

骨 骼 筋 運 動 神 經 支 配 型 式

山口県立医科大学整形外科教室 (指導: 伊藤鉄夫教授)

大 石 保

〔原稿受付: 昭和32年2月14日〕

THE PATTERN OF MOTOR INNERVATION
IN THE STRIATED MUSCLE

TAMOTSU OISHI

Orthopedic Department, Yamaguchi Medical School

(Director: Prof. Dr. Tetsuo Ito)

1) The pattern of motor innervation in the mm. tibialis anticus and extensor digitorum longus of the rabbit was investigated, both electrophysiologically and histologically.

The contractions were recorded isometrically under an initial tension of 50 grams in all instances.

The main histological method used was the gold-chloride-formic acid technique. Although this method inevitably gives mechanical distortion of the neural pattern in such a tissue, material so obtained is nevertheless of considerable value for examining the inner structure of the nerve fibre bundle and the arrangement of pre-terminal motor fibres and of end-plates.

2) The sum of isometric tensions developed in the muscle by stimulation of the fifth, sixth and seventh lumbar nerves, of which the peroneal nerve consists, is considerably larger than that developed by stimulation of the peroneal nerve.

This fact suggests that a large number of the muscle fibres are doubly innervated by these spinal segments.

3) The intramuscular nerve fibre bundles keep branching off and have multiple anastomoses with each other during their distribution within the muscle. Figs. 3, 4 and 5 show the intraneural plexus at the forks of the trunk.

Furthermore, several nerve bundles were frequently found to anastomose with each other to form an intricate network (Figs. 7, 8, 9 and 10).

4) In some preparations, two or three motor end-plates were seen to be related to a single muscle fibre. The end-plates concerned were derived from a common axon in some instances, and from different axons in the others (Figs. 13, 14 and 15).

5) In the mm. tibialis anticus and extensor digitorum longus of the rabbit, the intricate plexiform pattern of nerve innervation provides an anatomical means for commingling and interwiring of the nerve fibres during their distribution within the muscle.

As a result of this, one axon entering the muscle may divide to supply end-

plates in different parts of the muscle. Conversely, individual end-plates in a given zone of the muscle are frequently derived from intermingling terminal fibres from different parent axons.

Moreover, a large number of the muscle fibres are doubly innervated by the different spinal nerves.

運動単位は通常機能的にも又解剖学的にも独立した構造を有し、隣接運動単位の変化によつて何等の影響をもうけないと考えられている。そして又たとえ筋の神経支配の一部が永久に障害されても、残存する運動単位はその正常機能を保持し、筋線維の或る程度の肥大と云うことを除けば変化は起らないと云うことが暗黙のうちに仮定されている。併しながら Mandelstamm (1882) 及び Exner (1884, 1885) の観察はこの様な考え方に疑義をもたらした。

Exner によれば、家兎の *M. cricothyreodeus* は *N. laryngeus superior and medius* によつて支配されているが、その何れか一方を切断したのでは筋の変性は起らないが、両方を切断すると期待される様な筋変性が起ると云う。それ故に、Exner は一方の神経切断によつて神経支配を失つた筋線維は変性する前に他の神経によつて再支配を受け得る可能性があると考えた。この仮説は Lederer 及び Lemberger (1907) によつて支持された。彼等は神経刺激実験に基いて、Exner の実験成績は各筋線維が *N. laryngeus superior and medius* の両者によつて重複支配を受けていると云うことで説明されないと云っている。

Harreveld (1945) は家兎の *M. sartorius* 及び *M. quadriceps* を支配する第5及び第6腰髄神経のうち、第6腰髄神経だけを切断した後、第5腰髄神経電気刺激による筋の等長性張力を測定したが、筋張力は術後日を経るに従つて増加し、而も筋線維には変性が起らないことを証明した。彼はこれ等の事実からして第6腰髄神経の支配を失つた筋線維が第5腰髄神経の終末分岐によつて再び神経支配を受ける可能性があることを主張した。Hines, Wehrmacher and Thompson (1945) や Weiss and Edds (1945) も骨格筋支配神経部分的切除後に残存神経線維が神経支配を失つた筋線維を再び支配する可能性があることを電気生理学的に証明している。

Hoffmann (1949) は鼠を用いて同様の実験を行い、Loewit gold-chloride-formic acid technique によつて、術後に urtraterminal branch が形成さ

れたり、隣接健存神経線維から神経分岐が起り、この分岐が変形神経鞘に侵入して再び神経支配を恢復することを証明した。Edds and Small (1951) は猿について同様の実験を行い、健存神経線維は側枝再生を行うが、それは不完全なものであつて、多数の筋線維は再び神経支配を受けることなく終ることを証明した。尚 Harreveld (1945) は上記の実験に際して、*M. sartorius* を支配する第5及び第6腰髄神経を単独に電気刺激して生ずる筋張力の和が *N. femoralis* の電気刺激によつて筋張力より大であることからして、筋線維の一部が第5及び第6腰髄神経によつて重複支配を受けていることを推定している。

以上の様な事実があるとすれば、臨床上にも重大な意義を有することになる。脊髄前角炎後の筋力の自然的恢復にもこの様な現象が大きな役割を果すであろう。又四肢痙性麻痺に対して筋緊張を減弱せしめる目的で、筋支配神経枝の部分的切除 (Stoffel) が日常盛んに行われているが、術後屢々症状の再発を見ることも亦上記の現象が重大な意義を有することになる。併しこの様な事実があるためには、骨格筋内で分岐する神経線維が、今日まで考えられている様に単純な分岐をなし、各運動単位が解剖学的に独立した構造を有するものではなくて、互いに密に交錯して居らなければならない。又筋線維が重複神経支配を受けていることもあり得ると考えられる。これ等の問題は先で骨格筋内の神経線維の分布の状態を組織学的に検索することによつて解決されなければならない。この様な研究目的には、gold-chloride-formic acid technique は最も便利な染色法である。本法によれば、比較的大きな筋肉片を圧平して神経線維束の分布を追及することが出来る。

実 験 方 法

実験にはすべて成熟家兎の *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* を用いた。先づ該筋支配神経電気刺激によつて等長性張力を測定した後、該筋を採取して gold-chloride-formic acid

technique によつて染色を行つた。

(1) *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* は第5, 第6及び第7 腰髄神経より成る腓骨神経によつて支配されている。腓骨神経は両筋の間に至り、こゝで樹枝状分岐をなして両筋に入る。従つて神経を傷つけることなしには両筋を分離することは出来ない。それ故に本実験では両筋を分離することなく一塊として用いた。即ち両筋の腱を足関節の高さに於いて切断し、これを槓杆に結合し、50gr. の負荷のもとに、感応電気刺激によつて生ずる等長性張力を測定した、刺激に用いた神経は第5, 第6, 第7 腰髄神経及び腓骨神経である。

(2) gold-chloride-formic acid technique は次の通りである。

(i) 新鮮な筋を3乃至5mmの厚さの小片に切る。

(ii) 濾過した新鮮レモン汁に10乃至15分間浸漬する。

(iii) レモン汁を捨てた後、組織片を水洗することなく直ちに1%塩化金液を注ぎ、組織片が一様に黄金色を呈するまで暗所に置く。これに要する時間は10分乃至1時間である。塩化金液は使用前1乃至2日に調製して置く。

(iv) 次にこの組織片を取出し、水洗することなく、3倍量の蒸溜水を以つて稀釈した蟻酸液中に移し、暗所に12時間乃至24時間放置する。著者の経験によれば冬期は25°Cの孵卵器中に置かなければ良い標本は得られない。

(v) 組織片を一度流水にて洗い、50%アルコール・グリセリン等量混合液に入れる。これは組織の膨化を防ぐのに役立つ。

(vi) 組織片を(又は組織片の表層部を鋏切し更に小さな片にする)載物ガラス板上に置き、2本の針で慎重に筋線維を互いに解きほぐしてゆく。この際手荒に取扱つて筋線維の連絡を断つ様なことのない様に注意を要す。次で被覆ガラス板を標本の上に置き、これを軽く圧しながら貼り付ける。

以上の方法によつて染色した標本では筋内神経線維の走向や線維束の内部構造が良く観察される。本法はメチレン青生体染色法よりも遙かに勝れている。尚標本の一部はアルコール固定の後、Cajal 法によつて染色を行つた。

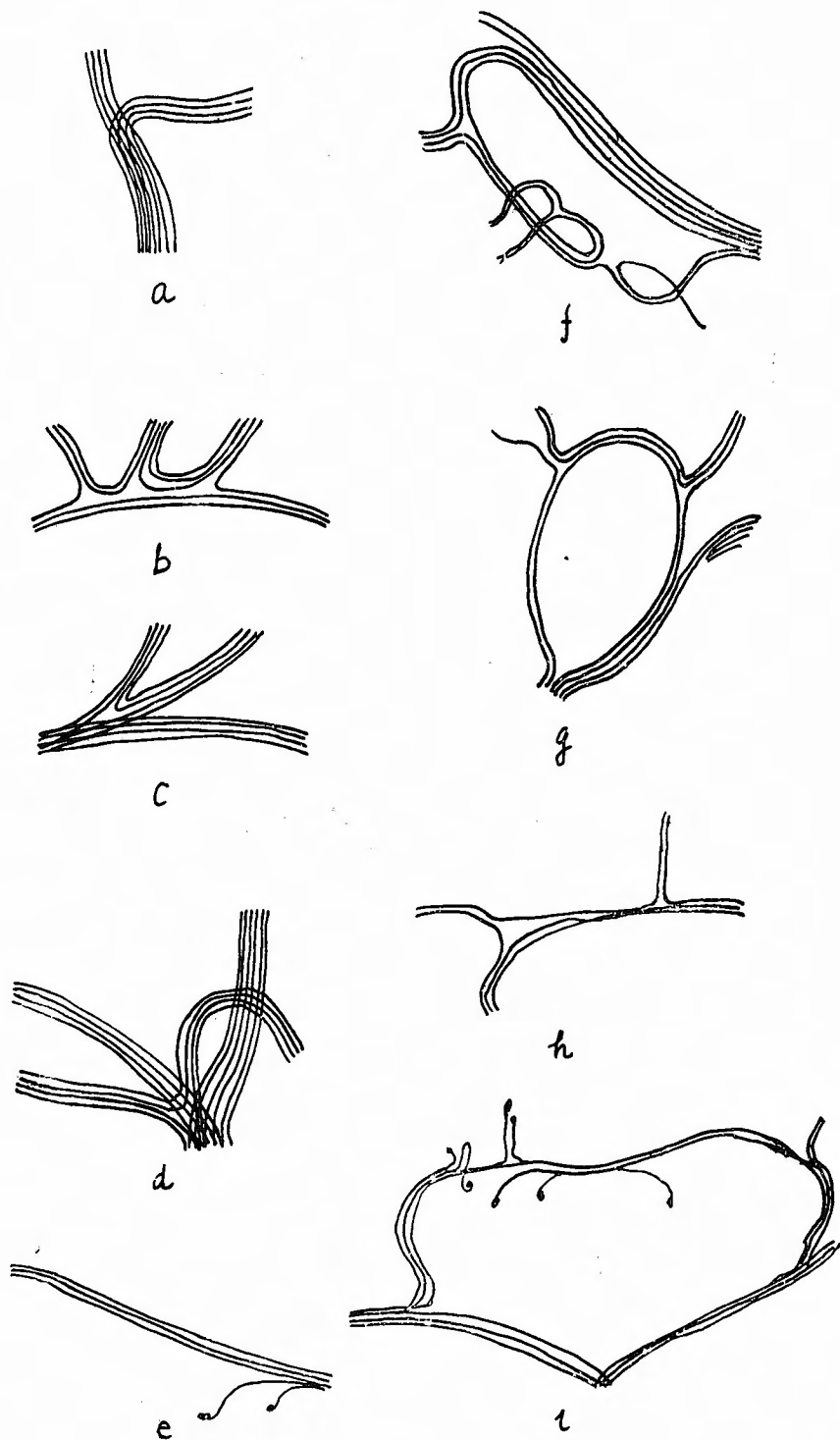
実 験 成 績

(1) 電気刺激成績

Table

	L_5 (g)	L_6 (g)	L_7 (g)	$L_5 + L_6 + L_7$	N. fibularis	$\frac{L_5 + L_6 + L_7}{N.fibularis}$
1	68	104	140	312	220	1.42
2	78	100	130	308	210	1.45
3	82	106	132	320	225	1.43
4	48	98	130	276	227	1.21
5	25	95	125	245	192	1.28
6	80	92	103	275	145	1.49
7	38	50	83	171	140	1.22
8	70	72	100	242	163	1.49
9	45	90	113	248	195	1.27
10	92	96	106	294	188	1.57
11	80	102	115	297	138	2.15
12	92	105	142	339	240	1.41
13	85	94	116	295	235	1.26
14	34	45	110	189	140	1.35
15	90	107	163	360	232	1.55
16	75	102	152	329	245	1.34
17	60	85	105	250	198	1.26
18	105	110	143	358	255	1.40
19	100	105	140	345	220	1.57
20	72	95	126	293	198	1.48

Fig. 1



第5, 第6及び第7 腰髄神経及び腓骨神経の感応電気刺激によつて生ずる *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* の最大等長性張力は Table に示す通りであつて, 各脊髄神経刺激によつて生ずる筋張力の和は腓骨神経刺激によつて生ずる筋張力よりも遙かに大であつて, その2倍に達するものさえある。この事は該筋の筋線維の大部分が各脊髄神経によつて重複支配を受けている事を示唆するものである。

(2) 筋内運動神経の構造

M. tibialis anticus 及び *M. extensor digitorum longus* を gold-chloride-formic acid technique によつて筋内運動神経の走向及び神経終末の状態を検索し次の様な結果が得られた。

(i) 比較的大きな神経線維束を見るに, Fig.1-a 及び Fig. 2 の様に分岐部の構造が簡単に同一方向に走る神経線維からのみ構成されているものが所々に見出される。併しながら屢々, Fig.1-b 及び Fig. 3 に示す様な神経線維束が種々の走向をとる神経線維によつて構成されているものも亦見出される。この写真では Fig. 1-b に示す様に, 一方から来た神経線維束が他の神経線維束に吻合し, その際に一部の神経線維を失い, 反転して去る時に新しい神経線維を伴う像が明瞭に観察される。Fig.1-c 及び Fig. 4 でも同様な構造が観察される。Fig. 1-d 及び Fig. 5 は4本の神経線維束分岐部の構造を示したものであつて, 神経線維の経路は決して単純なものではなく, 各神経線維束は種々の経路をとる神経線維によつて構成され, これが分岐と吻合を反覆することによつて各線維束はそれを構成する神経線維の一部を互いに交換しながら大きな網の目構造を造つていていると考えられる。

(ii) 神経線維束を少しく末梢に向つて追求するに, こゝに於ても同様に分岐と吻合を反覆して神経線維の一部を交換する像が所々に見出される。時には Fig. 1-e 及び Fig. 6 の様に長い経路中に分岐を行わずに遠く筋内を走るものがある。この様な構造は運動神経線維束は筋内に入ると直ちに分岐を行い附近の筋線維に終末を形成すると云う様な今日まで想像されていた様な構造とは甚だしく異なるものである。又屢々 Fig. 1-f, Fig. 7 及び Fig. 1-g, Fig. 8 に見る様に甚だしく複雑な分岐と吻合を行い, 遂に環状構造を示すものがある。この様に神経線維束は末梢に向うに従つて益々頻回に分岐と吻合も行い更に細い網の目構造を形成してゆく。

(iii) 同様な構造は神経終末に近づいても見出すことが出来る。Fig. 1-h 及び Fig. 9 では右側に上向する2本の神経線維が見られるが, これは互いに反対方向から来る神経線維が相合して上向している。同様な構造は Fig. 1-i 及び Fig. 10 に於て更に明瞭に観察される。即ち左右の小神経束が相合して環状構造を形成している。その経過中に分岐を出しながら神経終末を形成しているが, この終末分岐の走向は右方より左方に向うものは右下方に走つており, 左方より右方に向うものは左下方に走つており, 又略々中央部に於て左右から相合した神経線維が一束をなして上向している。又 Fig. 11 でも同様に上向神経線維と下向神経線維が相合している像が見られる。Fig. 12 は上記の様な末梢部に於ける環状構造に於ける神経線維の経路の一例を示すものであつて, 下方から上向する2本の神経線維が隣接する筋線維に夫々終末を形成しているが, 右上方から斜に下向する神経線維がこれに混入している。

(iv) 次に神経終末の分布状況を観察するに, 多くの筋線維は夫々1個の神経終末を有するものであるが, 又所々に1本の筋線維にして2乃至3個の神経終末を有するものが見出される。これには2つの型式があつて, Fig. 13 の様に同一神経線維が分岐して同一筋線維に2個の神経終末を形成するものと, Fig. 14 の様に互いに相反する方向から来た神経線維が同一筋線維に夫々終末を形成し, 筋線維が重複神経支配を受けているものがある。又 Fig. 15 の様に同一筋線維が3個の神経終末を有する場合もある。

考 察

骨格筋の運動単位は最近まで, 機能的にも解剖学的にも互いに独立した構造を有し, 隣接の運動単位の変化によつて何等の影響をも受けないと云う様に考えられていたけれども, 茲に示した神経構造よりすれば, 運動単位の構造は簡単なものでないと云う事が解る。即ち運動神経線維束は既に骨格筋に入るに先立つて数本の神経線維束に分岐するものであるが, 筋内では再び吻合と分岐を反覆して, その際に神経線維の一部を交換するものである。そしてこの様な構造は神経終末に至るまで頻回反覆されている。その結果として筋内の神経線維束は網の目構造をなし, この網の目構造は末梢に向うに従つて細くなる。又更に同一筋線維にして2乃至3個の神経終末を有し重複神経支配を受けているものもある。この様な神経線維分布の状況から想像される運動単位の構造は甚だ複雑なものである。

Fig. 2



Fig. 3

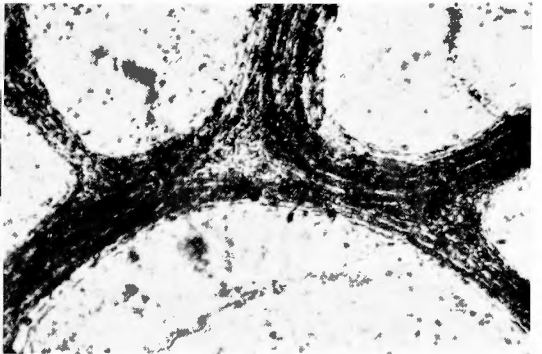


Fig. 4

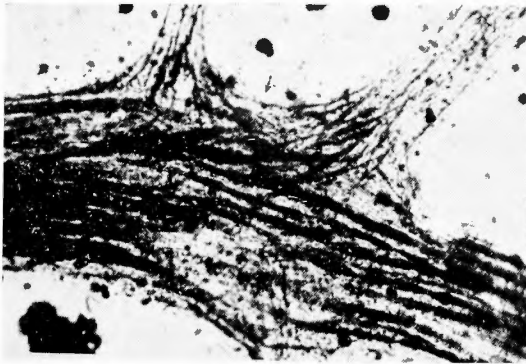


Fig. 5



Fig. 6



Fig. 7



Fig. 8



Fig. 9

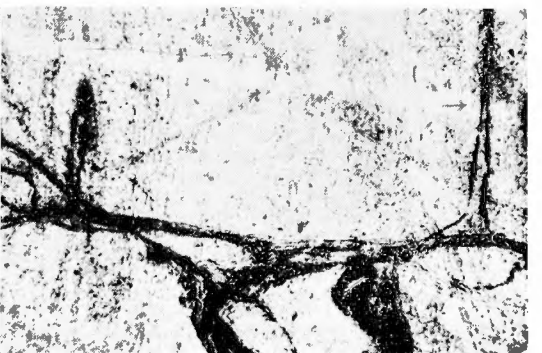


Fig. 10

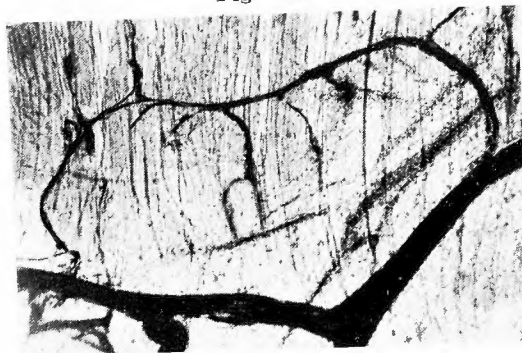


Fig. 11



Fig. 12



Fig. 13

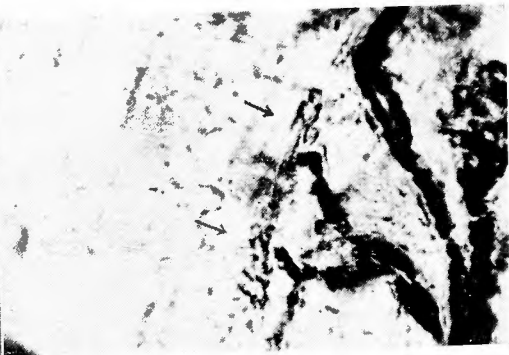


Fig. 14

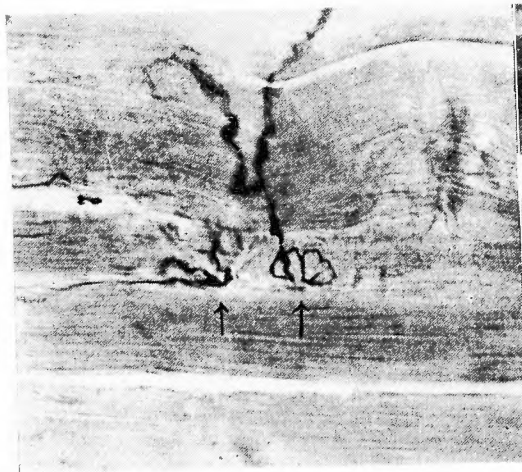


Fig. 15



即ち1個の運動単位に属する筋線維は一束をなしているものではなくして、互いに分散して存在し、その間に他の運動単位に属する筋線維が介在している。而も多くの筋線維は重複神経支配によつて2つの運動単位に属している。この事は神経刺激実験の成績によつても証明されている。即ち第5, 第6及び第7腰髄神経電気刺激によつて生ずる *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* の筋張力の和が腓骨神経電気刺激によつて生ずる該筋の筋張力よりも遙かに大であると云うことは、筋線維の多くが第5, 第6及び第7腰髄神経によつて重複支配を受けている事を示すものである。

結 論

(1) 家兎の *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* の運動神経支配型式を電気生理学的に検索した。

(2) 上記両筋を支配する第5, 第6及び第7腰髄神経を各単独に電気刺激して生ずる筋の等長性張力の和は腓骨神経を電気刺激して生ずる該筋の張力よりも遙かに大であることは、筋線維の多くがこれ等の腰髄神経によつて重複支配を受けていることを示唆するものである。

(3) 筋内神経線維束はその終末に至る迄に頻回に吻合と分岐を反覆して神経線維の一部を交換し、網の目構造をなしている。

(4) 同一筋線維にして2個乃至3個の神経終末を有するものがある。

(5) この様な神経線維分布の状況から想像される運動単位の構造は甚だ複雑なものであつて、一個の運動単位に属する筋線維は一束をなすものではなく、広く筋内に分散して存在し、その間に他の運動単位に属する筋線維が介在している。而も一部の筋線維は重複神経支配によつて同時に2個の運動単位に属していると考えられる。

(6) この様な神経と筋の構造はその障害に対する合目的な防禦構造であると考えられる。

写 真 説 明

Fig. 2. 筋内神経線維束の分岐。すべての線維が同一走向をとる。

Fig. 3. 筋内神経線維束の吻合と分岐。異つた走向をとる線維によつて構成されている。こゝで線維の交換が行われている。

Fig. 4. 筋内神経線維束の吻合と分岐。矢印の線維は吻合した後、直ちに反転する。

Fig. 5. 筋内神経線維束の分岐。矢印の線維はA線維束からB線維束に入る。

Fig. 6. 小神経線維束が分岐を出すことなく筋内を走る。

Fig. 7. 異つた経路をとる多くの神経線維が吻合と分岐を反覆して環状構造を形成している。

Fig. 8. 異つた経路をとる多くの神経線維が吻合と分岐を反覆して環状構造を形成する。

Fig. 9. 矢印の2本の神経線維は左右より相合して来ている。

Fig. 10. 小線維束が吻合して環状構造を形成している。

Fig. 11. 異つた方向から来た線維が相会す。

Fig. 12. 上向する2本の線維は相隣る筋線維に神経終末を形成し、これに下向する線維が混入している。

Fig. 13. 1神経線維からの2本の分岐が同一筋線維に神経終末を形成している。

Fig. 14. 異つた方向から来る神経線維が同一筋線維に神経終末を形成している (Cajal氏染色)。

Fig. 15. 同一筋線維が3個の神経終末を有している。

文 献

- 1) Bowden, R. E. M. and Gutmann, E. : Denervation and re-innervation of human voluntary muscle. *Brain*, **67**; 273, 1944.
- 2) Carey, E. J. : Studies on ameboid motion of motor nerve plates. *Am. J. Path.*, **18**; 242, 1942.
- 3) Edds, M. V. and Small, W. T. : The behavior of residual axons in partially denervated muscle of the monkey. *J. Exp. Med.*, **93**; 207, 1951.
- 4) Feindel, W. H., Sinclair, D. C. and Weddel, G. : A new method for investigating the nervous system. *Brain*, **70**; 495, 1947.
- 5) Feindel, W., Hinshaw, J. R. and Weddel, G. : The pattern of motor innervation in mammalian striated muscle. *J. Anat.*, **86**; 35, 1952.
- 6) Harreveld, A. V. : Re-innervation of denervated muscle fibres by adjacent functioning motor units. *Am. J. Physiol.*, **144**; 477, 1945.
- 7) Harreveld, A. V. : On the mechanism of the "spontaneous" re-innervation in paretic muscles. *Am. J. Physiol.*, **150**; 670, 1947.
- 8) Hoffmann, H. : Local re-innervation in partially denervated muscle. : A histo-physiological study. *Austral. J. Biol. Med.*, **28**; 383, 1950.
- 9) Mitchell, G. A. G. : Visceral nerve demonstrated by combined intravital and supravital techniques. *Acta anat.*, **18**; 81, 1953.
- 10) Morris, D. D. R. : Recovery in partly paralysed muscles. *J. Bone & Joint Surg.*, **35-B**; 650, 1953.
- 11) Weiss, P. and Edds, M. V. : Spontaneous recovery of muscle following partial denervation. *Am. J. Physiol.*, **145**; 587, 1946.