

血流制限を併用したレジスタンス運動の有効閾値についての検討

北 翔 大 学 沖 田 孝 一

Exploring the Effective Thresholds for Resistance Exercise with Blood Flow Restriction

by

Koichi Okita
*Department of Sport Education,
Hokusho University*

ABSTRACT

In recent years, low-intensity exercise with muscle blood flow restriction has been used for the rehabilitation of patients with neurological and musculoskeletal disorders. Therefore, the purpose of this study was to examine the effective threshold and exercise volume, taking into account differences in load intensity, in order to obtain effective muscle hypertrophy and strength gain in resistance exercise with blood flow restriction so that it can be applied to a variety of clinical settings.

Twenty healthy university students performed plantar flexion exercise with blood flow restriction for 120 seconds, 60 times, using four levels of load intensity from 10% to 40% of one repetition maximum (1-RM). Intramuscular energy metabolism was measured, and the effective threshold was examined by comparing with exercise at 65% 1-RM, which provides an effective training effect, and exercise at 20% 1-RM under blood flow restriction.

It was shown that an external load of 20% 1-RM or more is appropriate for obtaining reliable effects in resistance exercise under blood flow restriction with a fixed exercise

time and number of repetitions of 60 times. However, it was also suggested that an effect may be obtained even with 10% 1-RM with blood flow restriction, because it obtains a stronger intramuscular metabolic stress than 20% 1-RM without blood flow restriction, which is usually considered to be less effective.

キーワード

血流制限, トレーニング, リハビリテーション, 筋肥大, 筋力増加, 代謝的ストレス

Keyword

threshold; blood flow restriction; metabolic stress; ischemia; training; muscle hypertrophy

要 旨

近年, 筋血流制限を併用した低負荷運動は神経疾患や運動器疾患を持つ患者のリハビリテーションなどに利用されてきている. 本研究は, 血流制限を併用したレジスタンス運動が多様な臨床現場に応用できるように, 有効な筋肥大・筋力増加効果を得るための負荷強度の違いを考慮した有効閾値・運動量について検討することを目的とした. 健常大学生 20 名に最大挙上重量 (1-RM) の 10% から 40% まで 4 段階の負荷強度を用いて, 120 秒・60 回の血流制限を併用した下腿三頭筋の底屈運動を行わせ, 筋内エネルギー代謝を測定した. さらに有効なトレーニング効果が得られる 65% 1-RM での運動 (血流制限なし) および血流制限下 20% 1-RM と比較し, 有効閾値を検討した. その結果, 運動時間・回数を固定した血流制限下のレジスタンス運動において標準的な効果を得るには 20% 1-RM 以上の外的負荷が適当であることが示された. しかしながら, 10% 1-RM においても, 通常は効果が乏しいと考えられる血流制限を併用しない 20% 1-RM より強い筋内代謝ストレスが得られることから, 効果が得られる可能性も示唆された.

緒 言

骨格筋は身体機能だけではなく糖・脂質代謝の

大部分を担い, 加えて内分泌組織としてマイオカインを分泌し人の健康を支えている¹⁻³⁾. 筋量・筋力の増加を得るためには, レジスタンス運動が有効であるが⁴⁾, 高強度の重量負荷は筋・関節や心血管系への負荷が大きいことから女性や中高年者, 疾患者に行うには困難な場合が多く, しばしば臨床現場での支障となる. 我々は, レジスタンス運動に血流制限を併用することで筋へのトレーニング刺激が増強され, 低強度の負荷であっても高強度負荷に匹敵する効果が得られる可能性に着目してきた⁵⁾. 石本記念デサントスポーツ科学振興財団の助成を受けて実施した研究では, トレーニング効果の大きさが, 血流制限によって増強される骨格筋内の代謝ストレス (クレアチンリン酸および pH の低下, 無機リン酸の蓄積) に依存することを明らかにし⁶⁾, これらの知見を基に, 個体差や疾患の有無を考慮した至適なトレーニング・プロトコルを提案してきた⁷⁻¹⁰⁾.

最近, 筋血流制限を併用した超低負荷運動が多発性硬化症などの神経疾患や運動器疾患を持つ患者^{11, 12)}, さらには前十字靭帯再建術後の理学療法やリハビリテーションにも試験的に利用されてきている¹³⁾.

本研究は, 多様な臨床現場に応用できるよう血流制限を併用したレジスタンス運動における有効な筋肥大・筋力増加効果を得るための, 負荷強度

の違いを考慮した有効閾値（トレーニング効果が期待できる運動量）について検討することを目的とした。なお、機械的「負荷」と区別するため、本研究ではエネルギー代謝によるクレアチンリン酸およびpHの低下を「筋内代謝ストレス」と定義した。

1. 方法

1.1 被験者

対象は健常大学生20名（男性11，女性9人）とした。実験に先立ち、全ての被験者に本研究の目的、方法、安全性等を十分に説明し、本研究への参加の同意を得た。また本研究計画は、北翔大学倫理委員会の承認を受けている。

1.2 運動プロトコール

独自に作成した運動装置を用いて、仰臥位右足関節底屈運動を1回/2秒のペースで行った。負荷量は、各被験者の最大挙上重量（1 repetition maximum, 1-RM）から設定した。1-RMの測定は同様の運動装置を用いて、仰臥位右足関節底屈運

動を行い、5cm挙上可能な最大重量とした。

プロトコールは以下の通りである。①10% 1-RM + 血流制限，②20% 1-RM + 血流制限，③30% 1-RM + 血流制限，④40% 1-RM + 血流制限，コントロールとして⑤65% 1-RM + 血流制限なし。各条件下の運動継続時間は120秒（繰り返し60回）に統一した。

各プロトコールは無作為順に施行し、2条件ずつ2日間に分けて行った。2回目の運動を開始する前には、変化したエネルギー代謝が安静時の状態まで回復していることを確認した。血流制限は、先行研究に基づき右脚大腿部に装着した空気圧式カフと急速空気注入機（E-20 rapid cuff inflator, Hokanson, USA）を用いて、被験者の安静時収縮期血圧の1.3倍の圧で施行した⁵⁻¹⁰。血流制限圧は急速空気注入機のデジタルディスプレイを監視し、正確に維持した。血流制限は運動期開始10秒前かけ、運動終了後迅速に解放した。

1.3 骨格筋内エネルギー代謝の測定（図1）

被験者は全身用MR機器（55 cm-bore, 1.5 Tesla,

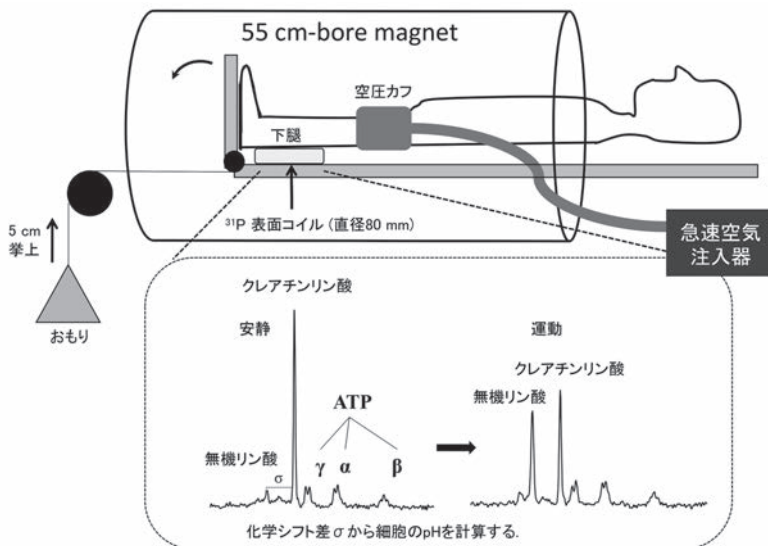


図 1 測定装置と運動方法。全身用MR装置内に2秒で1回の下腿三頭筋底屈運動を行い、下腿下面に設置した³¹P表面コイルにてエネルギー代謝を測定した。血流制限を施行した10%1-RM, 20%1-RM, 30%1-RM, 40%1-RMと対照として65%1-RM（非血流制限）を各2分間、60回を施行した。

BFR, blood flow restriction; RM, repetition maximum.

Magnetom Vision VB33G, Siemens, Erlangen, Germany) 内に設置した非磁性体で作成された運動装置において仰臥位となり、主動筋である下腿三頭筋の中央部下に31P励起用の表面コイル(直径80 mm)を固定し、磁気共鳴分光法による測定を安静時および運動中15秒ごとに行った。得られた高エネルギーリン酸スペクトルからクレアチンリン酸および無機リン酸の曲線下面積を算出した。スペクトルの大きさは相対値であるが、クレアチンリン酸が分解していく過程で[クレアチンリン酸]と[無機リン酸]の和は理論上一定であることから、先行研究に基づいて、その和を便宜上42.5 mMと仮定し、クレアチンリン酸量を絶対値として算出した¹⁴⁾。筋細胞内pHは、クレアチンリン酸と無機リン酸のピークのケミカルシフトの差を用いて算出した¹⁵⁾。

1. 4 統計処理

記述データは、平均±標準偏差で表し、図は、平均±標準誤差(クレアチンリン酸とpH)で表示した。運動条件間のクレアチンリン酸および筋細胞内pHの比較には、一元配置分散分析(ANOVA)を用いた。有意差が認められた場合は、Bonferroniの多重比較(post-hoc)により検定した。統計学的有意水準は、 $p < 0.05$ とし、すべての検定は統計解析ソフトIBM SPSS statistics version 29(IBM Japan)を用いて行った。

2. 結果

表1に被験者の基本特性、血圧・血流制限圧および最大挙上重量の結果を示した。

図2に各条件におけるクレアチンリン酸と筋内pHの経時的変化を示した。運動経過中の筋内クレアチンリン酸、pHは負荷強度に相応して低下した(図2)。一般的にレジスタンス・トレーニング効果得られにくいとされる血流制限を併用しな

表1 被験者の基本情報

項目	平均±標準偏差
被験者数	20
年齢, 才	21.6±1.2
身長 cm	165.4±7.9
体重, kg	57.9±8.1
体格指数, kg/m ²	21.1±1.8
収縮期血圧, mmHg	108.1±7.8
血流制限圧, mmHg	140.7±10.1
最大挙上重量, kg	45.0±10.6

い20%1-RMにおける筋内代謝ストレスのレベルを過去の報告から引用し二点鎖線で示した。一方、ガイドライン⁴⁾で推奨される65%1-RMにて60秒(30回)時点における筋内代謝ストレスを点線で示し、過去の我々の介入研究⁶⁾にて有効性を示した血流制限を併用した20%1-RMの120秒(60回)時は実践で示した。

今回の結果では、最も低負荷であった10%1-RM(血流制限あり)においてもクレアチンリン酸の低下は60秒(30回)以降で、筋細胞内pHは90秒(45回)以降にて、20%1-RM(血流制限なし)のレベルを超えていた。30%1-RM(血流制限あり)では、クレアチンリン酸の低下にて75秒(37.5回)の時点で20%1-RM(血流制限あり)120秒(60回)時と同等になっており、筋細胞内pHは、やや遅れて90秒(45回)にて同等になっていた。40%1-RM(血流制限あり)では、60秒(30回)の時点で20%1-RM(血流制限あり)120秒(60回)時と同等になっており、筋細胞内pHは、60秒(30回)の時点で65%1-RM(血流制限なし)60秒(30回)時と同等(有意差なし)になっていた。

3. 考察

本研究では、多様な臨床現場を想定し、固定した繰り返し回数・時間における負荷強度の違いを考慮した血流制限下レジスタンス運動の有効閾値を検討することを目的とした。後述するようにレジスタンス・トレーニングの最小限の強度閾値はまだ解明されていない。そこで、標準的な高強

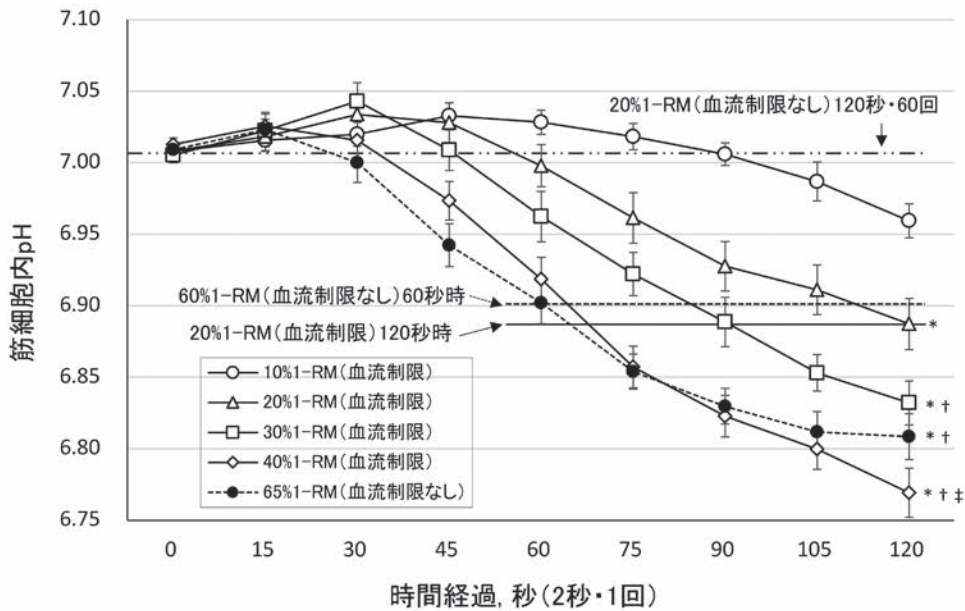
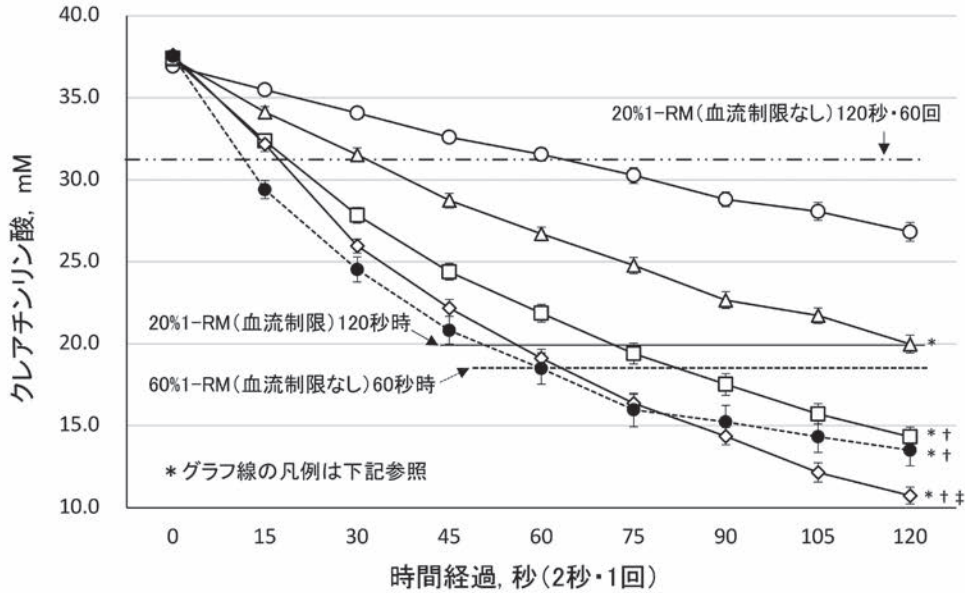


図2 運動中の筋内クレアチンリン酸と筋細胞内pHの経時変化。
 運動は2秒に1回の下腿三頭筋底屈運動を行った。エラーバー、標準誤差。
 * $p < 0.05$ vs 20%1-RM, † vs 30%1-RM, ‡ vs 65%1-RM.

度運動 (65% 1-RM) と過去に効果を確認することができた血流制限を併用した低強度運動 (20% 1-RM) における筋内代謝ストレスを目安として、各強度にて有効となる回数・時間を調べた。その結果、限定された回数では、血流制限を併用し

ても20% 1-RM以下では有効閾値に到達していなかった。一方、20% 1-RM以上であれば、60回以内(強度依存性により少ない回数で)で有効閾値に達することが示された。

本研究での最低強度である10% 1-RM (血流制

限あり)においても、血流制限なしの場合に比較し、時間経過(繰り返し増加)に相応して筋内代謝ストレスが増強するため、効果が得られる可能性はあり、前回の研究成果¹⁶⁾のように、運動量を固定せず、繰り返し回数を増やせば高強度運動と同等の筋刺激となり効果が得られると推測された。

筋量を増加させるための最小限の強度閾値が存在することは明らかであるが、正確な強度レベルはまだ解明されていない。これまでの研究では、血流制限を併用しない低強度の運動でも、未訓練者においては筋の適応を促進できることが示されており、これらの増加は機能的、代謝的、あるいは審美的に意味のあるものである可能性がある¹⁷⁾。また、低負荷を用いても all-out まで行うことで有意な筋肥大・筋力増加が得られることも示されている^{18, 19)}。しかしながら、自覚的限界までのトレーニングを継続的に行うことは、オーバートレーニングや心理的な燃え尽き症候群のリスクを高める可能性があると考えられている²⁰⁾。

トレーニング効果の目標をどう設定するかによって、負荷量の設定は変わってくる。仮に実践的な筋肥大・筋力増加が得られる標準的な高強度(1RMの65%以上)レジスタンス・トレーニングと同等の効果を血流制限運動で得たいとすれば、本研究の結果は参考になるとと思われる。

本研究の限界の一つは、疲労耐性の強い下腿三頭筋の運動を用いていることがあげられる。下腿三頭筋底屈運動は65%1-RMを用いても連続60回余の繰り返しが可能であり、上腕や大腿とは性質が異なると思われる。二つ目は長期的効果を見るための介入研究ではないことがあげられる。これまでに行った血流制限下20%1-RMを用いた1ヶ月間の介入研究により運動時の「筋内代謝ストレス」の程度が筋肥大および筋力増加と関連することを報告しているが⁶⁾、今回の研究では異なる負荷強度を用いており、結論を確証するためには実

際の介入研究が必要である。

結 論

運動時間・回数を固定した(120秒・60回)血流制限下のレジスタンス運動において標準的な効果を得るには20%1-RM以上の外的負荷が適当であることが示された。しかしながら、10%1-RMにおいても、通常は効果が乏しいとされる血流制限を併用しない20%1-RM以上の筋内代謝ストレスが得られることから、効果が得られる可能性も示唆された。

謝 辞

本研究にご協力いただきました被験者ならびに研究補助者の皆さまに心より感謝申し上げます。また、研究助成をいただきました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団さまに深く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Goodpaster B.H., Park S.W., Harris T.B., et al., The loss of skeletal muscle strength, mass, and quality in older adults: the health, aging and body composition study., *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, **61** (10):1059-1064(2006)
- 2) Cooper R., Kuh D., Hardy R., Objectively measured physical capability levels and mortality: systematic review and meta-analysis., *BMJ.*, **341**:c4467(2010)
- 3) Baskin K.K., Winders B.R., Olson E.N., Muscle as a "mediator" of systemic metabolism., *Cell. Metab.*, **21** (2):237-248(2015)
- 4) Kraemer W.J., Ratamess N.A.: Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **36**:674-688(2004)
- 5) 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.*, **88**:2097-2106(2008)
- 6) Takada S., Okita K., Suga T., et al.: Low-intensity exercise can increase muscle mass and strength proportionally to enhanced metabolic stress under

- ischemic conditions., *J. Appl. Physiol.*, **113**:199-205 (2012)
- 7) Suga T., Okita K., Morita N., et al.: Intramuscular Metabolism during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction., *J. Appl. Physiol.*, **106**:1119-24(2009)
 - 8) Suga T., Okita K., Morita N., et al.: Dose Effect on Intramuscular Metabolic Stress during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction., *J. Appl. Physiol.*, **108**:1563-1567(2010)
 - 9) Takada S., Okita K., Suga T., et al.: Blood Flow Restriction Exercise in Sprinters and Endurance Runners., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **44**:413-9(2012)
 - 10) Okita K., Takada S., Morita N., et al.: Resistance training with interval blood flow restriction effectively enhances intramuscular metabolic stress with less ischemic duration and discomfort., *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **44**:759-764(2019)
 - 11) Lamberti N., Straudi S., Donadi M., et al.: Effectiveness of blood flow-restricted slow walking on mobility in severe multiple sclerosis: A pilot randomized trial., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **30**:1999-2009(2020)
 - 12) Petersson N., Langgård Jørgensen S., Kjeldsen T., et al.: Blood Flow Restricted Walking in Elderly Individuals with Knee Osteoarthritis: A Feasibility Study., *J. Rehabil. Med.*, **54**:jrm00282(2022)
 - 13) Colapietro M., Portnoff B., Miller S.J., et al.: Effects of Blood Flow Restriction Training on Clinical Outcomes for Patients With ACL Reconstruction: A Systematic Review., *Sports Health*, **15** (2) :260-273 (2023)
 - 14) Harris R.C., Hultman E., Nordesjö L.O.: Glycogen, glycolytic intermediates and high-energy phosphates determined in biopsy samples of musculus quadriceps femoris of man at rest. Method and variance of values., *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **33**: 109–120(1974)
 - 15) Lanza I.R., Befroy D.E., Kent-Braun J.A.: Age-related changes in ATP producing pathway in human skeletal muscle in vivo., *J. Appl. Physiol.*, **99**: 1736–1744(2005)
 - 16) Okita K., Omokawa M., Takada S., et al.: Muscular stress is equal when resistance exercise with blood flow restriction is matched in total work volume: A cross-sectional, cross-over study., *Acta. Physiol. (Oxf.)*, **240**:e14097(2024)
 - 17) Schoenfeld B.J.: Is there a minimum intensity threshold for resistance training-induced hypertrophic adaptations? *Sports Med.*, **43**: 1279-88 (2013)
 - 18) Wernbom M., Augustsson J., Thomeé R.: The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Med.*, **37** (3) : 225-64(2007)
 - 19) Holm L., Reitelseder S., Pedersen T.G., et al.: Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity., *J. Appl. Physiol. (1985)*, **105** (5) : 1454-61 (2008)
 - 20) Fry A.C., Kraemer W.J.: Resistance exercise overtraining and overreaching. Neuroendocrine responses. *Sports Med.*, **23** (2) :106-29(1997)