尾縣 貢 (2004) スクワットにおける運動速度変化および反動動作の有無が股関節と膝関節まわりの筋の活動および関節トルクに与える影響. *体力科学*. 53, pp.425-442
- 7) 石井直方 (2012) スロートレーニングで健康づくり：筋肉の力を緩めずゆっくり動くことがポイント. いつでも元気. 245 (<https://www.min-iren.gr.jp/?p=7163>)
- 8) 真鍋芳明・横澤俊治・尾縣 貢 (2004) 動作形態の異なるスクワットが股関節と膝関節まわりの筋の活動および関節トルクに与える影響. *体力科学*. 53, pp.321-336
- 9) Isear JA, Erickson C, Worrell TW (1997) EMG analysis of lower extremity muscle recruitment patterns during an unloaded squat. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29 : 532-539
- 10) Takarada Y, Nakamura Y, Aruga S, Onda T, Miyazaki S, Ishii N (2000) Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *J. Appl. Physiol.* 88 : 61-65
- 11) Hunter GR, Seelhorst D, Snyder S (2003) Comparison of metabolic and heart rate responses to super slow vs. traditional resistance training. *J. Strength Cond. Res.* 17 : 76-81
- 12) Buck JA, Amundsen LR, Nielsen DH (1980) Systolic blood pressure responses during isometric contractions of large and small muscle groups. *Med. Sci. Sports Exerc.* 12 : 145-147
- 13) Lewis SF, Snell PG, Taylor WF, Hamra M, Graham RM, Pettinger WA, Blomqvist CG (1985) Role of muscle mass and mode of contraction in circulatory responses to exercise. *J. Appl. Physiol.* 58 : 146-151
- 14) Wickwire PJ, McLester JR, Green JM, Crews TR (2009) Acute heart rate, blood pressure, and RPE responses during super slow vs. traditional machine resistance training protocols using small muscle group exercises. *J. Strength Cond. Res.*, 23 : 72-79
- 15) 鈴木郁子 (編著) (2015) やさしい自律神経生理学, 中外医学社, p.78
- 16) 小谷 潔・古川健太・高増 潔 (2003) 呼吸情報に着目した高精度な呼吸性洞性不整脈の抽出法. *生体医工学*, 41, pp.11-18