

【研究報告】

筋発揮張力維持法実施における筋への触圧覚刺激の変化が 血中乳酸値に与える影響

堀内 俊樹¹⁾, 西田 裕介²⁾

1) 笛吹中央病院 リハビリテーション科

2) 聖隷クリストファー大学大学院 リハビリテーション科学研究科

E-mail : 10mr09@g.seirei.ac.jp

Low-intensity resistance exercise, with slow movement and tonic force generation enhances muscle coordination during tactile pressure stimulation

Toshiki Horiuchi¹⁾, Yuusuke Nishida²⁾

1) Fuefuki medical center, Department of rehabilitation

2) Department of Physiological Sciences for Physical Therapy, Rehabilitation Sciences, Seirei Christopher University

要旨

目的；理学療法において，筋力増強を目的とするプログラムは頻繁に処方されている．しかし，筋力増強運動は強度の違いなど効果は様々な報告が発表されている．本研究の目的は，効率よく筋収縮を促すための手段（運動条件の設定）を明らかにすることである．筋発揮張力維持法は，比較的低強度運動と言われていることから触圧覚刺激と融合し，血中乳酸値を測定することで生体反応から筋機能へ影響を及ぼす要因を検討した．方法；対象は整形外科的疾患の既往がない健常成人男性 15 名とした．筋発揮張力維持法は推奨されている運動方法で施行した．圧刺激（0, 30, 40, 50, 60mmHg）には水銀血圧計を用い，下腿最大膨隆部にカフを巻いた．安静 5 分終了後と各条件間の運動直後に血中乳酸値を測定した．結果；血中乳酸値は圧迫の上昇に伴い変化量も増加がみられた．0mmHg と 60mmHg の間では有意差が認められた（ $p<0.05$ ）．考察；乳酸は筋肉に対してエネルギー源の元と言われている．本研究の結果からも，代謝産物である乳酸の蓄積は筋力増強には欠かせないことが推測された．

キーワード：筋発揮張力維持法，触圧覚刺激，血中乳酸

Key Words : Low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation, tactile pressure stimulation, blood lactic acid

I. はじめに

ヒトの筋線維には、タイプの異なる数種類のものが存在しており、収縮速度が遅く疲労しにくい遅筋線維 (Type I) と収縮速度が速く疲労しやすい速筋線維 (Type II) に大別される。下腿三頭筋の筋線維タイプは腓腹筋、ヒラメ筋で異なる。腓腹筋は Type I 線維と Type II 線維の含有比率は共に 50% であり、ヒラメ筋の Type I 線維の割合は、前面 89%、後面 86.4% と Type I 線維が約 90% と圧倒的に多いことが報告されている¹⁾。Type I 線維は、酸化系活性も高いため酸化能力に優れ発揮張力は比較的小さいが疲労耐性は高い。Type II 線維は、解糖能力に優れ収縮速度が速く発揮する張力も大きい易疲労性である。Fukunaga et al.²⁾、Albert et al.³⁾ の報告からヒラメ筋は下腿の筋肉において最大であると言われている。

LST は、血管虚血しながらの低強度の筋力強化運動 (50% 1RM 未満) で、筋のサイズや力を増加させる。このような血流制限下での運動効果は、①局所的な乳酸などの無酸素性代謝産物が筋内へ蓄積し、成長ホルモンなどの内分泌活性が亢進、②低酸素環境による活性酸素種の産生、③低酸素環境における Type II 線維の付加的動員が挙げられる。LST における運動の効果は、持続した状態で活動筋が収縮され、低酸素状態になることである。また、外部から圧を加えなくても、高強度の筋力強化運動を行った時と同様の効果が期待される⁴⁻⁷⁾。現在、筋発揮張力維持法は、糖尿病のリスクを低下することができる⁸⁾と報告されている。

ヒトの感覚入力において、体節に用手接触すると、皮膚の感覚受容器が刺激される。皮膚の受容器の触・圧迫刺激は、それらの下にある筋を促通し、脊髄運動神経を興奮させるといわれ

ている⁹⁾。また、用手接触による筋腹への圧迫は、筋収縮の増大や動筋を刺激し運動を強化するといわれている¹⁰⁾。本研究において用手での圧迫は定量化が図れないため、血圧計のカフで代用し定量化を図った。カフを用いた先行研究では、運動中にカフ圧刺激を下肢で施行すると血中乳酸値が増加したと報告されている¹¹⁾。Sogaard et al.¹²⁾ は、水銀血圧計を用いて人為的に筋内圧を変化させることで、60mmHg の圧で EMG-RMS が 0mmHg と比較して高値を示すと報告している。

筋肉は、グリコーゲンからグルコースとなる反応を媒介するグルコース 6 リン酸がないため、血液中に放出されることがない。しかし、筋肉は、グリコーゲンを乳酸にして血液中の Type I、II 線維や心筋などにエネルギーの受け渡しができる¹³⁾といわれている。このように、筋肉でグリコーゲンから乳酸が産生されることは、エネルギーを他の組織へ配分することと同じである。乳酸は、運動中に筋内の血中乳酸濃度が上昇すると、その乳酸を取り込みエネルギーとして使用されるといわれている¹⁴⁾。また、乳酸の酸化は Type I 線維を中心に行われるとされている¹⁵⁾。

以上のことから、本研究で設定した LST と触圧覚刺激を融合させた運動様式は、type I 線維を多く含んでいるヒラメ筋に焦点を当てて実施しているため、乳酸の酸化に大きく関与し、また、LST と触圧覚刺激による低酸素状態の条件設定と合わせることで、さらに乳酸の産生を促すことができると考えられる。

II. 対象と方法

1: 対象

対象は整形外科的疾患の既往がない健常成人

男性 15 名 (平均年齢 26.2 ± 3.0 歳, 平均身長 170.3 ± 4.5 cm, 平均体重 64.9 ± 7.5 kg) とした。被験側は右下肢のヒラメ筋とした。全ての対象者に研究内容と倫理的配慮について説明し, 研究参加の同意を得た。

2: 方法

ヒラメ筋筋力の測定における測定機器は, BIODEX System 3 (酒井医療株式会社製) を用いた。測定肢位は, 股関節は代償動作が生じないように屈曲 90 度, 膝関節は腓腹筋の影響を除外するため屈曲 90 度, 足関節は筋腱複合体の弾性エネルギーの利用を除外するため底背屈 0 度とした (図 1)。

測定時間と回数は, 奈良ら¹⁶⁾ の等尺性収縮の筋力測定方法を参考にし, 検者は対象者に大きな声をかけ最大随意収縮 (Maximal Voluntary Contraction, MVC) を等尺性収縮にてヒラメ筋筋力を測定した。測定は 5 秒間を 3 回施行した。3 回の測定値から 50%MVC を計算し, 負荷強度とした。

LST は, 推奨されている運動方法⁴⁻⁷⁾ の 3

秒下ろし, 3 秒上げの動作を 1 回とし 8 回繰り返し返した。その際, カフによる触圧覚刺激を下腿最大膨隆部で圧迫し測定した。触圧覚刺激の強度は, 下肢血流と血中乳酸値および血圧変動に影響を及ぼすとされる 30 ~ 60mmHg のカフ圧を 10mmHg 単位で設定する 5 条件 (0, 30, 40, 50, 60mmHg) を設け, 測定順序はランダムに実施した。各条件間には 15 分間の休憩を挟んだ。

血中乳酸値はラクテート・プロセンサーを用いて使用した。使用方法は取扱説明書をもとに 1 条件後に施行した。

表面筋電図の導出方法として, 直径 10mm のディスク表面電極を用いた。電極の装着にあたっては, 剃毛後, 皮膚処理剤としてスキンピュア (日本光電) を使用し, 皮膚の角質を除去し, アルコール綿で十分に拭取り施行した。電極貼付箇所の同定として, SENIAN Project と表面筋電図マニュアルが推奨した下腿の遠位 1/2 でアキレス腱外側のヒラメ筋に筋線維の走行に沿って設置した^{17, 18)}。導出波形の再現性を得るため, 筋腹における神経支配帯の位置は,



図 1: BIODEX System3 による測定風景
姿勢: 股関節・膝関節屈曲 90°, 足関節底背屈 0°
カフ: 下腿最大周径が中心に来よう巻く

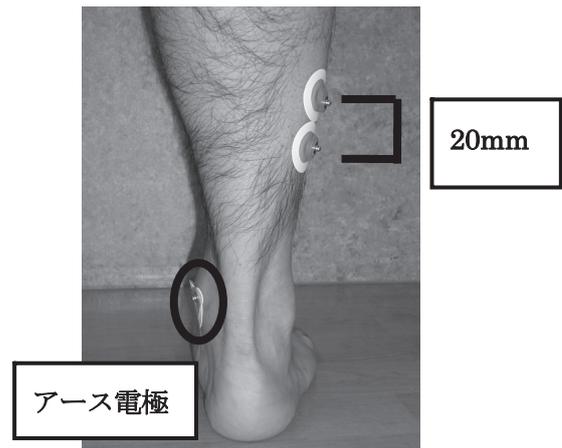


図 2: 電極貼付箇所
貼付箇所: 下腿の遠位 1/2 でアキレス腱外側のヒラメ筋に筋線維の走行に沿って設置
アース電極: 皮膚直下に筋肉が無い脛骨内果

表面筋電図に記載されている部位を参考に神経筋接合部を挟まないように貼付した¹⁹⁾。アース電極は皮膚直下に筋が無い脛骨内果に貼付した。双極誘導の電極間距離は、20mmとした(図2)。

また、筋電図は事前に安静レベルの振幅と最大随意収縮測定時の差が十分にあり筋出力の増大とともに筋電位振幅も増大しているか確認した。

表面筋電図計 MyoSystem 1200 (NORAKSON) を通してワイヤレスでパソコン上の表面筋電図解析ソフト MyoResearch XP (NORAKSON) 内にサンプリング周波数 1000Hz で連続的に記録した。

記録された波形を表面筋電図解析ソフト上で 3秒 + 3秒 = 6秒の運動を 8回で、48秒の運動の波形をマーカーで囲み解析した。波形を整流化し、量的要素の解析とされる、積分値を求めた。

データの代表値の一つとして分布の位置を示す平均値を求め、データのばらつきを確認に標準偏差を求めた。各測定において得られた指標について Shapiro-Wilk 検定を行い正規性に従うか確認した。各負荷強度から得られたデータの平均値の比較には、正規性の有無から、一元配置分散分析と Kruskal-Wallis 検定を用い差の検定を施行した。その結果から差がみられた場合、多重比較検定の Tukey の方法を用いて検討した。有意水準は危険率 5% 未満とした。統計解析には SPSS 15.0J for Windows を使用した。

Ⅲ. 結 果

全対象者の身体的特徴と MVC、安静時の血中乳酸値と血圧の結果を表 1 に示した。血中乳

酸値は、全ての対象者において 60mmHg で高い値を示した。統計学的検討の結果、0mmHg と比較して 60mmHg で有意に高い値を示した(図 3)。

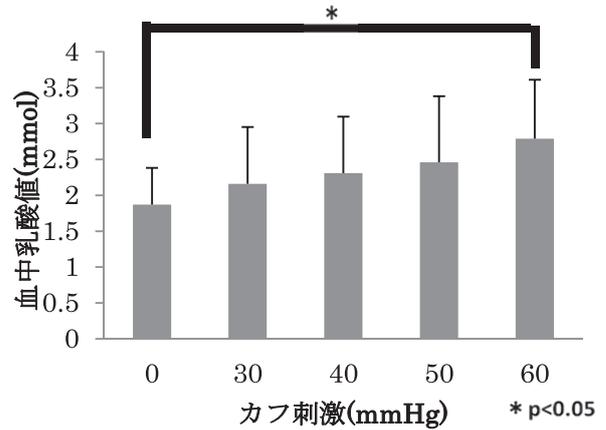


図 3：各条件間における血中乳酸値の比較

その他の比較では有意差は認められなかった。表面筋電図における量的解析の積分値は、全ての対象者において 60mmHg で高い値を示したものの、統計学的検討の結果では、0mmHg との比較において有意差は認められなかった(図 4)。

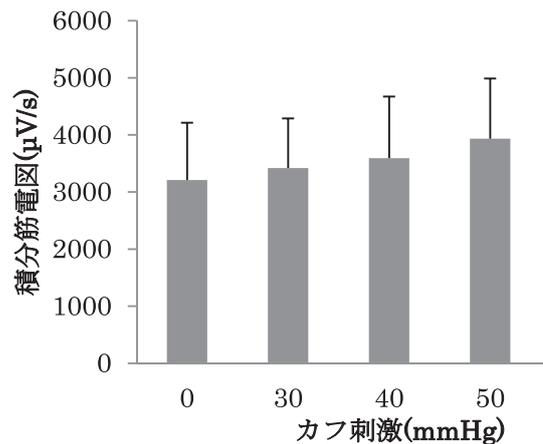


図 4：各条件間における積分値の比較

カフ圧の上昇に伴い段階的に増加がみられたが結果として差は認められなかった。

IV. 考 察

本研究では, LST と筋への触圧覚刺激を融合した運動において, 触圧覚刺激量の変化が血中乳酸値に及ぼす影響について検討した. その結果, 血中乳酸値は 0mmHg と比較した際, 60mmHg のカフ圧で有意に上昇する結果が得られた. 一方, 表面筋電図の量的解析では, 有意差は認められなかった.

異なる触圧覚刺激量における血中乳酸値の結果から, 全ての対象者において 0mmHg と比較し, 60mmHg で高い値を示した. Type I 線維が乳酸の酸化を積極的に行うという Brooks et al.¹⁵⁾ の報告からもわかるように, Type I 線維の含有量が多いヒラメ筋を運動様式に取り入れたことで, ヒラメ筋が運動中に筋内の乳酸を効率よく取り込み, エネルギー源として使用したものと考えられる. また, 谷本ら⁷⁾, Tanimoto et al.^{5,6)} は, LST の運動効果から, 局所的な乳酸などの無酸素性代謝産物が筋内へ蓄積すること, 血流制限による低酸素環境で活性酸素種の産生や Type II 線維の付加的動員が起こることを報告している. LST の効果は, 活動筋の持続的な筋収縮による運動形態が骨格筋内の低酸素環境を作り出すことにある. また, 筋内の低酸素環境は, 乳酸が蓄積しやすい状態である. 以上のように本研究における 60mmHg という触圧覚刺激量は, 筋内の低酸素環境を惹起できる刺激量であると考えられ, 血中乳酸値を効率よく上昇させる刺激量として適切な負荷量であることが示唆される. これまで疲労物質として捉えられていた乳酸は, 現在では筋肉に対してエネルギー源と言われていることから^{14,20)}, 代謝産物である乳酸の蓄積は筋収縮を促す上で重要な指標の一つであると考えられる.

表面筋電図を用いた積分値の結果では, 全ての対象者において 0mmHg と比較し, 60mmHg で高い値を示した. しかし, 統計学的には触圧覚刺激量による差は認められなかった. 理由として, データのばらつきの大きさが考えられる. 筋電図評価の特性上, 動員される筋線維 Type の種類や神経興奮の発火頻度の状況, 構造学的な筋配列などにより, データのばらつきが大きくなる特徴がある. また, 本研究における運動様式の設定が, 複合的な運動であったため, 単筋の要因のみを抽出できていない可能性が考えられる. LST 実施時における触圧覚刺激量である 5 条件 (0, 30, 40, 50, 60mmHg) をランダムに実施することや休憩を十分に挿入すること, データ測定手順の遵守など, ばらつきの要因の排除に対して十分に配慮したものの, 的確に要素を抽出することはできなかったと考えられる.

触圧覚刺激による運動の効果として, 先行研究では, 皮膚の受容器の触・圧迫刺激は, それらの下にある筋を促通し, 脊髄運動神経を興奮させると報告されている⁹⁾. また, 用手接触による筋腹への圧迫は, 筋収縮を増大や動筋を刺激し運動を強化するとい報告されている¹⁰⁾. しかし, 本研究において, 触圧覚刺激は下腿の最大膨隆部位であるためヒラメ筋だけでなく, 腓腹筋の促通や筋収縮の増大を引き起こしたと考えられる. さらに, 上記の運動形態に伴う筋線維の変化や発火頻度の考察からも, 統計学的に有意性がみられなかった理由として, 腓腹筋の影響を排除できなかった可能性がある. 今後は, 本研究を基にヒラメ筋だけでなく腓腹筋を考慮しながら実際にトレーニングを行うことで理学療法プログラムとして応用できると考えている.

Hakkinen et al.²¹⁾ は, 活動筋の収縮レベル

を次第に高めると、筋放電量が増加すると報告している。これは、各運動単位の発火頻度の増加と新たな運動単位の参加動員によるものとされている。このことは、本研究におけるLSTと触圧覚刺激を融合させた運動形態において、統計学的には有意性がみられなかったものの、筋に刺激を与えることは、筋収縮力を増加させ、その結果、筋力の強化につながる可能性が期待できると考えられる。

V. 引用文献

- 1) Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. : Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J Neurol Sci* Jan 18(1). 111-29. 1973.
- 2) Fukunaga T, Roy RR, Shellock FG, et al. : Specific tension of human plantar flexors and dorsiflexors. *J Appl Physiol* 80 (1). 158-65. 1996.
- 3) Albracht K, Arampatzis A, Assessment of muscle volume and physiological cross-sectional area of the human triceps surae muscle in vivo. *J Biomech* Jul 19 41 (10). 2211-8. 2008.
- 4) Takarada Y, Takazawa H, Sato, Y, et al. : Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *J Appl Physiol* Jun 88 (6). 2097-106. 2000.
- 5) Tanimoto, M., Ishii, N. : 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. 2006.
- 6) Tanimoto M, Sanada K, Yamamoto K, et al. : 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* Nov 22 (6). 1926-1938. 2008.
- 7) 谷本道哉, 大金朱音, 石井直方, 他 : 高齢者における筋発揮張力維持法 (LST) の筋力増強, 筋肥大効果および安全性の検証. 第24回健康医科学研究助成論文集, 71-80. 2009.
- 8) Grøntved A, Pan A, Mekary RA, et al. : Muscle-strengthening and conditioning activities and risk of type 2 diabetes : a prospective study in two cohorts of – US women. *Plos Med* Jan 11 (1). e1001587. 2014.
- 9) Hagbarth KE. : Excitatory and inhibitory skin areas for flexor and extensor motoneurons. *Acta Physiol Scand Suppl* 26 (94). 1-58. 1952.
- 10) Adler SS, Beckers D, Buck M. : PNF ハンドブック, クインテッセンス出版, 東京. 1997.
- 11) Nishiyasu T, Nagashima K, Nade ER, et al. : Human cardiovascular and humoral responses to moderate muscle activation during dynamic exercise. *J Appl Physiol* 88. 300-307. 2000.
- 12) Sogaard K, Orizio C, Sjøgaard G. : Surface mechanomyogram amplitude is not attenuated by intramuscular pressure. *Eur J Appl Physiol* Jan 96 (2). 178-84. 2006.
- 13) Belcastro AN, Bonen A. : Lactic acid removal rates during controlled and

- uncontrolled recovery exercise. *J Appl Physiol* 39. 932-936. 1975.
- 14) Bonen A, Heynen M, Hatta H. : Distribution of monocarboxylate transporters MCT1-MCT8 in rat tissues and human skeletal muscle. *Appl Physiol Nutr Metab* 31. 31-39. 2006.
- 15) Brooks GA, Fahey TD, White TP, et al. : *Exercise Physiology, Third Edition, Human Bioenergetics and Its Applications*. Mayfield. 2000.
- 16) 奈良勲, 岡西哲夫. : *筋力*. 医歯薬出版株式会社. 2009.
- 17) SENIAM (Surface EMG for Non-Invasive Assessment of Muscles) Project
- 18) 下野俊哉. : *表面筋電図マニュアル 基礎編*. 酒井医療 (株). 113-114. 2004.
- 19) 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 他. : *バイオメカニズム・ライブラリー表面筋電図*. 東京電機大学出版局. 2006.
- 20) Messonnier LA, Emhoff CA, Fattor J A, et al. : Lactate kinetics at the lactate threshold in trained and untrained men. *J Appl Physiol* Jun 114 (11). 1593-602. 2013.
- 21) Häkkinen K, Alen M, Kallinen M, et al. : Neuromuscular adaptation during prolonged strength training, detraining and re-strength-training in middle-aged and elderly people. *Eur J Appl Physiol* Sep 83 (1). 51-62. 2000.

【研究報告】

Low-intensity resistance exercise, with slow movement and tonic force generation enhances muscle coordination during tactile pressure stimulation

Toshiki Horiuchi¹⁾, Yuusuke Nishida²⁾

- 1) Fuefuki medical center, Department of rehabilitation
- 2) Department of Physiological Sciences for Physical Therapy, Rehabilitation Sciences, Seirei Christopher University

Abstract

Purpose: In physiotherapy, muscle-strengthening is frequently prescribed. However, to carry it out efficiently understanding how to achieve an adequate vital response is required. Therefore we combined high intensity training, low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation, and tactile pressure stimulation, to study the effects on muscle function and strength by measuring blood lactate levels. Method: Fifteen healthy adult men, without a history of orthopedic disease, were studied. A low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation was performed, and the average value was compared to a representative one. A cuff around the most bulbous part of the lower thigh was used for pressure stimulation at 0, 30, 40, 50, and 60 mmHg, using a mercury sphygmomanometer. The blood lactate levels were measured immediately after training, at the end of five minutes' rest, and during each stimulation condition. Results: Blood lactate levels increased with an increase in pressure, with a significant difference between 0 mmHg and 60 mmHg ($p < 0.05$). Discussion: Lactic acid is the energy source in muscles. Our results suggest that the accumulation of lactic acid, which is a metabolic product, is indispensable to muscle-strength.

Key Words : Low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation, tactile pressure stimulation, blood lactic acid