

# 神経束叢の複雑さはどのように表されるか

関 谷 伸 一, 一 戸 孝 七<sup>1)</sup>

新潟県立看護短期大学, <sup>1)</sup> 岩手医科大学 教養部 名誉教授

## Index of the Fascicular Plexus Complexity in Peripheral Nerves

Shin-ichi SEKIYA, Takakatsu ICHINOHE<sup>1)</sup>

Niigata College of Nursing, <sup>1)</sup> Iwate Medical University School of Liberal Arts

**Summary** In the human peripheral nervous system, nerves are usually composed of many fasciculi, which are bundles of nerve fibers invested by the perineurium. They divide and unite repeatedly to form a fascicular plexus along the full length of the nerve. The biological significance of these remains unknown, and there is no index to compare the complexity of the plexus among different parts of a nerve, different nerves and different species. Therefore, we worked out an index showing the complexity of the fascicular plexus and named it the fascicular plexus index (FPI). The FPI was defined as  $2(D+U)/(N_1+N_2)$ , where D and U denote the frequency of division and union of fasciculi within a piece of nerve that is 1 cm in length, respectively.  $N_1$  and  $N_2$  denote the number of fasciculi at both ends of the range. With the use of the index, it is possible to examine quantitatively the intraneural structure of peripheral nerves.

**要 旨** ヒトの末梢神経は、神経周膜で包まれた軸索の束である神経束から構成されている。神経束は分岐と癒合を繰り返すことによって、その太さと数を様々に変化させ、神経束叢ともいうべき複雑な内部構造を作り出している。神経束叢の複雑さは、動物により、神経により、そして身体における位置によっても変化するが、その生物学的意義は不明のままである。そこで、次のような神経束叢指数 (fascicular plexus index, 略して FPI とよぶ) を考案し、比較研究に用いることを提案した。

$$FPI = 2(D+U)/(N_1+N_2)$$

ここで、D と U はある一定の長さの神経片内で起こった神経束の分岐と癒合の回数、 $N_1$  と  $N_2$  はその両端部における神経束の数と定義した。その結果、神経束叢の複雑さを表すには、これらのパラメーターを用いることが妥当であることが示され、各種の末梢神経の内部構造を定量的に解析できる可能性が示唆された。

**Key words :** 末梢神経 (peripheral nerve)

神経束 (nerve fasciculus)

神経束叢 (nerve fascicular plexus)

神経束叢指数 (fascicular plexus index)

神経周膜 (perineurium)

## はじめに

ヒトの末梢神経の内部構造を見ると、いわゆる神経が多数の神経束 *nerve fasciculi* から構成されていることがわかる (Fig.1)。これらの神経束は、緻密な結合組織である神経周膜によって包まれた軸索の集団である。神経を構成するこれらの神経束は、その走行中に分岐 *division* と癒合 *union* を繰り返すために、全体として複雑な様相を呈する。この状態をここでは神経束叢 *nerve fascicular plexus* と呼ぶこととする。これらの神経束の数と太さは、神経の種類、その神経の身体における位置、あるいは動物の種類によって様々である (Fig.2)。このような末梢神経の内部構造を理解することは、末梢神経損傷における神経縫合手術と、その後の機能回復に重要な意味をもつため、古くから臨床医の関心を引き、多くの基礎的研究がなされてきた (Compton, 1917; Langley and Hashimoto, 1917; Dustin, 1918; Sunderland, 1978; Jabaley et al., 1980)。しかし、神経束叢の存在意義はいまだ不明のままである。そこでこのような複雑な神経束叢をできるだけ客観的に記載するために、次のように考えた。

神経束叢は3次元的な広がりを持つものであるが、基本的に1本の神経束が2本に分岐し、2本のものが1本に癒合するという点のみに着目すると、2次元での広がり置き換えて検討することが可能と考えられる。したがって、一見複雑な神経束叢は、Fig.3のような模式図によって表現できる。基本図形は  $\cap$  (人) と  $\cup$  (Y) の2つである。またこのモデルにおいては、神経束を近位から遠位方向に向かって観ていくものとする。

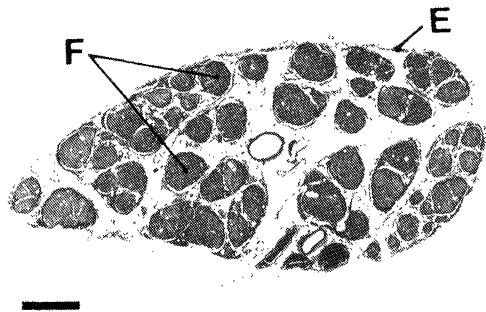


Figure 1 Cross section of the human left sciatic nerve, obtained by routine histological techniques, looking from the proximal to distal aspect. Masson-Goldner's stain. The medial side is on the left. The nerve consists of many nerve fasciculi (F) invested with the perineurium. They are loosely bound into the nerve by areolar connective tissue, the epineurium (E). Bar: 1mm.

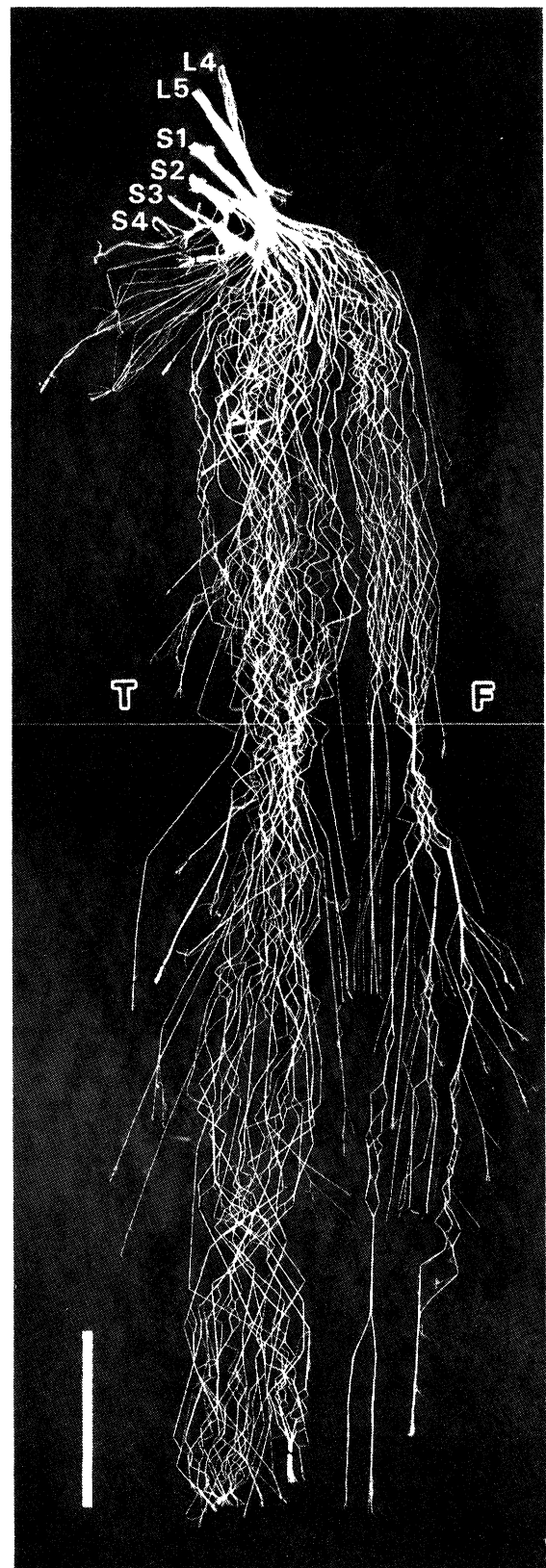


Figure 2 Dorsal aspect of the teased right sciatic nerve. All of the nerve fasciculi exposed by removing the epineurium are spread onto a rubber plate with insect pins. The tibial nerve (T) is composed of more fasciculi than those in the common peroneal nerve (F). L4-5 and S1-4 indicate the ventral rami of the lumbar and sacral spinal nerves, respectively. Bar: 10cm.

このような神経束叢を末梢神経の全経過について調べてみると、一見して複雑な部位とそれほど複雑とはいえない部位とが識別できる。しかし、その判断はあくまで直感的なものであり、複雑さがどの程度なものなのか、あるいは特定の部位においてのみ複雑であるのか、ということに関してはあいまいのままである。そこで、より客観的な判断ができるようにするため、神経束叢の回路網の複雑さを示す指数を求めることを試みた。複雑さの指数を求めることは、回路網の複雑さとは何なのか、という問題を解くことと同義と考えられる。そこで本論文では、回路網の複雑さをどのように考えるかについて考察を試みた。

## 1. 標本の抽出とパラメーターの検討

### (1) 標本の抽出

全体の状況を把握するために、母集団から標本を抽出して解析するのが統計学の常套手段である。この手法にならない、神経束叢をある一定の区間  $L$  に区切って、この  $L$  の区間について回路網の複雑さについて考えるものとする (Fig.3)。

### (2) パラメーターとしての神経束数

神経束数が多ければ多いほど、その部分の神経束叢は複雑であると考えられる。そこで、先の一定区間において、近位端における神経束数を  $N_1$ 、遠位端

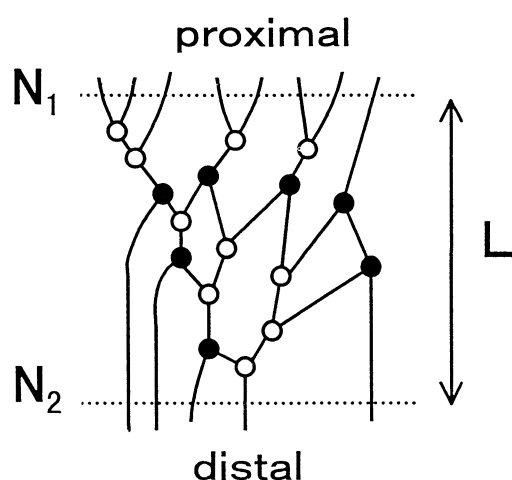


Figure 3 Diagram of a nerve fascicular plexus, assuming that it resides in a two-dimensional plane. The plexus is simply formed by division (●) and union (○) of fasciculi (solid lines). The frequency of division and union of the fasciculi within a certain range ( $L$ ) were counted for quantitative analysis.  $N_1$  and  $N_2$  denote the number of the fasciculi at respective ends of the range.

における神経束数を  $N_2$  とし、この  $N_1$  と  $N_2$  を複雑さのパラメーターの一つとすることが妥当と考えられる。しかし両者のいずれかを採用しても、一方だけでは区間内のパラメーターとしては不十分と考えられるので、ここでは、 $(N_1 + N_2)/2$  を求めた。

### (3) 神経束の数と分岐・癒合

神経束叢という神経束の回路網は、常に神経束の分岐 division と癒合 union を繰り返すことによって構成されている。この神経束の分岐と癒合には次のような特殊な構造を有す。

- ①分岐は1本の神経束が2本の神経束に分かれる。
- ②癒合は2本の神経束が1本の神経束に合流する。

そのためこのような構造を持っている回路網では次のような性質がある。

- ①分岐では常に神経束が1本増加する。
- ②癒合では常に神経束が1本減少する。

したがって分岐点の数を  $D$ 、癒合点の数を  $U$  とし、近位端の神経束数を  $N_1$ 、遠位端の神経束数を  $N_2$  とすれば、恒等的に

$$N_2 = N_1 + D - U$$

が成立する。

### (4) パラメーターとしての分岐・癒合の回数

このような神経束の分岐と癒合の頻度が高ければ高いほど、その部分における神経束叢はより複雑であると考えられる。そこで分岐点の数  $D$ 、癒合点の数  $U$  をカウントし、両者の和

$$D + U$$

を神経束叢の複雑さを計るパラメーターとすることが、重要と考えられる。

ところで、この一定区間において、近位側と遠位側を逆にすると、分岐点であったものが今度は癒合点となり、癒合点であったものは逆に分岐点になってしまう (Fig.4)。よって、分岐点と癒合点とは本質的に区別する必要はなく、したがって両者を等価に扱うことができる。このことが上述のように  $D + U$  の表現を複雑さのパラメーターにする理由でもある。

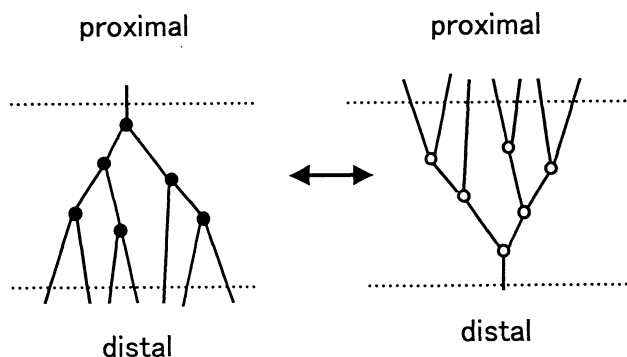


Figure 4 Relationship between divisions (●) and unions (○) of fasciculi. If the figure is turned upside down, the division replaces the union, and vice versa.

Fig.4 で示されたような回路図は極端な例であって、一般にはある区間の両端の神経束数  $N_1$  と  $N_2$  は何本もあり、それらの間に起こる分岐点  $D$  と癒合点  $U$  も複数あって神経束叢が形成されている。そしてその形状は  $D$  と  $U$  の組み合わせによって様々に変化する。

一方、 $D$  と  $U$  の積  $DU$  を複雑さのパラメーターとする方法もあるかもしれない。しかしこの場合、もし  $D$  か  $U$  の一方が0であると、他方が0でなくとも  $DU = 0$  となり、 $D = 0$  あるいは  $U = 0$  の場合と区別がつかなくなる不便さがあるので、 $DU$  は神経束叢の複雑さのパラメーターとしては不適当と考えられる。

## 2. 回路網の複雑さを表す指数

上述した点を考慮して、神経束叢の複雑さの指数として次の式を考え、これを神経束叢指数 (fascicular plexus index, 略して FPI とよぶ) と定義することにする。

$$FPI = p = \frac{D + U}{\frac{N_1 + N_2}{2}} = \frac{2(D + U)}{N_1 + N_2}$$

各パラメーターは上述したように、ある一定区間における神経において、神経束の分岐する回数を  $D$ 、癒合する回数を  $U$  とし、その区間の両端における神経束数のうち、近位端における数を  $N_1$ 、遠位端の数を  $N_2$  とする。

ここで問題になることは、1つの指数の値  $p$  を決めたとき、この  $p$  の値に対応する神経束叢の回路網が、実はいくつかある可能性がある、ということである。すなわち、神経束叢の回路網が異なっていて

も、同一の複雑度  $p$  を示すとき、それらの回路網が視覚的印象として同一の複雑さを示しているか、という問題である。またこのことは、神経束叢の回路網を図形として考えた場合、1つの値  $p$  に対応する回路網の図形は何種類あり得るか、という問題でもあるが、これは純粋に幾何学上の問題である。

そこで次に、この式において、 $p$  の様々な値に対応する回路網の図形を具体的に考えてみる。

## 3. 神経束叢指数 FPI の検討

まず各種の条件を整理すると、

$$N_2 \geq 1, N_1 \geq 1$$

$$D \geq 1, U \geq 1$$

$$N_2 = N_1 + D - U$$

である。また、

$$p = \frac{2(D + U)}{N_1 + N_2}$$

と定義し、神経束叢の複雑度の指数とした。

### ① $p = 0$ の場合

この場合は  $D = 0$ 、 $U = 0$  のときであって、神経束の分岐も癒合もない例である。例えば Fig.5 のような場合である。これらのどの例においても、複雑度は  $p = 0$  である。すなわち平行な神経束が並んでいるときは、神経束叢の複雑度は変わらないことを示している。このことは、今回定義した FPI は、神経束の数に関係なく、むしろ神経束の分岐と癒合に重点を置いた定義であるといえる。もし神経束数が問題となるならば、この FPI に神経束数を付記する

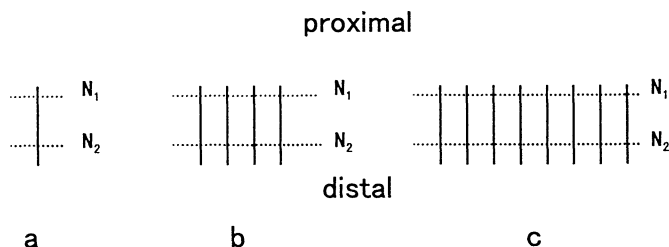


Figure 5 Cases without division and union of fasciculi. They contain an extreme case of only one fasciculus (a) and cases of multifasciculi (b and c). In all of these cases the frequency of division ( $D$ ) and union ( $U$ ) of fasciculi is zero. Independently of the number of the fasciculi, therefore, all of the fascicular plexus indices (FPI) come to zero.

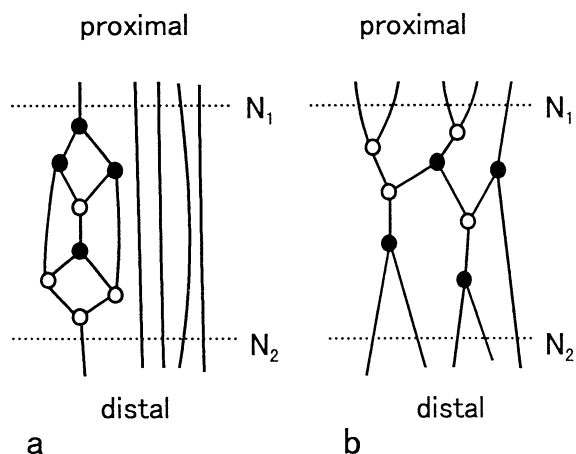


Figure 6 If both the number of fasciculi and the frequency of division (●) and union (○) are completely equal ( $N_1 = N_2$ ,  $D = U$ ), every FPI is the same, even though these two fascicular plexuses show a quite different appearance. In figures 6a and 6b, since  $N_1 = N_2 = 5$ , and  $D = U = 4$ , the FPIs of both cases come to the same value: 1.6.

方法を考えなければならない。例えば,

$$\frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{2(D + U)}{N_1 + N_2} = \frac{N_1 + N_2}{2} + p$$

とすることも考えられる。坐骨神経を例にとると、動物によってはラットのように神経束1本から成るものと、ヒトのように何十本もの神経束から構成されている場合とがある。このように動物種によって神経束数が異なる場合は、その数を無視するわけにはいかないため、特に比較解剖学的観点からは、このような定義が必要と思われる。しかしヒトに限るなど、同一種内で論ずる時には考慮する必要はないと思われる。

## ② $p_1 = p_2$ であっても、実は回路網が異なる場合

定義のように神経束叢の複雑さの指数を

$$p = \frac{2(D + U)}{N_1 + N_2}$$

で表すと、 $N_1$ ,  $N_2$ ,  $D$ ,  $U$  のそれぞれが互いに等しい場合には、神経束叢はどのような回路網を作っても、 $p$  の値は互いに等しくなる (Fig.6)。また,

$$p = \frac{2k(D + U)}{k(N_1 + N_2)}$$

のように  $N_1 + N_2$  と  $D + U$  がそれぞれ同数倍 ( $k$  倍) になった場合、やはり  $p$  の値は変わらないことになる (Fig.7)。

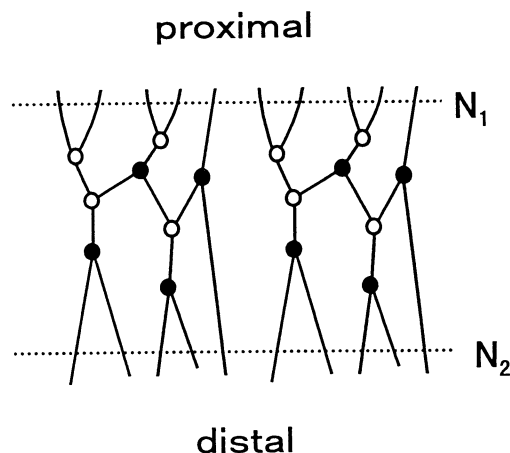


Figure 7 A case of the fascicular plexus which was double that of figure 6. The FPI is equal to the value in figure 6. Therefore, even if the more complex plexus in appearance resulted from an increase in the number of fasciculi, the FPI provides an objective value of the actual complexity of the plexus as the frequency of division and union per fasciculus.

このように複雑度が同じくとも、回路網が異なる場合が多数想定される。この点が今回定義した指数の欠点と考えられる。しかし、少なくとも視覚的には、神経束数の増減が分岐・癒合の頻度の増減よりも神経束叢の複雑さを大きく左右する要因になる、とは考え難い。このことは先に述べたように、この指数が神経束の分岐と癒合の頻度に重点を置いている根拠でもある。言い換えれば、この指数はある一定区間における単位神経束あたりの分岐・癒合の頻度を示しているわけである。

## おわりに

末梢神経の内部構造は、分岐と癒合を繰り返す神経束が複雑に入り乱れ、そこには何も規則性などないようにさえ思える。事実、Sunderland (1968) が示した筋皮神経の立体モデルは、神経束が複雑に錯綜している。このことは、末梢神経損傷における再建術後の機能回復がはかばかしくないことに対する説明に使われる結果となった。しかし、Langley and Hashimoto (1917) あるいは Dustin (1918) のように、個々の筋の支配神経が分岐して出る位置との関係に着目して、神経幹の中には神経束叢が複雑な部分と単純な部分とが区別されることを指摘した研究者達もいる。また Compton (1917) のように、筋枝が神経束叢の形成に関連し、皮枝は関係ないと、具体的に指摘したものもいる。しかしこのような初

期の研究においては、視覚的そして直感的に理解していただけても考えられる。一方、最近になって Jabaley ら (1980) は、末梢神経損傷の再建術における臨床的観点から、前腕の正中神経にはこのような神経束の錯綜した構造は見られないことを明らかにした。この結果はあくまで前腕における神経の内部構造のことであり、上腕や腕神経叢に近い部位ではどのようなになっているかは不明である。このように末梢神経の内部構造の全体像については、基礎的あるいは臨床的に興味深い議論の対象でありながら、いまだ統一された形での記載がないままである。

神経束についての定量的解析の試みは、漆谷 (1974) によってヒト坐骨神経について報告されている。漆谷は坐骨神経の横断切片を作成して、その断面に見られる神経束の数を計測した。しかし神経束の数を神経の全長にわたってカウントしても、それが神経束叢の複雑さを反映しているとは言いがたい。Sekiya and Horiguchi (1994) は同じくヒト坐骨神経を対象に、単に神経束の数を数え上げるのみでなく、神経束の分岐と癒合に着目し、それらの頻度を計測し、神経の部位によるそれらの頻度の変化を調べた。その結果、坐骨神経においては神経束の分岐と癒合の頻度が、部位によって異なりながらもその変化のパターンがほぼ一定していることを示した。これらの結果を踏まえ、より定量的に解析することを目的に、神経束の分岐と癒合が神経束叢の複雑さを示すものと考え、本論文における神経束叢指数の提唱となった。それゆえ、今回の定義に従って神経束の分岐と癒合の関係を改めて指数化すれば、より具体的かつ客観的に神経束叢の複雑さを表すことができ、神経の各部位についての指数を基に比較検討することが可能となる。神経束叢指数の坐骨神経への具体的適用結果については、別に報告する。

## 引用文献

- Compton, A. T. : The intrinsic anatomy of the large nerve trunks of limbs. *J. Anat.*, 51, 103~117, 1917.
- Dustin, A.-P. : La fasciculation des nerfs. *Ambulance de l'Océan*, 2, 135~154, 1918.
- Jabaley, M. E., Wallace W. H., Heckler F. R. : Internal topography of major nerves of the forearm and hand: A current view. *J. Hand Surg.*, 5(1), 1~18, 1980.
- Langley, J. N. and Hashimoto M. : On the suture of separate nerve bundles in a nerve trunk and on internal nerve plexuses. *J. Physiol.*, 51, 319~346, 1917.

Sekiya S. and Horiguchi M. : The funicular pattern of the sciatic nerve. *Acta Anat. Nippon*, 69(4), 510, 1994. (Abstract)

Sunderland, S. : *Nerves and Nerve Injuries*. ed 1, Churchill Livingstone, Edinburgh, 1968.

漆谷英礼 : 成人日本人坐骨神経の Funicular Pattern. *日本外科宝函*, 43 (4), 254~275, 1974.