

血流制限下低強度レジスタンス運動：女性における検討

Resistance training with blood flow restriction in women

沖田 孝一

Koichi OKITA

キーワード：筋力トレーニング，代謝的ストレス，性差，磁気共鳴スペクトロスコピー

I. はじめに

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，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¹⁾。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²⁻⁴⁾。

しかしながら，レジスタンス運動により目的とする効果（筋量および筋力増加）を得るには，最大筋力の65%以上（50~80%）の高い負荷強度が推奨されるため⁵⁾，高齢者，有疾病者および女性において施行するには，運動器損傷や心血管系への過負荷を来す危険性から臨床的に困難なことが多い⁶⁾。また，特に女性では，レジスタンス運動の効果が得られにくいことが知られている^{7, 8)}。

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⁹⁻¹¹⁾。

レジスタンス運動の効果を評価するには，一定期間のトレーニング前後で骨格筋量や筋力の変化を調べることが一般的であるが，期間が長くなると，栄養摂取状況の問題など他の因子の関与も無視できなくなる。我々は，トレーニング負荷の大きさを単回の運動における骨格筋内エネルギー代謝の変化を用いて評価することを提唱し，

またその正当性を証明してきた^{12, 13)}。本研究では，同方法を用いて，女性および男性における血流制限を併用したレジスタンス運動の効果を評価し，その差異について検討を行った。

II. 方法

1. 被験者

健常女性13名（年齢：20.8±3.8歳）と年齢を対応させた健常男性13名（年齢：22.2±3.7歳），計26名を対象とした。

2. レジスタンス運動

仰臥位における右足関節底屈運動を毎分30回のペースで，総計60回（2分間）施行した。運動には，独自に考案した装置を用い，ペダルを介して錘を正確に5 cm挙上するよう調整し，運動負荷を定量的に行った。

3. 負荷条件

あらかじめ最大挙上重（1-RM：one repetition maximum）を測定し，その20%を用いた低強度条件とその条件に加えて，先行研究に基づき，空気圧式カフを用いて，被験者の収縮期血圧の1.3倍で血流制限を行った低強度血流制限，さらに一般的に推奨される1 RMの65%を用いた高強度条件の3条件にて運動を行った。

4. 骨格筋内エネルギー代謝の測定と筋線維動員の評価

被験者は，全身用MR装置内（1.5Tesla, Magnetom H15, Siemens, Erlangen, Germany）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80mm）を固定し、磁気共鳴分光法¹⁴⁾による測定を安静時および運動中30秒ごとに行った（図1）。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（phosphocreatine：PCr）および無機リン酸（inorganic phosphate：Pi）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[PCr]と[Pi]の和は理論上一定であることから、先行研究に基づいて^{15, 16)}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、無機リン酸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^{17, 18)}。また無機リン酸の二峰性ピークの出現を明らかな速筋線維の動員とし¹⁹⁻²¹⁾、その出現率を検討した。



図1 骨格筋代謝測定の様子

5. 統計処理

条件間のクレアチンリン酸量および筋細胞内 pH の比較は、反復測定 ANOVA により行い、条件間に有意差が認められた場合、Bonferroni の多重比較（post-hoc）により検定した。記述データは、平均（標準偏差）で表し、グラフのエラーバーは、標準誤差とした。

Ⅲ. 結果

基礎データは、表1に示す通りであり、女性の1-RMは男性に比べて有意に低かったため、各条件における絶対的負荷量は、女性において低値となっている。また収縮期血圧も女性において低値であったため血流制限圧も低くなっている。

1. 骨格筋内エネルギー代謝

図2に安静から運動時における骨格筋内クレアチンリ

表1 被験者の基礎データ

項目	男性 (n=13)	女性 (n=13)
年齢, 才	22.2±3.7	20.8±3.8
身長, cm	171.9±4.4	160.5±4.0*
体重, kg	65.9±6.3	53.5±6.7*
BMI	22.3±2.4	20.8±2.3
収縮期血圧, mmHg	124.2±11.7	106.5±6.3*
血流制限圧, mmHg	161.5±15.2	138.5±8.1*
1RM, kg	50.7±6.6	31.8±8.3*
20%1RM, kg	10.2±1.2	6.4±1.6*
65%1RM, kg	33.1±4.3	

*p<0.05. 男性 vs 女性.

ン酸の経時的変化を示した。各条件・時間において、統計学的有意差は見られなかった。図3は筋細胞内 pH の経時的変化を示したグラフである。65% 1-RM 条件において、女性における筋内 pH の低下が小さいように見えるが、クレアチンリン酸同様に各条件・時間においても統計学的有意差はみられなかった。

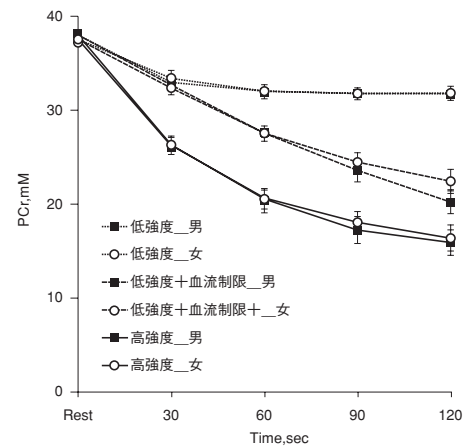


図2 クレアチンリン酸（PCr）の経時的変化。男女間に統計学的有意差なし。平均±標準誤差。

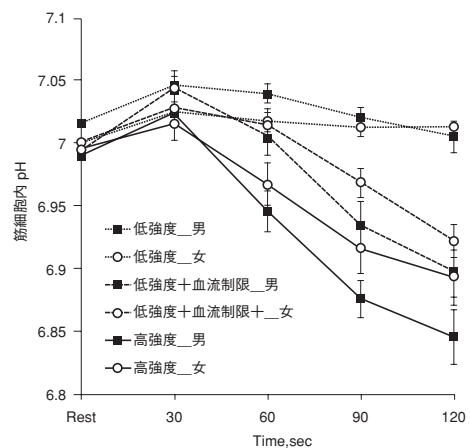


図3 筋細胞内 pH の経時的変化。男女間に統計学的有意差なし。平均±標準誤差。

2. 速筋線維の動員

血流制限条件および高強度条件において、図4に示すような二峰性の無機リン酸が出現した。左側のピークが遅筋線維、右側のピークは速筋線維を表し、速筋線維が動員されていること反映している。表2は二峰性無機リン酸の発現率を表したものである。男性において二峰性無機リン酸の発現率が高い傾向がみられたが、統計学的有意差はなかった。

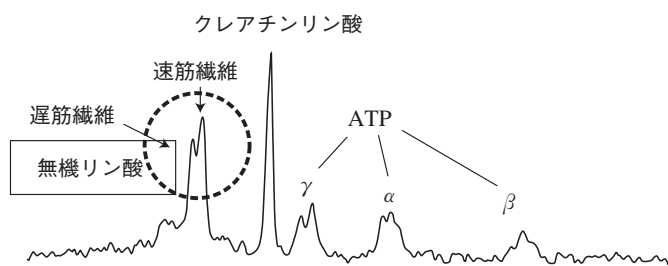


図4 二峰性無機リンの発現 (典型例)

表2 二峰性無機リンの発現率

	低強度+血流制限		高強度	
	男性	女性	男性	女性
発現率, %	5/13	3/13	12/13	6/13
	38.5	23.1	92.3	46.2

IV. 考 察

女性における血流制限下低強度レジスタンス運動の効果を単回の運動におけるエネルギー代謝の変化によって評価したが、運動に伴う骨格筋内のクレアチンリン酸および筋細胞内 pH の経時的変化と各時点の値において、男性と比較して明らかな差はみられなかった。また男女の二峰性無機リン酸の発現率の比較において、男性の発現率が女性に比べて高い傾向が見られたが有意ではなかった。これらのことから、血流制限下低強度レジスタンス運動では、女性においても男性と同等の効果が得られることが示唆された。

本研究では、血流制限を併用しない低強度負荷条件および高強度負荷条件においても骨格筋内エネルギー代謝の男女差はみられなかったが、筋内 pH については、高強度負荷条件において女性での低下が小さい傾向にあった。同様に、有意でないものの血流制限下および高強度負荷における二峰性無機リン酸の発現率が女性において低い傾向が認められたことは、女性ではレジスタンス運動の効果が得られにくいとする過去の報告に合致していると考えられる。

1. レジスタンス運動における男女差

これまでの研究で報告されているように女性においてレジスタンス運動の効果が得られにくい理由には、以下の原因が挙げられる。

1つは、男性と女性の遅筋線維の割合の差である。骨格筋生検により男女の筋線維組成を調べた Staron らの研究では、女性の Type I 線維の割合は男性よりも高いことが示されている²²⁾。また、Simoneau and Bouchard (1989) らの同様の研究においても、男性と女性の遅筋線維の占有率は男性が $46 \pm 15\%$ 、女性が $51 \pm 13\%$ であり、男性に比べ女性が有意に高いことが報告されている²³⁾。筋線維型では、速筋線維に比べ遅筋線維は、細く、肥大しにくい⁵⁾。また従来のレジスタンス運動は、速筋線維を動員することを目的とする運動様式であるが、遅筋線維が多いと、サイズの原理により²⁴⁾、それらが先行して動員されるため速筋線維が動員されにくいことになる。さらに、それらの研究を支持するように、酸化系酵素である HAD (3-hydroxyacyl CoA dehydrogenase) とクエン酸回路内酵素である SDH (succinic dehydrogenase) の比 (HAD/SDH) も、男性に比較して女性が有意に高値を示すことが報告されている²⁵⁾。女性の Type I 線維の割合や酸化系酵素の高い割合は、女性の筋疲労耐性に繋がり、持久性には有利ではあるが、一方、レジスタンス運動においては、筋への負荷刺激は少なくなり、効果が小さくなることに繋がると推測される。

2つ目は、最大筋力の差である。最大筋力の絶対値は、当然、男性の方が女性に比べ明らかに高く、男性の方が高い負荷強度を用いてレジスタンス運動を行うことになる。運動時の筋内圧は、負荷強度に応じて高くなるため、負荷が高いと、血管がより圧排され、血流が悪くなる。従って、特に血流制限を併用しない場合は、絶対筋力が高い男性において、レジスタンス運動時の筋内血流がより障害され、エネルギー代謝が亢進し、効果が得られるやすくなる可能性がある。

本研究において、血流制限の有無に関わらず、エネルギー代謝からみたレジスタンス運動中の筋負荷は、男女で同等であり、効果も同等に得られることが示唆された。しかしながら、従来の高強度負荷を用いたレジスタンス運動では、女性の筋負荷 (pH) がやや軽い傾向があるのに対し、血流制限ではその差は小さい傾向があり、血流制限の併用は、女性において有用である可能性がある。今後、対象を増やし、またプロトコルを変えた詳細な研究を計画していく必要がある。

付 記

本研究は、「平成22年度北翔大学北方圏生涯スポーツ

研究センターの研究費」の助成を受けて実施されたものである。

文 献

- 1) Braith RW, Stewart KJ : Resistance exercise training : its role in the prevention of cardiovascular disease. *Circulation*, 113 : 2642-2650, 2006.
- 2) Heitmann BL, Frederiksen P. Thigh circumference and risk of heart disease and premature death : prospective cohort study. *BMJ*, 339 : b3292 (online, p1-8), 2009.
- 3) Newman AB, 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 WJ, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training : progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc*, 36 ; 674-688, 2004.
- 6) Braith RW, Beck DT : Resistance exercise : training adaptations and developing a safe exercise prescription. *Heart Fail Rev*, 13 : 69-79, 2008.
- 7) 本郷 允彦 : 女性のスポーツ医学. 南江堂, 東京, 1996.
- 8) 宮下 充正 : 女性のライフステージから見た身体運動と健康. 杏林書店, 東京, 1995.
- 9) 石井 直方 : 筋血流制限とトレーニング. *体育の科学*, 53(8) : 564-568, 2003.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Suga T, Okita K, Morita N, Yokota T, et al. : Dose Effect on Intramuscular Metabolic Stress during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction. *J Appl Physiol*, 108 : 1563-1567, 2010.
- 13) Takada S, Okita K, Suga T, et al. : High-metabolic Stress During Resistance Exercise Might Provide Muscle Hypertrophy And Strength Increase Even With Low-mechanical Stimulus. *Med Sci Sports Exerc*, suppl.42 (5) : 498, 2010.
- 14) Taylor DJ, Bore PJ, Styles P, et al. : Bioenergetics of intact human muscle : A 31P nuclear magnetic resonance study. *Mol Biol Med*, 1 : 77-94, 1983.
- 15) Harris RC, Hultman E, Nordesjö LO : 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.
- 16) Kemp GJ, Radda GK : 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, 1974.
- 17) Lanza IR, Befroy DE, Kent-Braun JA : Age-related changes in ATP-producing pathways in human skeletal muscle in vivo. *J Appl Physiol*, 99 : 1736-44, 2005.
- 18) Wilson JR, McCully KK, Mancini DM, et al. : Relationship of muscular fatigue to pH and diprotonated Pi in humans : a 31P-NMR study. *J Appl Physiol*, 64 : 2333-9, 1988.
- 19) Houtman CJ, Heerschap A, Zwarts MJ, et al. : pH heterogeneity in tibial anterior muscle during isometric activity studied by 31PNMR spectroscopy. *J Appl Physiol*, 91 : 191-200, 2001.
- 20) Park JH, Brown RL, Park CR, et al. : Functional pools of oxidative and glycolytic fibers in human muscle observed by 31P magnetic resonance spectroscopy during exercise. *Proc Natl Acad Sci USA*, 84 : 8976-8980, 1987.
- 21) Vandenborne K, McCully K, Kakihiro H, et al. : Metabolic heterogeneity in human calf muscle during maximal exercise. *Proc Natl Acad Sci USA*, 88 : 5714-5718, 1991.
- 22) Staron RS, Hagerman FC, Hikida RS, et al. : Fiber type composition of the vastus lateralis muscle of young men and women. *J Histochem Cytochem*, 48 : 623-9, 2000.

- 23) Simoneau JA, Bouchard C : Human variation in skeletal muscle fiber-type proportion and enzyme activities. *Am J Physiol*, 257 (4 Pt 1) : E567-72, 1989.
- 24) Henneman E, Somjen G, Carpenter DO : Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol*, 28 : 865-879, 1965.
- 25) Green HJ, Fraser IG, Ranney DA : Male and female differences in enzyme activities of energy metabolism in vastus lateralis muscle. *J Neurol Sci*, 65 : 323-31, 1984.

