

## 非運動時に血流制限を施行した レジスタンス運動の有効性の検証

北 翔 大 学 沖 田 孝 一  
(共同研究者) 北海道大学大学院 高 田 真 吾  
北 翔 大 学 吉 田 真  
北海道教育大学 森 田 憲 輝  
北 海 道 大 学 横 田 卓

### Resistance Training with Blood Flow Restriction: Optimization in Women

by

Koichi Okita, Makoto Yoshida  
*Department of Sport Education, Hokusho University*  
Takada Shingo, Takashi Yokota  
*Cardiovascular Medicine, Hokkaido University of Medicine*  
Noriteru Morita  
*Sports Education, Hokkaido University of Education*

#### ABSTRACT

In recent years it has been reported that increases in muscle size and strength equivalent to those with high intensity load can be achieved even with low intensity loads (20–40% of 1 RM) using blood flow restriction (BFR) together with resistance training. The resistance training with BFR generally consists of multiple sets, during which the exercise protocol is for continuous BFR during exercise and rest. However, there is also a possibility that continuous BFR will markedly increase cardiovascular stress. There are also reports showing a very high rating of perceived exertion (RPE). However, they can be mitigated by performing this exercise intermittently, such as

by releasing the BFR during the exercise period or rest period. The aim of this study was to investigate the effectiveness of intermittent BFR during low-intensity resistance exercise. Seven healthy men were recruited and performed 3 sets of low-intensity (20% of one repetition maximum, 1-RM) unilateral plantar-flexion (30 repetitions/min for 2 min) with 1-min resting interval. The exercise protocols were as follows: natural blood flow, BFR during rest periods, BFR during exercise periods, and continuous BFR during both exercise and rest periods. BFR was applied by 130% of the subject's resting blood pressure. Muscular metabolic stress, defined as phosphocreatine and intramuscular pH decrease by using  $^{31}\text{P}$ -magnetic resonance spectroscopy. The intramuscular metabolic stress is significantly increased with continuous BFR compared with intermittent BFR in the exercise and rest periods. Intermittent BFR reduced subjects' RPE but could not raise metabolic stress to a level at which a sufficient training effect was obtained in previous intervention studies we conducted. In a comparison of the two methods of intermittent BFR, the metabolic load was equivalent with BFR in either the exercise or rest period.

## 要 旨

近年、血流制限の併用により、低強度負荷を用いたレジスタンス運動においても、高強度負荷を用いた場合に匹敵する効果が得られることが報告された。しかしながら、この方法は一般的に複数セットで施行され、血流制限は運動時および運動休止時（非運動時）にも継続されるため、被験者の苦痛は無視できない。血流制限を間欠的に施行することで、苦痛は軽減可能と考えられるが、有効性が低下する懸念がある。本研究では、複数セットのレジスタンス運動において間欠的に血流制限を施行する方法の有効性を磁気共鳴分光法により測定した骨格筋内代謝的負荷（筋内クレアチンリン酸および pH の低下度）により検討した。仰臥位右足関節底屈運動を 1 分間（30 回 / 分）、3 セット行い、セット間 1 分間の休息期を計 2 回とし、20% 1 RM（血流制限なし）、20% 1 RM + 休息期（非運動時）血流制限、20% 1 RM + 運動時血流制限、20% 1 RM + 継続的血流制限、の 4 つの条件で施

行し、代謝的負荷を比較した。

その結果、間欠的に血流を制限した休息期（非運動時）血流制限および運動期血流制限において、非血流制限に比較し、代謝的負荷は有意に増強していた。間欠的条件間の比較では、休息期では休息期血流制限において、運動期では運動期血流制限において、有意に代謝的負荷が上回っていたが、最終セット終了時では、有意差はなく、少なくとも同等の効果があることが示唆された。しかしながら、いずれの間欠的血流制限においても、継続的血流制限に比し、筋への負荷が十分ではなく、今後、有効なプロトコルを再検討するための研究が必要であると思われた。

## 緒 言

レジスタンス運動は筋力増強や筋肥大などのトレーニング効果をもたらす。この運動は主に競技者において競技能力の改善や怪我の予防として発展してきたが、近年、骨格筋の量および筋力が、ADL (activity of daily living) や QOL (quality of

life) のみならず生命予後や疾患予後に影響を与えることが疫学的に証明されたのを契機に、それらを向上させるレジスタンス運動の重要性が注目されている<sup>1)</sup>。横断的には、筋力および筋量が多いほど、死亡率が低く、また運動療法においても有酸素運動にレジスタンス運動を加えることで病態や予後を改善する効果はさらに増加する<sup>2-4)</sup>。

しかしながら、レジスタンス運動により効率的に筋肥大や筋力増強を獲得するためには最大挙上重量 (1 RM : repetition maximum) の 65% 以上の運動強度が必要であり<sup>5)</sup>、高齢者、有疾病者および女性において施行するには、運動器損傷<sup>6)</sup>や心血管系への過負荷<sup>7)</sup>を来す危険性から臨床的に困難なことが多い<sup>8)</sup>。

近年、血流制限の併用により、最大筋力の 20 ~ 40% 程度の低強度負荷を用いたレジスタンス運動においても、高強度負荷を用いた場合に匹敵する効果が得られることが報告された。低強度負荷を用いることで、前述のリスクが減少するため、高齢者、有疾患者および女性における臨床応用が期待されている<sup>9-12)</sup>。しかしながら、一般的な血流制限併用レジスタンス運動は、複数セットで構成され、運動および休息中継続して血流制限を施行するため<sup>9,10)</sup>、心血管系への負担や被験者の苦痛を無視できない<sup>13-15)</sup>。これらの副次的問題は、高齢者や有疾患者などで実施する際には大きなデメリットとなりうる。血流制限を運動期もしくは休止期に解除することで、苦痛は軽減可能と考えられるが、有効性が低下する懸念がある。本研究では、複数セットのレジスタンス運動において非運動時など間欠的に血流制限を施行する方法の有効性を磁気共鳴分光法による骨格筋内代謝的負荷の測定により検討した。

## 1. 方法

### 1. 1 被験者

健康男性 7 名が本研究に参加した。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。なお本研究計画は、北翔大学倫理委員会の承認を受けている (HOKUSHO-SPOR: 201301)。

### 1. 2 運動条件

① 血流制限を施行しない条件 → L : low-intensity resistance exercise (20% 1 RM)

② 休息期 (非運動時) に血流制限を併用した条件 → L with interval BFR

③ 運動期に血流制限を併用した条件 → L with exercise BFR

④ 運動期 + 休息期に血流制限を併用した運動条件 → L with continuous BFR

### 1. 3 運動プロトコール

被験者は、全身用 MR 装置 (55 cm-bore, 1.5 tesla, Magnetom H15, Siemens, Erlangen, Germany) 内にて非磁性体で作成した運動装置を用いて、毎分 30 回、毎回 5 cm 挙上するよう仰臥位右足関節底屈運動を 1 分間 × 3 セット行い、セット間に 1 分間の休息期を 2 回とった。運動負荷には下腿三頭筋の最大挙上重量 (1 RM) に基づいた、20% 1 RM を用いた。全ての運動条件は無作為に施行し、2 条件ずつ 2 日間に分けて行った。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毎回確認した。血流制限は、先行研究<sup>11,12)</sup>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、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。空気による制限圧は運動期開始 10 秒前にかけて、運動期終了後迅速に解放した。休息期に血流制限を併用した条件では休息期開始 10 秒前にかけて、休息期終了後迅速に解放した。主観的運動強度の指標と

した 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。

1RM の測定は実験で使用する装置とほぼ同様の装置を用いて、仰臥位右足関節底屈運動を行い、負荷を 5cm 挙上可能な最大強度を 1 RM とした。

#### 1. 4 骨格筋内エネルギー代謝（代謝的負荷）の測定

被験者は、全身用 MR 装置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<sup>16)</sup>による測定を安静時および運動中 30 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<sup>17-19)</sup> 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。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。

筋への代謝的負荷は、クレアチンリン酸および筋細胞内 pH の低下度として評価した。我々は、単回の運動における代謝的負荷の程度が、筋肥大や筋力増加に強く関連することを証明している<sup>12)</sup>。

#### 1. 5 統計処理

記述データは、平均 ± 標準偏差で表し、図は、平均 ± 標準誤差で表示した。ベースラインの基礎データにおける群間比較には、対応のない t 検定を用いた。運動条件間のクレアチンリン酸および筋細胞内 pH の経時的变化の比較

は、二元配置反復測定分散分析 (2-way repeated-measures ANOVA, 運動条件 × 時間) を用いて行った。運動条件間の交互作用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、 $p < 0.05$  とした。すべての検定は、ウンドウズ用統計解析ソフト Statview 5.0 (SAS Institute) を用いて行った。

## 2. 結果

表 1 に被験者の身体特性、運動負荷、制限圧の結果を示した。

表 1 被験者の身体特性、運動負荷、制限圧の結果

身体特性	(n=7)
年齢, 才	21.6 ± 1.6
身長, cm	174.6 ± 9.0
体重, kg	66.0 ± 6.9
BMI, kg/m <sup>2</sup>	21.2 ± 0.9
収縮期血圧, mmHg	109.3 ± 13.5
血流制限圧, mmHg	142.0 ± 17.7
1 RM, kg	53.9 ± 4.3
20% 1 RM, kg	10.9 ± 4.31

平均 ± 標準偏差, BMI, body mass index; RM, repetition maximum

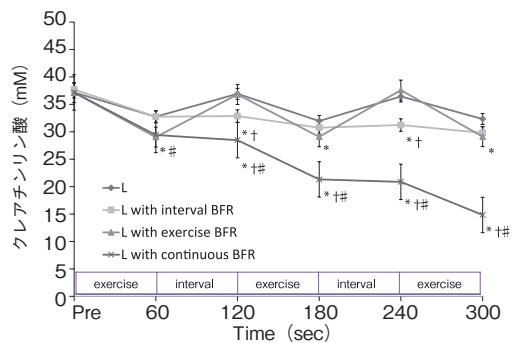


図 1 各条件におけるクレアチンリン酸の経時的变化 (平均 ± 標準誤差).  $P < 0.05$ , \* vs. L, # vs. L with interval BFR, † vs. L with exercise BFR. L, low-intensity resistance exercise; BFR, blood flow restriction

図 1 に各条件におけるクレアチンリン酸の経時的变化を示した。安静時のクレアチンリン酸の値は 4 条件の間で同等であった。

L with interval BFR では、セット間の運動休止期である 120, 240 秒後において、L および L

with exercise BFR に比較し、有意に大きな低下が認められた。逆に L with exercise BFR では、運動期である 60 秒後に L および L with interval BFR より有意に大きな低下を認め、同じく運動期である 180 秒後と最終セット終了時である 300 秒後において L より有意に大きな低下を認めた。最終セット終了時では、L with interval BFR と L with exercise BFR における有意差は認められず、全経過におけるクレアチンリン酸低下の積分値も比較したが、有意差は認められなかった ( $1761.6 \pm 1213.6$  vs  $1201.8 \pm 275.3$ ,  $p=0.25$ )。L with continuous BFR においては、120 秒後から運動終了までの各点において、間欠的 2 条件に比較し、有意に大きな低下を認め、また開始からのすべての点において、L より有意に大きな低下を認めた。

図 2 に筋細胞内 pH の経時変化を示した。安静時の値は 4 条件の間で同等であったが、L with continuous BFR において、運動開始 180 秒後から最終セット終了時まで、L に比較し有意に大きな低下を示した。L を除く 3 条件の間には統計学的有意差は認められなかった。

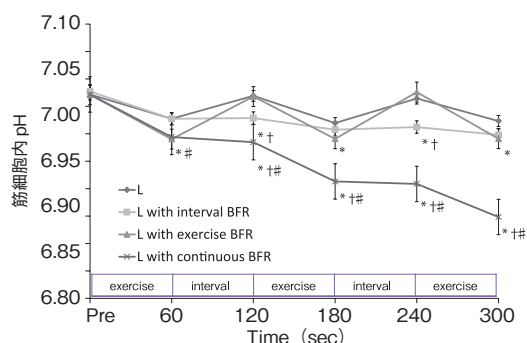


図 2 各条件における筋細胞内 pH の経時変化 平均 ± 標準誤差。P<0.05, \*vs. L, L, low-intensity resistance exercise; BFR, blood flow restriction

図 3 に各条件における運動セット終了直後の RPE を示した。運動 1 セット目には各条件間に有意差はなかったが、運動 2 セット目では L with continuous BFR が L と L with interval BFR に比較し、有意に大きな値を示した。運動 3 セット目

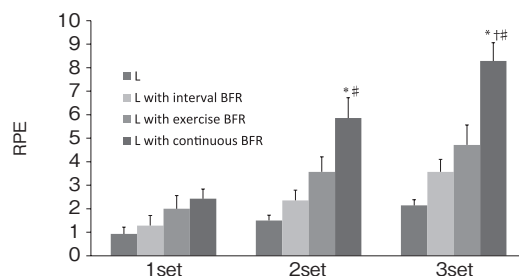


図 3 各条件における運動終了直後の RPE の平均値 平均値 ± 標準誤差。\*vs. L, † vs. L with exercise BFR, # vs L with interval BFR, P<0.05。RPE, the rating of perceived exertion; L, low-intensity resistance exercise; BFR, blood flow restriction

では L with continuous BFR が他の 3 条件に比較し、有意に大きな値を示した。間欠的 2 条件の比較では、平均値が L with interval BFR で小さいものの統計学的有意差は認められなかった。

### 3. 考 察

血流制限を併用した複数セットレジスタンス運動において、運動期もしくは休息期における休息期（非運動時）あるいは運動期の間欠的な血流制限では、非血流制限に比較し、クレアチンリン酸低下からみた代謝的負荷は有意に増強していたが、継続的血流制限に匹敵するレベルには至っていなかった。間欠的條件の比較では、休息期では休息期血流制限条件において、運動期では運動期血流制限条件において、より高い有効性を示したが、最終セット終了時では、有意差はみられなかった。運動時の血流制限では、運動時の低酸素により代謝的負荷が強まり、休息期の血流制限解除により速やかに回復する。一方、休息時の血流制限では、運動時の代謝的負荷が血流制限による酸素供給の欠如のため回復せずに維持される。これらのことが経時変化に反映されたと考えられる。自覚的運動強度 (RPE) は、継続的血流制限と比較し、セット終盤において、間欠的血流制限で有意に軽く、また間欠的條件間では、休息期に血流制限を併用する条件の方がより低い傾向がみられた。以上のことから、間欠的血流制限では、休息期すな

わち非運動時の施行において、運動時と同等の効果があり、有用性は上回る可能性が示唆された。

しかしながら、問題点も明らかになった。レジスタンストレーニングにおいて筋肥大、筋力増加などの良好な効果を得るためには、一般的に最大筋力の65%以上の負荷が推奨されている。我々は、先行研究において、65%1RMを用いた同様の運動を施行し、代謝的負荷を測定し、クレアチンリン酸がおおよそ16mM前後に低下していることを確認している<sup>11)</sup>。今回用いたプロトコールにおいて、そのレベルに達していたのは、継続的の血流制限のみであり、いずれの間欠的手法を用いても良好な筋肥大・筋力増加を得るための十分な代謝的負荷には達していないことも示された<sup>12)</sup>。ゆえに現場に応用するにはさらなる検討が必要である。

## 結 論

複数セットレジスタンス運動において、非運動時の血流制限は、運動時の血流制限と少なくとも同等の効果があることが示唆された。しかしながら、いずれの間欠の血流制限においても、継続的の血流制限に比し、筋への負荷が十分ではなく、今後、有効なプロトコールを再検討するための研究が必要であると思われる。

## 謝 辞

本研究は、平成26年度公益財団法人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されたものである。

## 文 献

- 1) Braith R.W., Stewart K.J.: Resistance exercise training: its role in the prevention of cardiovascular disease. *Circulation*, **113**: 2642-2650 (2006)
- 2) Heitmann B.L., Frederiksen P. Thigh circumference and risk of heart disease and premature death: prospective cohort study. *BMJ*, **339**:b3292 (online, p1-8) (2009)
- 3) Newman A.B., Kupelian V., Visser M., et al.: Strength, but not muscle mass, is associated with mortality in the health, aging and body composition study cohort., *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, **61**:72-7 (2006)
- 4) Hülsmann M., Quittan M., Berger R., et al.: Muscle strength as a predictor of long-term survival in severe congestive heart failure., *Eur. J. Heart Fail.*, **6**:101-7 (2004)
- 5) Kraemer W.J., Ratamess N.A., Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **36**:674-688 (2004)
- 6) Roth S.M., Martel G.F., Ivey F.M., et al.: High-volume, heavy-resistance strength training and muscle damage in young and older women., *J. Appl. Physiol.*, **88**:1112-1118 (2000)
- 7) MacDougall J., Tuxen D., Sale D.G., et al.: Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise. *J. Appl. Physiol.*, **58**: 785-790, 1985)
- 8) Braith R.W., Beck D.T.: Resistance exercise: training adaptations and developing a safe exercise prescription., *Heart Fail. Rev.*, **13**:69-79 (2008)
- 9) Takarada Y., Takazawa H., Sato Y., et al.: Effect of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in human. *J. Appl. Physiol.*, **88**:2097-2106 (2008)
- 10) Abe T., Yasuda T., Midorikawa T., et al.: Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily KAATSU resistance training., *Int. J. KAATSU Training Res.*, **1**:6-12 (2008)
- 11) 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)
- 12) 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)
- 13) Manini T.M., Clark, Brian C., Blood Flow Restricted Exercise and Skeletal Muscle Health. *Exercise and Sport Sciences Reviews.*, **37**:78-85 (2009)
- 14) Nakajima T., Kurano M., Takano H., Oonuma H., Morita T., Meguro K., Sato Y., Nagata T., Use and safety of KAATSU training: Results of a national survey., *Int. J. KAATSU Training Res.*, **2**:5-13 (2006)

- 15) Wernbom M., Augustsson J., Thomee R., Effects of Vascular Occlusion on Muscular Endurance in Dynamic Knee Extension Exercise At Different Submaximal Loads., *J. Strength Cond. Res.*, **20**:372-7 (2006)
- 16) Taylor D.J., Bore P.J., Styles P., et al.: Bioenergetics of intact human muscle: A <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance study., *Mol. Biol. Med.*, **1**:77-94(1983)
- 17) 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. Methods and variance of values: *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **33**:109-20(1974)
- 18) Kemp G.J., Radda G.K.: Quantitative interpretation of bioenergetic data from <sup>31</sup>P and <sup>1</sup>H magnetic resonance spectroscopic studies of skeletal muscle: an analytical review., *Magn. Reson. Q.*, **10**:43-63 (1974)
- 19) Lanza I.R., Befroy D.E., Kent-Braun J.A.: Age-related changes in ATP-producing pathways in human skeletal muscle in vivo., *J. Appl. Physiol.*, **99**:1736-44(2005)