K. KIKUCHI, M. MAN-I and K. ITO: Histological
Studies on the Muscular Training (II)
The Effect of Training upon the Heart

筋トレーニングの組織学的研究

第二報 トレーニングの心臓に及ぼす影響

京都大学 菊 地 邦 雄
万 井 正 人
伊 藤 一 生

緒 言

トレーニングをすれば、心臓が形態的にも、機能的にも変化を示してくることは、従来の研究から明らかにされていることである。

形の変化については、X-ray 撮影による心臓陰影の変化、心臓容積の変化等であるが、これらの現象が心筋線維の肥大に基因するとすれば、X-ray 検査法は心筋肥大を検査する正確な方法とは言えない。また、心筋の肥大が起るとすれば、その現象がいかなる機序にもとづいて起るのか明らかにされていない。これらの問題を解決するために、是非とも組織学的検討が必要であるが、方法上の困難さから、いままでに試みられることが少なかった。

心筋肥大については、1925年、H. T. Karsner¹⁾、1932年、T. R. Harrison²⁾、1958年、A. Linzbach³⁾、1964年、北村等⁴⁾によつて研究されているが、いままでに明らかになったことは、心筋の肥大は骨格筋と同様、筋線維の数の増加でなく、筋線維が太くなり、長さが増し、さらに線維が密になるということである。また、負荷過重であれば、心筋には出血浸潤がみられ、負荷中止直後に心筋の萎縮が起り

線維化するということである。

本研究では、トレーニングが心臓に及ぼす影響を器官、組織、細胞の各レベルで検討し、心筋肥大の現象を組織学的に追求することを目的としている。

動物はラットをつかい、トレッドミル走行を課した後で、心臓重量、心室壁厚を計測し、さらに、心筋線維の顕微鏡標本作製し、心筋肥大の現象を追求した。

実験方法

1) トレーニング方法

同腹の Wistar 系ラットを用い、生後40日～50日目にトレッドミル走を開始した(第1図)。

第1図 ラットのトレッドミル走

走行速度は、分速 40m 走行距離を 250m とし、毎日走行させ、トレーニング期間を60日とした。トレーニング群と対照群は、同腹の体重の似通ったもの同志を選んで、雌雄別にトレーニング群と対照群とに分けた。

2) 組織標本の作り方と染色法

顕微鏡組織標本の作製手順は次の通りである。

a) 固定：摘出した心臓を 10% ホルマリンに浸液し、約 3 週間固定する。

b) 包埋：1%の石炭酸 30cc にゼラチン粉末 10g の割合に溶かした溶液に組織を包埋し、約 1 日、恒温槽に入れる。

c) 薄切：Sartrius 型ミクロトームを用い、液状炭酸ガスで氷結し、15~30 μ に薄切し染色する。

d) 染色法：対照染色剤として、Böhmer 氏 Hematoxylin を用いる。染色液は Hematoxylin 結晶 2.5g を純アルコール 25cc に溶かし、濾過して両液を混合する。染色時間は 30 分~1 時間である。

e) 封入：染色した組織を水槽中で、スライドグラスに載せ、グリセリン及びパラフィンを用いて封入する。

3) 資料の分析

ラットの心臓は、第 2 図から明らかなよう

に、心房は心室に比べて非常に小さく、また、機能的にも心室の方が果す役割りは大きいと思われるので、心室についてのみ検討を行うことにした。心軸の midpoint で横断し、一つの組織より、厚さ 15~30 μ の Sample を 4~5 枚作成し、これらを拡大機で印画紙上に投影した。右心室については、第 3 図に示すように、測定部位を 5ヶ所設定して、前壁より後壁へ I, II, III, IV, V とし、壁厚を計測した。左心室壁厚の測定は、第 3 図の左心室半分の面積を切り抜き、秤量し、面積に換算し、さらに、

$$r = \sqrt{\frac{2S}{\pi}} - \sqrt{\frac{2S'}{\pi}}$$

S=斜線の部分及び黒の部分半分の面積

S'=黒の部分、半分の面積

の式より、左心室の平均壁厚を求めた。

心筋線維の肥大の検討にあたっては、左右の心室壁の外層部（IIIとVI）の心筋線維を約 50~100本選び出し、切抜法により秤量し、一本あたりの平均横断面積と平均直径を算出した。

実験結果

1) 心筋肥大を示す心臓体重比

心筋肥大の現象を器官のレベルで検討するために、P. V. Karpovich⁵⁾ が指摘している心臓体重比をもつて、心筋肥大の指標とした。

第 2 図 ラットの心臓

第 3 図 右心室、左心室の横断模型図

第1表 トレーニングによる体重、心臓重量、心臓体重比の比較

群	性	体 重 g	心臓重量 g	心臓体重比 /10 ⁵
トレーニング群	911 ♂	376.0	1.290	343
	516 ♀	219.0	0.991	452
	912 ♀	232.0	0.830	358
	645 ♂	374.5	1.369	366
	517 ♀	218.5	1.042	478
	646 ♀	275.5	1.378	500
	623 ♂	429.0	1.828	426
	625 ♂	394.5	1.547	392
	624 ♀	292.0	1.368	468
	626 ♀	259.5	1.003	387
平均		277.6	1.265	417
対照群	913 ♂	413.0	1.460	354
	515 ♀	200.5	0.777	388
	9110 ♀	244.5	0.890	364
	641 ♂	390.0	1.270	326
	513 ♀	211.0	0.913	432
	642 ♀	258.5	1.250	484
	621 ♂	459.0	1.704	371
	622 ♀	287.5	0.977	340
平均		308.0	1.030	306

第2表 トレーニングによる心室壁に及ぼす影響

群	性 別	体 重 g	右 室 壁 厚 mm					左心室壁厚 mm	
			I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V		平均
ト レ ー ニ ン グ 群	911 ♂	376.0	0.45	0.96	1.04	1.00	0.75	0.84	4.12
	921 ♂	446.0	0.46	1.00	1.26	1.48	1.45	1.13	4.20
	927 ♂	426.0	0.40	1.12	1.34	1.40	1.46	1.42	3.78
	912 ♀	232.0	0.41	0.80	0.92	0.98	1.00	0.82	2.44
	924 ♀	320.0	0.46	0.78	0.91	1.15	1.06	0.89	3.44
	916 ♀	306.0	0.42	0.85	0.94	1.01	0.87	0.82	4.32
	9116 ♀	306.5	0.60	0.86	0.73	1.11	1.04	0.89	4.33
	914 ♀	333.0	0.61	1.05	0.95	1.14	0.97	0.92	4.01
	918 ♀	330.0	0.50	0.82	0.90	1.20	1.19	1.15	3.85
	922 ♀	325.0	0.58	0.76	0.78	0.69	1.55	0.89	3.47
928 ♀	301.0	0.82	0.91	1.07	1.44	1.42	1.13	3.70	
平均		336.5	0.53	0.90	0.99	1.14	1.16	0.94	3.80
対 照 群	913 ♂	413.0	0.42	0.81	0.97	0.96	0.57	0.75	3.76
	925 ♂	498.0	0.44	0.91	1.05	1.24	1.15	0.92	4.04
	923 ♂	485.0	0.65	0.67	0.88	1.12	1.28	0.92	3.94
	9110 ♀	244.5	0.24	0.52	0.60	0.95	0.86	0.64	2.00
	9210 ♀	273.0	0.27	0.65	0.69	0.99	0.98	0.72	3.50
	9112 ♀	296.5	0.47	0.72	0.84	1.05	1.38	0.90	3.33
	9114 ♀	282.0	0.39	0.78	0.79	1.05	1.18	0.81	3.60
	926 ♀	296.0	0.46	1.04	1.20	1.36	1.64	1.13	3.34
平均		348.5	0.42	0.76	0.88	1.09	1.13	0.86	3.44

第4図 トレーニングによる心臓体重比の変化

第5図 トレーニングによる右心室壁の肥大

第6図 トレーニングの左心室に及ぼす効果

第1表はトレーニングによる体重、心臓重量の変化及び心臓体重比を示すものである。トレーニング群の体重の変化は、トレーニング期間中、対照群に比べて増加する割合が少なく、一方心臓重量は増加し、約30%の増加を示した。したがって、心臓体重比は増加し、約23%の増加率を示した。その関係は第4図に示した通りである。

2) 心室壁厚

トレーニングをすれば、心臓体重比に変化があらわれることは第4図より明らかになった。しかし、心臓のどの部位に、どの程度の肥大が起るのか追求することが必要と思われる。そこで、前述の方法で、心軸の midpoint で横断し、両心室の壁厚を計測した結果は、次の第2表に示す通りである。右心室壁にみられる特徴は、前壁から後壁に近づくにしたがって厚くなっている。右心室壁厚を5ヶ所の測定値の平均をもつて、トレーニング群と対照群を比較してみると、9.3%の肥大率を示した。さらに、左心室壁についても同様に比べると、10.5%の肥大率を示した。これらの関係を表わしたのが、第5図及び第6図である。第7図はトレーニングが心室に及ぼす効果の一例であるが、肉眼的にも、横断面積の増加及び壁厚の増加がうかがえる。心軸の midpoint では、左右の心室壁に肥大があらわれたが、これらの現象が心室のどの部位にもみられるの

かが問題である。そこで、横断連続切片を作成し検討したが、その結果、心軸の midpoint で肥大が起っているものは、どの部位にもトレーニング効果がみられるようである。

3) 心筋線維の組織学的並びに顕微鏡的所見

はじめに、心臓の縦断面、横断面の両面から、心筋線維構造の組織学的検討を行なった。第8図、第9図に示したように、心筋線維、心筋線維細胞核、冠状動脈及び毛細血管等がうかがえる。心臓の壁は、心内膜、心筋層及び心外膜より成り、心筋層には沢山の冠状動静脈が入りこんでいて、心室壁の筋層は右より左の方が厚い。心筋線維の横断面及び縦断面に与えるトレーニングによる影響を第10図、第11図の顕微鏡写真で示した。これらから、心筋線維の太さが増し、多角化し、線維間の結合組織が減少し、線維が密になってくる傾向がうかがえる。

次に、両心室壁の外層（横断面積の横径線）の心筋線維を約50～100本選び、一本当たりの平均横断面積及び平均直径を求め、トレーニング群、対照群の比較をした結果は、次の第3表及び第12図に示した通りである。トレーニング群の筋線維の横断面積は右心室で $452.4\mu^2$ 、左心室で $462.4\mu^2$ であり、対照群では各々 $402.2\mu^2$ 、 $401.9\mu^2$ で、肥大率は12.5%、15.5%を示した。また、平均直径で比較すると、トレーニング群の右心室で 24.1μ 、左心室で 24.4μ であり、対照群では左右とも 22.0μ であり肥大がみられた。

考 察

トレーニング期間中、体重にみられる特徴は、体重の増加率が低下するということである。このことについては、遊佐等⁹⁾がすでに報告しているが、本研究においては、走行開始後20～30日頃から体重の増加が著るしく低

第7図 心室に及ぼすトレーニング効果

第8図 ラットの心筋線維

下した。また、雌雄間にみられる傾向は、体重にあらわれる性差がだんだん小さくなっていった。これらの現象は、体脂肪の減少が主因であり、運動負荷に対する一つの適応現象と考えられる。

一方、心臓重量は、トレーニングを継続す

るにしたがつて、次第に増加していくものと考えられるが、この研究のトレーニング期間60日後では、約30%の重量増加がみられた。

遊佐等⁶⁾はラットに一定期間の遊泳運動を負荷した場合の心臓重量、心臓横径及び縦径を測定し、ともに増加の傾向が一様に著明で

冠状動脈の横断面

毛細血管の縦走

第9図 心臓の血管 (Hematoxylin 染色 : $\times 150$)

トレーニング

対 照

第10図 心筋の横断面よりみたトレーニングの影響 (: Hematoxylin 染色 : $\times 600$)

トレーニング

対 照

第11図 心筋の縦断面よりみたトレーニングの影響 (Hematoxylin 染色 : $\times 150$)

第3表 トレーニングによる心筋線維の横断面積、直径の比較

群	性	右心室壁の心筋線維		左心室壁の心筋線維	
		横断面積	直 径	横断面積	直 径
トレーニング群	921 ♂	420.1 μ^2	23.2 μ	502.1 μ^2	25.2 μ
	927 ♂	435.3	23.6	527.6	25.9
	924 ♀	478.4	24.7	466.7	24.4
	916 ♀	472.4	24.6	387.4	22.2
	9116 ♀	456.2	24.0	388.8	22.3
	914 ♀	424.0	23.4	422.8	23.2
	918 ♀	417.8	23.2	452.1	23.8
	922 ♀	484.7	25.0	542.9	26.2
	928 ♀	483.2	24.9	471.6	24.5
	平均	452.4	24.1	462.4	24.4
対 照 群	925 ♂	407.3	22.8	443.7	23.8
	923 ♂	384.9	22.0	430.4	23.6
	9210 ♀	363.9	21.4	364.9	21.6
	9112 ♀	450.6	21.0	387.0	22.2
	9114 ♀	355.1	21.2	349.4	21.0
	926 ♀	451.6	23.8	433.8	23.6
	平均	402.2	22.0	401.9	22.0

あつたことを報告している。

この重量の増加は、心筋線維の肥大、心臓容積の増加にもとづくものと思われる。

P. V. Karpovich⁵⁾ 及び A. Kerr⁷⁾ は、心筋肥大の指標として、心臓体重比を求めている。また、北村⁴⁾ はマウスの遊泳運動後の心臓体重比を比較し、負荷開始後 55 日頃に最大に達し、生後その心臓体重比は減少すると報告している。生後あまり長い期間をおいてからトレーニングを開始した場合や、トレーニング期間が 2 ヶ月を越すような場合には、心臓体重比をもつて、心筋肥大の指標とすることは危険性をもっており、この指標は単に傾向をみるにすぎない。

そこで、実際に、心臓のどの部位が、どれ程肥大するかを組織学的に検討する必要がある。心臓横断面にみられる組織学的特徴は、右心室壁では、前壁から後壁に近づくにしたがつて厚さが増している。左心室壁厚は右心室壁に比べて大部厚く、約 4 倍である。石田⁸⁾

右心室壁の心筋線維 左心室壁の心筋線維
第12図 トレーニングによる右心室、左心室各心室各壁の
心筋線維の横断面積と直径の比較

は胎児から老人にいたる心室壁の厚さを測定しているが、20～30代の成人では、それらの厚さの比は、およそ1:4であり、ラットの場合と非常に似通っている。このような壁厚の差は、大循環と小循環の機能の差に相当し、左心室は全身の抵抗に打ち勝って血液を送り出さねばならない必要性に基因するものと思われる。

トレーニングした場合の左右の心室壁厚を比較してみると、右心室では9.3%、左心室では10.5%の肥大率を示した。左右心室の肥大率に有意差をみとめなかつたのは、トレーニングに際して、右心室の負担度も左心室のそれにとらず、かなり大きいことを意味しているものと解される。

入内島⁹⁾は冠動脈の血流波形は他の動脈と著しく異なり、収縮期には血流が減少し、遂には血流曲線はOレベルを越して負になると述べている。これは心臓の収縮により冠血管が周囲の心筋線維に圧迫されて血流が流れにくくなり、遂には押しもどされるためであろう。したがって、トレッドミルのような走行運動では、脈が異常に早くなり、拡張期が短縮すると冠血流は阻害され、心筋にとっては不都合な状態となる。しかし、このような困難さに打ち勝ちながら、適応現象としての肥大がみられたものであろう。

平均横断面積、平均直径で比較しても左右心室の筋線維の肥大率にあまり差がみられないのは、心筋線維には、各々の筋線維間に原形質的な連りを持つており、心臓全体の線維が単一の様相をもつて興奮、収縮することに基づくものと考えられる。

総 括

同腹のWistar系ラットにトレッドミル走（速度：40m/min., 走行距離：250m, トレーニング期

間：60日）を毎日行わせ、心筋肥大の現象を器官、組織、細胞の各レベルで、組織学的検討を行い、次のような結果を得た。

1) トレーニングを課すと、体重の増加する割合は、対照群に比べて小さい。一方、心臓重量は増加する。したがって、心臓体重比はトレーニング群で $417/10^5$ 対照群で $306/10^5$ を示し、心筋肥大が見られた。

2) 心室壁厚を計測し、肥大率を求めると、右心室で、9.3%、左心室で、10.5%であり、左右の差はみられない。右心室の負担度も左心室のそれにとらず、かなり大きいことを示している。

3) 細胞のレベルで、心筋線維の肥大率を比較すると、平均横断面積にして、右心室で、12.5%、左心室で、15.5%を示した。顕微鏡的所見は、心筋線維の太さが増し、多角化し、結合組織が減少し、細胞が密になる。

（本論文要旨の一部は第17回日本体育学々会で発表した。また、本研究の一部は1965年度、文部省科学研究費補助金によるものである。）

参 考 文 献

- 1) H. T. Karsner, O. Saphir and T. W. Todd: Cardiac Muscle in Hypertrophy and Atrophy. American Journal of Pathology Vol. I, p. 351, 1925

-
- 2) **T. R. Harrison and R. Ashman and R. M. Larson**: Congestive Heart Failure. Relation between Thickness of Cardiac Fiber and Optimal Rate. Arch. Int. Med. Vol. 49, p. 151, 1932
 - 3) **A. Linzbach**: Die Funktions diagnostik des Herzens. 1958
 - 4) **K. Kitamura**: The role of sport activities in the prevention of cardiovascular malfunction. Proceedings of international congress of sport sciences p. 82, 1964
 - 5) **P. V. Karpovich**: Physiology of muscular activity. W. B. Saunders company Philadelphia p. 182~189, 1959
 - 6) **遊佐清市. 高橋政子他**: ラッテ 遊泳運動と心機能について (第Ⅰ報) 体力科学研究 昭和34年10月 p. 35~36
 - 7) **A. Kerr**: Cardiac Dilatation and Hypertrophy. The American Heart Journal. Vol. 54 p. 23~31, 1954
 - 8) **石田三郎**: 正常心臓重量および左右心室壁の厚さならびに百分率 十全会雑誌 44 (1), p. 193 昭和19年
 - 9) **入内島十郎**: 循環生理学入門 医学出版社 p. 62
-

Histological Studies on the Muscular Training (II)

—Effect of Training upon the Heart—

K. Kikuchi, M. Man-i, K. Itō

(Kyoto University)

The purpose of this study was to pursue the effect of training upon the heart. The hypertrophy of the cardiac muscle was analyzed at the following three levels; 1) organ 2) tissue 3) cell. The histological method, using Hematoxylin stain was adopted. The rats (Wistar) were compelled to make 6 minutes' running on the treadmill at the speed of 40m/min. every day for eight weeks successively.

The results obtained were as follows:

1) The increase of the body weight in the exercise group was smaller than that in the control group, but the heart weight increased. The heart-body ratio in the exercise group was considerably greater than that in the control group.

2) The cross-sections of the heart (Ventricle) were made at the center of the heart axis and the breadth of the walls of the heart was measured. The ratio of hypertrophy of the heart was 9.3% in the right ventricle and 10.5% in the left ventricle.

3) The average cross area of the cardiac fibers in the exercise group was $452.4\mu^2$ in the right ventricle and $462.4\mu^2$ in the left ventricle. On the other hand, that in the control group was $402.2\mu^2$ in the right and $401.9\mu^2$ in the left. The ratio of hypertrophy of the cardiac fibers was 12.5% in the right and 15.5% in the left.