

血流制限を併用したレジスタンス運動の効果： 低負荷×長時間と高負荷×短時間の比較

北 翔 大 学 沖 田 孝 一

Effect of Blood Flow Restriction Exercises: Light and Long vs Hard and Short Protocol

by

Koichi Okita

*Department of Sport Education,
Hokusho University*

ABSTRACT

Resistance exercise with blood flow restriction (BFR) is a new training method providing significant training effects despite the use of low-intensity mechanical loads. It was previously demonstrated that BFR remarkably enhances muscular metabolic stress in resistance exercise and that the metabolic stress was effectively enhanced by increasing mechanical intensity but not BFR pressure. However, because of blocking the metabolic recovery by BFR, it is possible that even with low intensity, metabolic stress might gradually increase with respect to increased repetitions and reach sufficient level.

Therefore, in this study, the muscular metabolic stress during resistance exercise with BFR between light-long and hard-short protocols, adjusted by totally the same work volume (load × repetitions) were compared.

Twelve male university students were recruited and performed unilateral plantar-flexion at 30 repetitions/min in a whole body magnetic resonance system. The BFR exercise protocols were as follows: exercise with 10% of one repetition maximum

(1-RM) for 360 sec (180 repetitions) , 15% 1-RM for 240 sec (120 repetitions) , 40% 1-RM for 90 sec (45 repetitions) . All protocols were same in total work volume (load \times repetitions=1800) . In addition, a standard high-intensity protocol of 65% 1-RM without BFR (60 sec, 30 repetitions) was also performed for comparison. Muscular metabolic stress in the calf muscle, defined as phosphocreatine and intramuscular pH decrease were evaluated by using ^{31}P -magnetic resonance spectroscopy.

Phosphocreatine depletion and intramuscular pH decrease at the end of each exercise were statistically similar and equal to or greater than that in 65% 1-RM without BFR. In conclusion, if the total exercise volume calculated as a product of mechanical load multiplied by repetitions were equal, metabolic stress in exercising muscle might achieve the similar level at the end of exercise with BFR and could provide similar successful training effects.

キーワード

血流制限, 代謝的ストレス, 虚血, トレーニング, 筋肥大

Keyword

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

要 旨

レジスタンス運動に血流制限を併用すると、筋収縮に利用された高エネルギーリン酸が再合成されずに代謝産物が蓄積し、通常では定常状態となるような低強度負荷を用いても、時間経過と共に代謝ストレスが漸増する。ゆえに本研究では、血流制限下の運動では、代謝ストレスは負荷強度に関係なく、総負荷量に依存するという仮説を立てた。本研究では、負荷強度が異なり、総負荷量が同等となる低強度 \times 多い繰り返し回数、高強度 \times 少ない繰り返し回数の条件を用いた血流制限下低強度レジスタンス運動を施行し、骨格筋内代謝ストレスを比較検討した。その結果、各プロトコル終了時の筋内クレアチンリン酸とpHの低下は、統計的に差はなく、血流制限を併用しない高強度負荷を用いた運動と同等かそれ以上であった。血流制限を併用した運動では、負荷強度と繰り返し

回数の積として計算される総負荷量が等しい場合、用いた強度にかかわらず同様なトレーニング効果をもたらす可能性が示された。

緒 言

レジスタンス運動により、筋量・筋力の増加を得るためには、高強度の重量負荷が必要であり¹⁾、筋・関節への負担や心血管系への負荷が大きいことから高齢者や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刺激が増強し、低強度負荷を用い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²⁾、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行った研究から、トレーニング効果の大きさが血流制限により増強する骨格筋内の代謝ストレス(クレアチンリン酸とpH低下および無機リン酸蓄積)に依存することを明らかにし³⁾、その知

見のもとで個体差や疾患を考慮した至適プロトコールを考案することができた^{4,6)}。さらに我々は、実地者の血流制限による苦痛を考慮し、間欠的に(特に非運動時)血流制限を施行する方法の有効性を検証し、同強度では継続的血流制限には及ばないものの強度を増加することで、同等な効果が得られる可能性を示すことができた⁷⁾。この研究も含めて、これまでの一連の研究結果は、血流制限を併用しても、その効果は負荷強度に依存することを示唆しているが、一方、加圧ウォーキングのような歩行運動においても筋肥大および筋力増加が得られることが示されている⁸⁾。本研究では、血流制限によりエネルギー代謝の回復が妨げられることに着目し、超低強度の負荷を用いても、繰り返し回数を増やし総負荷量を増加させることで、高強度負荷に匹敵する効果が得られると仮説を立て、総負荷量が同等となる低強度×多い繰り返し回数および高強度×少ない繰り返し回数の条件を用いた血流制限下レジスタンス運動を施行し、骨格筋内代謝ストレスを比較した。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

対象は健常男子大学生12名とした。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 (図1)

被験者は、全身用MR機器内にて非磁性体で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MR機器内で使用するものと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 (360秒, 180回), ②15% 1-RM + 血流制限 (240秒, 120回), ③40% 1-RM + 血流制限 (90秒, 45回), コントロールとして④65% 1-RM + 血流制限なし (60秒, 30回)。血流制限を用いたプロトコールは、「強度×繰り返し = 1800」に統

プロトコール (秒)	繰り返し回数 (回)		
	45	120	180
10% 1-RM + BFR (360)	→		
15% 1-RM with BFR (240)	→		
40% 1-RM with BFR (90)	→		
65% 1-RM (60)	30	→	

図1 運動プロトコール

2秒で1回の下腿三頭筋底屈運動を行った。血流制限を施行した10%1-RMでは、180回・360秒、15%1-RMでは、120回・240秒、40%1-RMでは、45回・90秒施行した。対照として行った一般的な高強度である65%1-RMでは、30回・60秒とした。BFR, blood flow restriction; RM, repetition maximum.

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 pneumatic rapid inflator (E-20 rapid cuff inflator, Hokanson, USA) を用いて³⁻⁷⁾、被験者の安静時収縮期血圧の1.3倍の圧で施行した。血流制限圧は pneumatic rapid inflator 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。

主観的運動強度 (rating of perceived exertion, RPE) は10-point Borg scale で評価し、最も低い rating は0.5 point とした。RPE は各運動期終了直後に聞き取った。

1. 3 骨格筋内エネルギー代謝の測定

被験者は全身用MR機器 (55 cm-bore, 1.5 Tesla, Magnetom H15, 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³⁻⁷⁾。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⁹⁾。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^{3-7, 10)}。

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) と平均±標準偏差 (RPE) で表示した。運動条件間の運動終了時における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、RPEについてはKruskal-Wallis検定を用いた。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 28 (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。

表1 被験者の基本情報

項目	平均 ± 標準偏差
被験者数	12
年齢, 才	22.1 ± 0.9
身長 cm	170.7 ± 5.8
体重, kg	62.7 ± 7.0
体格指数, kg/m ²	21.5 ± 2.1
収縮期血圧, mmHg	110 ± 8.7
血流制限圧, mmHg	143 ± 11.3
最大挙上重量, kg	52.3 ± 7.4

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。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するが、総負荷量が同等となる運動終点では同等のレベルに至っていた (図2)。さらに、血流制限を併用したすべてのプロトコールは、対照としていた標準的な高強度である65%1-RMを用いた運動より強い代謝ストレスを生じさせていた。

一方、運動終点のRPEには各プロトコール間の統計学的有意差は認められなかった (図3)。

2. 考察

本研究の結果は、超低強度負荷を用いても繰り返

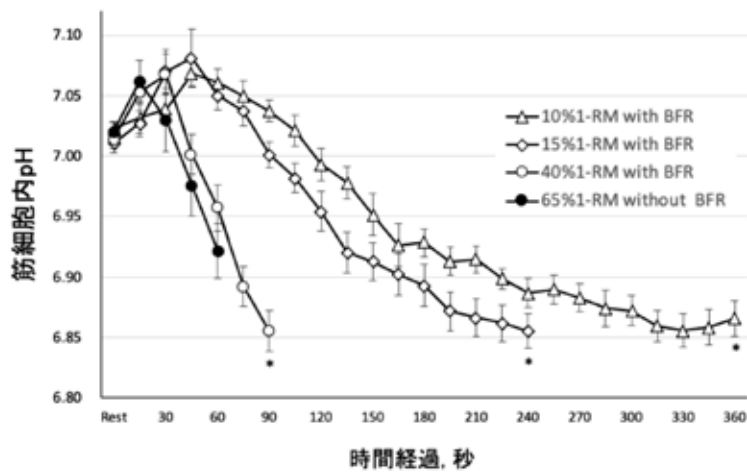
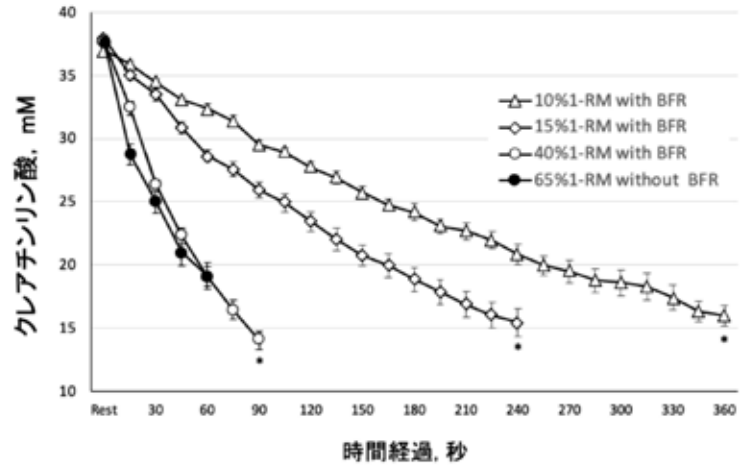


図2 運動中の筋内クレアチンリン酸とpHの経時変化
2秒で1回の下腿三頭筋底屈運動を行った。エラーバー, 標準誤差。* $p < 0.05$, vs 65%1-RM)。

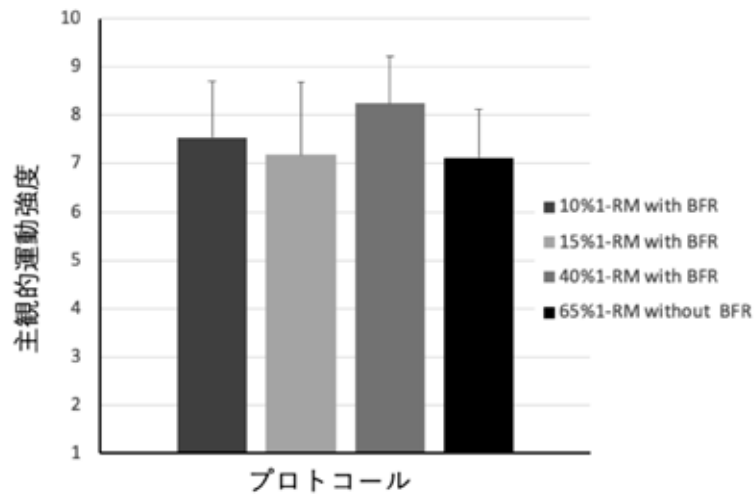


図3 運動終点における主観的運動強度
エラーバー, 標準偏差。

返し回数を増やし、総負荷量 (total work volume) を等しくすれば、高強度負荷を用いた運動と同等の効果をもたらす可能性を示した。すなわち、血流制限を併用した運動では、負荷強度 (重量) ではなく、総負荷量が筋への代謝ストレスを決定することが明らかになった。ゆえに機械的負荷と繰り返し回数積として計算される総負荷量が等しい場合、運動筋内の代謝ストレスは、運動終了時には同等のレベルに達し、同様のトレーニング効果をもたらすと推測された。この結果は、ウォーキングなどの非常に低強度の運動でも、血流制限を併用し適切な繰り返しを行うことで、筋肥大と筋力増加が得られることを報告した先行研究^{8, 11)}を支持するものであった。

現在、筋骨格系疾患や神経疾患に対する低強度負荷と血流制限を組み合わせたリハビリテーションが普及しているが¹²⁻¹⁴⁾、本研究の結果は、そのプロトコルの適切な方向性を示しているように思われる。さらに、通常のフィットネス現場において自転車運動、トレッドミル、クロストレーナー、さらにはエアロビクスを行う場合でも、血流制限を組み合わせることで、筋力増強・筋肥大効果が得られる可能性を示唆している。

3. 結 論

血流制限下のレジスタンス運動においては、超低強度など、一般的には筋力トレーニングに適さない負荷強度を用いても、繰り返し回数を増加し、総負荷量を十分に増やせば、運動終点の骨格筋代謝ストレスは高強度負荷運動と同レベルに至り、同様のトレーニング効果が得られる可能性が示唆された。

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) Kraemer W.J., Ratamess N.A.: Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **36**:674-688, (2004)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) Abe T., Kearns C.F., Sato Y.: Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training., *J. Appl. Physiol.*, **100**:1460-6, (2006)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) Abe T., Sakamaki M., Fujita S., et al.: Effects of low-intensity walk training with restricted leg blood flow on muscle strength and aerobic capacity in older adults., *J. Geriatr. Phys. Ther.*, **33**:34–40, (2010)
 - 12) Saraf A., Goyal M., Goyal K.: Blood Flow Restriction Training- An Overview and Implication in New Generation Physical Therapy: A Narrative Review., *J. Lifestyle Med.*, **31**:12:63-68, (2022)
 - 13) 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)
 - 14) 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)