筋持久性に関する研究 (Ⅳ)

骨格筋線維の種類とその分布

Studies on the Muscular Endurance.
Report (IV) Different Types of Skeletal Muscle
Fibers and their Distribution in a Muscle.

京都大学教養部

万 井 正 人 伊 藤 一 生

菊 地 邦 雄

M. MAN-I, K. ITŌ, K. KIKUCHI

(受付 昭和 41 年 3 月 1 日)

SUMMARY

The skeletal musculature in mammals has hitherto been thought to be composed of both white and red fibers. Recently attention has, however, been directed to the presence of intermediary form of the two types of the fibers as mentioned above. As to the characteristics and the function of such medium fibers, further study seems to be imperative.

The author made an extensive study on the form, bulk and intramuscular distribution of white and red fibers in the anterior tibial muscle of the rats (Wistar), as viewed in the cross section.

a) Form: Red fibers appeared more slender and rounded as compared with the white ones.

b) Bulk: The fibers near the center of the muscle are slender, which become more voluminous, the nearer they located to the body surface.

c) Distribution: Red fibers were to be found more in number and in space in the center of the muscle and adjacent to the corresponding skeletal bone, while white fibers were more frequently found around the surface opposite to the bone.

The results written above seem to be essential in case of studying the relationship between morphological aspect of a muscle and its function, as well as in the experimental research of electromyograms.

I 緒 言

骨格筋線維は筋原線維の量と筋形質の量によつて、従来一般には、白筋線維（以下略して W. F. と記す）及び赤筋線維（以下略して R. F. と記す）に二大別されている。すなわち、筋原線維に富み、筋形質の乏しい筋線維は肉眼的に白色を呈するので W. F. といわれ、筋原線維が少く、筋形質に富む筋線維は赤味を帯びているので R. F. とよばれ

ている。機能の面では、白筋は収縮速度は速いが疲労しやすく、それと反対に赤筋は緩慢であるが持久性が大きいといわれている¹⁾²⁾³⁾。

William F. Ganong¹⁾によれば赤筋は Myoglobin を多く含み、motor-unit 当りの筋線維数が多く、長い潜伏期をもつてゆつくり反応するが、一方白筋は Myoglobin が少なく、motor-unit 当りの筋線維数も少くて、潜伏期が短いと述べている。生化学的な観点から林⁴⁾は、赤筋は呼吸酵素活性が

強く、高エネルギー磷酸保有量が小さいが、白筋は逆の立場にあると述べている。さらに、名取⁵⁾は白筋及び赤筋の成分分析を行って、creatine 量、creatinine 量、carboine 量、蛋白質量、glycogen 量、cholesterin 量、水分量等について比較している。また、形態の面で明らかになっていることは、赤筋は白筋に比べて mitochondria が大きく、その数も多く、筋原線維は太くて多くの顆粒を含んでいるが、横紋が少いということである。そのほか、表在性の筋には W.F. が多く含まれ、深層筋には R.F. が多いこと、及び二関節にまたがる筋には W.F. が多いことなども知られている。

最近、森、塚本、緒方等⁶⁾⁷⁾⁸⁾は組織化学の方法を用い、succinic dehydrogenase の量によつて W.F. と R.F. を区別しているが、その際に両者の中間的性質をもつ medium fiber の存在に注目している。

骨格筋線維の種類とその特性については、以上のほかにもなお数多くの業績があるが、その性差に関する文献は殆んど見られない。前報⁹⁾で腕エルゴメーターを用いた実験結果から、女子は男子に比べて瞬間最大筋力は弱い、筋持久力の点ではすぐれていることを報告した。その際、筋力にあらわれた性差は W.F., R.F. の配分等の組織学的差異にも原因があるのではないかとの考察を行ったので、そのことを検証するために骨格筋の組織学的検討に着手した。そして、先ず最初に筋線維そのものの種類を検討することからはじめた。

したがって、本研究の目的は筋持久性にみられる性差の根源を探ると共に、さらに、トレーニングによる W.F., R.F. の肥大の様相を追求することにあるが、本編では筋線維の識別とその形、大きさ及び同一筋内におけるそれらの分布状態について調べた結果を報告する。

II 実験方法

実験動物は主として Wistar 系ラットを用いたが、その他にマウス、ウサギ、魚及びヒトについても観察した。

顕微鏡標本作成の手順は次の通りである。

a) 固定 筋を10%ホルマリンに7~10日間浸して固定する。

b) 包埋 固定した組織片をゼラチン液(1%

石炭酸 30cc, セラチン 粉末 10g) に入れて24時間恒温槽内包埋する。

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 に薄切して染色する。

d) 染色 染色液は Sudan black B のアルコール溶液を用い、染色時間は組織の種類、液温によつて異なるが約 30 分である。

筋横断面の組織標本作成にあたっては、筋腹中央を選び、筋線維の走行と直角に横断することにした。

W.F., R.F. の横断面積の測定は、細胞1個ごとに印画紙を切り抜いて重さを秤り、その後で面積に換算する方法をとった。

III 実験結果並びに考察

先ず、Sudan black B 染色による、白筋、赤筋識別の信頼性を確める目的で、線維の分布がはっきりしている魚類(タイ)の筋肉について検鏡した結果は、第1図および第2図の通りである。太い W.F. は殆んど染色されておらず、細い R.F. は濃染されている。このことは、魚類の赤身(血合筋)の部分は純赤色筋線維からなる特殊の筋で、一般の筋線維より細い¹⁰⁾といわれていることに一致する。

そのほか、R.F. が多いとされているヒト及び兎の咬筋(M. masseter)についても同様の染色法によつて検鏡したが、ほとんど濃染された細胞のみからなっている像がみられた。以上の成績から W.F., R.F. を識別するために Sudan black B を用いられることがわかった。つぎに、ヒト(M. brachioradialis), ウサギ(M. gastrocnemius), マウス(M. tibialis ant.), 及びラット(M. soleus, M. gastrocnemius, M. tibialis ant.) についての筋組織像を第3図~第14図に示す。

これらから先ず次のことが観察できる。

① W.F. と R.F. とは線維一本づつが random に配列されている。

② ラットの R.F. は一般的にみて W.F. よりも細くて丸味を帯びていることが多い(第10図)。しかしヒト及びウサギでは必ずしもそうではない。

③ 形、大きさ及び染色濃度のすべての点で

W.F. と R.F. の中間に位するもの、即ち、中間型がみとめられる。これは、森⁶⁾⁷⁾⁸⁾らのいわゆる medium fiber に相当するものと思われるが、第10図の強拡大像でみると一層明瞭に認められる。medium fiber の中でも、W.F. に近いものもあり、R.F. に近いものもあつて、形態上からは劇然とした区別をつけ難いことがある。

W.F. と R.F. の神経支配をとりかえると互いに逆の性質をもつようになるという報告もある¹⁾ので、medium fiber の存在は、両線維が先天的要因をもつた不変のものではなく、相互に移行する可能性もあることを立証する一つの材料となるかも知れない。

つぎに、ラットの *M. tibialis ant.* を用いて、同一筋内の筋線維の分布について検討を行つた。筋腹中央における全横断面は第9図のとおりである。この図からは、倍率の関係で個々の線維の種類まで識別することは困難であるが、適当な倍率で検鏡すると次のことがわかる。即ち筋の中心部では R.F. が多く、周辺部にゆくにしたがって逆に W.F. が多くなっている。同じ周辺部であつても、体表に近い部分よりも骨に近い部分の方が遙かに多くの R.F. を含んでいる。筋の中心部では各線維とも細いものが集つており、周辺部にゆくにしたがって太くなっている。(第11図～第14図参照)

以下、それらのことについて詳細に検討した結果をのべる。なお、ここでは便宜上明らかに W.F.

とみなされるもの以外は、medium fiber も含めてすべて R.F. として計算した。つまり medium fiber は原則的には R.F. として計上し、極めて W.F. に近い一部のもののみを W.F. として取扱うことにした。

① 横断面の各部位における各線維の数の配分について

各部位を表わす方法としては、R.F. のもつとも

第15図 *M. tibialis ant.* の区分図

第16図 *M. tibialis ant.* の赤筋線維の分布
M. soleus

第1表 区画別にみた赤筋線維，白筋線維の面積比率

No.	筋線維の種類	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	全平均
No. 1	赤筋	12.6%	12.4	7.2	16.8	33.0	43.7	31.3	46.1	24.1
	白筋	87.4	87.6	92.8	83.2	67.0	56.3	68.7	53.9	75.9
No. 2	赤筋	9.3	22.6	7.3	21.0	33.9	36.0	31.1	31.2	22.7
	白筋	90.7	77.4	92.7	79.0	66.1	64.0	68.9	68.8	77.3
No. 511	赤筋	16.4	26.8	16.3	17.5	47.1	53.2	47.0	57.2	32.9
	白筋	83.6	73.2	83.7	82.5	52.9	46.8	53.0	42.8	67.1

第17図 区画別 白筋線維 赤筋線維 の面積比率

稠密にあるとみられる筋の中心部を0区分として、(第15図参照)0区分から9つの方向を考えそれぞれ筋表面に向って等間隔に1～4までの区分を設けた。そのうち、体表側として6方向、骨側として3方向を区別した。ラットの *M. tibialis ant.* について上の方法に従って設けた各区分の中に含まれる赤筋線維数の百分比を求めると第16図のとおりになる。この図から明らかなように、筋の中心部および骨側の筋表面に R.F. が多く分布しており、特に体表側から筋の中心に向つては直線的に赤筋線維数が増加し、白筋線維数が減少していることがわかる。

② 筋横断面の各部分で W.F. と R.F. が占める面積比について

横断面を I～VIII の8区画に分けて両線維毎の面積比を求めると、第1表および第17図のようになる。横断面で R.F. の占める面積比は赤筋線維数の分布の場合と同じく、筋中心及び骨側筋表面において大きな値を示す。

③ W.F. と R.F. の太さについて

まず、筋の全横断面を 150～200 倍に印画紙上に引き伸し、全線維をその種類別に切り抜いて秤量、換算し、W.F.、R.F. 毎の総面積を求める。つぎにその値を線維数で除して求めた線維一本当りの平均横断面積は第2表及び第18図のとおりである。ラットの場合、線維の太さは体重とほぼ相関があるが、総線維数には大差がなく、11000～14000 本であった。

全横断面における W.F. の平均横断面積は R.F. のその約 1.8 倍である。

線維の横断面の形は一般に多角形のものが多いが、等しい面積をもつ円形として計算した直径を第18図において○印および●印で示した。

(第2表、第18図の No. 1 はトレーニングを行つたラットである。トレーニング内容の詳細は第5報以後に報告する。)

筋の中心部の線維は細く、周辺部のものは太くなっていることはすでに述べたが、第17図のVIII区画にある W.F. の平均横断面積は $877\mu^2$ 、R.F. の平均横断面積は $520\mu^2$ であり、また周辺部として、I, II, III, IV区画にある W.F. の平均横断面積は $1246\mu^2$ 、R.F. の平均横断面積は $588\mu^2$ である。周辺部と中心部とで各線維毎の太さの比を求めると、W.F. で 1.42 : 1, R.F. で 1.11 : 1 と

第2表 ラット *M. tibialis ant.* の筋線維数、各線維の平均横断面積及び平均直径

No.	性	体重 g	線維数	筋線維 の種類	平均横 断面積 μ^2	平均直 径 μ
No. 1	♂	230.0	12017	赤 筋	801	31.9
				白 筋	1701	46.0
No. 2	♂	243.5	12201	赤 筋	580	27.1
				白 筋	1042	36.3
No. 3	♂	208.0	13540	赤 筋	546	26.3
				白 筋	936	34.4
No. 4	♀	176.0	13943	赤 筋	423	23.1
				白 筋	580	27.1
No. 511	♂	97.5	13382	赤 筋	278	18.8
				白 筋	526	25.8
No. 512	♀	84.4	11050	赤 筋	280	18.6
				白 筋	511	25.4

第18図 筋線維の平均横断面積及び平均直径

なる。

第11図～第14図にみるごとく、体表側の最外層では圧倒的に大きな W.F. が集り、殊に筋外縁の一群の細胞のほとんど全ては最も大きい W.F. からなっている。

以上の筋線維の形状及び分布についての傾向は、*M. gastrocnemius*, *M. soleus* 等についても

ほぼ同様のことがいえる。

また、以上の成績は最初に述べた本研究の目的のための基礎資料となるほか、たとえば筋電図誘導にあつての参考資料となるものと思う。

IV 総 括

骨格筋の機能をその構成成分たる筋線維を単位として考察する場合に当然問題となることは、形態的にも機能的にも特色のある筋線維の種類についてであろう。

従来哺乳動物の骨格筋は、白筋線維と赤筋線維からなるとされてきたが、組織学上両者の中間型が認められることに注目する必要がある。この中間筋線維 (medium fiber) の成因及び特性については、今後に残された研究課題である。

Wistar 系ラットの *M. tibialis ant.* の横断面について、白筋線維、赤筋線維の形、大きさ及びその分布等を詳細に検討した。

① 形 赤筋線維は白筋線維より細くて丸味を帯びている。

② 大きさ 筋の中心部の線維は細く、周辺部にゆくに從つて太くなる。

体表側の筋表面を形造る一層の線維はほとんど白筋線維からなつていて、特別に太いものである。

③ 分布 筋中心部と骨側の筋表層には、赤筋線維が多く、体表側の筋表層には白筋線維が多い。体表側から中心に向つての両線維分布の変化は直線的である。

文 献

- 1) Ganong W.F. : (1963) Review of Physiology. p. 38
- 2) Bloom W. and Fawcett D.W. : (1965) Text Book of Histology. Chapter VIII Muscular Tissue. p. 187-212
- 3) Bourne G.H. and Walls E.W. : (1960) Structure and Function of Muscle. Chapter II The Microanatomy of Muscle. p. 40
- 4) 阿南功一 他 : (1959) 医学領域における生化学実験法, 医学書院 p. 86-87
- 5) 名取礼二 : (1951) 筋生理学, 丸善出版 p. 24-25
- 6) Tsukamoto S. and Mori M. : (1961) Succinic Dehydrogenase Activity of Skeletal Muscle

- and Its Electrophysiological Function. Proceedings of the Second Annual General Meeting of Japanese Histochemical Association. Nov. 22, 23 p. 26-30
- 7) Ogata T. and Mori M. : (1963) A Histochemical Study of Hydrolytic Enzymes in Muscle Fibers of Various Animals. The Journal of Histochemistry and Cytochemistry. Vol. 11 No. 5 p. 645-652
 - 8) Ogata T. and Mori M. : (1964) Histochemical Study of Oxidative Enzymes in Vertebrate Muscles. The Journal of Histochemistry and Cytochemistry. Vol. 12 No. 3 p. 171-182
 - 9) 万井正人, 伊藤一生, 菊地邦雄 : (1966) 筋持久性に関する研究 (Ⅲ) 性差による筋持久力の相違について, 体力科学 15 巻 1 号
 - 10) 西村秀雄, 清水信夫編集 : (1962) 新組織学, 医学書院 p. 161

第1図 魚（タイ）の筋横断面（×150）

第2図 魚（タイ）の筋縦断面（×600）

第3図 ヒトの M. brachioradialis
横断面（×150）

第4図 ヒトの M. brachioradialis
縦断面（×600）

第5図 ウサギの *M. gastrocnemius*
横断面 (×150)

第6図 マウスの *M. tibialis ant*
横断面 (×150)

第7図 ラットの *M. gastrocnemius*
横断面 (×150)

第8図 ラットの *M. soleus* 横断面 (×150)

第9図 ラットの M. tibialis ant.
横断面全景 (×40)

第10図 ラットの M. tibialis ant.
にみられる白筋線維, 赤
筋線維及び中間筋線維
(×300)

↑
red
fiber

↑
white
fiber

← median
fiber

第11図 ラットの M. tibialis ant. 横断面
(体表側表層) (×150)

第12図 ラットの M. tibialis ant. 横断面
(×150)

第13図 ラットの M. tibialis ant. 横断面
(中心部) (×150)

第14図 ラットの M. tibialis ant. 横断面
(骨側表層) (×150)