

トレーニング効果から見た持久力
トレーニングの量的限界に関する
組織化学的, 生化学的研究

筑波大学 勝田 茂
(共同研究者) 同 金尾 洋治
同 満園 良一

**Histochemical, Biochemical Study
on the Quantitative Limitation of Endurance Training
from the Viewpoint of the Effect of Training**

by

Shigeru Katsuta,
Yoji Kanao and Ryoichi Mitsuzono
University of Tsukuba

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine the quantitative limitation of endurance training from the view point of the effect of training.

Thirty-two wistar strain male rats (49 days after birth) were classified into four groups, namely control group, 60 min. running group, 120 min. running group and exhaustive running group.

After 8-week training period, histochemical and biochemical analyses were made on the gastrocnemius muscle.

The results obtained were summarized as follows;

- 1) In the running performance test at constant speed of 30 meter per min. 120 min. running group ran the longest time.
- 2) The ratio of heart weight per body weight was higher with increase of training time, but the trend of hypertrophy in heart was leveling off in 120 min. running group.
- 3) Capillary supply (number of capillaries per mm², per fiber, in con-

tact with fiber and distance of diffusion) in training group was significantly higher than that of control group. It suggested the remarkable capillarization by training. But there was no difference in any parameters between 120 min. running group and exhaustive running group.

4) Glycogen content was increase as training time increased, but the difference among four experimental groups were not significant.

These results suggest that the exhaustive training is not necessary the optimal training for endurance training.

緒 言

陸上競技・長距離トレーニングの現状は、量が最も重んじられており、「量的に多い者ほど長距離走は強くなる」と信じられている。このような状況では、オーバーワークによる過労や関節および筋肉の障害などによって、パフォーマンスが低下するという危険性が常に伴う。また生体は、持久的トレーニングに対して、毛細血管、酸化酵素活性、基質などを無限に増加させて反応することはできない。必ずトレーニング量に対して、その効果にレベリングオフの生じる臨界点が存在すると考えられる。

従来の持久的トレーニングの効果に関する研究は、一定範囲内の負荷を与えることによってその反応を観察したものが多く、最適トレーニング量については不明な点が多い。そこで本研究では、持久的トレーニングの処方に対する基礎的な資料を得る目的で、主として筋組織に及ぼす効果の面から、持久的走トレーニングの量的限界および最適トレーニング量について検討を行った。

研究 方法

A. 実験動物およびトレーニング方法

実験には Wistar 系雄ラット32匹を用いた。ラットは、5週齢より飼育を開始し、1週間予備飼育を行った。走トレーニングは、夏目製作所製の

小動物用トレッドミル (KN-73) を用いて、すべてのラットに予備走行トレーニング (10m~20m/分のスピードで10分~40分間) を7週齢まで行った。その走行成績と体重をもとにして、各群が等質グループとなるように、コントロール群 (C群, n=8), 60分走トレーニング群 (60分群, n=8, Lost 1), 120分走トレーニング群 (120分群, n=8), Exhaustive 走トレーニング群 (E群, n=8, Lost 1) の4群に分類した。

トレーニングは、1日1回、週5回の頻度で (木曜および日曜日・休息日) 毎回午前5時より開始し15週齢まで行った。走行スピードは3群ともに分速30mに固定し、60分群は60分間、120分群は120分間の連続走行を一定負荷とした。E群は120分間の走行を週3回行い、残りの2回 (水曜および土曜日) は Exhaustion に至るまで走行させた。Exhaustion の判定は、藤原⁵⁾ が用いた基準と同様に、ラットが腰部をベルトに接触させて走行し、電気刺激に対して反応しなくなった時点とした。

なお、水と飼料は24時間自由に摂取できるようにし、飼育室の環境は、温度 $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ に常時維持した。

B. 測定項目

体重は毎週1回トレーニング前に測定した。トレーニング期間終了後2日間の休息をおき、全群に30m/分のスピードで走行パフォーマンステス

トを実施した。その3日後に、心臓、肝臓、腓腹筋を摘出し秤量した。

筋は内側頭、外側頭別に分け、内側頭部分を生化学的分析に用い、外側頭部分を組織化学的分析の試料とした。まず、外側頭部分の筋腹の部位を横断し、一方をスライドグラスに乗せ、プロジェクターに20倍に投影し、トレーシングペーパーにトレースした後、紙重量法で筋横断面積を算出した。残る一方から凍結切片を作成し、ミオシンATPase (pH 10.3)¹²⁾、DPNH-diaphorase¹¹⁾、Amylase-PAS¹⁾の各染色を施した。

これらは、Peterら¹³⁾の分類に従って、SO、FOG、FGの各筋線維タイプに分類し、図1に示したように深層部と表層部に分けて筋線維構成比、筋線維横断面積、CD(単位面積あたりの毛細血管数)、CF ratio(筋線維1本あたりの毛細血管数)、CC(筋線維1本をとり囲んでいる毛細血管数)、筋線維横断面積/CC(毛細血管の拡散距離を考慮したもの)について比較検討した。

肝臓および腓腹筋の内側頭部分を赤色を示す部位と白色を示す部位に分けて、Loら¹⁰⁾の方法にしたがい、グリコーゲン濃度の測定を行った。

データは各項目ごとに分散分析を行い、有意な値が認められた項目について各群間の差を検定し

た。なお、棄却水準は5%とした。

結果ならびに考察

A. 走行パフォーマンステスト

8週間にわたるトレーニング期間終了後にパフォーマンステストを行った結果、C群は平均46分(range 24~62分)、60分群は80分(65~98分)、120分群は146分(137~162分)、E群は134分(110~154分)という結果を得た。

Bagbyら²⁾の報告と比較して時間が短いのは、気温が高かったためではないかと考えられる(9月20日、午前5時、気温24°C、湿度83%)。また、120分群とE群に設定したトレーニング時間は、生体にとって相当過酷なものであり、本研究の目的に対して妥当であったと考えられる。

走行テストの結果は、個体間にある程度のバラツキが認められたものの、C群、60分群、120分群とexhaustion timeは伸びており、120分群が最も好成績を収めたことは、必ずしもexhaustiveなトレーニングが、持久的トレーニングとして最適なものではないことを示すと考えられる。

B. 体重および組織重量

図2に、解剖時の体重、各組織重量、体重に対する相対重量を示した。体重は、C群が他の3群

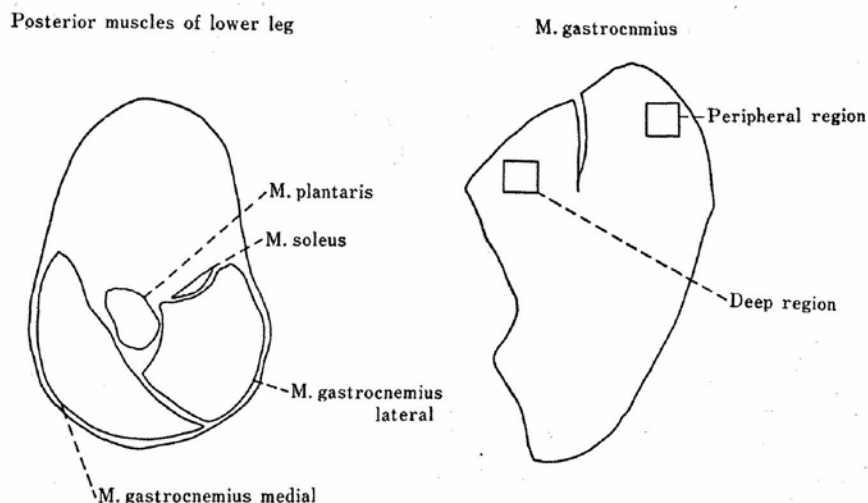


図1 Inspected parts of the cross section of m. gastrocnemius.

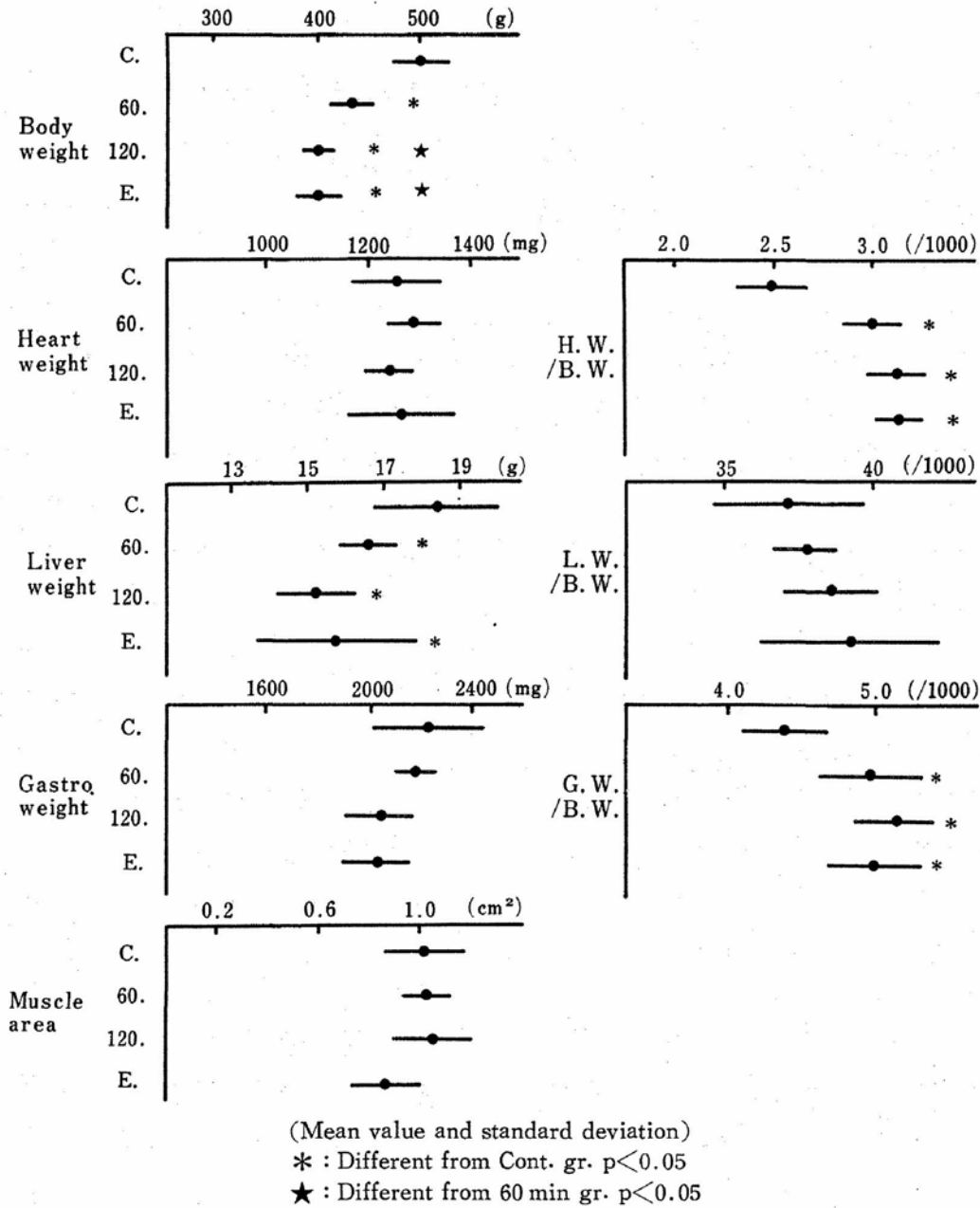


図2 Comparison of various organs on the last day of the breeding in each group.

よりも有意に高い値を示し、トレーニングによって体重の増加が抑制されるというこれまでの報告⁹⁾と同様の結果を得た。また、60分群よりも120分群、E群の方がその傾向は強く ($p < 0.05$)、体重はトレーニング量の影響が大きいことが示されたが、120分群とE群との間の差は全く認められなかった。肝臓重量は体重と同様の傾向を示し、体重に依存していると考えられる。しかし相対重量は、有意ではないがトレーニング群

が高くなる傾向がみられ、トレーニング効果があったと考えられる。

心臓と腓腹筋は、絶対重量では各群間に差が認められなかったが、相対重量ではトレーニング群がC群と比較して有意に高く、トレーニング効果が顕著にみられた。またその値は、120分群でレベリングオフに達していると考えられる。心臓の相対重量が心筋肥大の指標となりうるのであれば⁷⁻⁹⁾、120分群のあたりに最適トレーニング時

間があると考えられる。

C. 筋線維の構成比および筋線維横断面積

腓腹筋の深層部は、全群ともに SO 線維と FOG 線維から構成されており、その構成比と筋線維横断面積には差が認められなかった。一方表層部は、FG 線維と FOG 線維から構成されており、トレーニング群は C 群よりも FOG 線維の占める割合が有意に高かった。FG 線維は FOG 線維よりも筋線維横断面積は広く、トレーニング群の FOG 線維は、C 群の FOG 線維よりも大きい傾向（有意ではない）がみられたことなどを考慮すると、トレーニングによって、FG 線維から酸化能力の高い FOG 線維へと移行が生じたものと考えられる。

しかし、その傾向は、図 3 に示したように、筋全般にまでは及んでいないし、3つのトレーニング群の間の差は明確になっていない。トレーニングに対して、まず毛細血管の適応がおり、最後に Fiber type の移行がおこるのであれば^{4,14)} トレーニング期間をもっと長くとる必要があると考えられる。

D. Capillary Supply

(CD, CF ratio, CC)

図 4 に、CD, CF ratio, CC を、深層部と表層部に分けて示した。いずれの項目においてもトレーニング群が C 群よりも有意に高い値を示し、トレーニングによって毛細血管が発達したことがわかる。また、60分群と120分群、あるいは E 群の間の差も有意であり、トレーニング時間の長いことが、毛細血管を最大に発達させるための必要条件であると考えられる。しかしながら、いずれの項目も120分群でレベリングオフに達していると考えられ、最適な効果を得るためには、トレーニング時間にも限度があるものと考えられる。

E. Capillary Supply

(筋線維横断面積/CC)

図 5 に、筋線維横断面積を CC で除した結果を示した。このパラメータは、CC と同様に、各筋線維タイプ別に毛細血管の発達を評価できる上に、拡散距離を考慮して評価できるという利点がある。つまり、この値が小さいほど筋線維の酸化能力は高いと考えられる。まず各筋線維タイプ別にみると、FG 線維は、SO 線維あるいは FOG

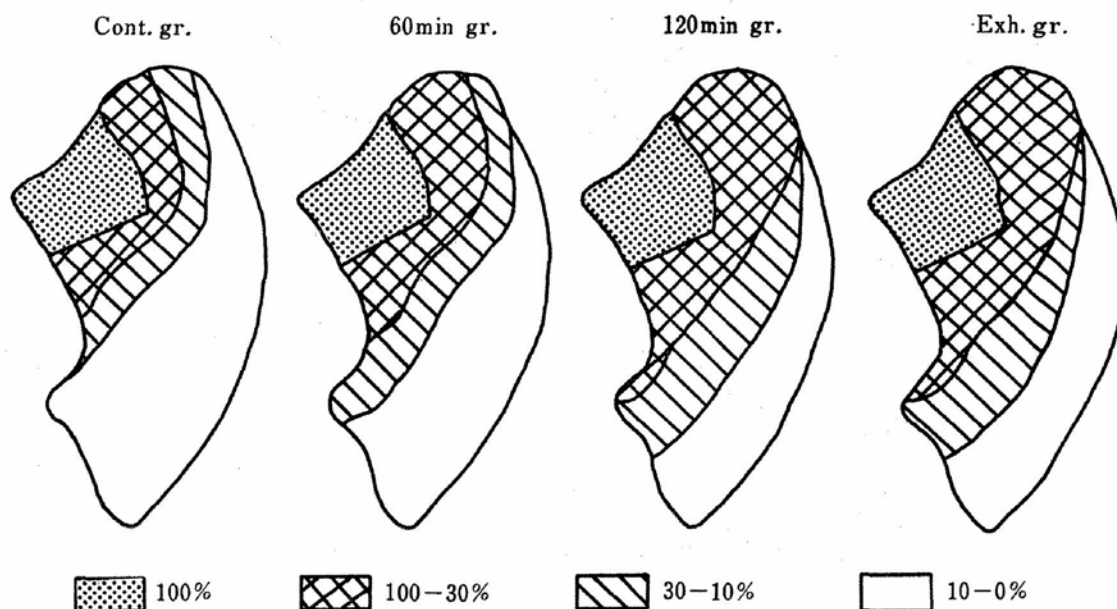
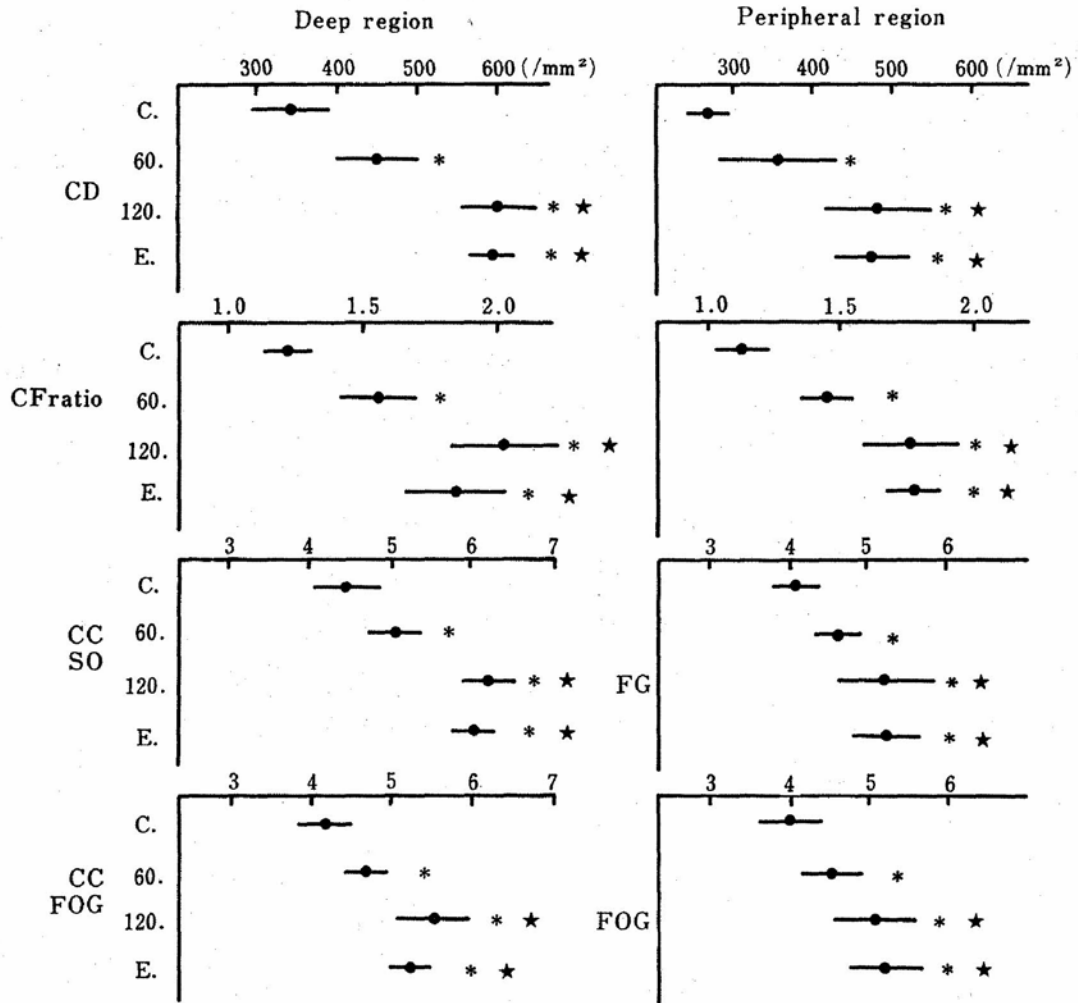
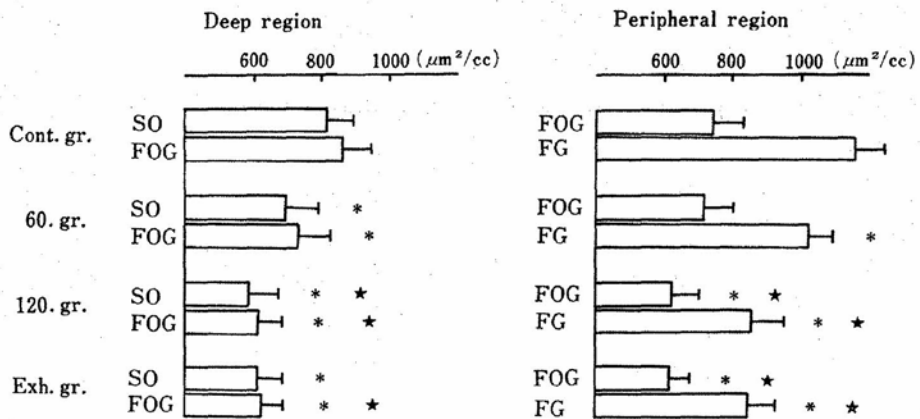


図 3 The schema of distribution of oxidative fibers in m. gastrocnemius.



(Mean value and standard deviation)
 * : Different from Cont. gr. $p < 0.05$
 ★ : Different from 60 min gr. $p < 0.05$

图4 Number of capillaries per mm² (CD), per fiber (CFratio), in contact with fiber (CC) from each group.



* : Different from Cont. gr. $p < 0.05$
 ★ : Different from 60 min gr. $p < 0.05$

图5 Comparison of distance of diffusion from each group.
 Distance diffusion: Fiber area/CC

線維よりも大きな値を示し、各筋線維の代謝特性（酸化能力）と一致しており、このパラメータで評価することの妥当性を示した。

次に、各群間で比較すると、すべての筋線維タイプともに、前述した CD, CF ratio などと同様の傾向を示した。すなわち、トレーニングによって筋線維の酸化能力は高くなるが、120分群でレベリングオフしていると考えられる。表層部における FOG 線維は、筋線維横断面積の大きい FG 線維から小さい FOG 線維へと移行が生じたために、他の筋線維タイプほど明確にその差が表われにくい、トレーニング効果はすべての筋線維タイプに及んでいると考えるのが妥当であろう。そしてその最適トレーニング時間は、120分群にあると考えられた。

F. グリコーゲン貯蔵量

図6に、各群における筋および肝のグリコーゲン貯蔵量を示した。個体間の差が大きく有意な差は認められなかったが、トレーニング群が高くなる傾向がみられた。これまでの報告どおり³⁾、トレーニングによって貯蔵量は増すことが示された

が、その上限、あるいは最適なトレーニング量については、食事量、摂取のタイミングなどの問題が大きな影響を及ぼすと考えられ、今後の課題として残された。

総括

持久的走トレーニングの量的限界および最適トレーニング量に対して、基礎的資料を得る目的で本研究を行った。Wistar 系雄ラット32匹を用い、コントロール群、60分走トレーニング群、120分走トレーニング群、Exhaustive 走トレーニング群の4群に分けた。ラットは、8週間にわたってトレーニングを行った後、パフォーマンステスト、各組織重量および組織化学的、生化学的分析などにより、以下に示す結果を得た。

1. 走行パフォーマンステストの結果、120分群が最も好成績を収めた。
2. 体重あたりの心臓重量を心筋肥大の指標として用いた時、いずれの群においてもトレーニングによって肥大が認められたが、その肥大率は120分群でレベリングオフする傾向が認められ

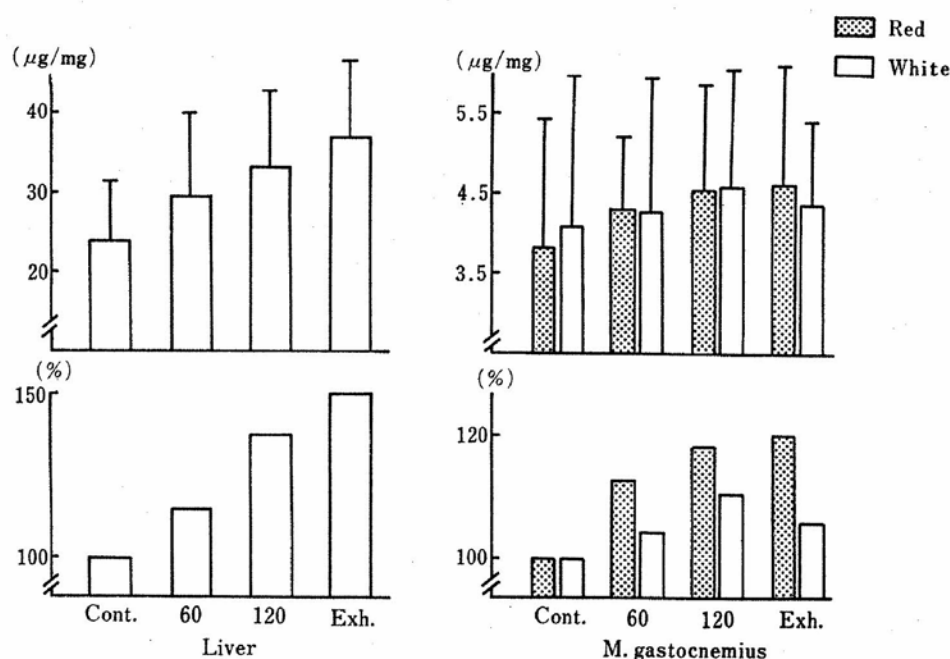


図6 Liver and muscle glycogen content in each group.

た。

3. トレーニング群における Capillary supply (CD, CFratio, CC, 筋線維横断面積/CC) はコントロール群よりも有意に高く, トレーニングによる毛細血管の新生が示唆された. しかし, いずれの項目においても, 120 分群と Exhaustive 走群との間の差は全く認められず, 120 分群でレベリングオフの傾向にあった.

4. トレーニングによって, 肝臓と筋のグリコーゲン貯蔵量は増加の傾向が認められたが, 4 群の間の差は有意なものではなかった.

本研究の結果から, 持久トレーニングとしては, 120 分群に最も望ましい効果が認められており, 必ずしも exhaustive なトレーニングが最適なものではないと考えられた.

文 献

- 1) Andersen, P.; Capillary density in skeletal muscle of man. *Acta Physiol. Scand.*, **95**, 203—205 (1975)
- 2) Bagby, G.J., H.J. Green, S. Katsuta and P.D. Gollnick; Glycogen depletion in exercising rats infused with glucose, lactate or pyruvate. *J. Appl. Physiol.*, **45**, 425—429 (1978)
- 3) Baldwin, K.M., R.H. Fitts, F.W. Booth, W.W. Winder and J.O. Holloszy; Depletion of muscle and liver glycogen during exercise. Protective effect of training. *Pflugers Arch.*, **354**, 203—212 (1975)
- 4) Cotler, M., O. Hudlicka, D. Pette, H. Staudte and G. Vrbova; Changes of capillary density and enzyme pattern in fast rabbit muscles during long term stimulation. *J. Physiol.*, **230**, P 34—P 35 (1973)
- 5) 藤原 弘; 走行トレーニングによるラットの performance の向上に関する研究, 航空医学実験報告, **18**, 23—40 (1977)
- 6) Gillespie, A.C., E.L. Fox and A.J. Merola; Enzyme adaptations in rat skeletal muscle after two intensities of treadmill training. *Med. Sci. Sports Exercise*, **14**, 461—466 (1982)
- 7) 岩崎義正; 発育期の運動処方に関する実験的研究, 体力科学, **32**, 105—125 (1983)
- 8) Karpovich, P.V.; Physiology of muscular activity. 6th ed. W.B. Saunders company Philadelphia, 156—159 (1965)
- 9) 菊地邦雄, 万井正人, 伊藤一生; 筋トレーニングの組織学的研究, 第2報トレーニングの心臓に及ぼす影響, 体育学研究, **11**, 222—230 (1967)
- 10) Lo, S., J.C. Russell and A.W. Taylor; Determination of glycogen in small tissue samples. *J. Appl. Physiol.*, **28**, 234—236 (1970)
- 11) Novikoff, A.B., W. Shin and J. Drucker; Mitochondrial localization of oxidative enzymes; staining results with two tetrazolium salts. *J. Biophys. Cytol.*, **9**, 47—61 (1961)
- 12) Padykula, H.A. and E. Herman; Factors affecting the activity of adenosine triphosphatase and other phosphatases as measured by histochemical techniques. *J. Histochem.*, **3**, 161—169 (1955)
- 13) Peter, J.B., R.J. Barnard, V.R. Edgerton, C.A. Gillespie and K.E. Stempel; Metabolic profiles of three fiber types of skeletal muscle in guinea pigs and rabbits. *Biochemistry*, **11**, 2627—2633 (1972)
- 14) Vrbova, G.; Innervation and differentiation of muscle fibers. Development and specialization of skeletal muscle, Goldspink, D.E. (ed.), Cambridge University Press, p. 37—50 (1980)