筋紡錘の組織学的研究

——その分布と内封筋線維について——

(昭和45年2月13日受付)

菊 地 邦 雄

Histological study on muscle spindle — distribution and intrafusal fibers of muscle spindles —

Kyoto University, Kunio Kikuchi

The purpose of this study is to investigate histologically the distribution of muscle spindles and the relationship (size, number) between intrafusal and extrafusal fibers.

M. tibialis ant. of Wistar-strain rats was chiefly used in this experiment. Alcohol solution of Sudan black B was used to stain the fibers. The results were as follows:

- (1) Muscle spindles were distributed more at the middle part of the muscle and were observed more in innermost region than in peripheral.
- (2) Muscle spindle consists of sarcosome rich (red) and sarcosome poor (white) intrafusal fibers. The number of red intrafusal fibers involved in a muscle spindle is more than that of white intrafusal fibers.
- (3) Development of intrafusal fibers and extrafusal fibers was observed as days passing after birth. The rate of hypertrophy of extrafusal fibers is greater than that of intrafusal fibers while their development occurs.

Kikuchi, Kunio: "Histological Study on Muscle Spindle: Distribution and intrafusal of muscle spindles", *Research Journal of Physical Education*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~7, July, 1970.

緒 言

筋紡錘は A. Ruffini¹⁾ によると A.H. Hassall が、人の筋で骨格筋線維と異なる細い筋線維が存在することを発見したのが最初で、次いで、A. Weismann が蛙の胸皮筋に発見し、1863年、W. Kükne が筋紡錘なる名称をつけたということである。

その後、多くの研究者によつて、解剖学的、生理学的に広汎な研究が行われた結果、筋紡錘は骨格筋の感覚受容器であり、姿勢及び運動調節の主体をなすことが明らかになった。

筋紡錘の分布については、K. E. Hagbarth²⁾, D. Barker³⁾, J. E. Swett⁴⁾ 等によつて研究されているが、しかし、骨格筋線維と内封筋線維の関係を追求した資料はみられない。

京都大学

本研究では、筋紡錘の分布について検討するとともに、筋紡錘の内封筋線維と骨格筋線維の関係を数及び太さの面から、赤筋線維、白筋線維に分けて組織学的に追求した。

実 験 方 法

実験材料は、主として Wistar 系ラットの M. tibialis ant. を用い、次の順序で顕微鏡標本を作成した。

- (1) 固定：筋を10%ホルマリンに約3週間固定する。
- (2) 包埋：固定した筋をゼラチン溶液（1% 石炭酸 30cc にゼラチン粉末 10g の割合）に約1昼夜包埋する。
- (3) 薄切：液体 CO₂ を用いて氷結し、Sartrius 型ミクロトームで 15~30 μ に薄切する。
- (4) 染色：脂質染色法⁵⁾ (Sudan black B を使

用した Lison 法)を用いる。

次に、顕微鏡写真をとり、内封筋線維と骨格筋線維の直径の計測を行った。

なお、その計測の方法は、M. tibialis ant. の深層部に存在する筋紡錘の内封筋線維とそのまわりの骨格筋線維の直径を、いずれも横径および縦径を計つて、それらの平均値を求めて算出した。

実験結果

(1) 筋紡錘の構造に関する顕微鏡的所見

写真1は、ラットの筋紡錘を横断面から観察したものである。

骨格筋線維の構成については、すでに報告⁶⁾したが、筋紡錘の内封筋線維も、顆粒の多い赤筋性の内封筋線維（以下、赤筋線維という）と顆粒の少ない白筋性の内封筋線維（以下、白筋線維という）がみとめられた。

筋紡錘の構造については、すでに明らかにされているが、Sudan black B 法でも、知覚神経及び遠心性の神経線維がみられ、これらの神経や内封筋線維の間に、Lymph が充満し、そのまわりは被

Photo. 1 Cross section of rat's muscle spindle involved in M. tibialis ant. X600

膜でおおわれていることがうかがわれる。

写真2は、ラットの筋紡錘の縦断面と横断面の連続切片の一部を示したものである。

筋紡錘の中央部（赤道部）は両端より太く、内封筋線維には神経終末が附着している。

(2) 筋紡錘の分布

第1図は、ラット M. tibialis ant. の筋腹にみられる筋紡錘の分布を示したものである。

筋を体表側と深層側に分けて筋紡錘の分布をみ

Photo. 2

Peripheral

Fig. 1 Distribution of Muscle Spindles Involved in Rats' Tibialis Ant. Muscles.

Photo. 3

ると、深層部に多いことが明らかである。

M. soleus, M. gastrocnemius についても検討を行つた結果、M. tibialis ant. と同様に、深層部に多く分布した（写真3）。

第2図は、筋腹（b）を中心に等間隔で5ヶ所選
び、それぞれの各場所における筋紡錘の分布を検
討したもので、筋紡錘は筋腹附近に多く存在する
ことが明らかとなつた。

Fig. 2 Distribution Muscle Spindles in Each Region of Rat's Tibialis Ant. Muscle

すなわち、筋紡錘は筋腹の深層部に最も多く分布することになる。

(3) 内封筋線維と骨格筋線維の関係について

ラットの M. tibialis ant. の筋腹にみられる筋紡錘の数および内封筋線維と骨格筋線維数の関係を赤筋線維、白筋線維に分けて検討した結果は、第1表および第3図に示す通りである。

筋紡錘は平均6個存在し、筋紡錘1個当りにみられる内封筋線維は、平均して赤筋線維3本、白筋線維2本であつた。また、骨格筋線維は平均して赤筋線維は7082本、白筋線維は6796本で、内封筋線維、骨格筋線維とも赤筋線維がやや多い傾向

Table 1: Mean Number of Muscle Spindles, Mean Number of Intrafusal Fibers per Muscle Spindle and Mean Number of Extrafusal Fibers Involved in M. Tibialis Ant.

Number of Materials	Mean Number of Muscle Spindles Involved in M. Tibialis Ant.	Mean Number of Intrafusal Fibers per Muscle Spindle		Mean Number of Extrafusal Fibers	
		Red fibers	White fibers	Red fibers	White fibers
25	6	3	2	7082	6796

を示した。

著者⁷⁾はすでに、骨格筋線維の発達について報告したが、筋紡錘の内封筋線維の発達を生後の日数(35日、70日、105日、143日、500日)を追つて、赤筋線維、白筋線維に分けて検討し、さらに骨格筋線維の発達との関係を追求した。その結果は第2表および第4図に示すとおりである。

骨格筋線維の太さは、赤筋線維、白筋線維とも生後の日数の経過と共に次第に大きくなり、生後143日で最大を示した。生後500日では次第に筋萎縮が起つていることが明らかである。生後35日をもとに、太さの増加率を求めて検討しても同じような傾向がみられた。

内封筋線維は、骨格筋線維と同様な傾向はみら

Fig. 3 Relationship between Number of Intrafusal Fibers and that of Extrafusal Fibers in Rats' Tibialis Ant. Muscles.

Table 1 Comparison of Average Diameter of Intrafusal Fibers and Extrafusal fibers From View Point of Days after Birth

Days after Birth		35		70		105		143		500	
		N		N		N		N		N	
		Red fiber	White fiber	Red fiber	White fiber	Red fiber	White fiber	Red fiber	White fiber	Red fiber	White fiber
Intrafusal Muscle Fibers	Average diameter (μ)	7.1	9.3	6.8	9.9	6.1	9.9	7.9	10.8	6.9	3.7
	Increasing** rate (%)			—*	7	—*	7	11	16	—*	—*
Extrafusal Muscle Fibers	Average diameter (μ)	21.6	34.7	24.7	35.0	24.6	39.2	28.9	43.3	24.4	32.4
	Increasing** rate (%)			14	1	14	13	34	25	13	—*

** Increasing rate: average increased diameter of muscle fibers on each day after birth per that of 35 days after birth

* —: Shows decreasing

Fig. 4 Comparison of Average Diameter of Intrafusal Fibers and Extrafusal Fibers in Rats' Tibialis Ant. Muscles.

れるが、それ程著明ではなかつた。

さらに、生後まもない日数（1日、10日、20日）の筋紡錘の発達過程を検討した結果は、写真4に示す通りである。生後1日で、すでに筋紡錘がみられ、内封筋線維もみとめられる。生後10日では内封筋線維と骨格筋線維の大きさに殆んど差はみられな。生後20日では、内封筋線維、骨格筋線

維とも、赤筋、白筋の分化がはつきりし、骨格筋線維の大きさは内封筋線維の大きさをしのぐようになる。

考 察

筋紡錘の主要な構成要素は内封筋線維であるが従来、内封筋線維に関して組織学的に3説があ

Photo. 4

つた⁹⁾。すなわち、内封筋線維は骨格筋線維の縦裂芽生により生成した daughter fiber ではないかという發育説、また發育が不完全な筋線維ではないか、あるいは、退行変性産物ではないかと考えられていた。

しかし、この發育及び後者の2説は、L. Kershner⁹⁾ や P.A. Cilimbaris¹⁰⁾ 等によつて否定され筋紡錘の形態的特異性と其の神経支配とにより、特殊知覚機能をもつた器官であると考えられるにいたつた。

C.S. Sherrington¹¹⁾ はオスミウム酸染色で、V.T. Nachmias¹²⁾ 等はコハク酸脱水酵素染色で、筋紡錘の内封筋線維の構成について研究し、いずれも赤筋性内封筋線維のみからなるといわれた。

しかし、近藤⁹⁾ や本研究の Sudan black B を用いた脂質染色法では、筋紡錘の内封筋線維には赤筋線維と白筋線維が存在することが明らかになつた。

内封筋線維の機能は、骨格筋線維と同様に、赤筋線維は tonic contraction, 白筋線維は phasic contraction に関係すると S. Cooper 等¹³⁾ は述べている。

また、近藤⁹⁾ は筋紡錘を内封筋線維の構成からⅠ型筋紡錘—赤筋性内封筋線維からなる筋紡錘、Ⅱ型筋紡錘—白筋性内封筋線維からなる筋紡錘、Ⅲ型筋紡錘—兩種内封筋線維が混在する筋紡錘の3型に分けている。それらの分布と筋の機能との関連性について、Ⅱ型とⅢ型は phasic な運動をする四肢筋に、Ⅰ型とⅢ型は tonic な機能をもつ軀幹筋及びそれに近い筋に多いと述べている。

このことからして、赤筋性と白筋性の両筋線維を含む筋紡錘は、あらゆる運動様式に適合しうる feed back system として、運動及び姿勢保持に関与しているものと思われる。

筋紡錘の筋内分布については、いままでにいくつかの知見があり、S. Cooper¹³⁾ 等は赤筋線維に M. Hines¹⁴⁾ は軀幹筋に筋紡錘が多いことを示し、大島¹⁵⁾ は繊細な運動を営む筋にその密度が高いと報告している。

また、J.E. Swett¹⁶⁾ 等は、ネコの M. medial gastrocnemius を用いて筋紡錘の分布の仕方を検討し、筋紡錘は筋の中心部、即ち、筋腹に多く分布し筋線維と平行していると述べている。

本研究でも、ラットの M. tibialis ant. の筋紡

錘の数は、筋の深層部さらには筋腹附近に多いことが明らかになった。

内封筋線維の数については、いくつかの報告があるが、赤筋線維、白筋線維に分けて検討した資料はみられない。また、内封筋線維と骨格筋線維の数及び太さの比較を、赤筋線維、白筋線維に分けて検討した資料もみられない。

本研究では、ラットの *M. tibialis ant.* の内封筋線維及び骨格筋線維の数は、両者とも赤筋線維の方が白筋線維より多い傾向を示した。これらの関係は筋の種類が変わった場合、即ち、tonicな働きのある筋と phasic な働きのある筋ではどう変わるか今後に残された課題である。

太さについては、成熟期と思われる生後143日頃まで、骨格筋線維の方が内封筋線維より肥大する割合が大である。生後間もない期間の内封筋線維の発達は比較的早く、以後は骨格筋線維程著るしくないことが原因するものと思われる。

結 論

主として、ラットの *M. tibialis ant.* を用い、Sudan black B 染色法により、筋紡錘の分布と内封筋線維、骨格筋線維の関係を検討し、次の成績を得た。

(1) 筋紡錘は、筋の深層部、ならびに筋腹附近に多く分布するが、その仕方には規則性はみられない。

(2) 筋紡錘の内封筋線維は赤筋線維と白筋線維とから構成される。筋紡錘1個当りの赤筋線維は平均3本、白筋線維は平均2本で、赤筋線維の方が多い。

(3) 骨格筋線維数は、赤筋線維平均7082本、白筋線維平均6796本で、骨格筋線維も赤筋線維が多い傾向がある。

(4) 内封筋線維と骨格筋線維の発達を、生後の日数を追って検討した結果、生後143日頃までは、両者とも次第に大きくなるが、それらの肥大する割合は骨格筋線維の方が著明である。

稿を終るに当たり、御指導いただいた万井正人教授、御協力いただいた伊藤一生助教授に深謝いたします。

本論文の要旨は、第20回日本体育学会で発表した。

参 考 文 献

- 1) A. Ruffini (1898): Journal of physiology, Vol.23, p. 190~208
- 2) K.E. Hagbarth and G. Wohlfart (1952): The number of muscle-spindles in certain muscles in the cat in relation to the composition of the muscle nerves. Acta Anatomy, Vol.15, p. 85~104
- 3) D. Barker and N.K. Chin (1960): The number and distribution of muscle-spindles in certain muscles of the cat, Journal of Anatomy, Vol. 94, p. 473~486
- 4) J.E. Swett and E. Eldred (1960): Distribution and numbers of stretch receptors in medial gastrocnemius and soleus muscles of the cat, Anatomy Rec., Vol. 137, p. 453~460
- 5) 岡本耕造、上田政雄他 (1955): 顕微鏡的組織化学医学書院, p. 276
- 6) 万井正人, 伊藤一生, 菊地邦雄 (1966): 筋持久性に関する研究(Ⅳ) 骨格筋線維の種類と分布, 体力科学 Vol. 15, No. 1, p. 30~35
- 7) 菊地邦雄 (1967): 骨格筋線維の発達に関する組織学的研究, 体力科学, Vol. 16, No. 2, p. 38~44
- 8) 近藤正美 (1959): 骨格筋の機能分化と構造との相関性に関する組織学的研究, 第3編筋紡錘の機能分化と構造との相関性に関する研究, 岡山医学誌, Vol. 71, p. 3591~3600
- 9) L. Kerschner (1888): Anat. Anz. 3, p. 126~132
- 10) P.A. Cilimbaris (1910): Arch. Mikr. Anatomy, Vol. 75 p. 692~747
- 11) C.S. Sherrington (1894): Journal of physiology Vol. 17, p. 211~258
- 12) V.T. Nachmias and H.A. Padykula (1957): Journal of Biophysics and Biochemistry, Cytology, Vol. 4, p. 47~57
- 13) S. Cooper and P.M. Daniel (1956): Human muscle spindles, Journal of physiology. Vol. 133, p. 1~3
- 14) M. Hines (1931): American Journal of Anatomy, Vol. 47, p. 1~53
- 15) 大島哲郎 (1952): 長崎医学誌, Vol. 15, p. 85~104