

運動時の筋長の違いがトレーニングにより
生じる筋肥大の程度に及ぼす影響
— 上肢筋群を対象に —

立命館大学 前大純朗
(共同研究者) 同 金久博昭

The Effect of Muscle Length During Resistance Training on Muscle Hypertrophy: Examination on Upper Limb Muscles

by

Sumiaki Maeo, Hiroaki Kanehisa
Ritsumeikan University

ABSTRACT

The triceps brachii long head (TBL) is a biarticular muscle that crosses the shoulder and elbow joints, and therefore its length is influenced by the position (angle) of each of these two joints. With this background of the biarticular nature of the TBL, this study examined the effect of muscle length during resistance training on muscle hypertrophy, by comparing two elbow extension training regimes performed at different, otherwise identical, shoulder joint positions. Using a cable machine, 21 healthy young adults conducted dynamic elbow extension (range of motion: 90-0°) training, with the shoulder joint of one side fixed at 180° flexion and the other at 0° (i.e. the elbow facing upwards and downwards, respectively), whereby the TBL was in a long (L) and short (S) length condition, respectively. The training was performed with the load of 70% of one-repetition maximum, 10 reps/set, 5 sets/session, 2 sessions/week, for 12 weeks. After the intervention, MRI-based cross-sectional area (CSA) of the total triceps brachii (the sum of the three muscles) significantly increased in both conditions,

with a greater degree for the L (23%) than S (16%). On an individual muscle basis, the CSA significantly increased in all muscles for both conditions, with a significant difference in the degree between conditions only found in the TBL (L: 33% vs S: 21%) and not in the other two (monoarticular) muscles. These results suggest that the muscle hypertrophic effect of resistance training can be enhanced by conducting training at a long muscle length position.

要 旨

本研究では、二関節筋である上腕三頭筋長頭 (TBL) に着目し、運動時の筋長の違いがトレーニングにより生じる筋肥大の程度に及ぼす影響を検証した。健常若年男女21名が、片方の腕を肩関節屈曲180°固定のLong条件 (L)、もう一方を0°固定のShort条件 (S) とし、ケーブルマシンを用いた動的肘関節伸展 (可動域90~0°) トレーニングを週2日、12週間行った。負荷は最大挙上重量の70%とし、回数は10回反復/セット、5セット/日とした。トレーニングにより、MRIから測定した上腕三頭筋の横断面積は両条件で増加したが、その程度はL (23%) がS (16%) よりも有意に大きかった。筋別にみると、各筋の横断面積は両条件で有意に増加したが、その程度はTBLでのみL (33%) がS (21%) よりも大きかった。本研究の結果から、筋長が長い状態でトレーニングを行うことにより、筋肥大効果が促進されることが示唆された。

緒 言

筋力は筋機能を規定する重要因子であり、筋量に大きく依存する。例えば、肘関節屈曲筋群の筋体積は、肘関節屈曲筋力の個人差の87%を説明しうる¹⁾。筋力と筋量を増加させる最も有効な介入手段は、筋に抵抗をかけるレジスタンストレーニング (以下: トレーニング) であり、現在、アスリートのみならず多くの人々がトレーニングを実施して

いる。したがって、筋肥大をより効果的に促すトレーニング方法を確立することは、トレーニングに対する実社会のニーズ (競技パフォーマンスやQOLの向上) に応える、スポーツ健康科学領域の重要な研究課題である。

近年、筋が伸張された状態、すなわち筋長が長くなる関節角度でトレーニングを行うことにより、筋長が短くなる関節角度で行う場合に比べ筋肥大の効果が高まることが示唆されている^{2,3)}。しかしながら、これを否定する結果も散見され^{4,5)}、一致した見解は得られていない。その主な理由として、先行研究における1) サンプル数の少なさ (8~9名) および2) 下肢筋群の筋量変化の小ささ (+5~11%) が挙げられる。また、他にも考慮すべき点として、先行研究間の3) トレーニング様式の違い (動的 vs 静的) や4) 筋量の評価方法の違い (MRI vs 超音波) などが影響していると考えられる。

四肢の主要な骨格筋は、一つの関節をまたぐ単関節筋と、二つの関節をまたぐ二関節筋に大別できる。例えば、上腕三頭筋を構成する長頭 (TBL)、外側頭 (TBLat)、および内側頭 (TBMed) の三筋は全て肘関節をまたぎ肘関節の伸展に作用するが、そのうちTBLのみが肩関節もまたぐ二関節筋であり、その筋長は肩関節の角度にも影響を受ける。すなわち、肘関節の角度や可動域が等しい条件で運動を行う場合、肩関節が屈曲位 (例: 腕が前方に挙上された位置) にある方が、伸展位 (例: 解剖学的正位・安静位) にあるよりもTBL

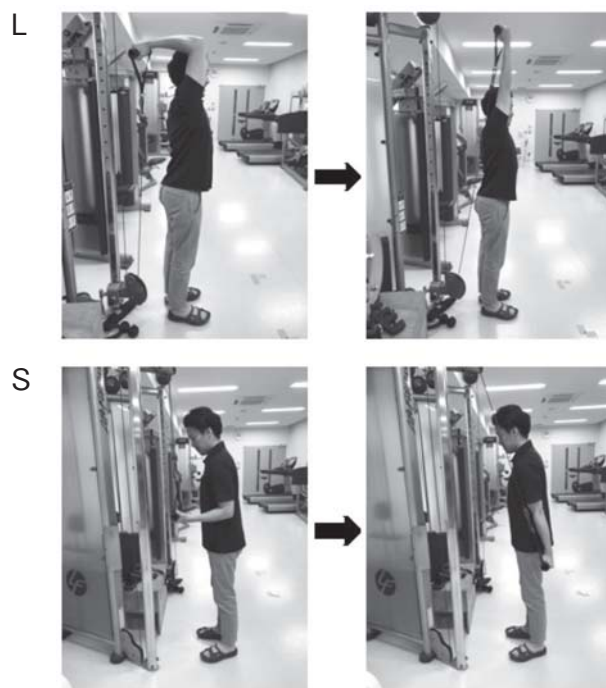


図1 Pictures of the posture during training performed at the long (L: top) and short (S: bottom) conditions.

が伸張される度合いは大きくなる。このようなTBLの解剖学的特性を考慮し、運動時の肩関節角度が異なる上腕三頭筋のトレーニング種目(図1)の効果を比較することにより、運動時の筋長がトレーニングによる筋肥大効果にどのような影響を及ぼすのかについて、有益な情報が得られると期待できる。

本研究では、上記を踏まえ、1)十分なサンプル数を用い、2)トレーニングによる筋量変化が大きい上肢筋群であり、かつ二関節筋を含む上腕三頭筋を対象とし、3)一般的に実施されることが多い動的運動によるトレーニング種目を採用し、4)筋量変化の評価にはゴールドスタンダードであるMRI法を用いることにより、「運動時の筋長の違いがトレーニングにより生じる筋肥大の程度に及ぼす影響を明らかにする」ことを目的とした。

1. 方法

1.1 被検者

体系的なトレーニングプログラム(>30分/日, >2日/週)を実施していない健康若年男女21名(年齢 23 ± 2 歳, 身長 168.9 ± 8.8 cm, 体重 64.5 ± 12.4 kg; 平均値 \pm 標準偏差)が実験に参加した。被検者には、実験の目的と内容、注意事項、および危険性などについて説明し、実験参加への同意を得た。本研究は、「立命館大学 人を対象とする医学系研究倫理審査委員会」の承認を得て行った(承認番号:2018-087)。

1.2 トレーニング

被検者は、片方の腕をTBLの筋長が長くなる肩関節屈曲 180° 固定のLong条件(L), もう一方をTBLの筋長が短くなる肩関節 0° 固定のShort条件(S)とし(図1), ケーブルマシンを用いた動

的肘関節伸展（可動域 $90\sim 0^\circ$ ）トレーニングを1セットあたり10回反復（2秒で伸展，2秒で屈曲），1日に5セット（セット間休憩は2分間），週2日，12週間行った。トレーニングの負荷は，事前に測定した各条件の最大挙上重量（1RM）の70%とした。ただし，トレーニング初日と2日目は，トレーニングに不慣れな状態での過度な負担による怪我を避けるため，負荷を50%，60%と漸増させ，3日目から70% 1RMとした。トレーニングには検者が毎回立ち会い，1セットあたり10回反復できない場合には，残りの回数を検者が補助をしながら実施した。3日目（負荷：70% 1RM）以降のトレーニングにおいて，設定負荷で規定の回数（10回 \times 5セット）を遂行することができた場合，次のトレーニングでは1RMの5%分の負荷を追加した。同様の条件で，その後のトレーニングにおいても，設定負荷で規定の回数を遂行できた場合は次のトレーニングで負荷を漸増させた。

トレーニングの実施順序として，片方の腕のトレーニング（5セット）を終えた後，もう一方の腕のトレーニングを行った。また，次のトレーニングでは，その順序を各被検者で入れ替えた。なお，LとSの条件に対して，被検者の利き腕・非利き腕の割合，およびどちらの腕を先にトレーニングするかの割合が同程度になるように振り分けた。全てのトレーニングに先立ち，ウォームアップとして，設定負荷の約半分の負荷で5～10回の反復を実施した。

1. 3 筋横断面積（CSA）

トレーニング初日の3～7日前および最終日の3～5日後において，3テスラMR撮像装置（MAGNETOM Skyra, Siemens）を用いて，左右の腕のMRIを取得した。専用の分析ソフト（Horos, The Horos Project）を用いて，上腕三頭筋の起始-停止長の50%位置において，上腕三頭筋の各筋のCSAを計測した。加えて，上腕三頭筋の3筋全体

（TBtotal）のCSA（3筋のCSAの和）を算出した。

1. 4 統計

基本統計量は平均値 \pm 標準偏差で示した。トレーニング前における上腕三頭筋各筋およびTBtotalのCSAを，対応のあるt-testを用いてLとSの条件間で比較した。トレーニング前後におけるTBtotalのCSAを，二元配置分散分析（2条件 \times 2時間）で比較した。交互作用が認められた場合，各条件におけるトレーニング前後の比較を，対応のあるt-testを用いて行った。また，トレーニング前後における上腕三頭筋各筋のCSAを，三元配置分散分析（3筋 \times 2条件 \times 2時間）で比較した。交互作用があった場合，各条件における各筋のトレーニング前後の比較を，対応のあるt-testを用いて行った。

トレーニングによるCSAの変化率（%）に条件間で差があったのかを確認するため，TBtotalのCSAの変化率について，対応のあるt-testを用いてLとSの条件間で比較した。各筋のCSAの変化率については，二元配置分散分析（3筋 \times 2条件）を行い，交互作用が認められた場合，各筋において対応のあるt-testを用いてLとSの条件間で比較した。統計処理には統計解析ソフトウェア（SPSS statistics 25, IBM）を用い，全ての検定において有意水準は $P < 0.05$ とした。

2. 結果

2. 1 CSAの変化

トレーニング前において，TBtotalおよび各筋のCSAに条件間で差はなかった（ $P = 0.24-0.54$ ，表1）。トレーニング前後におけるTBtotalのCSAには交互作用（2条件 \times 2時間， $P = 0.013$ ）が認められ，事後検定の結果，両条件においてトレーニングによる有意な増加が認められた（ $P < 0.001$ ）。トレーニング前後における上腕三頭筋各筋のCSAにも交互作用が認められ（3筋 \times 2条件 \times 2時

表1 Changes in muscle cross-sectional area (CSA) measured pre- and post-training

CSA(cm ²)	L		S	
	Pre	Post	Pre	Post
TBtotal	19.4 ± 7.4	23.6 ± 8.5*	20.0 ± 7.2	23.1 ± 8.2*
TBL	7.4 ± 3.0	9.7 ± 3.8*	7.7 ± 2.9	9.4 ± 3.6*
TBLat	8.8 ± 3.6	10.4 ± 4.1*	8.9 ± 3.7	10.0 ± 3.8*
TBMed	3.3 ± 1.2	3.6 ± 1.4*	3.4 ± 1.0	3.8 ± 1.2*

*Significantly different from pre (P < 0.05)

L: Long condition; S: Short condition; TBtotal: Total triceps brachii; TBL: Triceps brachii long head; TBLat: Triceps brachii lateral head; TBMed: Triceps brachii medial head

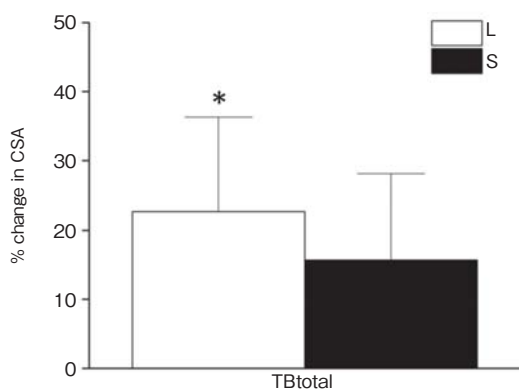


図2 % changes in cross-sectional area (CSA) of the total triceps brachii (TBtotal) after the training at a long (L) and short (S) condition

*Significantly different from S (P < 0.05)

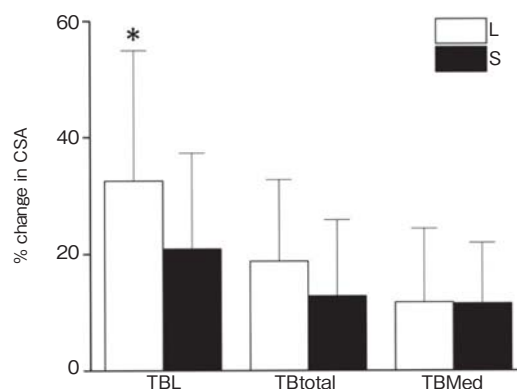


図3 changes in cross-sectional area (CSA) of the triceps brachii long (TBL), lateral (TBLat), and medial (TBMed) heads after the training at a long (L) and short (S) condition

*Significantly different from S (P < 0.05)

間, P < 0.001, 表1), 事後検定の結果, 両条件において各筋でトレーニングによる有意な増加が認められた (P < 0.002).

TBtotalのCSAの変化率(%)は, LがSよりも有意に大きかった(図2). また, 各筋の変化率に交互作用が認められ(3筋×2条件, P = 0.031, 図3), 事後検定の結果, TBLでのみLとSで有意な条件間差が認められた (P = 0.018).

3. 考察

トレーニングにより, TBtotalのCSAはL (+23%) およびS (+16%) で有意に増加した. この値は, 上腕三頭筋のトレーニングを同程度の期間(12~16週間)実施した先行研究で報告されている筋量の変化(+20~32%)と同程度である⁶⁻⁸⁾. したがって, 上腕三頭筋のトレーニングで一般的に生じう

る筋肥大が本研究でも観察されたといえる. 一方, その変化の程度には, LとSで有意な条件間差が認められた(図2). また, 筋別にみると, 両条件において全ての筋で有意な筋肥大が生じたが(表1), 条件の違いにより筋長に違いが生じるTBLにおいてのみ, LがSよりも筋肥大の程度が大きかった(図3). このような結果は, 条件(筋長)の違いによりTBLの肥大率に差が生じ, これがTBtotalで観察された条件間の筋肥大の差(L > S)の主要因であることを意味する.

レジスタンストレーニング実施時の筋長の違いが筋肥大の程度に及ぼす影響については, これまでにいくつか検討されているが一致した見解は得られていない. すなわち, 筋長が長くなる関節角度でトレーニングを行うことにより, 筋長が短くなる関節角度で行う場合に比べ筋肥大の効果は高

いとす報告^{2,3)}と、それを否定するもの^{4,5)}に分かれる。本研究の結果は、前者の知見を支持するものであり、筋長が長い状態でトレーニングを行うことにより筋肥大効果が促進されることを示唆する。そのメカニズムは明らかになっていないが、筋長が長い状態での運動では、短い状態で行う場合に比べ、筋内環境がより低酸素状態となり代謝的負担が高まること¹⁰⁾、より大きな筋損傷を生じさせること¹¹⁾、または機械刺激感受性シグナル伝達が増加すること⁹⁾などが影響し、筋断面積の増加率に条件間の差がもたらされた可能性がある。今後、これらを含む種々の因子と、筋長の異なるトレーニングによる筋量の変化との関係について明らかにするための実験モデルを考えるうえで、本研究で採用したトレーニング様式と得られた結果は参考になると考えられる。

4. まとめ

本研究では、二関節筋である上腕三頭筋長頭の解剖学的特性、すなわち、その筋長は肘関節のみならず肩関節の角度にも影響を受けるということに着目し、肩関節角度の異なる2種類の肘関節伸展トレーニングの効果を比較した。その結果、上腕三頭筋の横断面積は両条件で有意に増加したが、その程度は筋長が長い条件(L)が短い条件(S)でのトレーニングよりも大きかった(L: 23% vs S: 16%)。また、各筋の横断面積は両条件で有意に増加したが、その程度は上腕三頭筋長頭でのみLがSよりも大きく(L: 33% vs S: 21%)。単関節筋である上腕三頭筋外側頭と内側頭では条件間に有意な差はなかった。これらの結果から、筋長が長い状態でトレーニングを行うことにより、筋肥大効果が促進されることが示唆された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興デサントスポーツ科学 Vol.41

財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Fukunaga T., Miyatani M., Tachi M., Kouzaki M., Kawakami Y., Kanehisa H., Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans, *Acta. Physiol. Scand.*, 172(4) :249-55(2001)
- 2) Alegre L.M., Ferri-Morales A., Rodriguez-Casares R., Aguado X., Effects of isometric training on the knee extensor moment-angle relationship and vastus lateralis muscle architecture, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 114(11) :2437-46(2014)
- 3) Noorkoiv M., Nosaka K., Blazevich A.J., Neuromuscular adaptations associated with knee joint angle-specific force change, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 46(8) :1525-37(2014)
- 4) Kubo K., Ohgo K., Takeishi R. et al., Effects of isometric training at different knee angles on the muscle-tendon complex in vivo, *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 16(3) :159-67(2006)
- 5) Stasinaki A.N., Zaras N., Methenitis S. et al., Triceps Brachii Muscle Strength and Architectural Adaptations with Resistance Training Exercises at Short or Long Fascicle Length, *J. Funct. Morphol. Kinesiol.*, 3(2) :28-39(2018)
- 6) Kawakami Y., Abe T., Kuno S.Y., Fukunaga T., Training-induced changes in muscle architecture and specific tension, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 72(1-2) :37-43(1995)
- 7) Wakahara T., Fukutani A., Kawakami Y., Yanai T., Nonuniform muscle hypertrophy: its relation to muscle activation in training session, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 45(11) :2158-65(2013)
- 8) Wakahara T., Miyamoto N., Sugisaki N. et al., Association between regional differences in muscle activation in one session of resistance exercise and in muscle hypertrophy after resistance training, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 112(4) :1569-76(2012)
- 9) Russ D.W., Active and passive tension interact to promote Akt signaling with muscle contraction, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 40(1) :88-95(2008)
- 10) Kooistra RD, de Ruyter CJ, de Haan A. Knee angle-dependent oxygen consumption of human quadriceps muscles during maximal voluntary and electrically evoked contractions, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 102(2) :233-42(2008)
- 11) Allen T.J., Jones T., Tsay A., Morgan D.L.,

Proske U., Muscle damage produced by isometric contractions in human elbow flexors, *J. Appl. Physiol.*

(1985), 124(2) :388-99(2018)