

筋力増加に最も有効な血流制限下トレーニング運動条件の検索 —筋内エネルギー代謝の検討—

北海道大学大学院 絹川 真太郎
(共同研究者) 同 菅 唯志
北 翔 大 学 沖 田 孝 一

Investigation Into the Effective Conditions of Resistance Training with Blood Flow Restriction for the Gain of Muscle Strength -Examination of Skeletal Muscle Energy Metabolism-

by

Shintaro Kinugawa, Tdashi Suga
*Department of Cardiovascular Medicine,
Hokkaido University Graduate School of Medicine*
Koichi Okita
*Graduate School of Program in Lifelong Learning Studies,
Hokusho University*

ABSTRACT

Recent studies have reported that low-intensity resistance training with blood flow restriction (BFR) could provide the rapid muscle hypertrophy and strength gain equivalent to those of high-intensity resistance training. Its mechanism has been speculated to be caused by the increased metabolic stress in exercising muscle; however it remains unclear. We measured the intramuscular metabolism during resistance exercise using ^{31}P -magnetic resonance spectroscopy (MRS). In the present study, we sought to optimize the exercise protocol for BFR exercise by examining a variety of the intensity of exercise and the pressure of BFR. The exercise was performed unilateral plantar flexion (30 repetitions/min) for 2 min. Intramuscular phosphocreatine (PCr) and pH were obtained

by ^{31}P -MRS. The change of intramuscular PCr and pH during low-intensity resistance exercise (20% 1RM) with moderate BFR (130% of systolic blood pressure) was significantly greater than that during exercise of similar intensity without BFR. However, those changes were lower than that during high-intensity exercise (65% 1RM) without BFR. The changes of PCr and pH during BFR protocol with 30% 1RM had similar levels of changes in the high-intensity exercise. In contrast, the increased pressure of BFR had only a little effect. Our results suggested that the intramuscular metabolic stress during BFR exercise might be associated with exercise intensity. To replace high-intensity resistance exercise, the BFR protocol with the intensity of at least 30% 1RM might be required.

要 旨

最近、低強度負荷に血流制限を併用したトレーニングが高強度トレーニングと同等の筋肥大や筋力増加をもたらすことが報告された。この血流制限の作用機序は代謝的負荷の増加が関わっていると推測されているが、詳細は不明である。我々はリンの磁気共鳴スペクトロスコピー (^{31}P -MRS) を用いて、トレーニング運動中の筋内代謝 (クレアチンリン酸 (PCr) および pH) を測定した。血流制限下運動の負荷強度や血流制限圧を変化させることによって、最も有効な運動プロトコルの検索を行った。運動は2分間の下肢低屈運動で行われた。血流制限を併用した低強度負荷 (20%1RM) 運動中の PCr および pH の変化は自然血流下の低強度負荷運動中の変化より有意に大きかったが、高強度負荷 (65%1RM) 運動中の変化より小さかった。30%1RM に血流制限を併用した運動中の変化は高強度負荷運動中の変化と同等であった。一方、血流制限に用いる圧を増加させても代謝に与える影響はなかった。我々の結果は血流制限運動中の代謝負荷は運動強度と関連していることを示唆している。高強度負荷運動と同等の効果を得るためには血流制限に30%1RM以上の強度の負荷の併用が必要と考えられる。

緒 言

高齢者や慢性疾患患者における筋量や筋力は、予後の強力な予測因子である^{6,7,12,14}。近年、筋量や筋力の増加を目的とした筋力トレーニングは、健康の維持・増進や疾病からの体力回復を目的としたリハビリテーションに幅広く用いられている^{1,17}。実際、高齢者や慢性疾患患者を対象とした報告では、筋力トレーニングによって運動能力や生活の質が向上するだけでなく病態が改善することが示されている³。しかしながら、加齢や慢性疾患患者では運動能力・機能が低下しており、筋力および筋量の増加に有効である高強度のトレーニング負荷を用いた筋力トレーニングを実施することが困難な場合が多い。したがって、効果的な筋力トレーニングが行うことができない場合がある。このことから高齢者や慢性疾患患者においても安全かつ効果的な筋力トレーニングを行うことができる方法の確立が急務とされている。

最近、低強度負荷に血流制限 (blood flow restriction; BFR) を併用した筋力トレーニング法 (BFR トレーニング) が高強度負荷による筋力トレーニングに匹敵する効果を獲得できることが報告されている¹⁶。このようなトレーニング効果を導く主機序として、血流制限併用運動によって、

骨格筋への代謝的負荷が増加することに起因すると推察されている^{4,10,16}。しかしながら、これまでにBFRトレーニング運動中の代謝的負荷を捉えた報告はない。さらに、BFRトレーニングの有効性を明らかにした複数の報告では、トレーニング運動に適用した負荷強度や血流制限に用いる圧などの運動プロトコルが一致していない。したがって、本研究は、BFRトレーニング運動中の代謝的負荷を測定し、筋力および筋量の増加に有効とされる高強度筋力トレーニング運動中の代謝的負荷と比較することにより、至適な負荷強度および血流制限圧を検討することを目的とした。さらに、男女に差がないかどうかを検討した。

1. 研究方法

1.1 実験デザイン

研究1：これまでの報告で用いられた負荷強度（最大挙上重量;1RMの20%）と血流制限の圧（収縮期血圧の130%）を適用したBFRトレーニング運動（20%1RM+BFR）中の代謝的負荷を低強度（20%1RM）および高強度（65%1RM）筋力トレーニング運動中と比較検討した。さらに、男女間で差がないかどうかを検討した。

研究2：BFRトレーニングに用いる圧強度（100mmHg, 150mmHg, 200mmHg）の影響を検討した。

研究3：異なる負荷強度を適用したBFRトレーニング運動中の代謝的負荷を測定し、低強度および高強度筋力運動と比較することによって至適な運動プロトコルを明らかにした。

これらの実験を実施するにあたり、すべての被験者に本研究の目的および方法などを十分に説明し、実験参加の同意を得た。なお、本研究は北翔大学北方圏生涯スポーツ研究センター倫理委員会の承認を得て実施された。

1.2 測定方法

被験者らは、全身用MR装置（1.5Tesla, Magnetom H15, Siemens, Erlangen, Germany）内の非磁性体で作成された運動装置を用いて、毎分30回、2分間の仰臥位右足関節底屈運動を行った。運動時の負荷は、あらかじめ測定した1RMに基づいて決定された。

³¹P-MRSの測定は、被験者の右下腿部下に³¹P-MRS専用の表面コイルを装着し、右下腿三頭筋の最大筋腹部位を分析対象として行った。³¹P-MRS測定のシーケンスは、パルス幅500ms、伝達電圧20V、繰返し時間2000msに設定して行った。シミングは水のプロトン信号を用いて自動的に行った。スペクトルは、8スキュンの加算平均により安静時および運動中30秒ごとの高エネルギーリン酸のスペクトルを獲得し、得られたスペクトルからクレアチンリン酸（phosphocreatine; PCr）および無機リン酸（inorganic phosphate; Pi）の曲線下面積を算出した。

PCrの算出は、PCrが分解していく過程でPCrとPiの和は理論上一定であり、 $[PCr] + [Pi] = 42.5\text{mM}$ と仮定して算出した^{5,8}。筋細胞内pHは、PCrとPiのピークのケミカルシフトの差を用いて算出し、Piに二峰性のピークが認められた場合は、両ピークから算出したpHを標準化した値を採用した⁹。

1.3 実験プロトコル

1.3.1 研究1

対象は健常男女26名（男/女；13/13、年齢； 21.5 ± 3.7 歳、身長； $166.2 \pm 7.1\text{cm}$ 、体重； $59.7 \pm 9.0\text{kg}$ 、1RM； $41.3 \pm 12.1\text{kg}$ ）であった。次の3つのプロトコルをランダムに行った。

1) 20%1RMの低強度負荷と血流制限を併用したBFRトレーニング運動。

2) 自然血流下において20%1RMの低強度筋力トレーニング運動。

3) 自然血流下において65%1RMの高強度筋力トレーニング運動。

なお、BFRトレーニングの運動プロトコルは、以前の報告^{2,4,10,15)}に従い決定された。BFRトレーニング運動の血流制限は、大腿部に駆血用カフを装着し、駆血計により運動開始10秒前から加圧し、運動終了後に速やかに除圧した。収縮期血圧の130%の血流制限圧(161.5 ± 15.2 mmHg)を用いた。なお、条件間の休息は、十分にとらせ、高エネルギーリン酸および筋細胞内pHが安静時レベルまで回復したことを確認して次のプロトコルを行った。

また、BFRトレーニングに適用した圧の正当性を検討するため、実験に先立ち、健常男性被験者10名(年齢; 21.3 ± 1.6歳)において、BFRトレーニング運動中の血圧を測定した。その結果、20%1RMに中強度血流制限圧を併用した運動プロトコル中の収縮期血圧、115 ± 6%の増加であり、本研究で施行した収縮期血圧の130%よりも低い値であった。このことから、本研究で適用した血流制限圧は、運動中に十分な血流制限をもたらしていると考えられた。

1. 3. 2 研究2

対象は健常男女10名(男/女; 5/5, 年齢; 21.3 ± 1.7歳, 身長; 168.9 ± 9.3cm, 体重; 64.7 ± 9.3kg, 1RM; 44.7 ± 11.5kg)であった。次の3条件の20%1RMのBFRトレーニング運動をランダムに行った。

- 1) 血流制限圧100mmHg
- 2) 血流制限圧150mmHg
- 3) 血流制限圧200mmHg

1. 3. 3 研究3

対象は健常男女12名(男/女; 6/6, 年齢; 20.1 ± 1.1歳, 身長; 167.5 ± 6.7cm; 体重; 59.4 ± 9.4kg, 1RM; 38.3 ± 14.0kg)であった。

デサントスポーツ科学 Vol. 31

以下の5条件の運動を最低1週間の間隔を空けた2日間に分け、ランダムに行った。

- 1) 自然血流下において20%1RMの低強度筋力トレーニング運動。
- 2) 20%1RMのBFRトレーニング運動。
- 3) 30%1RMのBFRトレーニング運動。
- 4) 40%1RMのBFRトレーニング運動。
- 5) 自然血流下において65%1RMの高強度筋力トレーニング運動。BFRトレーニング運動において用いられた血流制限圧は収縮期血圧の130%の中強度血流制限圧(146.8 ± 16.8mmHg)であった。

1. 4 統計処理

安静時および運動中の高エネルギーリン酸および筋細胞内pHの比較は、反復測定ANOVAにより有意差が認められた場合、post-hoc分析として、Bonferroniの多重比較法により検定した。なお、有意水準は5%とした。

2. 結果

2. 1 研究1

図1に同一個人から記録された安静時および様々な負荷速度中のMRスペクトルの代表例を示す。20%1RMの低強度負荷において、PCrが著明に減少し、Piは増加している。PCrおよび筋細胞内pHは、自然血流下の20%1RMの低強度トレーニング運動よりも有意に大きな変化を示した(図2)。しかし、これらの変化は、65%1RMの高強度筋力トレーニングに比較して有意に小さかった(図2)。さらに、これらの変化を男女別に解析したところ、クレアチンリン酸の変化は男女間で差がなかった(図3)。

2. 2 研究2

20%1RMに100mmHgの低強度血流制限圧を併用した運動プロトコル中のPCrおよび筋細胞内

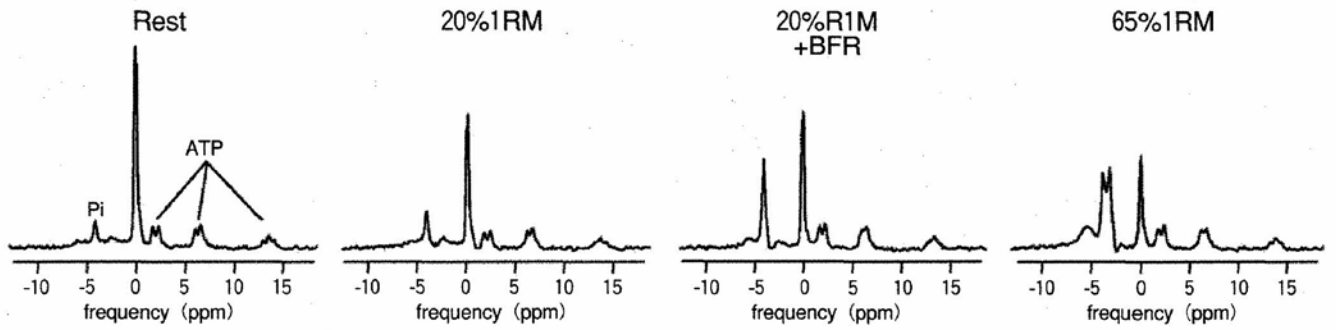


図1 同一個人から記録された安静時および様々な負荷運動中のスペクトルの代表例
 血流制限 (BFR) に用いた圧は収縮期血圧の130%であった。PCrはクレアチンリン酸, Piは無機リン ATPはアデノシン三リン酸を示す。

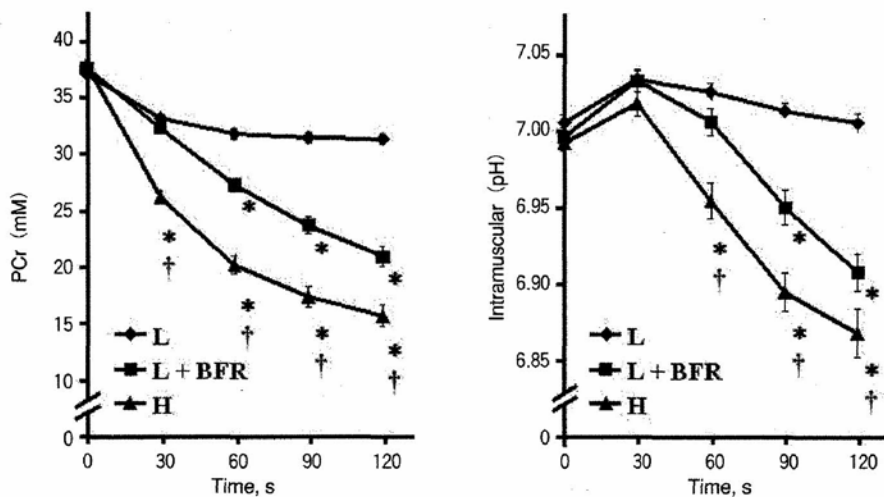


図2 クレアチンリン酸および筋細胞内pHの経時的変化
 Lは20%1RMの低強度負荷, BFRは血流制限, Hは65%1RMの高強度負荷を示す
 数値は平均±標準誤差。*p<0.05 対L, †p<0.05 対L+BFR

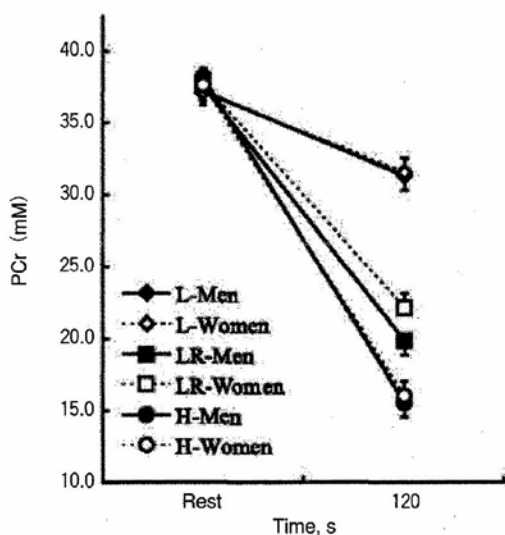


図3 様々な負荷プロトコール前後のクレアチンリン酸の変化および男女差
 Lは20%1RMの低強度負荷, Rは血流制限, Hは65%1RMの高強度負荷を示す。数値は平均±標準誤差

pHの変化は、自然血流下における低強度レジスタンス運動中よりも有意に大きかったが、150mmHgによる中強度血流制限圧および200mmHgによる高強度血流制限圧を併用した運動プロトコルに比較して有意に小さかった。一方、150mmHgの中強度血流制限圧と200mmHgの高強度血流制限圧を併用した運動プロトコル間のPCrおよび筋細胞内pHの変化に有意な差はなかった。

2.3 研究3

BFRトレーニング運動において、いずれの負荷強度でも20%1RM単独プロトコールと比較して

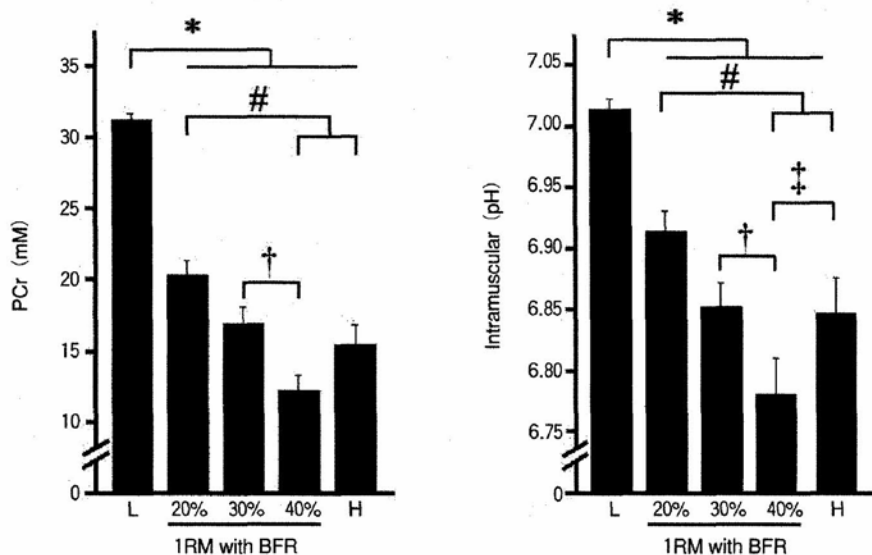


図4 血流制限下筋力トレーニングに用いる負荷強度の影響
Lは20%1RMの低強度負荷，BFRは血流制限，Hは65%1RMの高強度負荷を示す。数値は平均±標準誤差。*P<0.05対L。
#P<0.05対20%1RM。†P<0.05対30%1RM。‡P<0.05対40%1RM

PCrおよび筋細胞内pHの変化が有意に大きく、負荷強度依存性に変化した(図4)。このBFRトレーニング運動と65%1RM単独プロトコルと比較すると、30%1RM+BFRにおいて変化に差がなく、40%1RM+BFRではむしろ変化が有意に大きかった(図4)。

3. 考察

本研究において、先行研究で用いられている血流制限下筋力トレーニングの運動プロトコルは、自然血流下における低強度レジスタンス運動よりも顕著な骨格筋への代謝的負荷をもたらしたが、この促進効果は、高強度筋力トレーニング運動に達していなかった。したがって、20%1RMに中強度の血流制限圧を併用した通常の運動プロトコルでは、高強度筋力トレーニング運動と同等の代謝的負荷は得られないことが示された。

次に、我々は、血流制限下筋力トレーニングの重要なトレーニング変数である血流制限圧に着目し、その影響を検討した。その結果、中強度と高強度の血流制限圧の間に有意な差は認められなかったのに対して、低強度と中強度の血流制限圧の

間に有意な差が認められた。低強度血流制限圧に用いた100mmHgの圧は、我々が、実験に先立って行った自然血流下での20%1RMを用いた低強度筋力トレーニング運動中の収縮期血圧(127.5±13.1mmHg)よりも低いものであった。このことから血流制限の顕著な併用効果を得るためには、運動中の血圧よりも高い圧が必要であると考えられた。実際、本研究で用いた150mmHgもしくは収縮期血圧の130%の中強度血流制限圧は、自然血流下のみならず通常の血流制限下筋力トレーニング運動中に上昇した収縮期血圧よりも高いものであった。また、中強度と高強度血流制限圧との間に有意差が認められなかったことから、運動中の血圧よりも高い血流制限圧を施行すれば、必要以上に高い血流制限圧を施行しなくても十分な効果を得られることが示された。

最後に我々は、異なる運動強度を用いて、BFRトレーニングの至適な運動プロトコルを検討した。その結果、30%1RM+BFRトレーニングの運動プロトコルは、高強度筋力トレーニング運動と同等の代謝的負荷を獲得した。BFRトレーニングと高強度筋力トレーニングの一過性および長期的な

トレーニング効果を比較検討した報告^{11,16)}では、20%1RMよりも高い負荷強度を用いており、同等もしくはそれ以上に高い効果が得られることを報告している。したがって、BFRトレーニングの運動プロトコルとして、高強度筋力トレーニングと同等の骨格筋への代謝的負荷を獲得するためには、30%1RM以上の負荷強度が必要であることが示唆された。

一方、本研究の結果では血流制限圧を増加させた効果は認められなかった。異なる血流制限を用いて検討を行った先行研究^{2,13)}において、血流制限の圧強度を高めた場合の顕著な効果が認められなかったことが報告されている。したがって、血流制限下筋力トレーニングを効果的に行うためには、血流制限圧よりも負荷強度を増加することで、高い代謝的負荷を獲得できることが示唆された。

結 論

以上の結果から、30%1RMに中強度の血流制限圧を併用したBFRトレーニングの運動プロトコルは、高強度筋力トレーニングと同等の骨格筋への代謝的負荷を獲得できることが示唆された。BFRトレーニングは、高強度筋力トレーニングに用いる半分以下の負荷強度で顕著なトレーニング効果を獲得できる可能性があり、今後、高齢者や慢性疾患患者への応用が期待される。

謝 辞

本研究に対しまして助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。

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) Cook S.B., Clark B.C., Ploutz-Snyder L.L.: Effects

- of exercise load and blood-flow restriction on skeletal muscle function., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39, 1708-1713 (2007)
- 3) Dunstan D.W., Daly R.M., Owen N., Jolley D., De Courten M., Shaw J., Zimmet P.: High-intensity resistance training improves glycemic control in older patients with type 2 diabetes., *Diabetes Care*, 25, 1729-1736 (2002)
- 4) Fujita S., Abe T., Drummond M.J., Cadenas J.C., Dreyer H.C., Sato Y., Volpi E., Rasmussen B.B.: Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increase S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis., *J. Appl. Physiol.*, 103, 903-910 (2007)
- 5) 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)
- 6) Heitmann B.L., Frederiksen P.: Thigh circumference and risk of heart disease and premature death: prospective cohort study., *BMJ*, 339, b3292 (2009)
- 7) Hülsmann M., Quittan M., Berger R., Crevenna R., Springer C., Nuhr M., Mörtl D., Moser P., Pacher R.: Muscle strength as a predictor of long-term survival in severe congestive heart failure., *Eur. J. Heart Fail.*, 6, 101-107 (2004)
- 8) Kemp G.J., Radda G.K.: Quantitative interpretation of bioenergetic data from ³¹P and ¹H magnetic resonance spectroscopic studies of skeletal muscle: an analytical review., *Magn. Reson. Q.*, 10, 43-63 (1994)
- 9) 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)
- 10) Pierce J.R., Clark B.C., Ploutz-Snyder L.L., Kanaley J.A.: Growth hormone and muscle function responses to skeletal muscle ischemia., *J. Appl. Physiol.*, 101, 1588-1595 (2006)
- 11) Reeves G.V., Kraemer R.R., Hollander D.B., Clavier J., Thomas C., Francois M., Castracane V.D.: Comparison of hormone responses following light resistance exercise with partial blood flow restriction and moderately difficult resistance exercise without occlusion., *J. Appl. Physiol.*, 101, 1616-1622 (2006)

- 12) Ruiz J.R., Sui X., Lobelo F., Morrow J.R. Jr, Jackson A.W., Sjöström M., Blair S.N.: Association between muscular strength and mortality in men: prospective cohort study., *BMJ*, 337, a439 (2008)
- 13) Sumide T., Sakuraba K., Sawaki K., Ohmura H., Tamura Y.: Effect of resistance exercise training combined with relatively low vascular occlusion., *J. Sci. Med. Sport*, 12, 107-112 (2009)
- 14) Swallow E.B., Reyes D., Hopkinson N.S., Man W.D., Porcher R., Cetti E.J., Moore A.J., Moxham J., Polkey M.I.: Quadriceps strength predicts mortality in patients with moderate to severe chronic obstructive pulmonary disease., *Thorax*, 62, 115-120 (2007)
- 15) Takano H., Morita T., Iida H., Asada K.I., Kato M., Uno K., Hirose K., Matsumoto A., Takenaka K., Hirata Y., Eto F., Nagai R., Sato Y., Nakajima T.: Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 95, 65-73 (2005)
- 16) Takarada Y., Takazawa H., Sato Y., Takebayashi S., Tanaka Y., Ishii N.: Effect of resistance exercise combined with moderate blood flow restriction on muscular function in human., *J. Appl. Physiol.*, 88, 2097-2106 (2000)
- 17) Williams M.A., Haskell W.L., Ades P.A., Amsterdam E.A., Bittner V., Franklin B.A., Gulanick M., Laing S.T., Stewart K.J.: Resistance exercise in individuals with and without cardiovascular disease: 2007 update: a scientific statement from the American Heart Association Council on Clinical Cardiology and Council on Nutrition, Physical Activity, and Metabolism., *Circulation*, 116, 572-584 (2007)