

筋の持久性トレーニングで神経系の 働きは変化するか?

横浜国立大学 森 本 茂

(共同研究者) 同 稲 荷 教 司

同 河 辺 典 子

同 高 橋 静

國學院栃木
短期大学 石 山 育 朗

Effect of Static Muscular Endurance Training on Motor Units Activity

by

Shigeru Morimoto, Kyouji Inari,
Noriko Kawabe, Shizuka Takahashi
Yokohama National University

Ikuo Ishiyama
Tochigi Junior College of Kokugakuin University

ABSTRACT

The aim of the present study is to investigate the effect of the static muscular endurance training at the lower tension level (10% maximal voluntary contraction : 10% MVC) on the motor unit activity. The subject was required to develop the flex tension of right middle finger at the tension of its 10% MVC for 20 min. During the prolonged activity, surface electromyogram and motor unit action potentials were recorded from right m. Flexor Digitorum Superficialis and Prtofunds. These signals were obtained at the first day, after 2 weeks and after 3 weeks (last day) of a training period.

The muscular endurance training program was as follows; 1) sustained tension = 10% MVC, 2) sustained duration 20 min, 3) training frequency = one practice/day and 6 practices/week, 4) training period = 3 weeks.

Obtained results were as follows :

1) Amplitude of surface electromyogram during the prolonged activity increased gradually for 700% of initial amplitude. But the rate of increase was decreased depend upon the period for training.

2) Before the training, recruited motor units fired continuously during the activity. At a period of 2 weeks of the training, some motor units fired intermittently (decruted and re-recruited) were appeared and its tendency was more obviously at 3 weeks training period.

3) With detraining for 1 month, discharge pattern of motor units returned to initial pattern (pattern of first day of the training). And with re-training for 2 weeks, motor units showed the same discharge pattern as the pattern resulted from the first training program. The training effect on the motor unit activity was highly reproducible.

緒 言

全身持久性能力は、最大酸素摂取量や心拍出量、筋の毛細血管分布密度などの呼吸循環器系の機能、筋線維内酸化酵素系の活性度などを指標として評価され、持久性トレーニングの効果とあわせて研究されてきている。これに対して静的持久力のトレーニング効果に関しては、全身持久性と相似的にみることができる毛細血管分布密度、筋酸化系酵素の項をのぞいて、静的最大筋力との低相関、動的筋持久力に対する効果がみられない。また効果に一致がみられないなど、今だ不明な点が多く解釈の困難さを示している。しかし、筋血流量が精神的緊張度に影響を受けるといった報告があり、筋持久性トレーニングに効果の一致、一般性がみられない点の解釈に中枢神経系の関与が

示唆される。

最大下の筋力（最大筋力の10%）を、持続的に発揮時の単一運動単位の活動状態を観察した時、筋力発揮終了時まで持続的に活動するもの、途中で活動を休止するもの、活動休止と再活動をするもの、活動参加してくるものの4種類の活動様式が存在した。このような運動単位活動様式は、筋持久性に対して何らかの決定因子になろう可能性が示唆される。

本実験の目的は、ヒトにおいて、中枢神経系興奮の最終出力装置である脊髄α運動神経の興奮性を、筋電図学的手法を用いて観察し、静的筋持久性トレーニングの効果とそれに対する神経系調節機構の変容の存在について、検討することにある。

1. 実験方法

被験者は、神経、筋に疾患、疾患経歴のない健康成人（23～33歳）とし、被験筋は右手指屈筋群（浅指屈筋、深指屈筋）を用いた。

被験者は右上肢水平屈曲位で、肘関節伸展位、前腕回外位にて椅座位姿勢をとった。手根関節および中指以外をベルト、弾性テープで固定の上、等尺性に中指屈曲を行った。中指屈曲の負荷強度は、目標張力を10% MVCとし20分間一定保持することとした。被験者には目の前70 cmのモニター用ブラウン管面上に、輝点として表示される目標張力（実験ごとに前もって測定されたMVCから算出）に、中指屈曲張力を合わせるように指示した。

中枢神経系の興奮性の指標として、表面筋電図の波形と単一運動単位の活動電位の放電様式を用いた。表面筋電図の導出にあたっては直径10 mmの皿型の銀-塩化銀電極にて、電極間距離20 mmとした双極誘導法を用いた。単一運動単位の活動電位導出には、直径100 μmの銅線を2本貼り合わせ、筋中に残す釣り針型の筋内埋入電極を用いた。これらの電気信号は周波数帯域3～3 kHzにて差動増幅した。埋入電極の刺入位置は、表面電極の装着位置にできる限り近い筋線維の走行方向にそった位置とした。

前述の姿勢にて指尖部に生じる屈曲張力は、ロードセルにて検出し、直流増幅した。

以上の電気信号と機械的信号はすべてFMデータレコーダに記録し、後のデータ解析に用いた。

運動単位の活動電位は、陰極線オシロスコープに表示し、オシロペーパー上に撮影記録した。この記録から、各単位時間ごとに活動する運動単位の種類を求めた。運動単位の種類は、導出された活動電位波形の相違から判別を行った。表面筋電図は、全波整流後1秒の時間間隔で積分値を求め、

熱ペン式記録用紙上に記録し、張力発揮の持続時間にもなう筋電図の振幅変化を求めた。

静的筋持久性のトレーニングは、実験に用いた負荷強度と同じ負荷とした。すなわち、各被験者の10% MVCを20分間保持することとし、1日1回、週6回3週間にわたって実施させた。トレーニング初日のデータをコントロールとして用い、トレーニング2週間後および3週間後にデータ収集を行った。

2. 結果

3週間の静的筋持久性トレーニングを行った結果、中指屈曲の等尺性最大筋力は、 5.0 ± 1.58 kg（トレーニング前）から 5.2 ± 0.6 kg（トレーニング後）と有意な増加が観られなかった。しかし、10% MVCの保持時間に、 1958 ± 648 秒（トレーニング前）から 2589 ± 728 秒（トレーニング後）と有意な（ $P < 0.01$ ）増加がみられた。

2.1 持続的筋力発揮と表面筋電図

目標筋力発揮開始時より、毎分0～10秒間の1秒ごとの表面筋電図積分値の平均値を求め、初期値に対する相対的变化を、筋力発揮時間に対し

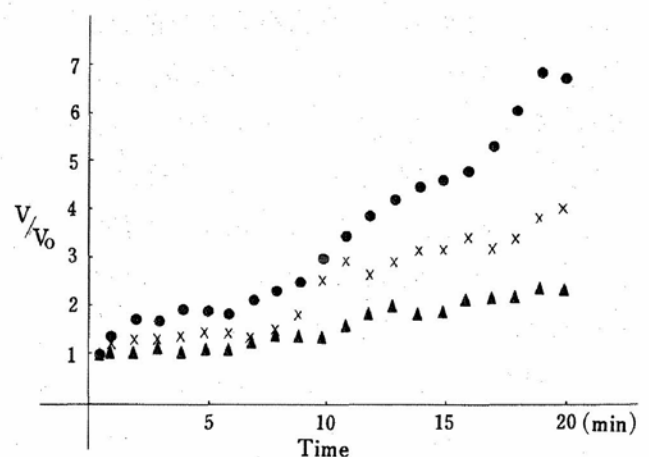


図1 持続的に一定張力（最大筋力の10%）を保持した時に導出された表面筋電図積分値の時間的变化

- ：トレーニング初日
- ×：トレーニング2週間目
- ▲：トレーニング3週間目

てプロットした(図1). 図中の●, ×, ▲印はそれぞれトレーニング初日, 2週間時, 3週間時(トレーニング終了時)に得られた結果を示している. それぞれの実験結果に, 筋力発揮の持続時間に依存した, 積分値の漸増傾向が共通してみられたが, その増加率に相違があった. すなわち, トレーニング期間の延長にともなって, 初期値に対する20分時の積分値が7(トレーニング開始時), 4(2週間時), 2(3週間時)とその増加率に減少傾向がみられた.

つぎに, このようなトレーニングにより表面筋電図上にみられた変化動態が, どのような運動単位活動を反映しているか検討した.

2.2 持続的筋力発揮と運動単位活動

表面筋電図における分析時間と同様に, 筋力発揮開始時より毎分0~10秒間の運動単位活動を, オシロペーパー上から(方法参照)分析した. 本報告で用いた分析方法は, 各単位時間当たり筋力発揮に対して, 活動参加する運動単位の種類を数えることとし, 運動単位の発火頻度は考慮しなかった.

図2は図1と同実験で得られた結果であり, 図2のA, B, Cはそれぞれトレーニング初日(図1;●), 2週間時(図1;×)3週間時(図1;▲)に対応する.

図2Aにおいて, 20分間の筋力発揮時に同定可能であった運動単位は9種類であった. トレーニング初日において, 筋力発揮後活動参加する運動単位の数は徐々に増加し, 活動参加した後は20分の終了時まで活動し続けた. この結果に対して, 図2-Bのトレーニング2週時では, 図2-Aと同様に活動参加する運動単位が観察されたが, 活動参加後の活動の持続性が小さかった. すなわち, 20分にわたって持続的に活動した運動単位が3例みられたが, ほかの運動単位は活動休止, 再活動といった活動様式を示した. さらに3週時においては, この傾向が顕著になり導出された運動

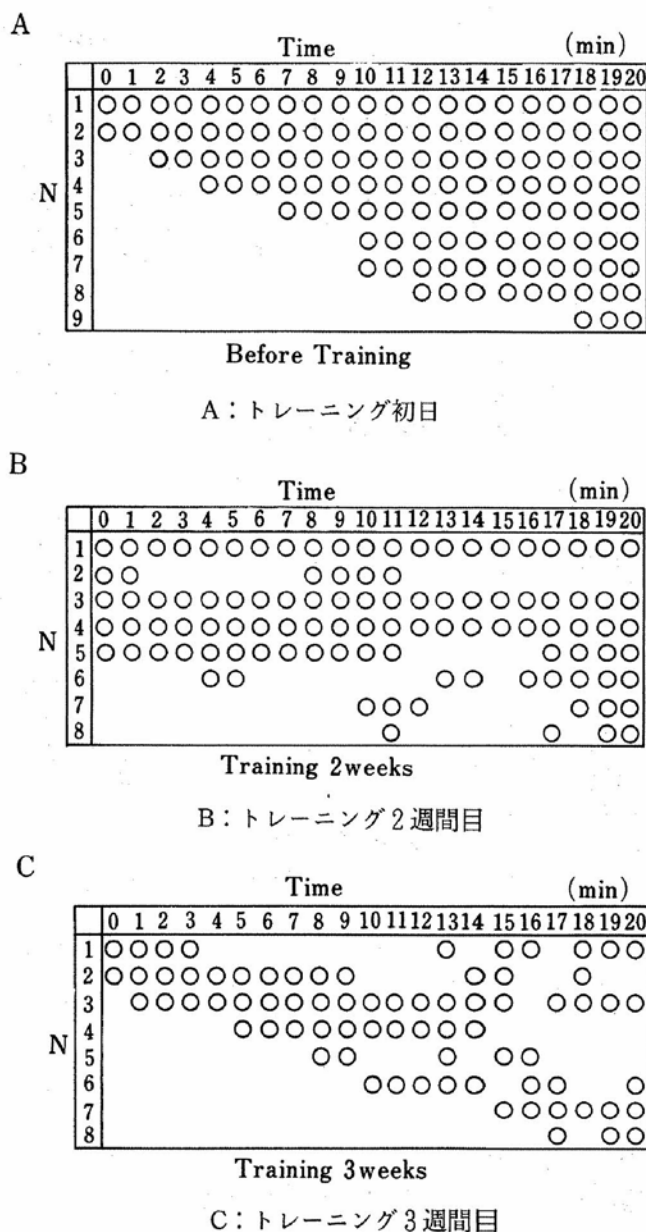
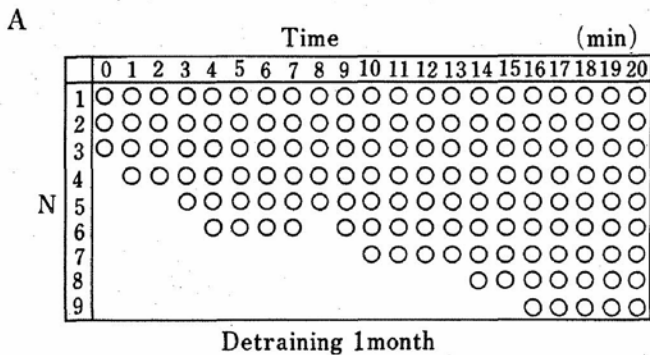


図2 図1と同条件下での筋力発揮時に筋内埋入電極より導出した運動単位種類(縦軸:N)と活動状況. 毎分0から10秒までの記録から活動参加がみられた場合には○印をしてある. A, B, Cはそれぞれ図1の●, ×, ▲に対応する.

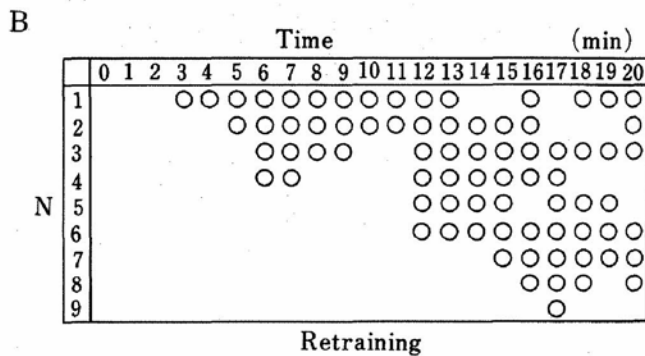
単位すべてにおいて活動休止, 再活動が観察された.

2.3 脱トレーニングと再トレーニング

以上の結果の再現性を検討するために, トレーニング3週間の結果を得た後, 1ヵ月間の脱トレーニング(図3-A)とその後に再トレーニング(図3-B)を行い, 結果の比較を試みた. 1ヵ月の



A: 図2の結果を得た後1ヵ月の脱トレーニングにおける運動単位活動



B: 再トレーニング2週間目に得られた運動単位活動

図3 運動単位活動にみられる脱トレーニングおよび再トレーニング効果。実験条件は図2と同じ条件下で行った。

脱トレーニングによって、ほぼトレーニング前(図2-A)の運動単位活動の傾向に戻っていた。再トレーニング2週間目において一回目の実験結果(図2-B, C)と同様に、運動単位活動に活動交代がみられるようになった。

3. 考 察

3.1 低強度での静的持久性トレーニングとその効果

静的持久力のトレーニング効果は、用いる負荷強度に依存することが筋力トレーニングの負荷強度に対する負荷強度と相似的に考えられるが、Muller et al.⁵⁾は、1/3 MVCの負荷強度ではトレーニング効果がみられないとする報告をしている。しかし、Vanderhoof et al.⁶⁾は、1/3 MVC

強度でも静的筋持久性と最大筋力に顕著な効果があるとし、Hansenn⁸⁾は、2/3 MVCの負荷強度では静的持久性には効果があったが、動的持久性や瞬発筋力には効果がないと報告している。

本実験においては、10% MVCと低い負荷強度でも持久性には効果をもたらした。負荷強度とトレーニング効果の関係は、前述の報告とも合わせて一定の結果があらわれず、その原因は明らかにすることは困難である。Allwood¹⁾の筋持久性に大きな影響を及ぼすと考えられる筋血流量が交換神経系の緊張度によって変化するという報告から、小野²⁾はその著書において中枢神経系の興奮状態が、トレーニング効果に影響をあたえる可能性を示唆している。

3.2 持久的筋力発揮時の運動単位活動

加茂と森本⁴⁾は、持久的に一定筋力を随意調節した時の内側広筋の運動単位活動を観察し、その発火頻度の増加と新しい(高閾値)運動単位の活動参加の存在を見出した。この現象は、活動している運動単位の筋疲労による筋力低下を補う、補償作用であると考えた。本報告の図2-Aにおいて、筋力発揮後2~18分にみられる運動単位の活動参加は、内側広筋でみられた補償作用が、浅指屈筋でも存在することを示唆する。

3.3 トレーニングと運動単位活動の変容

3週間の静的持久性トレーニングの結果、持続的筋力発揮中の表面筋電図の積分値変化は、増加率が減少する結果を得た。これは電極が導出し得る範囲の運動単位活動に変容があったことを示唆する。すなわち積分値の増加率の減少は、運動単位活動に抑制が生じたものと考えられる。

また、3週間の静的持久性トレーニングの結果、運動単位活動は持続的な活動から活動休止-再活動が顕著にあらわれるようになった。写真記録上から、単一運動単位の波形を確認し、その波形に筋収縮中の電極の移動にともなう波形変化がみられていないことから、活動休止と再活動は確

実に存在する現象と考えられる。運動単位の活動休止は、調節する目標張力からの誤差（減少）を生じる。この誤差を補償するためには、ほかの運動単位の活動参加を必要とする。したがって、活動の休止はほかの運動単位との『活動交代』を意味するものと考えられる。

静的持続的筋力発揮時の運動単位の活動性から観たトレーニング効果は加茂と森本⁴⁾にみられた補償作用の増強—発火頻度の増加、活動参加運動単位の増加—ではなく、活動交代の機構が観られた。活動交代には脱トレーニングと再トレーニングで再現性があり、活動交代を静的持続的筋力トレーニングの効果の一つととらえることが可能であろう。本実験では筋実質の変化について観察は行っていないため、運動単位活動の変容（中枢神経系の機能の変容）のみからトレーニング効果を判断することは誤謬を生む可能性がある。神経系の機能の変容と筋の形態的変容のかかわり合いは興味ある問題であり今後の追求すべき課題である

う。

文 献

- 1) Allwood, J., et al.; The effect of mental arithmetic on the blood flow through normal sympathectomized and hyperhidrotic hands, *J. Physiol.*, **148**, 108-116 (1959)
- 2) 小野三嗣; 持久性とトレーニング, 運動の生理科学, 朝倉書店, 東京, 6 p. 27-30 (1982)
- 3) Hansen, J. W.; The effect of sustained isometric muscle contraction on various muscle functions, *Inst. Z. Angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol.*, **19**, 430 (1956)
- 4) 加茂美冬, 森本 茂; 単一運動単位の持続的筋力発揮時の放電様式とその筋興奮伝導速度-活動参加閾値レベルの筋力発揮負荷において, 体力科学, **39**, 298-306 (1990)
- 5) Muller, E. A., et al.; The rate of muscle strength increase in isometric training, *Inst. Z. Angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol.*, **19**, 403-419 (1963)
- 6) Vanderhoof, F. R et al.; Effect of muscle strength and endurance development on blood flow, *J. Appl. Physiol.*, **16**, 873-877 (1961)