

筋力トレーニングが筋活動電位におよぼす影響

小 原 達 朗

長崎大学教育学部保健体育教室
(平成2年2月28日受理)

Effect of the Muscle Training on the Muscular Action Potential

Tatsuro OBARA

Department of Physical Education, Faculty of Education
Nagasaki University, Nagasaki, Japan
(Received Feb. 28, 1991)

Abstract

In this study, the change with muscle training of muscle strength, muscle hypertrophy and muscular action potential were investigated by the frequency of electromyograph as the directive system on muscle contraction. The subjects were five students, and their flexors of upper arm were trained by 70% of maximal voluntary strength. The results were as follows.

1. The muscle strength increased significantly 4.48kg, 19.38% ($p < 0.01$), and the cross-sectional area in upper arm increased significantly 2.41cm², 5.52% ($p < 0.05$).

2. The frequency components separated two phases, one of them was low pass filter band (LFD : 20-40Hz) in relation to tonic contraction and the other was high pass filter band (HFB : 80-140Hz) in relation to dynamic contraction.

Both components increased significantly, LFB increased remarkably.

3. With muscle training, the frequency components at 70%MVS didn't change. Therefore, it was recognized that the intensity and the road of training was adjustment.

I. 緒 言

筋の張力発生の増減は、筋収縮の命令系としての運動単位と運動ニューロンのインパルス発射頻度によるとされている¹⁾。DeLormとWatkins²⁾は、筋力増加過程に2つの要素が関与していると述べている。特に、初期の筋力トレーニング段階において、筋力増加が筋の形態学的変化(筋の生理学的横断面積)より早くから認められることから、運動学習効

果が筋力発揮に大きな影響を及ぼすとしている点は興味深い。

一方、絶対筋力と筋横断面積、あるいは筋力増加と筋横断面積との間にかかなり高い相関があることが知られている⁴⁾⁹⁾¹⁹⁾。また、Ikaiら¹⁰⁾¹¹⁾は、トレーニングにおける筋力増加は、活動している筋の運動単位放電（命令系）の増加と、筋収縮組織の肥大を伴った形態的变化（効果系）の2つの要素の関与により達成されると仮定している。

Moritani と deVries は一連の筋電図学的研究¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾において Ikai と Fukunaga¹⁰⁾の仮説の裏付けを行い、初期の筋力増加が電気生理学的活動を通した神経的要素の改善によってもたらされることを推察している。

本研究では、トレーニング期間を50日（5回/週）程度としたときの筋力の増大に対し、効果器としての筋の形態学的変化（筋肥大）と命令系としての活動電位の変化が、どのような関連の上に生ずるかを活動電位の総和となる表面筋電図の周波数成分の変動から検討した。

II. 研究 方 法

1. 期 間

1990年10月下旬～1990年12月下旬

測定日：トレーニング前 10月31日

トレーニング後 12月19日

2. 被験者と被験筋

被験者：大学陸上競技部短距離選手の男子5名で一般的な運動選手

被験筋：利き腕側の上腕屈曲筋群（上腕二頭筋）

3. 測定方法

(1) 最大筋力（MVS）発揮時の活動電位の測定

被験者は、椅座位で机上に肘関節を90度に固定し手首にベルトを掛けて筋力を発揮した。筋電図は、表面電極法により導出し生体現象測定装置（三栄測器製）により増幅記録し、同時に、カセットデータレコーダ（TEAC社製 R-71型）に収録した。最大筋力は3回測定し、その平均を最大筋力の値とした。

(2) 最大筋力の70%（70%MVS）の筋力発揮時の活動電位の測定

本研究では70%MVSをトレーニング強度とした。そのために、最大下筋力の筋力発揮時の活動電位に、最大筋力発揮時の活動電位と差異があるかを比較するために、最大筋力の測定と同様の方法で、70%MVSの筋力発揮時の筋電図を測定すると同時に筋放電量を収録した。

4. 活動電位の分析方法

データレコーダに収録した筋放電量を再生し、A/D変換し、高速フーリエ変換することによりパワースペクトル密度を求め、それを再度D/A変換し、プリンターに記録した。データ処理条件として、サンプリングタイムは500msec、全周波数帯域は512Hz、データ集積方法は有限積分を用いた。以上の演算は、脳波・筋電図データ解析ソフト（KST-320）

表1 被験者の身体特性

| | 年齢 (歳) | 身長 (cm) | 体重 (kg) | 皮下脂肪厚(mm) | | 上腕 囲(cm) | |
|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------|----------|------|
| | | | | 前 | 後 | 前 | 後 |
| Y.O. | 19 | 180.0 | 65.0 | 12.5 | 11.5 | 26.5 | 26.7 |
| S.S. | 19 | 173.0 | 63.0 | 13.5 | 14.5 | 25.3 | 26.3 |
| T.S. | 20 | 180.0 | 66.0 | 11.5 | 13.5 | 25.5 | 26.0 |
| H.M. | 20 | 170.0 | 63.0 | 18.0 | 18.5 | 27.0 | 26.3 |
| M.W. | 21 | 174.0 | 66.0 | 21.5 | 16.5 | 25.8 | 27.6 |
| \bar{X} | 19.8 | 175.4 | 64.6 | 15.4 | 14.9 | 26.0 | 26.6 |
| S D | 0.75 | 3.98 | 1.36 | 4.22 | 2.72 | 0.71 | 0.62 |

皮下脂肪厚は、上腕の前面、後面、外側および内側の4点の合計

を用い、パーソナルコンピュータ (NEC PC-9801Vm) により行った。以上を、生データ (図1) とし、さらに20Hzごとに区分して算出したヒストグラムを作成した。

5. 上腕横断面積 (筋肥大) の測定

上腕の前側、後側、内側、外側の4箇所
の皮脂厚を栄研式皮下脂肪計により測定し、
皮脂厚分を着し引いて、模式的に便宜的な
筋横断面積を算出して筋肥大の指標とした。

6. 最大筋力を高めるための筋力トレーニング

上腕屈曲筋群の最大筋力を高めるための
トレーニングは、肘関節の屈曲運動を課題
とした。筋力の増加に対し特に適切なものは、等尺性トレーニング、電気刺激法であり、
またピラミッドトレーニングと高負荷および少ない反復数からなるステーショントレーニング
ならびに高負荷最大反復数 (おのおのの最大筋力の75~80%) と結びついたすべての
動的トレーニング方法である¹²⁾。そこで本研究では、高負荷および少ない反復数からなる
ステーショントレーニングを実施した。負荷は70%MVS, 反復回数5回を1セットとし、セッ
ト数3回、セット間5分の休息をとらせ、週5日 (休息日: 日曜日, 水曜日) のトレー
ニングを7週間行わせた。なお、負荷のレベルの調整をトレーニング開始25日ごろに行った。

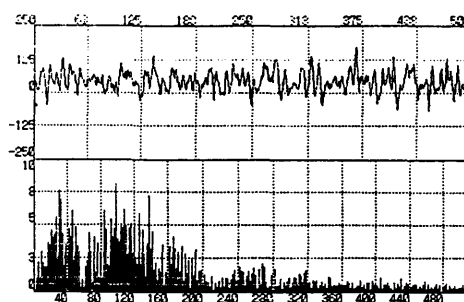


図1 最大筋力発揮時のパワースペクトル

III. 結果および考察

1. 筋力トレーニングによる筋力の増加および筋肥大

7週間の筋力トレーニングを実施した結果を表2に示した。筋力は4.48kg, 19.38% (P < 0.01), 上腕横断面積は、2.41cm², 5.5% (P < 0.05) のいずれも有意な増加を認めた。ま

た、最大筋力と上腕横断面積、筋力の増加量と上腕横断面積の増加量、筋力の増加率と上腕横断面積の増加率および筋力の増加率と上腕横断面積の増加量の間には有意な相関は認められなかった。

表2 トレーニングの前後における最大筋力と上腕横断面積

| | 最大筋力(kg) | | 最大筋力増加量 | | 上腕横断面積(cm ²) | | 上腕横断面積増加量 | |
|-----------|----------|------------|---------|------|--------------------------|------------|-----------|------|
| | 前 | 後 | (kg) | (%) | 前 | 後 | (cm) | (%) |
| Y. O. | 25.3 | 32.0 | 6.7 | 26.5 | 47.94 | 49.38 | 1.40 | 2.9 |
| S. S. | 23.0 | 28.7 | 5.7 | 24.8 | 42.78 | 45.94 | 3.17 | 7.4 |
| T. S. | 24.7 | 26.2 | 1.5 | 6.1 | 44.70 | 45.40 | 0.70 | 1.6 |
| H. M. | 28.2 | 32.5 | 4.3 | 15.2 | 46.53 | 49.80 | 3.22 | 6.9 |
| M. W. | 25.5 | 31.8 | 6.2 | 24.3 | 40.04 | 43.58 | 3.54 | 8.8 |
| \bar{X} | 25.3 | ※※ 30.2 | 4.5 | 19.4 | 44.40 | ※ 46.81 | 2.41 | 5.5 |
| S D | 1.68 | 2.41 | 1.87 | 7.72 | 2.78 | 2.39 | 1.14 | 2.77 |

※※：P<0.01 ※：P<0.05

2. 最大筋力発揮時の筋電図の周波数分析について

上腕屈曲筋群の筋力発揮時の表面筋電図をパワースペクトルとして表示した。その結果、筋放電図の周波数成分は、図1のように二相に分離して出現した。すなわち20~40Hz付近の低周波数成分(Low pass filter band, LFB)と80~140Hz付近の帯域を中心とする高周波数成分(High pass filter band, HFB)(以後、LFB, HFBの略語を用いる。)である。

表面筋電図は筋群の活動を導出しているが、単一運動単位の放電間隔が基本になっている。その観点から時実・津山ら²¹⁾は単一運動単位の最短固有間隔を緊張的な性質をもつ緊張性の運動単位で20Hz、動的な性質をもつ相動性の運動単位で50Hzとを区別して報告している。また、Eccles³⁾やGranitら⁷⁾は、運動ニューロンの性質から、後過分極の時間が相動性の運動ニューロンにおいて50~100msec、緊張性の運動ニューロンにおいて130~200msecであり、各種運動ニューロンの放電間隔との関係を相動性運動ニューロンにおいて30~60Hz、緊張性運動ニューロンでは10~20Hzであるとし、神経・筋の放電間隔に対応すると報告している。こうした報告を参考にすると、LFBの約20Hzは、単一運動単位における緊張性の運動単位の最短固有間隔に近似した周波数を示しており、持続的に緊張的な運動単位と速筋・赤筋からの放電に該当するものと考えられる。また、HFBの約75~90Hzは、相動的あるいは速い筋収縮に参加する運動単位と速筋・白筋からの放電に該当するものと考えられる。一方、他の文献による緊張性の運動単位の最短固有間隔は20Hz、相動性の運動単位の最短固有間隔は50Hzであるのに対して本研究のそれに相当するLFBは20~40Hz、HFBは80~140Hzである。これについての説明として、時実・清水ら²⁰⁾によって運動単位の活動には非同期的な放電の報告がある。すなわち、個々の運動単位が非同期的に筋収縮に参加しているために、放電周波数が増大してくるというものである。そのために、

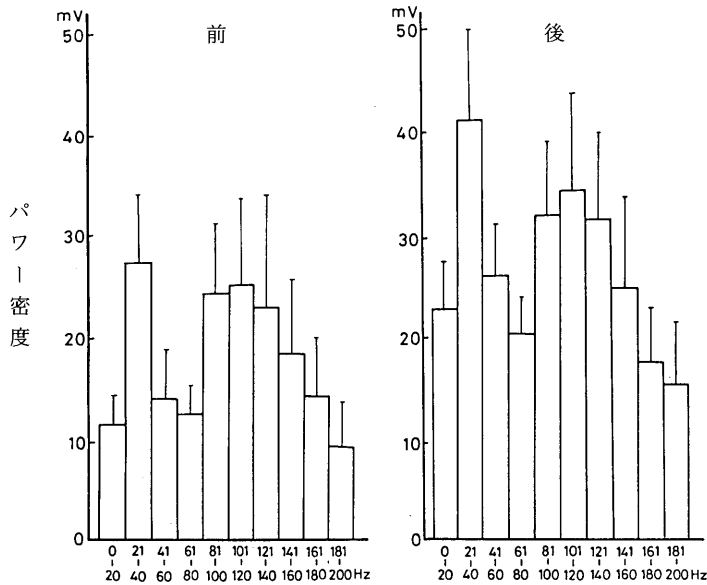


図2 最大筋力発揮時のトレーニング前後の20Hz 単位のパワー密度

本研究のLFB, HFBのパワースペクトルはブロードな帯域を示し, 上の事実を裏付けていると思われる。

3. トレーニングによる最大筋力発揮時の周波数成分の変化

トレーニング前と後の最大筋力発揮時のパワースペクトルを20Hzごとに平均したものを図2に示した。これを比較すると, 筋力トレーニング前と後とでは, 後の方が全体に筋放電量が増加している。各周波数別の平均の増減量を図3に示した。0~20Hz, 21~40Hz, 41~60Hz, 61~80Hz, 101~120Hzで有意に増加した ($P < 0.05$)。永田¹⁸⁾は, 等尺性筋収縮の筋放電スペクトル解析において, 負荷の弱い段階では20Hz成分が著明にみられ, 負荷を強くしていくと80~90Hz成分が20Hz成分よりも大きくあらわれ, 負荷増大とともに筋収縮の強さ, 筋放電の発射頻度を密にせざるを得ない状態となり, さらに一つの運動単位に対する筋線維数も多く筋収縮に参加し, さらに運動単位数も多くなり, ついには単一筋群のみでなく周囲の筋群も参加せざるを得ない状態となって, これがHFBを出現させる主因ではなかろうか, と報告している。本研究では, 筋力トレーニングによって筋力の増加と筋肥大が有意に認められたが, トレーニング前後におけるHFBの増加は, 永田の報告と同様のことが考えられる。しかし, 本研究ではHFBよりLFBが著明に増加した結果となった。

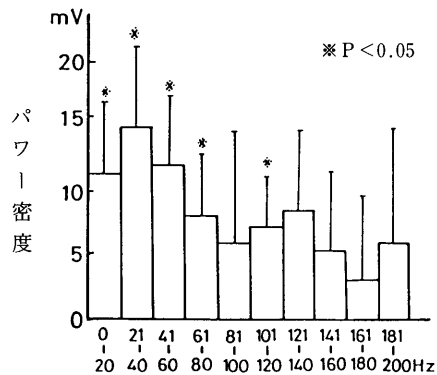


図3 最大筋力発揮時のトレーニング前後のパワー密度の変化量

したがって、トレーニングによって緊張性収縮の運動単位数の動員も増えるのではないかと考えられる。

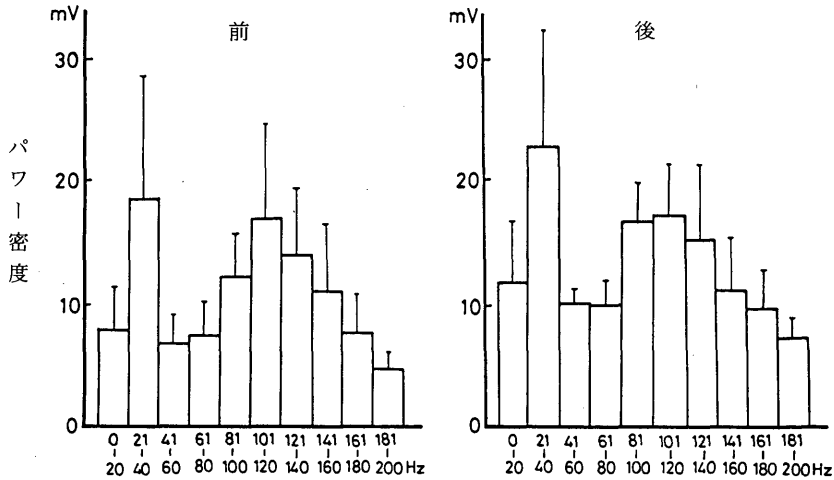


図4 70%MVS発揮時のトレーニング前後のパワー密度

4. 最大下筋力 (70%MVS) 発揮時の周波数成分の変化

筋力トレーニング前と後の70%MVS発揮時の表面筋電図のパワースペクトルを平均したものを図4に示した。また、各周波数別の平均の増減量を図5に示した。図5より41~60 Hz, 81~100Hz, 181~200Hzにおいて有意な増加(P<0.05)がみられるが、一定の変化は認められない。最大筋力発揮時の筋放電の変化とは関連を持たないといえる。これは、筋力の増大とともに負荷を調整した結果、筋力と負荷の増大が相対的にほぼ一致していたことを示している。

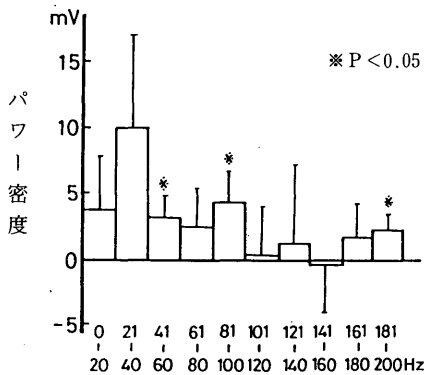


図5 70%MVS発揮時のトレーニング前後のパワー密度の変化量

IV. 総 括

筋力、筋肥大および筋活動電位が筋力トレーニングによってどのような関連で変化するかについて、筋収縮の命令系に着目して筋電図の周波数成分の変動により検討した。

被験者は、大学陸上競技部短距離選手の男子5名とし、上腕屈曲筋群(上腕二頭筋)を対象として70%MVSの強度で7週間の筋力トレーニングを行った。結果の概要は以下のとおりである。

1. 筋力トレーニングにより、筋力は4.48kg, 19.38% (P<0.01), 上腕横断面積は2.41cm²,

5.5% ($P < 0.05$) でいずれも有意に増加した。

2. 分析した全周波数帯域(512Hz)中、著明な周波数成分が二相に分離して現れ緊張性の収縮と関係のあると思われるLFB(約20~40Hz)と、相動性の収縮と関係のあると思われるHFB(約80~140Hz)に分かれた。

3. 筋力トレーニングによって、最大筋力発揮時の周波数成分がLFB, HFBとも有意に増加($P < 0.05$)したが、特にLFBの方が著明に増加した。

4. 筋力トレーニングによって、70%MVS発揮時の周波数成分には変化がみられず、トレーニング強度と負荷の増大の整合性が認められた。

本研究は、開成学園勤務、樋口和満君の協力によって行われた。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Adrian, E.D. and Brouk, D.W.: The discharge of impulses in motor nerve fibers. Part II. The frequency of discharge in reflex and voluntary contraction. *J. Physiol.* 67 : 119-151, 1929.
- 2) De Lorme, T.L. and Watkins, A.L.: *Progressive Resistance Exercise*, New York, Appleton Century Ink. 1957.
- 3) Eccles, J.C., Eccles, R.M. and Lundberg, A.: The action potentials of the alpha motoneurons supplying fast and slow muscles. *J. Physiol.* 142, 275-591, 1958.
- 4) 福永哲夫：ヒトの絶対筋力, 杏林書院 PP.182-277, 1978.
- 5) Friedebold, G., Nussgen, W. und Stoboy, H: Die veränderungen der elektrischen Aktivität der Skelettmuskulatur unter den Bedingungen eines isometrischen Trainings. *Z. ges. Exp. Med.* 129, 1957.
- 6) Goldberg, A et al: Mechanism of workinduced hypertrophy of skeletal muscle. *Med. and Scie. in Sports* 3 : 185-197, 1957.
- 7) Granit, R., Henatsch, H.D. and Steg, G.: Tonic and phasic ventral horn cells differentiated by post-tetanic potentiation in cat extensors. *Acta Physiol. Scand.* 37 : 114-126, 1956.
- 8) Hettinger, T: *Isometrisches Muskel training* Stuttger. Thieme Verlag, 1966.
- 9) Hettinger, T. and Müller, E.A.: Muskel-listung und Muskel-Training. *Arbeitsphysiol.* 15 : 111-129, 1953.
- 10) Ikai, M. and Fukunaga, T.: A Study on training effect on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurement. *Int. Z. angew.* 28 : 173-180, 1970.
- 11) Ikai, M. and Steinhaus, A.H.: Some factors modifying the expression of human strength. *J. Appl. Physiol.* 16 : 157-163, 1961.
- 12) J. Weineck : *スポーツ医学・健康シリーズ 最適トレーニング*, オーム社, 1984.
- 13) 金久博昭：筋出力とトレーニング *体育の科学* 39(4) : 274-285, 1989.
- 14) Moritani, T: Training adaptations in the muscles of older men. PP. 149-166. In: *Exercise and Aging-The Scientific Basis*, edited by E.L.Smith and R.C. Serfass, New Jersey: Enslow Publishers, 1981.
- 15) Moritani, T. and deVries, H.A.: Reexamination of the relationship between the surface integrated electromyogram (IEMG) and force of isometric contraction *Am. J. Phys. Med.* 57

- : 263-277, 1978.
- 16) Moritani, T. and deVries, H.A.: Neural factors hypertrophy in the time course strength gain. *Am. J. Phys. Med.* 58 : 115-130, 1979.
 - 17) Moritani, T. and deVries, H.A.: Potential for gross muscle hypertrophy in older man. *J. Gerontol.* 35 : 672-682, 1980.
 - 18) 永田 晟：筋と筋力科学—筋収縮のスペクトル解析，不味堂出版，1984，
 - 19) Rodahl, K. and Horvst, S.M.: *Muscle as a Tissue*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1962.
 - 20) Tokizane, T. and Shimazu, H.: Functional differentiation of human skeletal muscle. *Univ. of Tokyo Press.* 62, 1964.
 - 21) 時実利彦，津山直一：筋電図の臨床，協同医書出版，68-81，1952.