

疲労困憊に至る低強度レジスタンス運動が muscle swelling へ及ぼす影響：血流制限と非血流制限の比較

東京大学 安田 智 洋
(共同研究者) 同 福田 平
同 福村 和 也
同 内田 祐 介

Effect of Low-load Resistance Exercise to Volitional Exhaustion on Muscle Swelling: Comparison Between Blood Flow and Non-blood Flow Restriction

by

Tomohiro Yasuda, Taira Fukuda,
Kazuya Fukumura, Yusuke Uchida
*Graduate School of Medicine,
University of Tokyo*

ABSTRACT

Comparison of low-load resistance exercise with (BFR) and without blood flow restriction (NBFR) to volitional exhaustion on muscle swelling. Eight young men (aged 27[SD 5]years, standing height 1.74[SD 0.05]m, body mass 70.3[SD 4.3]kg) performed 20% of one repetition maximal dumbbell curl exercise to exhaustion (4 sets, rest intervals were 30-sec for BFR and or 3-min for NBFR, respectively). One arm was randomly chosen for BFR exercise and the other arm performed NBFR exercise. During the BFR exercise session, subjects placed elastic cuff proximally on testing arm at 160 mmHg. Electromyography (EMG) signals were recorded from surface electrodes placed on the biceps brachii muscle and analyzed for integrated EMG

(iEMG). Biceps brachii muscle thickness (MTH) were measured using B-mode ultrasound. During exercise session, iEMG for biceps brachii muscles increased ($p < 0.01$) progressively during BFR and NBFR (3.52 and 3.70 times of baseline value). Immediately after the exercise, MTH acutely increased ($p < 0.01$) with BFR and NBFR (1.23 and 1.19 times of baseline value). These results demonstrate that BFR and NBFR exercises lead to pronounced muscle activation and muscle swelling, which were similar between two conditions. Thus, it can be speculated that the magnitude of increase in muscle size following low-load resistance training is similar between BFR and NBFR.

要 旨

疲労困憊に至る低強度レジスタンス運動が muscle swelling へ及ぼす影響について、血流制限 (BFR) と非血流制限 (NBFR) で比較した。健康な男性8名の両腕を無作為に BFR 側と NBFR 側に分け、低強度のアームカール運動 (20% 1RM, 4セット) を疲労困憊まで実施した。血流制限には空圧式ベルトを用い、上腕基部に 160mmHg の圧を加えた。運動前後と各セット間の休息中は筋厚を測定し、運動中は上腕二頭筋の筋活動量を測定した。筋活動量は2条件ともに1セット中から漸増し、BFR では1セット目に運動前の3.52倍、NBFR では4セット目に3.70倍に達した。筋厚は2条件ともに1セット終了時点から上昇し、BFR ではPostで運動前の1.23倍、NBFR では3セット終了時点で1.19倍に達した。いずれの項目とも条件間で違いは認められなかった。両条件とも、筋の大きな代謝変化によって各セット間の休息中および運動後は muscle swelling が顕著に増加し、それらの大きさには条件間で違いがないと判明した。そのため、通常血流の低強度レジスタンス・トレーニングを疲労困憊まで実施すると、加圧トレーニングと同様の筋肥大を引き起こす可能性があるかと推察された。

緒 言

適度に活動筋への血流を制限した状態で筋力トレーニング (加圧トレーニング) を実施すると、最大挙上重量 (1RM) の20~30%という低強度でも著しい筋サイズと筋力の増加を引き起こす^{16, 17)}。このような低強度では運動器や循環器への負担が少ないため、競技選手、若年者、高齢者、リハビリ患者などの筋力トレーニングとして有用であると認知されている^{2, 7, 9, 14, 15)}。

一方、加圧トレーニングは適度に血流制限を行うことが特徴であるため、加圧トレーニングの資格をもたない者が実施することは禁止されている。したがって、トレーニングを行う際には指導資格をもったトレーナーの元に通うか、自分の特徴に適合する専用のベルトを購入する必要がある。誰もが手軽に行うことはできない。

最近、通常血流で低強度レジスタンス運動 (30% 1RM) を疲労困憊まで実施すると、運動直後に筋のタンパク合成速度が増加し、90% 1RM で実施した場合よりも有意に高いことが報告された⁴⁾。その後、疲労困憊に至る低強度レジスタンス・トレーニング (30% 1RM) によって、6週間 (3回/週) で筋肥大や筋力増加が起こることが明らかとなった⁸⁾。したがって、通常血流でも低強度レジスタンス運動を疲労困憊まで実施すると、加

圧トレーニングと同様の筋肥大効果が期待できるかもしれない。

トレーニング運動直後に起こる筋細胞の膨張 (Muscle swelling) は、筋タンパク合成を促進し筋タンパク分解を抑制するため、筋肥大を引き起こす重要な刺激のひとつである⁶⁾。最近、加圧トレーニングは運動中、主に速筋線維の動員亢進に伴う大きな筋活動量の増加を示し、代謝産物の蓄積が増加するため、活動筋では muscle swelling が顕著に起こり、これが大きな筋肥大効果に貢献すると考えられている^{15,16)}。

そこで本研究は、疲労困憊に至る低強度レジスタンス運動が muscle swelling へ及ぼす影響について、血流制限と非血流制限で比較することにした。

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者は健康な成人男性 8 名 (年齢 26.5±5.1 歳, 身長 173.6±4.9cm, 体重 70.3±4.3kg) であり, 安静時血圧 (エレノーマ血圧計, テルモ社製, 東京) はすべて正常範囲内であることを確認した。全ての被験者は定期的 (週 2~3 回) なスポーツ活動を実施していた。被験者には事前に本研究の目的, 測定内容や運動時の安全管理を文書および口頭で十分に説明し, 文書での研究参加の同意を得た。本研究は東京大学医学部の倫理委員会の承認

を受けて実施された (承認番号: 3681)。

1.2 運動条件

本研究では、片側のアームカール運動を用いた。被験者の左右の腕を無作為に血流制限側 (BFR) または非血流制限側 (NBFR) に分類した。BFR と NBFR の運動条件は先行研究^{4,12,13)} を参考に設定し, 強度は 20% 1RM, セット数は 4 セットとし, セット間の休息は BFR が 30 秒間, NBFR が 3 分間とした。運動中のテンポは 2.4 秒に 1 回 (短縮性: 伸張性運動 = 1.2:1.2 秒) とし, 短縮性収縮が 1.2 秒で遂行不可になった時点を各セットにおける疲労困憊とした。1RM は, 実験の少なくとも 1 週間前に, 実験で用いるアームカールベンチを使って, 先行研究¹⁾ に従い測定した。

1.3 血流制限の条件

血流制限には 3cm 幅の伸縮性ベルト (Kaatsu-Master, KAATSU JAPAN 社製, 東京) を用い, 上腕基部に装着 (30mmHg) してから空圧式センサーで圧を加えた。BFR での圧強度は先行研究¹²⁾ を参考に 160mmHg とし, 4 セット終了後に速やかに除圧した。また, NBFR では, ベルトの装着は行わなかった。なお, 2 つの実験順序はランダムとし, それぞれの条件の実施には, 1 週間以上の間隔を空けた。

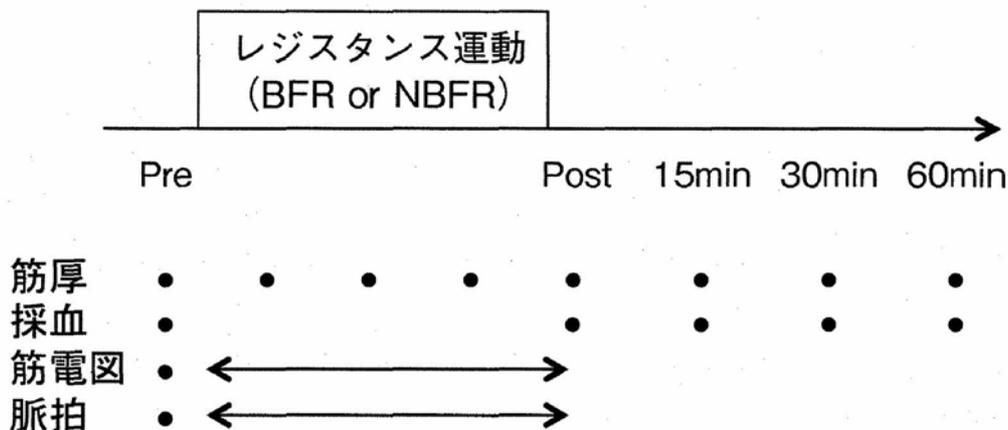


図1 実験の流れ

1.4 筋厚の測定

超音波 B モード法 (Acuson Sequoia 512, SIEMENS 社製, 東京) にて, 上腕部前面 60% 位置の筋厚を測定した (図 1). 上腕長は肩峰から尺骨肘頭までの直線距離とし, 上腕 60% 位置に油性ペンで印を付けた. 決定した測定位置に超音波プローブ (5MHz) を皮膚に圧迫がかからないようにあて, 皮下脂肪, 筋組織, 上腕骨を含む超音波画像を取得した. 測定位置における筋厚は, 皮下脂肪と筋組織の境界線から上腕骨までの距離とした¹⁶⁾.

1.5 血液成分の測定

橈側皮静脈から静脈血を毎回 2ml 採取し, ヘマトクリット, 赤血球数, 乳酸を測定した (図 1). 乳酸の測定には簡易血中乳酸測定器 (ラクテート・プロ, アークレイ社製, 東京) を用いた.

1.6 筋電図の測定

筋電図の測定には生体アンプ (AB-621G, 日本光電社製, 東京) を用い, 1,000Hz の帯域周波数で双極誘電法にて記録した. 上腕二頭筋の筋腹付近に直径 1cm のディスポーザブル電極 (ピトロード F, Ag/AgCl 皿形電極, 日本光電社製) を貼付し, 電極間の距離は 2cm とした. 電極の貼付に先立ち, 角質除去クリーム (スキンプュア, 日本光電社製) にて皮膚を研磨後, アルコール綿にて拭拭した. 筋電図の波形は, AD 変換器 (Powerlab/8sp) を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ. 筋電図の分析は解析ソフト Lab Chart ver. 7 (AD Instruments ジャパン社製, 東京) を用い, アームカール運動中の筋放電量の積分値 (iEMG) を求めた (図 1). iEMG は, 連続的に記録された筋電図データ全てとし, 実験直前に実施した 5 回の平均値を 1.0 とした¹³⁾. 実験中は運動 5 回毎に 1 ポイントとして iEMG を算出し, 各セットの最終で抽出回数が 5 回未満の場合は回数に応じ

て iEMG とした. 各セットで得られた iEMG の最大値を代表値として分析に用いた.

1.7 脈拍の測定

片側のアームカール運動を実施する間, 対側の指先には超小型パルスオキシメーター (オニックス II, NONIN 社製, Minnesota) を装着し, 運動前と運動中の脈拍を連続して測定した. 各セットで得られた脈拍の最大値を代表値として分析に用いた (図 1).

1.8 統計処理

各測定項目はすべて平均値 \pm 標準偏差で示した. 運動条件差および時間変化に関しては「運動条件 (BFR, NBFR) \times 時間」に関する二元配置の分散分析を行い, 有意差が認められた場合には Tukey 法を用いて post-hoc テストを実施した. 解析には JMP Pro Ver. 9.0 for Mac を用い, 危険率 5% 未満を有意水準とした.

2. 研究結果

BFR と NBFR の間で 1RM (13.3 ± 2.5 , 13.3 ± 2.2 kg) と運動前の安静時血圧 (収縮期血圧: 123 ± 6 , 121 ± 8 mmHg; 拡張期血圧: 72 ± 8 , 73 ± 14 mmHg) に有意な違いは認められなかった.

2.1 運動回数

2 条件ともに 1 セット目の運動回数が一番多く, 2 セット目以降は運動回数が有意に低下した. 1 ~ 3 セット目の運動回数は NBFR が BFR より有意に多く, 4 セットの総運動回数においても NBFR (208 ± 60 回) が BFR (102 ± 26 回) より有意 ($p < 0.01$) に多かった (図 2).

2.2 筋厚

Pre の筋厚は 2 条件で同様の値を示した (BFR, NBFR: 3.2 ± 0.4 , 3.4 ± 0.4 cm). 運動に伴う筋厚は,

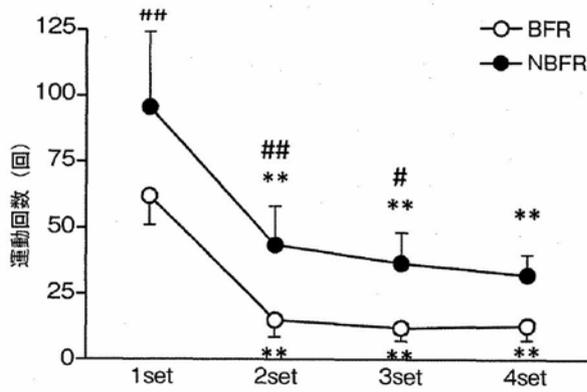


図2 各セット中の運動回数
**p<0.01, vs 1set; ##p<0.01, #p<0.05, vs. BFR

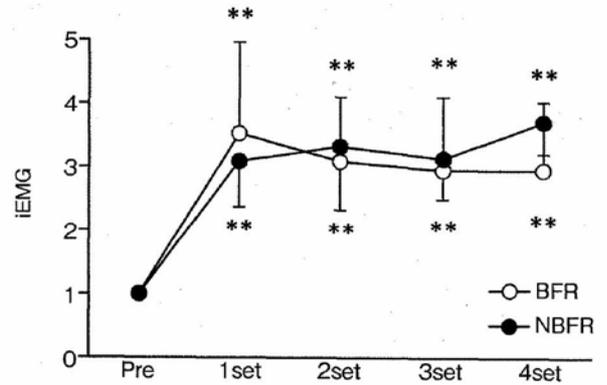


図4 運動に伴う筋活動量 (iEMG) の経時変化
**p<0.01, vs Pre

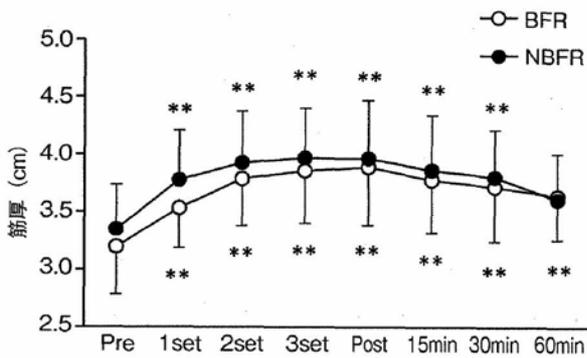


図3 運動に伴う筋厚の経時変化
**p<0.01, vs Pre

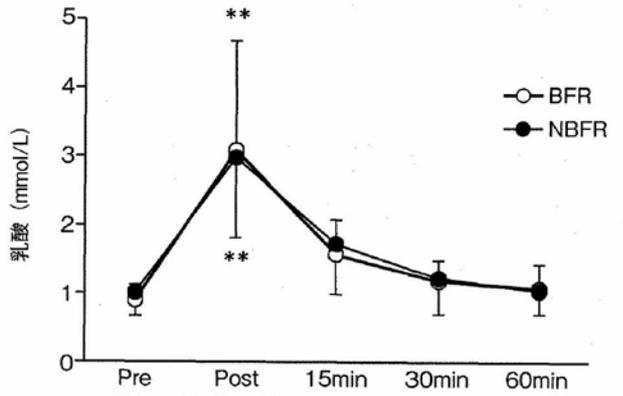


図5 運動に伴う乳酸の経時変化
**p<0.01, vs Pre

2条件ともに1セット終了時点から有意に上昇し、BFRではPostでPreの1.23倍に達したのに対し、NBFRでは3セット終了時点で1.19倍に達したが、運動を通じて2条件で有意差は認められなかった(図3)。

2.3 筋活動量 (iEMG)

運動中のiEMGは、2条件ともに1セット中から漸増し、BFRでは1セット中にPreの3.52倍に達したのに対し、NBFRでは4セット中に3.70倍に達したが、運動を通じて2条件で有意差は認められなかった(図4)。

2.4 血液成分

乳酸は2条件ともPostで有意な増加(BFR, NBFR: 3.1±1.6, 3.0±1.2 mmol/L)を示したが、条件間に有意差は認められなかった(図5)。ま

た、血液中のヘマトクリットと赤血球数も、2条件ともPost(BFR, NBFR: 48.7±2.6%と510±32, 48.0±2.0%と507±31×10000/μL)でPre(BFR, NBFR: 46.6±2.3%と490±30, 46.5%±1.7と496±26×10000/μL)より有意な増加を示したが、条件間に有意差は認められなかった。

2.5 脈拍

1~4セット中の脈拍(BFR: 98±9, 97±8, 93±5, 94±5 bpm; NBFR: 97±15, 99±16, 98±14, 103±18 bpm)は2条件ともにPre(BFR, NBFR: 69±9, 67±11 bpm)より有意な増加を示したが、条件間に有意差は認められなかった。

3. 考察

3.1 低強度レジスタンス運動と muscle swelling

本研究では、疲労困憊に至る低強度レジスタンス

ス運動によって、BFRだけでなくNBFRでも大きな muscle swelling が観察された。一般に、急性の swelling はタンパク合成を刺激し、タンパク分解を抑制すると報告されている^{3,5)}。先行研究では、急性のBFR運動によって muscle swelling が観察された筋ではその後のトレーニングによって顕著に肥大することが観察されており^{16,17)}、 muscle swelling が筋の同化作用に重要であると報告されている⁶⁾。一方、近年の研究^{4,10)}はNBFRでも急性運動後には筋の同化作用が有意に上昇することを報告し、Ogasawaraら⁸⁾によってNBFRの筋力トレーニングでも筋肥大することが確認されたが、 muscle swelling との関係性は不明だった。本研究では運動に伴う主働筋の筋厚変化には2条件で違いが観察されなかったため、血流制限の有無によらず疲労困憊に至る低強度レジスタンス運動は十分に筋の同化作用を刺激すると推察された。

3.2 低強度レジスタンス運動と筋活動量 (iEMG)

筋電図を用いた研究では、BFR運動中は運動強度が低い(20%IRM)にもかかわらず、通常の高強度筋力トレーニングを行った場合に匹敵する筋活動量(iEMG)が確認され、この顕著な筋活動は筋肥大が十分に期待できるレベルであることを報告している^{12,13,16)}。先行研究では、このiEMGの増加は活動筋が十分な血流を獲得できないため、その運動に動員された筋線維内に代謝産物の蓄積が起り発揮張力は低下し、その筋力低下を補うために新たな筋線維(主に速筋線維)が動員されて運動が継続されると推察している¹¹⁾。本研究では、BFRとNBFRは運動中のiEMGが同じレベルまで顕著な増加を示し、運動に伴う代謝産物(乳酸)の蓄積にも違いが観察されなかった。したがって、NBFRでも低強度レジスタンス運動(20%IRM)を疲労困憊に至るまで実施す

ると、BFRと同様に筋活動の増加(主に速筋線維の動員)を促進することが可能である。また、2条件とも運動後の静脈血ではヘマトクリット値や赤血球数の顕著な増加が観察されたため、運動中の速筋線維の動員に伴う代謝産物の蓄積が末梢血管系から筋組織へ血漿を移動させ、 muscle swelling の増加を引き起こしたと推察される。したがって、NBFRでは運動1回あたりの代謝産物の蓄積はBFRほどは大きくないが、筋内エネルギーの需要-供給関係にミスマッチが存在しており、運動回数を約2倍実施することでBFRとほぼ同じiEMGと muscle swelling に達したと考えられる。

3.3 今後の課題

非血流制限は総運動回数が血流制限よりも約2倍多く、それに伴う精神的な苦痛が生じていた。そのため、被験者の内省報告では、全員がトレーニングとして実施する場合には非血流制限よりも血流制限の方を希望していた。さらに、血流制限は運動直後の除圧により虚血-再還流に伴うずり応力が一酸化窒素の産生を促進し、トレーニング後の動脈・血管系機能へ有益な効果を示すことが報告されているが^{9,14)}、非血流制限ではそのような効果が期待できるか定かではない。高齢者やリハビリテーション患者に対するトレーニング方法へと発展させるためには、今後は動脈・血管系機能や安全性に関してさらなる検討が必要であろう。

4. 結論

本研究では、疲労困憊に至る低強度レジスタンス運動が muscle swelling へ及ぼす影響を血流制限と非血流制限で比較した。その結果、両条件ともに各セット間の休息中および運動後の muscle swelling が顕著に増加し、その大きさには条件間で違いがないと判明した。そのため、通常血流の低強度レジスタンス・トレーニングを疲労困憊ま

で実施すると、加圧トレーニングと同様の筋肥大を引き起こす可能性がある」と推察された。

謝 辞

本研究に助成いただい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に深く感謝申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり、ご協力いただきました東京大学の中島敏明特任准教授、飯田陽子特任研究員ならびに被験者の皆様に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Abe T., deHoyos D.V., Pollock M.L., Garzarella L., Time course for strength and muscle thickness changes following upper and lower body resistance training in men and women. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 81: 174-180 (2000)
- 2) Abe T., Kawamoto K., Yasuda T., Kearns C.F., Midorikawa T., Sato Y., Eight days KAATSU-resistance training improved sprint but not jump performance in collegiate male track and field athletes. *Int. J. KAATSU Training Res.*, 1: 13-18 (2005)
- 3) Berneis K., Ninnis R., Haussinger D., Keller U., Effects of hyper- and hypoosmolality on whole body protein and glucose kinetics in humans. *Am. J. Physiol.*, 276: E188-E195 (1999)
- 4) Burd N.A., West D.W., Staples A.W., Atherton P.J., Baker J.M., Moore D.R., Holwerda A.M., Parise G., Rennie M.J., Baker S.K., Phillips S.M., Low-load high volume resistance exercise stimulates muscle protein synthesis more than high-load low volume resistance exercise in young men. *PLoS One*, 9: e12033 (2010)
- 5) Häussinger D., Roth E., Lang F., Gerok W., Cellular hydration state: an important determinant of protein catabolism in health and disease. *Lancet*, 22: 1330-1332 (1993)
- 6) Loenneke J.P., Fahs C.A., Rossow L.M., Abe T., Bemben M.G., The anabolic benefits of venous blood flow restriction training may be induced by muscle cell swelling. *Med. Hypotheses*, 78: 151-154 (2012)
- 7) Nakajima T., Kurano M., Sakagami F., Iida H., Fukumura K., Fukuda T., Takano H., Madarame H., Yasuda T., Nagata T., Sato Y., Yamasoba T., Morita T., Effects of low-intensity KAATSU resistance training on skeletal muscle size/strength and endurance capacity in patients with ischemic heart disease. *Int. J. KAATSU Training Res.*, 6: 1-7 (2010)
- 8) Ogasawara R., Loenneke J.P., Thiebaud R.S., Abe T., Low-Load Bench Press Training to Fatigue Results in Muscle Hypertrophy Similar to High-Load Bench Press Training. *Int. J. Clin. Med.*, 4: 114-121 (2013)
- 9) Ozaki H., Yasuda T., Ogasawara R., Sakamaki-Sunaga M., Naito H., Abe T., Effects of high-intensity and blood flow-restricted low-intensity resistance training on carotid arterial compliance: role of blood pressure during training sessions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113:167-174 (2013)
- 10) Wernbom M., Apro W., Paulsen G., Nilsen T.S., Blomstrand E., Raastad T., Acute low-load resistance exercise with and without blood flow restriction increased protein signalling and number of satellite cells in human skeletal muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (2013) [Epub ahead of print]
- 11) Yasuda T., Abe T., Brechue W.F., Iida H., Takano H., Meguro K., Kurano M., Fujita S., Sato Y., Nakajima T., Venous blood gas and metabolite response to low-intensity muscle contractions with external limb compression. *Metabolism.*, 59:1510-1519 (2010)
- 12) Yasuda T., Brechue W.F., Fujita T., Shirakawa J., Sato Y., Abe T., Muscle activation during low-intensity muscle contractions with restricted blood flow. *J. Sports Sci.*, 27: 479-489 (2009)
- 13) Yasuda T., Brechue W.F., Fujita T., Sato Y., Abe T., Muscle activation during low-intensity muscle contractions with varying levels of external limb compression. *J. Sports Sci. Med.*, 7: 467-474 (2008)
- 14) Yasuda T., Fukumura K., Fukuda T., Uchida Y., Iida H., Meguro M., Sato Y., Yamasoba T., Nakajima T., Muscle size and arterial stiffness after blood flow-restricted low-intensity resistance training in older adults. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, (2013) [Epub ahead of print]
- 15) Yasuda T., Fujita S., Ogasawara R., Sato Y., Abe T., Effects of low-intensity bench press training with restricted arm muscle blood flow on chest muscle hypertrophy: a pilot study. *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, 30: 338-43 (2010)
- 16) Yasuda T., Loenneke J.P., Thiebaud R.S., Abe

- T., Effects of low-intensity blood flow restricted concentric or eccentric training on muscle size and strength. *PLoS One*, 12: e52843 (2012)
- 17) Yasuda T., Ogasawara R., Sakamaki M., Ozaki H., Sato Y., Abe T., Combined effects of low-intensity blood flow restriction training and high-intensity resistance training on muscle strength and size. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111: 2525-2533 (2011)