

筋酸素化レベルを指標とする筋力トレーニング処方確立に向けた研究

北田友治¹, 尾崎隼朗²

¹⁾ 順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科, ²⁾ 順天堂大学スポーツ健康科学部

1. 諸言

筋力トレーニングは、今やアスリートの競技力向上のためだけでなく、サルコペニアの予防や、糖代謝異常の改善といった観点からも重要視され、全国民に対して広くその実施が推奨されている[Roth et al., 2000; Grøntved et al., 2012; American College of Sports Medicine, 2009]. しかしながら、こうした幅広い対象者に向けて筋力トレーニングを処方するほどのエビデンスについては、我々の知る限り十分には得られていないのが現状である。

筋力トレーニングの効果は、機械的なストレスと代謝的なストレスの程度に左右され、前者は最大拳上重量 (Repetition maximum; RM) に対する割合 (%RM) などを指標として一般的に評価されてきた[Goldberger et al., 1975]. しかしながら、後者を客観的かつ簡易に評価する指標は、現在のところ明確になっていない。機械的な負荷が小さくても疲労困憊まで運動を実施することによって同様の効果が得られる[Tanimoto and Ishii, 2006; Mitchell et al., 2012]との報告があることから、代謝的なストレスの程度を推し量る指標を発見することは、筋力トレーニング処方を確立するうえで重要であると考えられる。

ところで、申請者は近赤外線分光法を用いることでレッグエクステンション中の筋酸素動態をモニタリングしたところ、筋酸素化レベルが動作の継続回数 (レップ数) に伴い低下し、ある時点からその低下が停滞することを観察している[未発表]. Tanimoto and Ishii[2006]は、低負荷のスロートレーニングによる効果には筋内の低酸素化の亢進が関与していることを示唆しており、血流制限を課してトレーニング部位を低酸素化させることで代謝ストレスを増大させると、短期間で筋肥大および筋力の増加もまた認められている[Pearson and Hussain, 2015]. これらの知見を踏まえると、筋酸素化レベルが筋力トレーニングを処方する際の一指標として有用である可能性、さらには筋酸素化レベルの停滞が起きるポイントが代謝的なストレスが大きく誘発されたことを示す生理応答であり、筋力トレーニングの効果を大きく左右する閾値である可能性が考えられる。

そこで、本研究は筋力トレーニング処方の確立に向け、筋酸素化レベルがその指標として有用か否かを調べることを目的として実施した。申請者は、筋酸素化レベルの低下が停滞する点を境に、筋力トレーニングの効果が大きく異なると仮説を立てた。

2. 研究方法

2.1 被験者

本研究では、健康な男子大学生 8 名 (年齢: 22 ± 3 歳, 身長: 173.1 ± 6.2 cm, 体重: 68.1 ± 6.5 kg, 体脂肪率: 14.4 ± 3.2 %) を対象とした。実験に先立ち、研究の目的、内容、方法および参加によって生じる不利益等について説明を行い、彼らから口頭および書面にて同意を得たうえで実験を実施した。彼らのうち、5 名は運動習慣を有しており、残りの 3 名もまた高専生までは運動習慣を有していた者であった。なお、本研究は、順天堂大学大学院スポーツ健康

科学研究科等倫理委員会の承認を受けた。

2.2 実験デザイン

被験者らの身体組成、下肢の筋厚および片脚でのレッグエクステンション（ワンレッグエクステンション）における 1RM を測定したうえで、それらを考慮したカウンターバランスによって、次に示す 3 つの群に振り分けた。筋酸素化レベルの低下が停滞する前で運動を中止する群（条件 1, n=5）、筋酸素化レベルの低下が停滞するまで運動を継続する群（条件 2, n=5）、筋酸素化レベルの変化に関係なく拳上ができなくなるまで運動を継続する群（条件 3, n=5）に分けた。なお、群分けには左右の脚を別々の群として扱ったが、うち 1 名の被験者が片脚を捻挫したことによりその者についてはもう片方の脚だけを対象とした。筋力トレーニングは、8 週間のワンレッグエクステンションを 60%1RM の負荷、週 3 回の頻度で継続して実施した。このとき、1 レップに要する時間はメトロノームを用いて拳上（コンセントリック局面）に 1 秒、下降（エキセントリック局面）に 2 秒のリズムで実施することを規定した。トレーニングに用いる負荷はトレーニング開始 4 週目に調整し、これに応じて条件設定となるレップ数もまた調整した。また、トレーニング期間の前後には、トレーニング効果を評価するために、1RM、筋持久力、等尺性最大筋力および筋厚を測定した。

2.3 筋力トレーニング

被験者らは、週 3 回の頻度でトレーニング室に設置されているレッグエクステンションマシン（CYBEX 社製）でワンレッグエクステンションを実施した。トレーニングに用いた負荷は 60%1RM とし、1 レップに要する時間はメトロノームを用いて拳上（コンセントリック局面）に 1 秒、下降（エキセントリック局面）に 2 秒のリズムで実施することを規定した。1 回のトレーニングで 3 セット実施し、セット間には 2 分の間隔を置いた。なお、1 セットごとのレップ数は、条件 1 および条件 2 においては予め測定した筋酸素動態から規定し、条件 3 においては各セットで拳上ができなくなるまでとした。

2.4 測定項目

2.3.1 筋酸素動態

筋力トレーニングにおける条件設定のために、近赤外レーザー組織血液酸素モニター（OMEGAMONITOR BOM-L1TRW, オメガウェーブ社製）を用いて、外側広筋（膝蓋骨上縁から大腿骨上 15 cm, さらにそこから外側へ 3–5 cm の部位）にプローブを貼り付けることで、ワンレッグエクステンション中の筋酸素動態を測定した。本プローブに内蔵されている光源には、異なる 3 つの波長（780 nm, 810 nm, 830 nm）の LED が用いられており、これらの波長を Beer-Lambert 則[Delpy, 1988]に基づいて変換することで、酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン（Hb/Mb）（Oxy-Hb/Mb）、脱酸素化 Hb/Mb（Deoxy-Hb/Mb）、総 Hb/Mb（Total-Hb/Mb）および筋酸素飽和度（StO₂）が算出される。本プローブの送光部と受光部の距離を 30 mm に設定したため、この距離における測定範囲は、～1.5 cm 程度であった[Chance et al., 1992; Bhamhani, 2004]。また、データは 10Hz で測定し、1 レップ毎の平均値として算出した。なお、本研究において、レップ数に伴い低下する筋酸素化レベルが停滞する時点を筋酸素停滞閾値（muscle oxygen stagnation threshold: MOST）と定義し、MOST を基準にして前後 2 レ

ップの時点をそれぞれ条件 1 および条件 2 と設定した。

2.3.2 1RM, 筋持久力および等尺性最大筋力

1RM は, トレーニングに用いた同一のレッグエクステンションマシンにて片脚ごとに測定された。また, 筋持久力は, トレーニング前における 60 %1RM の負荷で拳上できなくなるまでのレップ数として評価された。加えて, 多用途筋機能評価運動装置 (BIODEX SYSTEM 4, BIODEX 社製) を用いて膝関節屈曲 75 度位 (伸展筋力) および 15 度位 (屈曲筋力) における等尺性膝最大筋力が測定された。

2.3.3 筋厚

大腿部における筋厚は, 超音波診断装置 (Noblus、日立メディコ社製) を用いて B モード法によって測定された。測定部位は, 外側広筋 (近赤外レーザー組織血液酸素モニターのプロローブ貼付部位) に加えて, 膝蓋骨上縁 15 cm における大腿直筋の最大隆起部とした。

2.4 統計処理

すべての統計処理には, 統計解析ソフトウェア SPSS (SPSS Statistics Ver.17.0, IBM 社製) を用い, データは平均±標準偏差で示した。筋力トレーニング前後による条件間の比較には, 二元配置の分散分析を用い, これらの結果に有意差が認められた場合には, Bonferroni の多重比較により検定した。有意水準は 5 %未満とした。

3. 結果

3.1 MOST

MOST は 1 セット目が 6 ± 1 レップ, 2 セット目が 5 ± 1 レップ, 3 セット目が 5 ± 0 レップに出現し, このときの StO_2 はそれぞれ 36.4 ± 10.0 %, 36.6 ± 9.0 % および 36.5 ± 8.2 % であった。

3.2 1RM, 筋持久力および等尺性最大筋力の変化

表 1 には, 各条件における筋力トレーニング前後での 1RM, 筋持久力および等尺性最大筋力の変化を示した。ワンレッグエクステンションにおける 1RM は, すべての条件においてトレーニング前に比べてトレーニング後で有意な向上が認められた ($p < 0.01$)。また, 筋持久力は有意な交互作用がすべてのセット間で認められ ($p < 0.01$)。条件 1 ではトレーニング前後で有意な向上が認められなかった一方で, 条件 2 ($p < 0.05$) および条件 3 ($p < 0.01$) においてはトレーニング前に比べてトレーニング後で有意な向上が認められた。加えて, 等尺性膝伸展筋力はすべての条件において向上傾向 ($p = 0.06$) が認められた一方で, 等尺性膝屈曲筋力においては有意な変化は認められなかった。

3.3 筋厚の変化

表 2 には, 各条件における筋力トレーニング前後での筋厚の変化を部位ごとに示した。外側広筋における筋厚は, すべての条件において増加傾向が認められた ($p = 0.06$)。また, 大腿直筋における筋厚は, すべての条件において有意な増加が認められた ($p < 0.01$)。

Table 1. Changes in 1RM, muscular endurance and MVC during before and after one-leg extension exercise training for 8 weeks.

	1RM, kg		Muscular endurance, repetitions						MVC, Nm					
			1set		2sets		3sets		Extension torque		Flexion torque			
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post		
Condition 1	52.3 ± 9.0	71.1 ± 12.7**	16 ± 5	18 ± 5	12 ± 3	14 ± 4	10 ± 3	12 ± 3	277 ± 43	288 ± 45	121 ± 26	114 ± 22		
Condition 2	49.4 ± 10.4	65.2 ± 13.1**	16 ± 3	19 ± 3*	12 ± 2	15 ± 2*	10 ± 1	12 ± 2*	281 ± 19	302 ± 22	124 ± 19	118 ± 16		
Condition 3	49.3 ± 8.4	68.4 ± 18.2**	17 ± 4	26 ± 7**	11 ± 3	20 ± 6**	9 ± 2	17 ± 5**	260 ± 46	271 ± 33	119 ± 13	110 ± 13		

Values are mean ± SD; n = 5 for each condition. RM, repetition maximum; MVC, maximal voluntary contraction.

*Significant difference from before the training in each condition (p<0.05).

**Significant difference from before the training in each condition (p<0.01).

Table 2. Changes in muscle thickness of vastus lateralis and rectus femoris before and after one-leg extension exercise training for 8 weeks.

	Muscle thickness, mm			
	Vastus lateralis		Rectus femoris	
	Pre	Post	Pre	Post
Condition 1	27.3 ± 3.4	27.5 ± 3.1	27.8 ± 2.1	28.5 ± 1.8**
Condition 2	26.2 ± 2.6	27.6 ± 2.9	26.8 ± 3.0	28.2 ± 3.3**
Condition 3	29.2 ± 2.7	29.4 ± 3.6	26.8 ± 2.4	29.2 ± 2.8**

Values are mean ± SD; n = 5 for each condition.

**Significant difference from before the training in each condition (p<0.01).

4. 考察

本研究の主な知見は、筋酸素化レベルを指標として条件を振り分け、8週間のワンレッグエクステンションを実施した際、MOSTが出現するより前で運動を中止する場合（条件1）とは異なり、MOSTが出現するまで運動を継続する場合（条件2）および筋酸素化レベルの変化に関係なく拳上ができなくなるまで運動を継続する場合（条件3）では、1RMおよび筋厚に加えて筋持久力も有意に向上したことであった。

60%1RMでワンレッグエクステンションを実施した本研究において、1RMおよび筋厚がすべての条件で有意に向上した。1RMの向上率は、条件1が36.7±15.7%、条件2が33.2±17.7%、条件3が37.9±22.5%であった。これに対して、外側広筋および大腿直筋における筋厚の増加率は、条件1が100.9±4.0%および102.8±5.4%、条件2が105.3±4.9%および105.3±4.5%、条件3が100.4±3.5%および109.2±10.3%であった。この筋力の向上率と筋厚の増加率との間には、有意な相関関係は認められなかった。これらの結果は、筋力の向上には神経系の適応が大きく寄与していることを示唆している[Moritani and deVries, 1979]。また、本研究における対象者は、運動経験を有する者達であったものの、ランニングを主とし、レッグエクステンションを実施している者は誰一人いなかった。そのため、彼らにとってはMOST出現に至るまでの運動でも十分な刺激であったのかもしれない。

一方、筋持久力においては、条件2および条件3でのみ有意に向上した。筋持久力を向上させるためには、高いレップ数で実施することが推奨されている[American College of Sports Medicine, 2009]。実際、レッグエクステンションを高負荷低レップ数、中負荷中レップ数および低負荷高レップ数で実施した条件のうち、中負荷中レップ数および低負荷高レップ数で実施した条件でのみ筋持久力が向上したことが報告されている[Campos et al., 2002]。また、筋持久力の向上には、血流量の増加や毛細血管の発達などが関与していることが知られている[Kagaya and Ikai, 1970; American College of Sports Medicine, 2009]。Camposら[2002]もまた、筋持久力が向上した中負荷中レップ数および低負荷高レップ数で実施した条件においてのみ、毛細血管が発達傾向にあることを報告している。加えて、骨格筋における血管新生には低酸素化が起因していることが報告されている[Hoppeler, 1999]。本研究は、筋内の低酸素化に着目してトレーニング条件を設定した。本研究における条件2および条件3は、MOST出現以上の運動条件、すなわち、低酸素化が十分に生じている運動条件であった。そのため、十分な低酸素化が生じていた条件2

および条件3においてのみ、筋持久力が向上したと考えられる。しかしながら、毛細血管の新生が実際に生じていたかどうかについては、本研究ではそれに関連する項目を測定していなかったため、推測の域を出ないことは言及しておくべき点であろう。

最後に、疲労困憊に至るところまでは実施していない条件2においても、1RMおよび筋厚に加えて筋持久力が向上した結果は、筋酸素化レベルの低下が停滞する点を境に、筋力トレーニングの効果が異なるとの仮説を裏付けるエビデンスの一つであり、体力レベルや時間的な制限によって疲労困憊に至るまでの実施が困難な対象者にとって、筋酸素化レベルを指標とする筋力トレーニングが有用である可能性を示唆するものである。しかしながら、本研究は（サンプルサイズを含めて）対象者、トレーニング強度および種目において限定的であるため、今後は広範囲の体力レベルの者に対して異なるトレーニング強度や種目においても検証していくことが必要であろう。また、トレーニング実施の安全性を考慮すると、トレーニング時の血圧などを把握することは重要である。しかしながら、本研究では筋酸素動態に影響が及ぶ可能性を考慮し、あえて血圧等の測定を実施しなかった。そのため、今後は血管新生やホルモン応答などのトレーニング効果の違いを説明するメカニズムを検討していくことに加え、安全性の面からも十分に検討していく予定である。

5. 結言

本研究は、筋力トレーニング処方確立に向け、筋酸素化レベルがその指標として有用か否かを調べることを目的に、MOSTを境にして筋力トレーニングの効果が大きく異なるか仮説検証した。その結果、8週間のワンレグエクステンションにおける筋持久力は、MOSTが出現するまで運動を継続した場合および筋酸素化レベルの変化に関係なく拳上ができなくなるまで運動を継続した場合で有意な向上が認められたことに対して、MOSTが出現するより前で運動を中止した場合には有意差が認められなかった。これらの結果から、MOSTが筋力トレーニングの効果を左右する閾値として、筋力トレーニングを処方する際の一指標として有用である可能性が示唆された。

参考文献

- American College of Sports Medicine. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 2009;41:687-708.
- Bhambhani YN. Muscle oxygenation trends during dynamic exercise measured by near infrared spectroscopy. *Can J Appl Physiol* 2004;29:504-23.
- Campos GE, Luecke TJ, Wendeln HK, et al. Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol* 2002;88:50-60.
- Chance B, Dait MT, Zhang C, et al. Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am J Physiol* 1992;262:C766-75.
- Delpy DT. Developments in oxygen monitoring. *Journal of biomedical engineering* 1988;10:533-40.
- Goldberg AL, Etlinger JD, Goldspink DF, et al. Mechanism of work-induced hypertrophy of

skeletal muscle. *Medicine and science in sports* 1975;7:185-98.

Grøntved A, Rimm EB, Willett WC, et al. A prospective study of weight training and risk of type 2 diabetes mellitus in men. *Arch Intern Med* 2012;172:1306-12.

Hoppeler H. Vascular growth in hypoxic skeletal muscle. *Adv Exp Med Biol* 1999;474:277-86.

Kagaya A, Ikai M. Training effects on muscular endurance with respect to blood flow in males and females of different ages. *Res J Phys Ed* 1970; 14: 129-36.

Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DW, et al. Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J Appl Physiol* (1985) 2012;113:71-7.

Roth SM, Ferrell RF, Hurley BF. Strength training for the prevention and treatment of sarcopenia. *J Nutr Health Aging* 2000;4:143-55.

Moritani T, deVries HA Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med* 1979;58:115-30.

Tanimoto M, Ishii N. Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *J Appl Physiol* (1985) 2006;100:1150-7.