

総説

腕神経叢の治療

奈良県立医科大学救急医学講座

松山 武

MANAGEMENT OF BRACHIAL PLEXUS INJURIES

TAKESHI MATSUYAMA

Department of Emergency and Critical Care Medicine, Nara Medical University

Received October 25, 2004

抄録：腕神経叢損傷 (brachial plexus injury) は通常、脊髄神経の断裂、神経根の引き抜き損傷 (root avulsion) を伴っており非常に複雑な病態を呈する。そのため、診断法および治療法においても基準化されていないのが現状である。医療の進歩がめまぐるしいのに関わらず機能的予後はまだまだ満足な結果を得られておらず、また治療困難なため回避されている感がある。しかしながら、多発外傷に対する治療の向上により致死性であった患者が生存可能になり、腕神経叢損傷は、新たな臨床での問題点となってきている。今回、腕神経叢損傷についての概念から治療、最近のトピックスについて概説する。

Key words : brachial plexus injury, root avulsion, nerve repair

初めに

腕神経叢損傷 (brachial plexus injury) は通常、脊髄神経の断裂、神経根の引き抜き損傷 (root avulsion) を伴っており非常に複雑な病態を呈する。原因としては、オートバイのような高エネルギー損傷をきたす交通事故により生じることが多い。病理学的には伸展損傷 (stretch injury) であるが、時にナイフなどによる刺創、切創のこともある。若年者に多く、一本の神経が障害されるのではなく、多数の神経根、神経幹、神経束が傷害される。また、頭部外傷、血気胸を伴う肋骨骨折、鎖骨骨折、鎖骨下動脈損傷、四肢の骨折、脊髄損傷、腹部損傷などの多発外傷を伴うため、それに隠れて診断が遅れることと、全身的な初期治療が必要となるため、わが国では初療で脳神経外科を受診することは稀である。医療の進歩がめまぐるしいのに関わらず、機能的予後はまだまだ満足な結果を得られておらず、治療困難なため回避されている感がある。また、多発外傷に対する治療の向上により致

死的であった患者が生存可能になり、腕神経叢損傷は、新たな臨床での問題点となってきている。逆に言えば、まだまだ治療においては議論の余地が残されており、神経外科医にとっては、興味深く、挑戦的な分野と考えられる。今回、腕神経叢損傷の治療と最近の傾向について述べる。

1. 疫学

交通事故、特にオートバイによる転倒により上肢、肩と頭頸部が各々違う方向に外力を受けた際に腕神経叢が引き伸ばされて生じる^{1,2)}。原因の特性上、若年で男性に多く認められ、多発外傷患者の約 1.2% という報告がある³⁾。他の原因として、ラグビー、自転車競技、スキー、そり、馬術、レスリング、最近ではスノーモービルによる損傷が増えてきている³⁻⁵⁾。また高率に頭部および胸部損傷を伴い、そのため初期治療において神経損傷を見逃す可能性が示唆されている³⁾。

2. 解剖 (図1)

1) 脊髄神経 (spinal nerve), 根 (root) (図2-a)

腕神経叢は、第5-8の頸神経と第1胸神経より成り立ち、脊髄神経 (spinal nerve), 神経幹 (trunk), 及び神経束 (cord) に分けられる。腕神経叢は前斜角筋 (anterior scalene) と中斜角筋 (middle scalene) の間を通過して、内上方から外下方に走り、鎖骨の下を通過して腋下に至り上肢に神経枝を出す。脊髄神経より臨床的に重要な神経が分枝している。肩甲背神経 (dorsal scapular nerve) は、第5頸神経の椎間孔近位部より分枝し、菱形筋 (rhomboid), 肩甲挙筋 (levator scapulae) を支配する。菱形筋は、肩甲骨の内縁を上内側に引く働きがある。長胸神経 (long thoracic nerve) は、第5, 6, 7頸神経が椎間孔を出てすぐに分枝し、前鋸筋 (anterior serratus) を支配する。前鋸筋は、肩甲骨を胸隔後部で正中から前方に引く働きがある。これらの筋が麻痺を起こすと、scapular wingingを引き起こす。逆に、これが認められれば、支配神経が脊髄神経の近位部より出ているので、神経根の障害、または引き抜き損傷の可能性を示唆する重要な所見となる。またこれら神経が機能していれば、下位の神経が機能し

なくても、椎間孔を出たレベルでの近位切断端は生きており、神経叢の再建に中枢端として用いることができる。

2) 神経幹 (trunks) (図2-a)

上神経幹 (upper trunk) は、第5, 6頸神経により形成され、中神経幹 (middle trunk) は、第7頸神経のままの延長であり、下神経幹 (lower trunk) は第8頸神経と第1胸神経が合して形成される。これら神経幹は、後頸三角 (posterior cervical trunk) に位置する。上肩甲神経 (suprascapular nerve) はちょうど鎖骨の下より上神経幹より分枝し、棘上 (supraspinatus), 棘下筋 (infraspinatus) を支配する。棘上筋は、肩の外転において最初の30度を担う。肩機能を評価する場合、三角筋 (deltoid) の機能との区別をしなければならない。三角筋は、水平位より30度以上上方の外転を担う。棘下筋は、肩と上肢の外旋を担う。

3) 神経束 (cords) (図2-b)

3つの神経束は、鎖骨のレベルでおのおの前後の2枝 (divisions) に分かれる。後枝3本は合して一本の後神経束 (posterior cord) となる。上神経幹と中神経幹の前枝は、

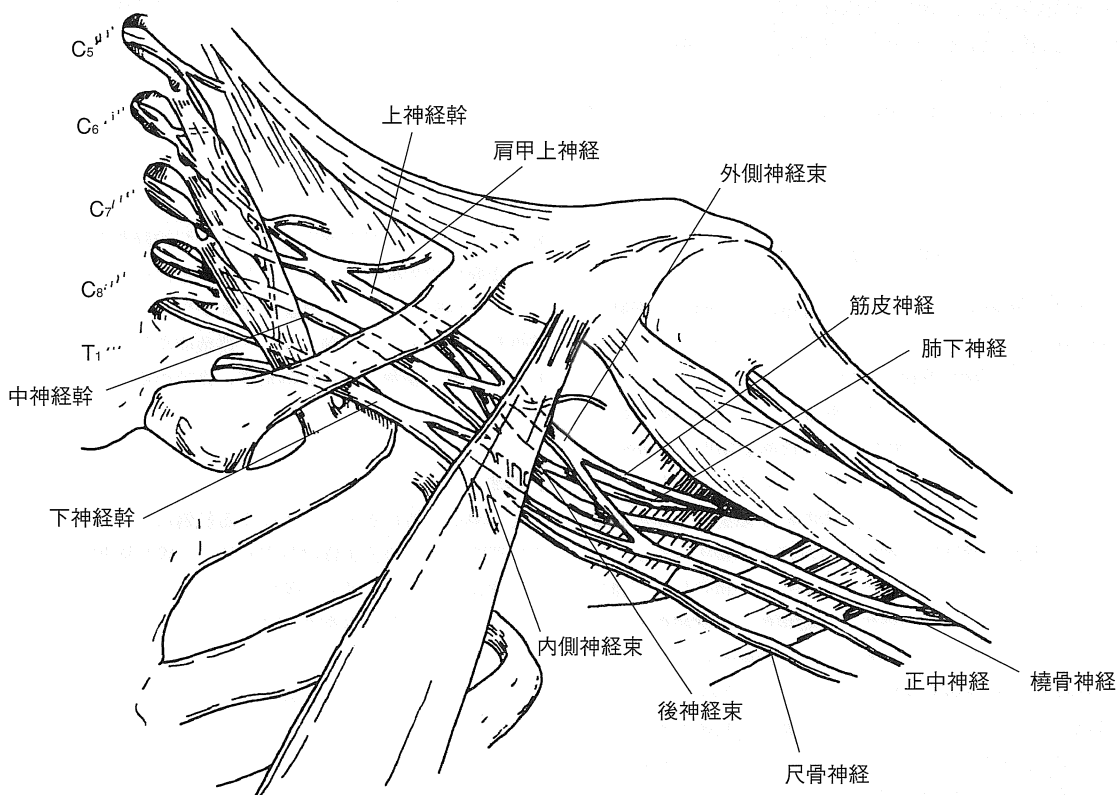


図1. 腕神経叢の解剖

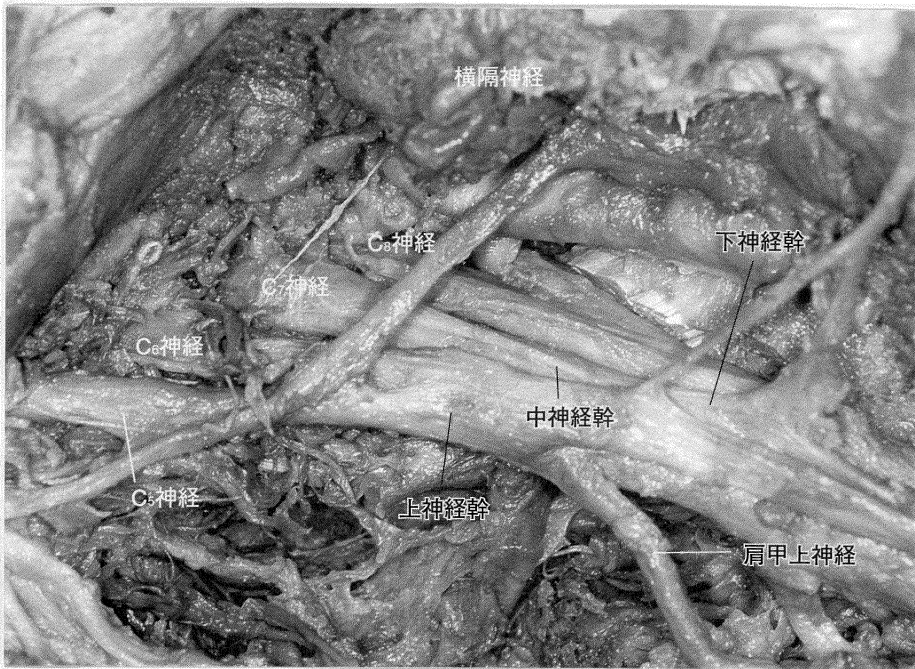


図 2-a. 脊髄神経根と神経幹

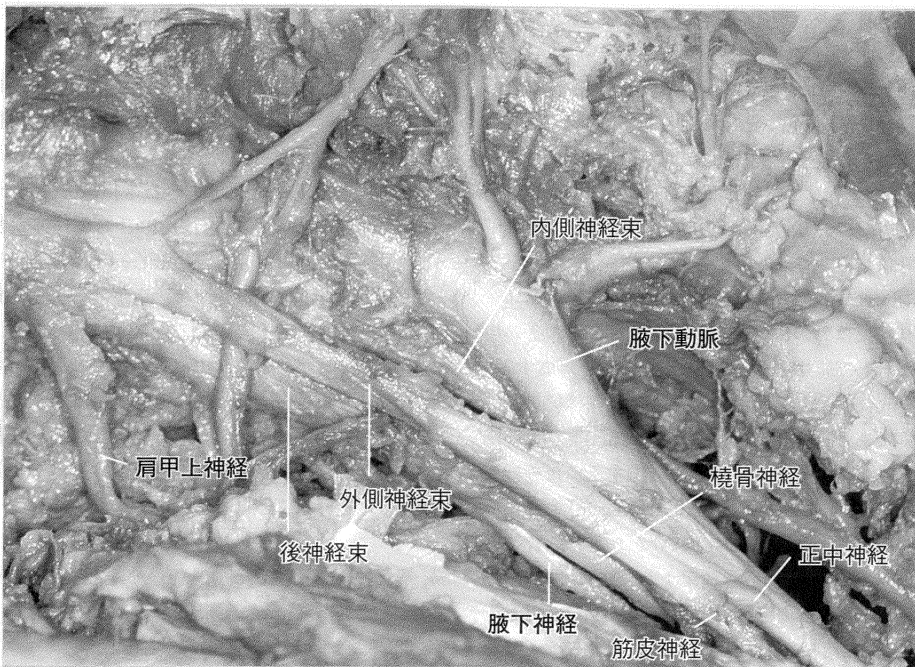


図 2-b. 神経束

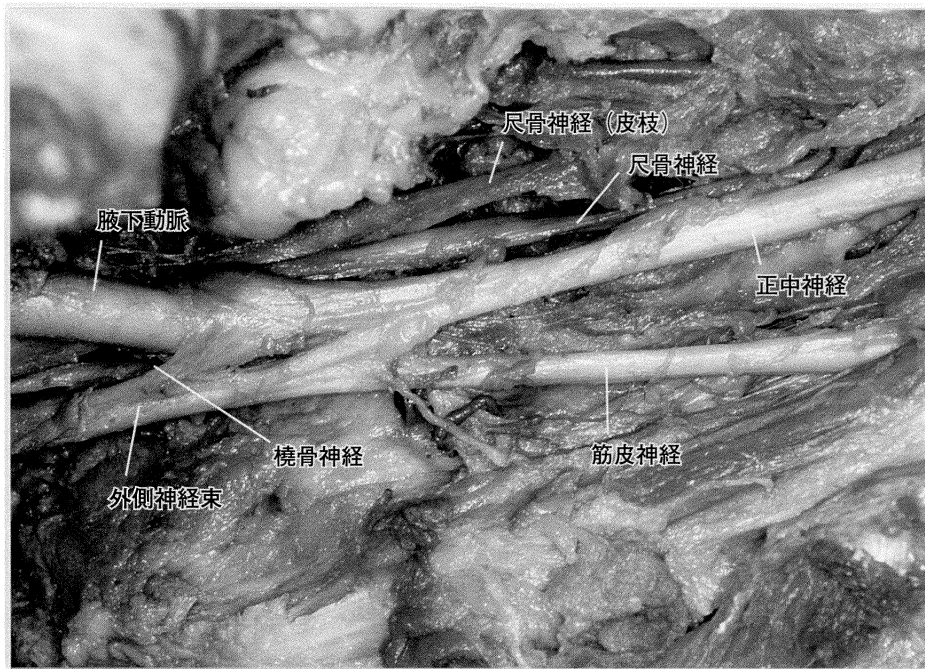


図2-c. 終末分枝
図2. 腕神経叢の解剖

合して外側神経束 (lateral cord) を形成し、下神経幹の前枝は内側神経束 (medial cord) にそのまま移行する。これら神経束の名前は、腋窩動脈 (axillary artery) に対する位置関係に基づく。これらは、小胸筋 (pectoris minor) の真下に位置しており、鎖骨より遠位の神経束は鎖骨下神経叢と呼ばれる。

4) 終末分枝 (terminal branches) (図2-c)

内外の神経束はおのおの分かれて2枝となる。その中央の2枝が合して正中神経 (median nerve) を形成する。筋皮神経 (musculo-cutaneous nerve) は、外側神経束の外側枝の続きであり、烏口腕筋 (coracobrachialis), 上腕筋 (brachialis), 上腕二頭筋 (biceps) を支配する。後神経束は、三角筋を支配する腋窩神経 (axillary nerve) と終末分枝である橈骨神経 (radial nerve) に分かれる。胸背神経 (thoracodorsal nerve) は後神経束より分枝し、肩の内転および伸展、上肢の内旋を行う広背筋 (latissimus dorsi) を支配する。この筋の収縮を見るには、患者に深く咳を促すことで評価できる。尺骨神経 (ulnar nerve) は内側神経束の内側枝の延長である。

3. 損傷の種類と分類

損傷には、ナイフ、ガラス片などによる刺創または銃創のような鋭的損傷と(図3-a)、腕神経叢損傷の大半を占める伸展損傷 (stretch injury) に分類できる(図3-b)。伸展損傷の病理は、引き抜き損傷 (root avulsion)、脊髄神経断裂 (nerve interruption) および連続性を保った神経腫 (neuroma in continuity) の3種類がある(図4)。これは、治療に際しての手術療法の決定に重要であるため、術前にはその病理の把握が肝心である。引き抜き損傷を伴った神経は、中枢端として利用できず、神経移植 (nerve grafting) による神経再生は期待できないので、神経移行術 (neurotization) が行われる。脊髄神経断裂および連続性を保った神経腫(図3-c)に対しては、神経移植を行うことになる。

4. 損傷のレベル (Level of injury)

- 鎖骨上損傷 (supraclavicular injury)
 - ◆ C5-C6 (C5-C6 to upper trunk)
 - ◆ C5-C6-C7(C5-C6 to upper trunk, C7 to middle trunk)
 - ◆ C5-T1(panplexopathy)
 - ◆ C8-T1(C8-T to lower trunk)

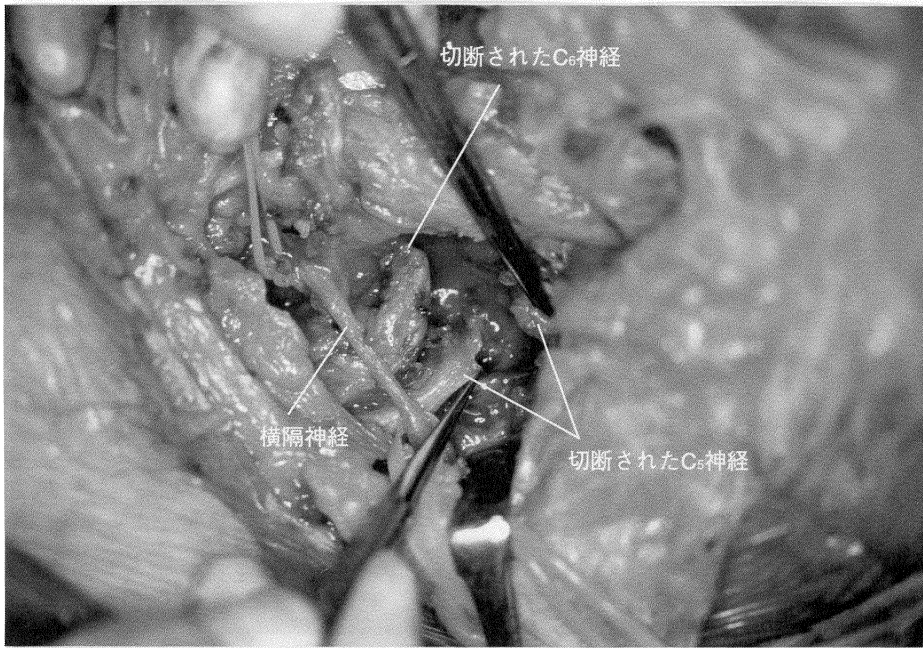


図 3-a. ナイフによる鋭的損傷



図 3-b. 引き抜かれた全神経根



図 3-c. 神経腫

図 3. 損傷の種類と分類

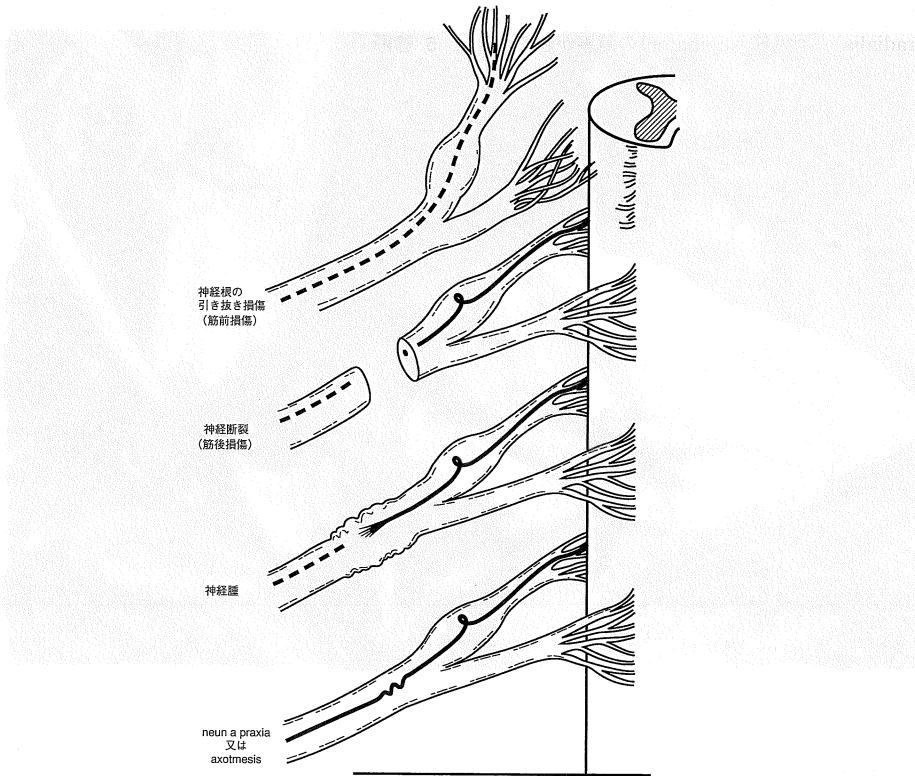


図 4. 伸展損傷における神経損傷の種類

- ◆ etc.
- 鎖骨下損傷 (infraclavicular injury)
 - ◆ posterior cord to axillary
 - ◆ posterior cord to radial
 - ◆ lateral cord to musculocutaneous
 - ◆ lateral cord to median
 - ◆ medial cord to ulnar
 - ◆ medial cord to median
 - ◆ etc

閉鎖性損傷のメカニズムの大部分は、伸展によるものであるため損傷した神経の組み合わせにある程度の傾向がある。これは、臨床上有用で、患者の予後にも関与する。鎖骨上損傷では、C5-C6型、C5-C6-C7型、C5-T1型がもっとも良く認められる組み合わせである。鎖骨下損傷では、posterior cordを含む組み合わせが多く、他は同頻度の組み合わせで生じる。

1) 鎖骨上損傷 (図5-a)

① C5-C6型

腕神経叢損傷全体の約20%を占める。棘上(supraspinatus)、棘下筋(infraspinatus)、三角筋(deltoid)、上腕二頭筋(biceps)、上腕筋(brachialis)、腕橈骨筋(brachioradialis)、回外筋(supinator)の障害が起こる。重症なことの多い腕神経叢損傷のなかではもっとも良好な予後をしめす群である。神経根の引き抜きを伴うことは比較的低い。3から6ヶ月で、約30%の患者が自然回復を示す。損傷部切除後の中枢側断端は、神経修復に用いることがほとんど可能であるので、神経移植術(nerve grafting)を行うことが多く、神経移行術(neurotization)行うことは少ない。前腕の屈曲(上腕二頭筋)の改善は、肩の外転よりも良好である。Useful recoveryは、85.7から87%である⁹⁻¹²⁾。

② C5-C6-C7型

腕神経叢損傷全体の約15から20%を占める。C5-C6型に上腕三頭筋(triceps)の肘関節の伸展障害が加わる。手指の伸展、屈曲障害は常に認められるとは限らない。自然回復はC5-C6型よりも低い。通常、一つの神経根は引き抜きがあるので、上腕および肩の機能改善はある程度制限される。神経移植が行われるが、二つ以上の神経根の引き抜きがあるときは、神経移行術で補わなければならない。予後は引き抜き損傷の有無によって左右される。前腕機能の回復は良好である。肘の伸展は、部分回復に留まる。Useful recoveryは、58から85.1%である⁹⁻¹²⁾。

③ C5 to T1型

もっとも多い損傷型であり、全体の40から50%を占める。悲惨な上肢の完全麻痺を呈し、自然回復はほとんど望めない。障害された神経根の約半分は引き抜きを伴っている。C5,C6の引き抜きは比較的少ないので神経移植で再建可能である。しかしながら、すべての神経幹および神経束の再建は不可能であり、全レベルで引き抜きのある場合は、神経移行術のみに頼らざるを得ない。機能回復は厳しい制限がある。三角筋、上腕二頭筋、上腕筋の部分的回復は40%、上腕三等筋の部分的回復は30%である¹³⁾。Useful recoveryは、34.9から43%である^{9-12;14-17)}。

2) 鎖骨下損傷 (図5-b)

このタイプの損傷は、鎖骨上損傷と比べて頻度は多くない。Cordsとcords to nerveの二つに分類され、cordsはlateral, medial, posteriorとさらに分けられる。通常、重度の損傷であり、他に肩または上腕骨の脱臼、骨折、血管損傷を伴っている。全体の20%前後である。腋下心神経(axillary nerve)の損傷との組み合わせが最も多く見られる。自然回復は極めてまれであり、多くの場合外科的修復を必要とする。神経遠位まで損傷は及んでいることがあり、その場合予後は良くない。Useful recoveryは、70%前後である。

5. 診断

腕神経叢損傷には、通常頭部外傷、血気胸を伴う肋骨骨折、鎖骨骨折、鎖骨下動静脈損傷、四肢の骨折、脊髄損傷、腹部損傷などの多発外傷を伴うため、多発外傷に注意を奪われて見逃さないことが重要である。高率に意識障害を合併するため、より注意を要する。上肢の麻痺、知覚脱失、鎖骨下動脈損傷(図6)による橈骨動脈の拍動の消失、Horner兆候、鎖骨上窩のTinel兆候の有無を観察する。鎖骨上(supraclavicular injury)、下損傷(infraclavicular injury)に分けられるが、鎖骨上損傷では、上位型(第5, 6, 7頸神経)、全型(第5頸神経から第一胸神経まで)麻痺がよく見られ、引き抜き損傷を伴っていることが多い。鎖骨下損傷では、腋下心神経損傷が多く、腋下心動脈損傷を伴うことがある。

6. 検査

神経修復には、損傷神経根が神経移植で中枢端として利用できるかどうか術式の決定で重要である。すなわち損傷神経根が引き抜かれているかを鑑別する必要がある。従来は、supraganglionic type(節前型)、infraganglionic type(節後型)に分類され、節前=引き抜き損傷と考えられてきた。しかし、intraforaminal intradural nerve rupture(椎間孔内硬膜内神経切断)の存在が示さ



巨大な神経腫となった
鎖骨上神経叢

図 5-a. 鎖骨上損傷

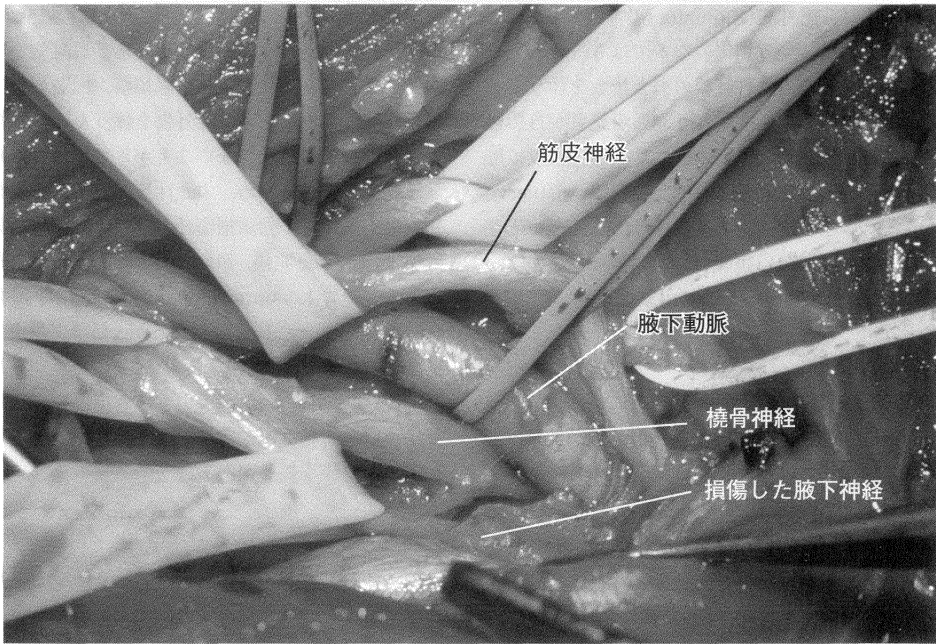


図 5-b. 損傷のレベル

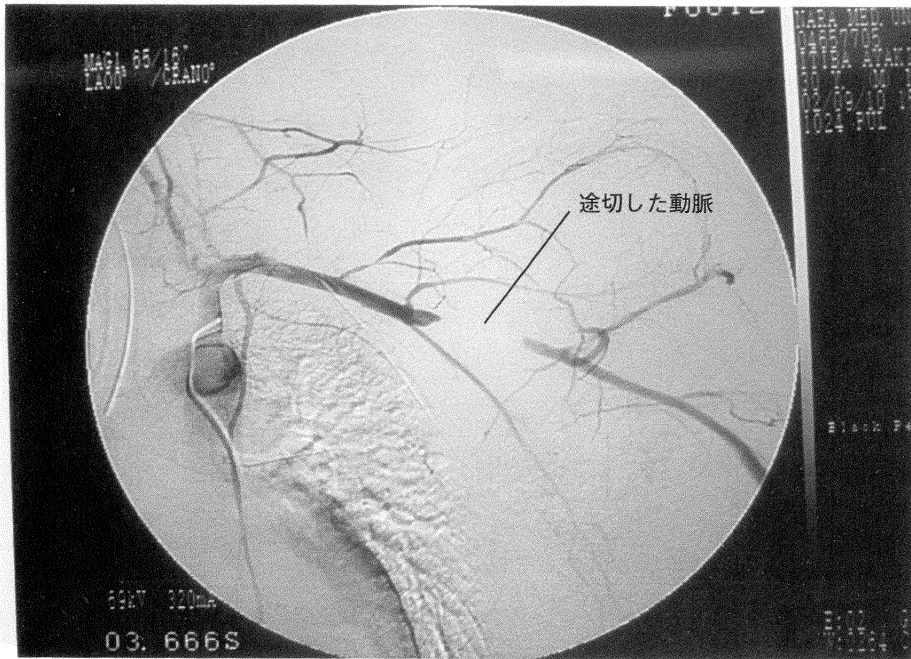


図6. 鎖骨下動脈造影

れ、これは神経移植術で修復可能なため、引き抜きと区別しなくてはならない。よって障害の型として、先述したように、引き抜き損傷(root avulsion), 神経断裂(nerve interruption), 神経腫(neuroma in continuity)に分類する。

1) 引き抜き損傷を疑う所見として次のものがある。

- ① 神経根より直接分枝する神経に支配される傍脊椎筋、菱形筋(肩甲背神経), 肩甲挙筋(肩甲背神経), 前鋸筋(長胸神経), 横隔膜(横隔神経)の麻痺(図7)および筋電図による脱神経の証明
- ② Horner 兆候(第8頸神経, 第一胸神経根の引き抜き)(図8)
- ③ 頸椎 X-P による横突起, 椎体の骨折の存在
- ④ 頸部脊髓造影(図9-a), 造影後 CT(図9-b), MRI による偽性髄膜瘤の存在(図9-c)
- ⑤ 知覚完全脱失と知覚神経誘発電位の導出

以上はすべて間接的所見であるが, 複数認められれば, 総合的に考えて引き抜き損傷があると診断する。

2) root avulsion の診断

上記の所見は引き抜き損傷を疑う間接的所見である。現時点での, 治療の最大の目的は, 運動機能の再建であ

る。頸部脊髓造影, MRI による偽性髄膜瘤の存在だけでなく前根, 後根の良好な描写があるのが望ましい。従来から前根, 後根は個々に引き抜かれることはないと考えられていた。しかしながら Carvalho らによると, partial root avulsion は 11% に存在し, 脊髓造影後 CT を行うことによって 85% の正確な診断ができたと報告している¹⁰⁾。健全に前根が保たれていることは, 神経移植が可能であることを示し, 治療を決定するうえで重要な所見となる。また MRI は, 目覚しい進歩を遂げているが, まだ脊髓造影後 CT ほど, 前根, 後根の状態の把握は正確にできないとしている。

Dubuisson らの報告によると, 実際に, 術中に 1 または 2 本の神経根の引き抜きを認めるのは 49% である。C5 神経根が引き抜きとなるのは 6%, C6 神経根は 21%, C7 神経根は 32%, C8 神経根は 21%, T1 神経根は 18% であった¹⁰⁾。4 本の神経根またはすべての神経根が引く抜きとなっているのは 6% であり, Alnot らの 24%¹⁹⁾, Narakas らの 30%²⁰⁾ と比して低頻度である。これによると C5 神経根は神経修復において中枢神経断端としてかなりの高率で利用できることが示されており, 神経移植術が第一選択の手術となりうることを示唆している。

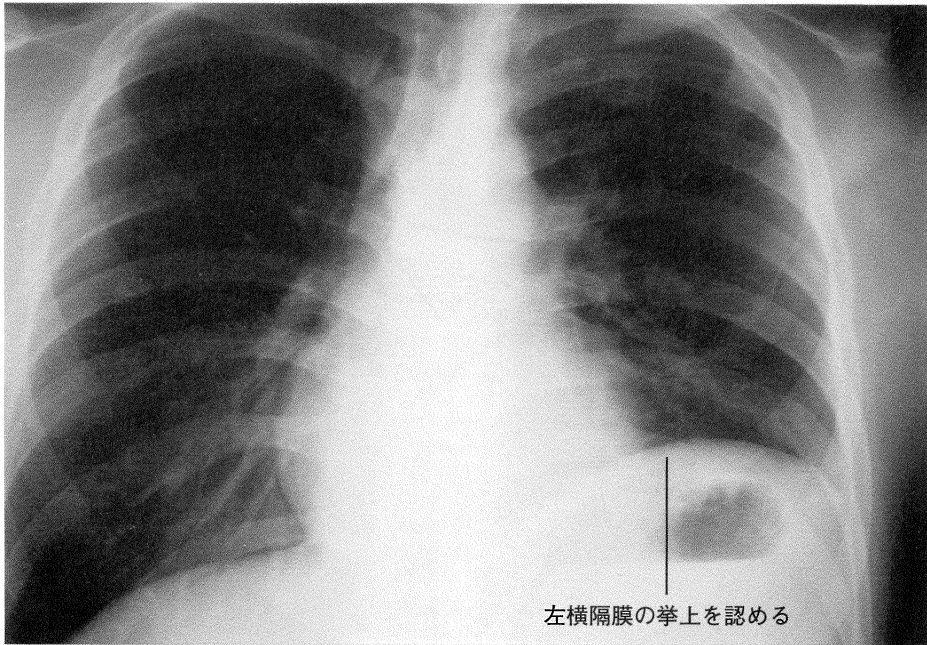


図7. 胸部X-P

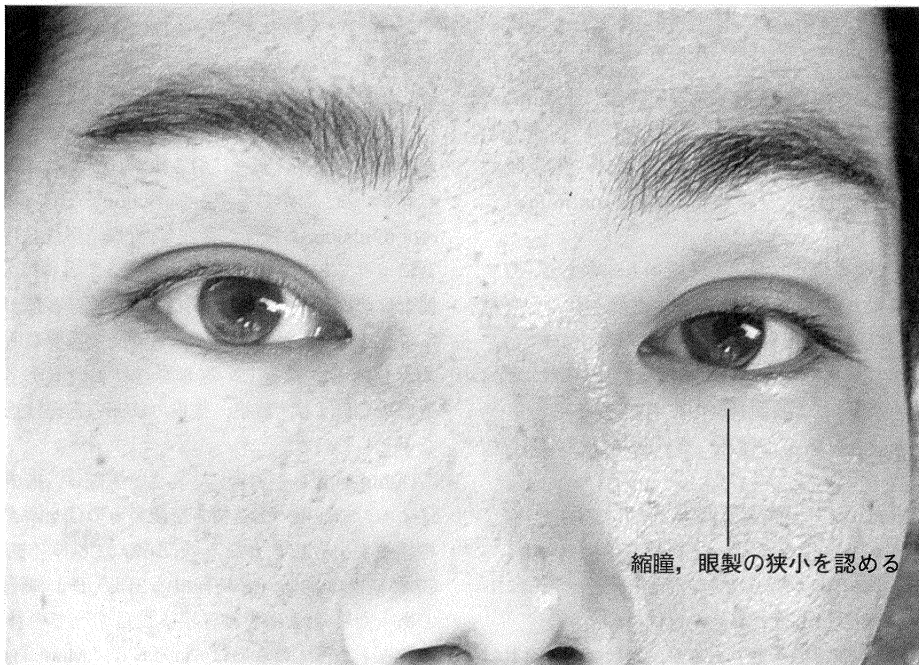


図8. Horner 兆候

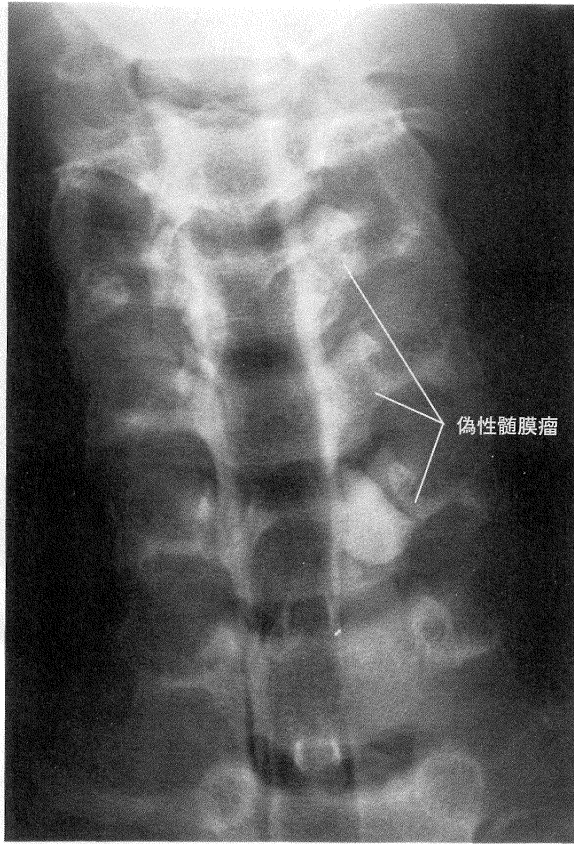


図9-a. 頸部脊椎造影

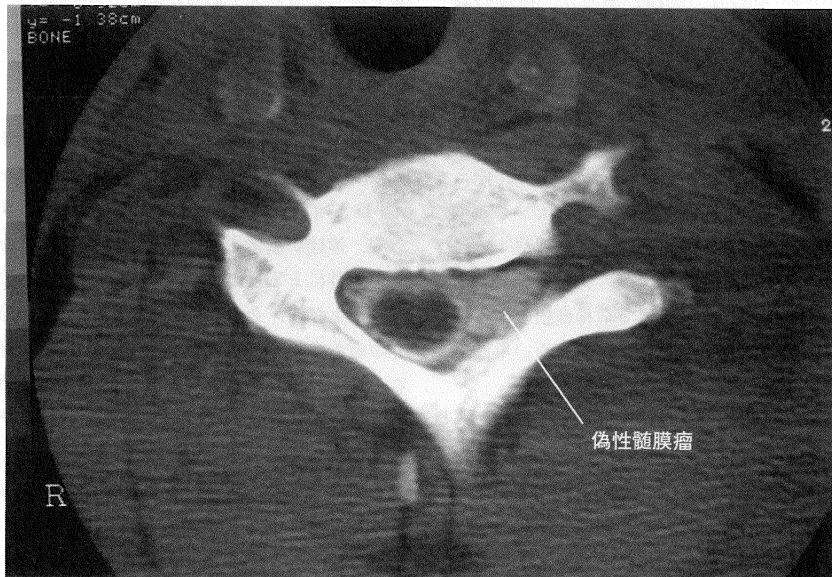


図9-b. 脊椎造影後CT

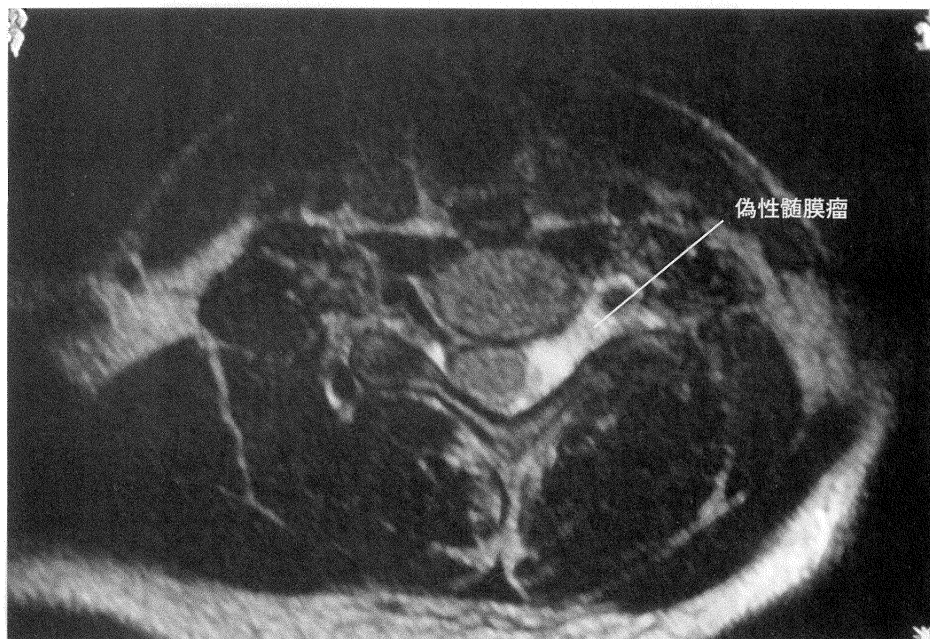


図9-c. MRI

7. 治療計画 (図10)

刺創などの鋭的開放性損傷では、通常血管損傷を伴っているため、その修復後に神経欠損がなく、断面が健常であり清潔ならば、引き続いて一次的修復(神経上膜縫合 epineurial suture)を行う。欠損があるか、損傷の範囲がはっきりと断定できないときは、待機的に神経移植術をおこなう。

閉鎖性損傷の場合、ほとんどstretch injuryであり損傷部位の広がりや受傷早期には確定できないため、かつ自然回復の可能性もあるため経過を見る必要がある。ゆえに、3ヶ月間は保存的に加療し、神経学的チェックと電気生理学的検査を繰り返し行い回復の程度を観察する。有効な臨床的、電気生理学的機能回復の兆候の見られないときは手術療法を行う。なお全型で全神経根の引き抜きが明らかなものでは、筋萎縮の進行が進まない早期に手術を行うのが好ましい。

8. 手術における運動機能再建の優先順位

上肢の有用な機能の観点からみれば、再建において優先順序(priority)が決まってくる。腕の屈曲が一番重要であることから、筋皮神経の機能回復がもっとも優先される。ついで肩の機能として、棘上、三角筋が重要であることより、肩甲上神経、腋下水神経が次ぎの優先となる。

ついで手関節の伸展(橈骨神経)、指の屈曲(正中神経)の神経再建が目標となる。反して、尺骨神経は、内在筋の回復はほとんど期待できないので再建の優先順序は最後になる。なお感覚の有無が日常生活において、上肢の保護する上で不可欠であるため、正中神経の感覚再建を重要視する向きもある²¹⁾。

9. 手術

手術には、神経剥離術(neurolysis)、神経修復術(nerve repair)があり、後者には、神経移植(nerve grafting)(図11-a)と神経移行術(neurotization)(図11-b)がある。神経が損傷を受けると、それに伴う血液もしくは浸出液等による反応性の炎症のため、周囲の結合組織と癒着が生じる。それにより神経伝達機能が障害される。その癒着を神経から剥離除去するのが、神経剥離術である。通常、不完全麻痺に対しておよび神経修復術の前段階として行われる。神経移植術は、神経グラフトを用いて損傷部位を除去した後の神経欠損(nerve gap)を修復する術式である。神経移行術は、引き抜き損傷のため中枢断端が用いることができないとき、そのため中枢側の神経(lead-out)として、肋間神経(intercostal nerve)²²⁾、副神経(accessory nerve)²³⁾、横隔神経(phrenic nerve)²⁴⁾、対側の第7神経根(contralateral C7 root)²⁵⁾、第3、4頸

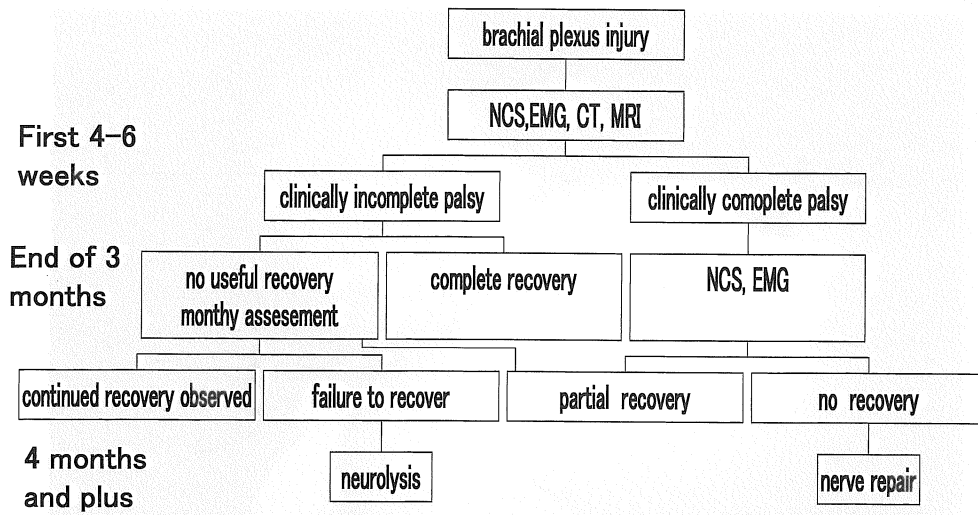


図 10. v 腕神経叢損傷の治療のアルゴリズム

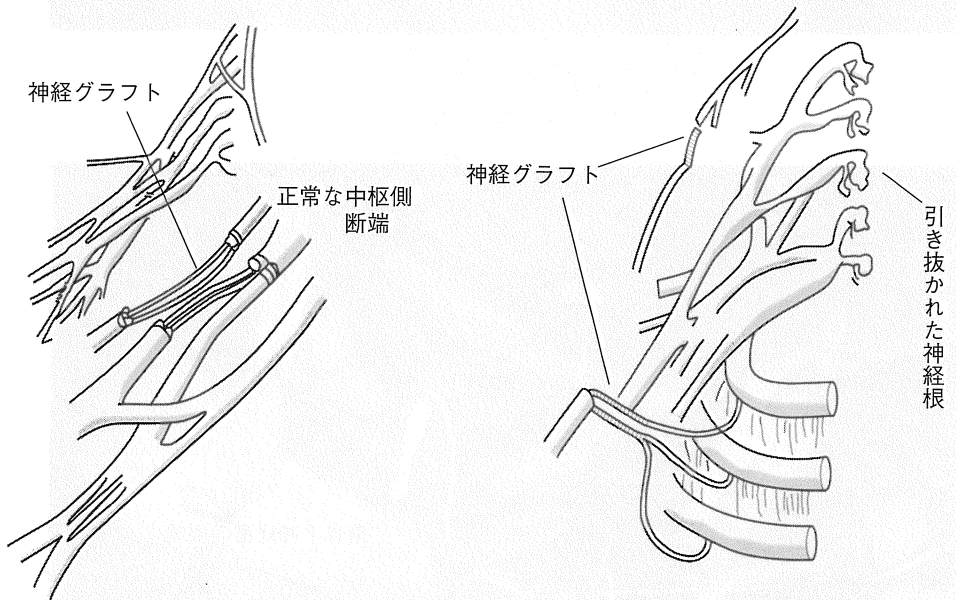


図 11-a. 神経移植術

図 11-b. 神経移行術

神経²⁶⁾、尺骨神経の一部を用いる神経移行術²⁷⁾が行われる。多く行われているのは、肋間神経-筋皮神経、尺骨神経の一部-筋皮神経(Oberlin's method)、副神経-肩甲上神経神経移行術である。副神経を用いたときが一番機能再建の成績がよく、副神経-肩甲上神経神経移行術

は他に比して良好である²⁸⁻³⁰⁾。とくにこの手術法では lead-out として用いられた神経の機能は損失することとなる。

アプローチとして鎖骨上展開と鎖骨下展開に分けられる。(図 12 - a,b)



図 12-a. 体位と皮切

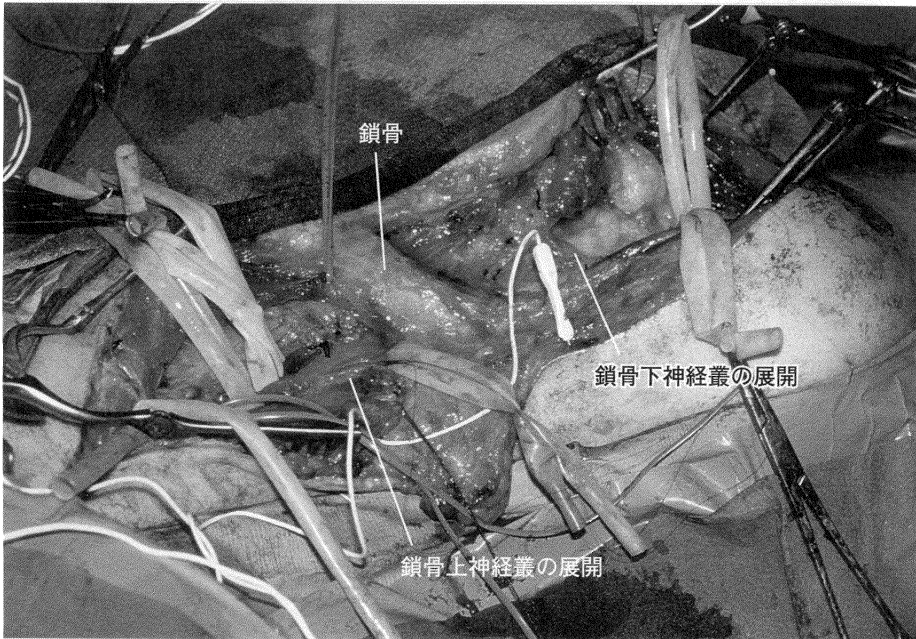


図 12-b. 術野全体像

図 12. 手術アプローチ

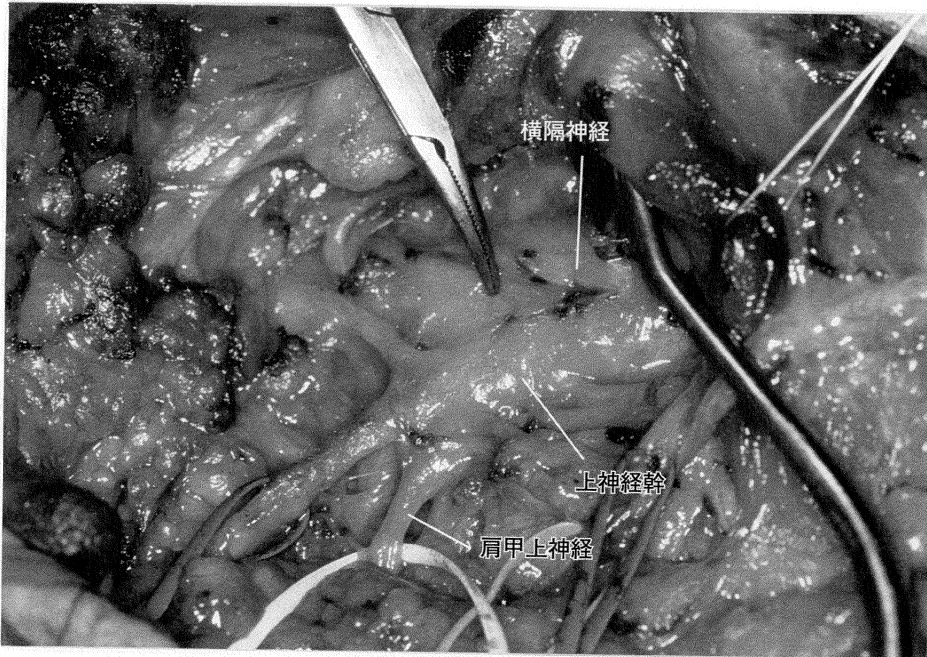


図 12-c. 鎖骨上展開

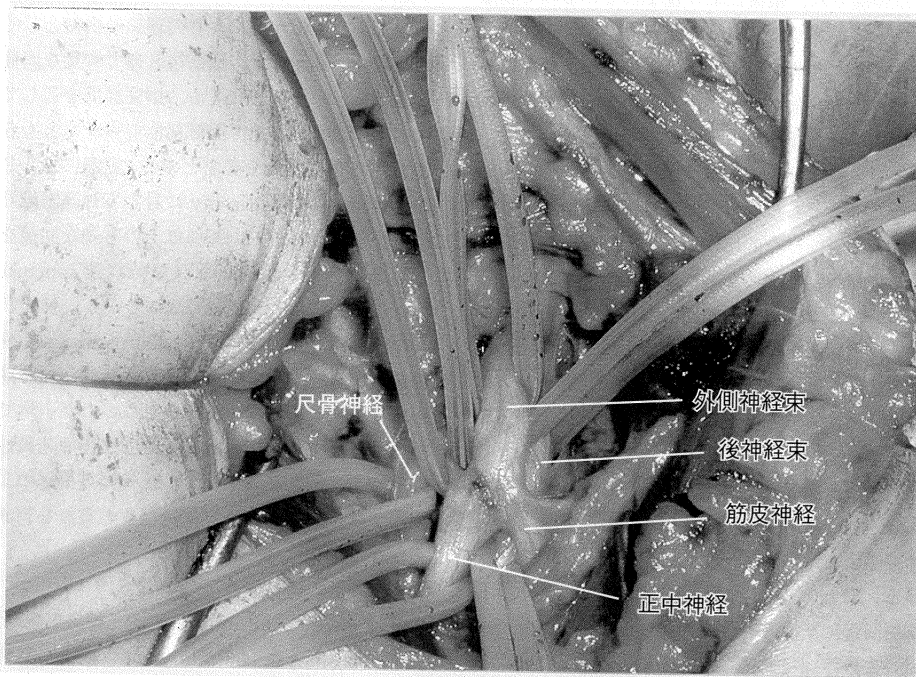


図 12-d. 鎖骨下展開

図 12. 手術アプローチ

1) 鎖骨上神経叢の展開(図12-c)

鎖骨上アプローチは、脊髄神経、神経幹および肩甲上神経、肩甲背神経、長胸神経などの腕神経叢の鎖骨上分枝の展開に用いる。後頸三角を胸鎖乳突筋の後縁から、第5-7頸椎横突起に向かって剥離していく。副神経、小後頭神経さらに上方から、下行頸神経叢(descending cervical plexus)を同定し、神経移行術のlead-outとして損傷しないように確保しておく。神経根の同定には横隔神経がよいlandmarkである。前斜角筋上で、横隔神経を上方、外側に追って行くと、第5頸神経、および上神経幹に至ることができる。第8頸神経は第7、第一胸神経より太く、やや斜めに走行している。第1胸神経の近くの操作では、胸管、星状神経節、椎骨動脈があり注意を払う。

2) 鎖骨下神経叢の展開(図12-d)

鎖骨下アプローチにて神経束、腕神経叢の終末分枝を露出する。丁寧に皮下および三角筋大胸筋溝を剥離すると、小胸筋が見えてくる。その筋膜を切開し、脂肪の中を剥離していくと、最初に確認することができる構造物が外側神経束である。神経を剥離する前に、鎖骨下、腋動脈を触知し、位置関係を覚えておく。これらの血管はしばしば伸展され、瘢痕により包まれているので剥離操作で損傷する可能性があるため注意する。鎖骨下神経叢の展開は、非常に時間がかかり、大変は忍耐を要する。なぜならば、癒着が強いことと腋動脈を損傷の危惧を持って周辺性に剥離しなければいけないからである。特に後神経束と終末分枝の剥離は困難である。鎖骨上から下のアプローチをどちらから行うかは、瘢痕組織の状態によって決定する。一般的には、鎖骨上神経叢の展開の方が容易であり、十分に脊髄神経をそれぞれ椎間孔のレベルにおいてまで瘢痕より剥離しなければならない。鎖骨上窩に巨大は瘢痕神経腫があるならば、鎖骨下神経叢よりの剥離から始めるべきであり、瘢痕に巻き込まれて神経の同定には電気刺激を用いることが有用である。

10. 術中神経活動電位測定(Nerve action potential recordings: NAP recordings)(図13-a,b)

重症の神経損傷とはいえ、大部分(60-70%)は連続性を保っている。緊急の神経修復の必要性がないとされた損傷で、自然回復に期待して保存的療法を行って数ヶ月経っても十分な機能回復が得られないことがある。その際手術を考慮するが、病変部を切除するかどうかの判断は大変難しい。手術時における肉眼的所見と触診だけの診断では誤りが生じる。単純の電気刺激でも比較的早期に再支配された筋では収縮を生じるが、大きな神経の重度

の損傷において数ヶ月間はこのような反応を期待できない。もともと再生の可能性のない損傷部位は、再生した軸索が筋に到達するのは数百のみである。一方、適切に再生した神経では損傷後に遠位断端に数千の軸索が再生し到達するのである。Lesions in continuity(神経腫)をそのまま放置しておけば、筋組織の変性を進めるだけである。その後期待した回復がないといって神経修復を行っても時期を逸しているのである。逆に早期に切除して自然再生の可能性のある損傷部を切除するのは避けなければならない。そこで神経再生が末梢断端側にまで充分に行われるかどうか、行われなければ切除すべきかどうかを評価する一番良い方法が、術中に損傷部位をほとんど神経を刺激し記録することである。これは神経活動電位測定(Nerve action potential recordings: NAP recording)と呼ばれる。このNAPの有無によりLesions in continuityに対して手術方針を決定するのである。NAPが記録されるならば、その病変部は神経剥離(external neurolysis)のみで切除はしない。そのままでも神経再生が充分おこり、機能回復が期待できるからである。神経剥離とは、神経上膜の周囲で近傍の組織と神経との癒着を省くことである。損傷後2カ月から3ヶ月でNAPが認められないときは、その病変は切除して神経移植か神経移行術を行なう。NAPの理論的根拠としては、術中の刺激による記録で、損傷後8週で有意な回復の情報を得られるということである。損傷部位を通してNAPを検出できるためには、記録部位で少なくとも5-6mmの径の4000本の再生軸索を必要とする。実際にNAPが認められたLesions in continuityに対して神経剥離だけで治療した臨床例において、90%以上の有効な回復を示している。またNAPが検出されない病変とneurotmetic lesionsとの有意な相関も示されている。NAPが測定されなければ、自然回復のないneurotmesisの病変であり神経修復を要するのである。NAP測定の時期であるが、あまり早期であれば、検出されないのが当然である。骨折や銃創のような比較的局所的な挫傷や連続性のある裂傷では受傷後2から4ヶ月、腕神経叢損傷のような伸展損傷では4から5ヶ月で神経再生の有無を判断できるようになる^{31,32}。

11. Lesions in continuityの組織と神経再生(図14)

通常Lesions in continuityでは、神経は急性に腫脹しており、血漿または血液の成分の滲出、ミエリンの覆いをなくした軸索の壊死、そして結合組織の破綻を伴っている。ワラー変性がおこると、軸索やミエリンの破壊産物は損傷部位および遠位神経から、マクロファージお

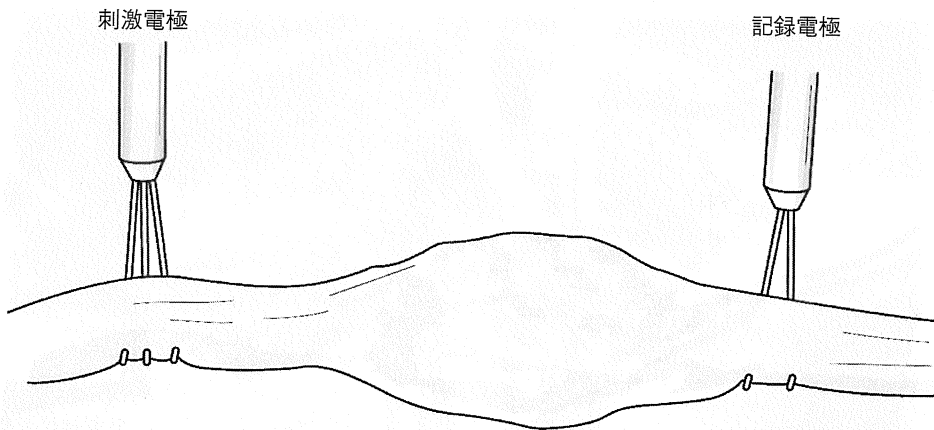


図 13-a. 術中神経活動電位測定

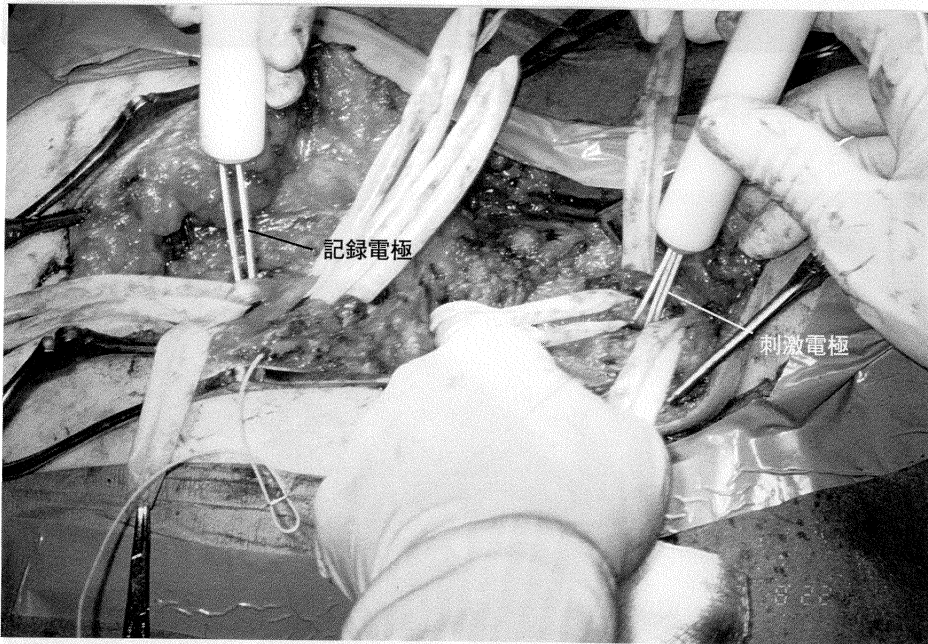


図 13-b. 術中神経活動電位測定

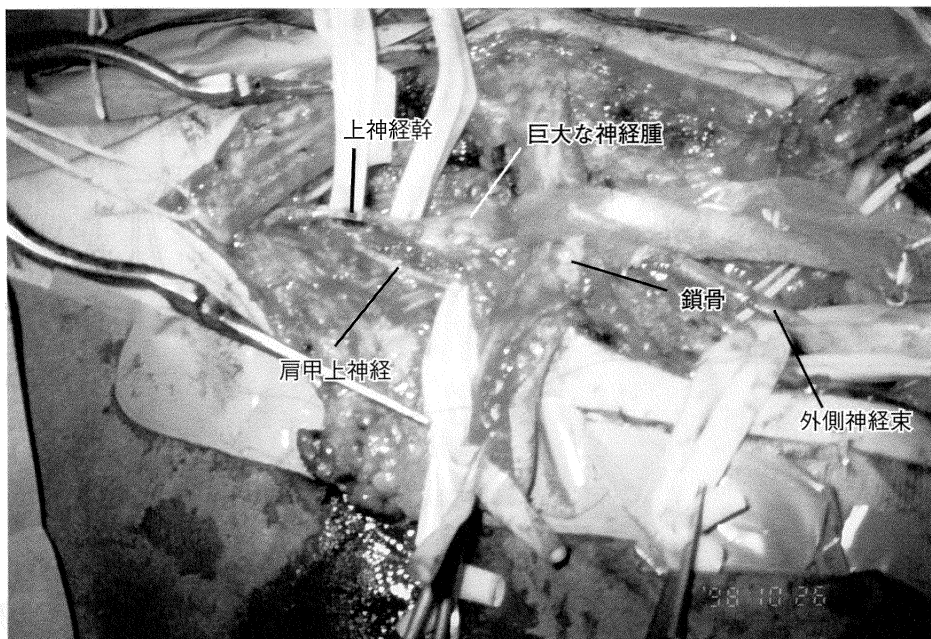


図 14. Lesions in continuity

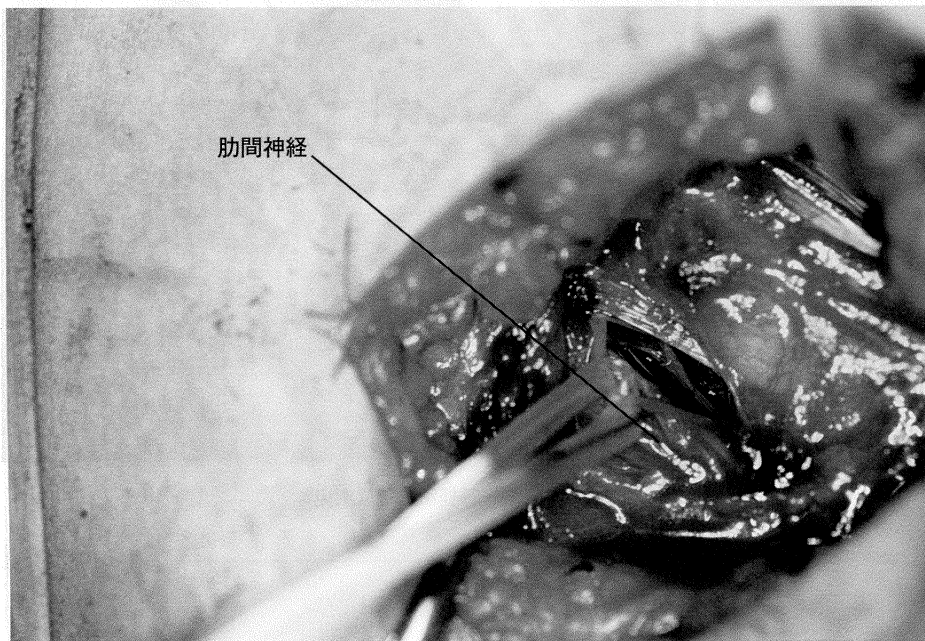


図 14-14c. 神経移行術に用いられる神経

図 14-14. 中枢断端としての神経の選択

よび単球細胞により貪食される。シュワン細胞、基底膜および遠位の結合組織は残存し、新しい軸策成長のための準備状態にはいる。しかしながら、損傷部位の神経周膜や神経内膜は迅速に増殖し無構築なコラーゲンを敷き詰めるようになり、組織化され適切に方向に向けて再生している軸策を邪魔するようになる。多くの神経損傷では、損傷部位より近位に向かってある程度のダメージがあるため、再生して軸策の集団はまず、この欠損部を補わなくてはならず、それから組織化されていないコラーゲンによって無構築となった損傷部位を試行錯誤で乗り越えていかなければならない。そのため、軸策は幾度も分枝することを強要される。人体においては、数百回の分枝がおこる。損傷部位では結合組織の中に埋もれていってしまう軸策もある。遠位断端に達した軸策は薄く、ほとんど有髄化されておらず、axonotmetic injury によっては、以前の標的器官に到達はしにくい。それゆえ、ほとんどの Lesions in continuity は有効な機能回復をもたらすような良好な再生を期待できない。結合組織の無構築化がひどいときは、再生した軸策は、数千と損傷部位を貫いていくが、径は小さく不適当な方向に進んでいる。それに比して、結合組織の損傷軽度で、周膜組織だけでなく神経内膜の通路が比較的適切に保たれているとき、軸策は良好に再生し、再生ユニットは最小の分枝を行うだけで標的器官に到達し、以前支配していた部位に近傍に落ち着き、十分な径をもち有髄化されている。このタイプの自然再生では有効な機能回復が得られる。

Lesions in continuity が自然に良好な機能を回復するかどうかを予測するのは困難であり、かつ短期間での評価は不可能である。それゆえに、手術治療に入る前には、臨床的に経過を追って十分に観察し、数ヶ月の期間をもって再評価をしなければならない。

12. Lesions in continuity の治療

損傷部位より遠位の機能損失が不全 (incomplete) か完全 (complete) かによって治療法が異なる。機能損失が不全の時、ほとんどの場合保存的療法で改善するので、臨床的および筋電図検査によるフォローアップを行う。手術になる場合としては以下の例である。血腫、動脈瘤、動静脈奇形による増大する病変を伴うときには、通常緊急手術を行う。絞扼の引き起こされる可能性のある部位の近くまたはその部位に病巣があるとき、比較的早期に手術を行う。遠位の機能損失が部分的であるが重要な機能を持つ場合または投薬や理学的療法では緩和しない疼痛に対して、晩期に手術を行うことがある。機能損失が完全の時、Lesions in continuity の広がりによって多少

の治療の違いがある。骨折または銃創のような局所的病変のときは、臨床観察と筋電図の検査を行い2から3ヶ月間フォローアップする。改善が認められないときは、exploration を行う。伸展または挫滅による比較的広範囲の病変のときは、臨床観察と筋電図の検査を行いながら4から5ヶ月フォローアップする。臨床的および筋電図検査での改善が認められないときは、exploration を行う。術中は、神経活動電位測定 (Nerve action potential: NAP) を行う。電気刺激に対して遠位の反応がないか、病変部を挟んでの NAP が認められない場合は、切除し神経縫合か神経グラフトを用いた修復術を施行する。

13. 中枢断端としての神経の選択

一番大切なことは、どの脊椎神経根が引き抜かれて、どれが機能を保っているか、どの中枢断端が神経移植に用いることができるかを決定することである。引き抜かれた神経根や損傷された中枢断端は lead-out として使えない。第5神経根は伸展損傷でもっとも障害されやすいが、引き抜きがないならば中枢断端としては、ほとんど利用可能である(図 15-a)。反対に、第7神経根、下位神経根は引き抜かれていることが多い。引き抜かれた神経根が1, 2本の時は、神経移行術よりは、神経移植術が可能なが多い。移植神経を用いて遠位神経と中枢断端を縫合する。再建される神経としては、肩甲上神経、後、外側神経束、腋神経、筋皮神経である。勿論引き抜かれていなくても、中枢断端の組織が正常でないならば、神経移植は行えない。神経根がすべて引き抜かれている時は、神経移植として中枢断端はどれも利用できない。このようなときは、神経移行術が、唯一の機能再建の方法である。神経移行術に用いられる神経は、下行頸神経叢、第3, 4頸神経、副神経(図 15-b)、肋間神経(図 15-c)、対側第7頸神経、尺骨神経の一部分、横隔神経、または舌下神経等がある。

14. 神経移植術 (nerve grafting) (図 16)

損傷された部位を切除した後は、nerve gap が生じ、直接の神経縫合は通常不可能である。神経移植により再建しなければならない。術者は、損傷された部位や神経腫を切り取り評価して、神経の中枢および遠位断端を縫合に適するように整えなくてはならない。手技としては、神経上膜を縦に割り、すこし切り取って顕微鏡下で神経束を剥離する。欠損を埋めるにおいて緊張がかからない程度の十分な長さ(欠損の10%の余裕)の神経グラフトを用いる。腓腹神経 (sural nerve) が良く用いられる。神経グラフトを採取して、欠損部の長さを考慮して、分割

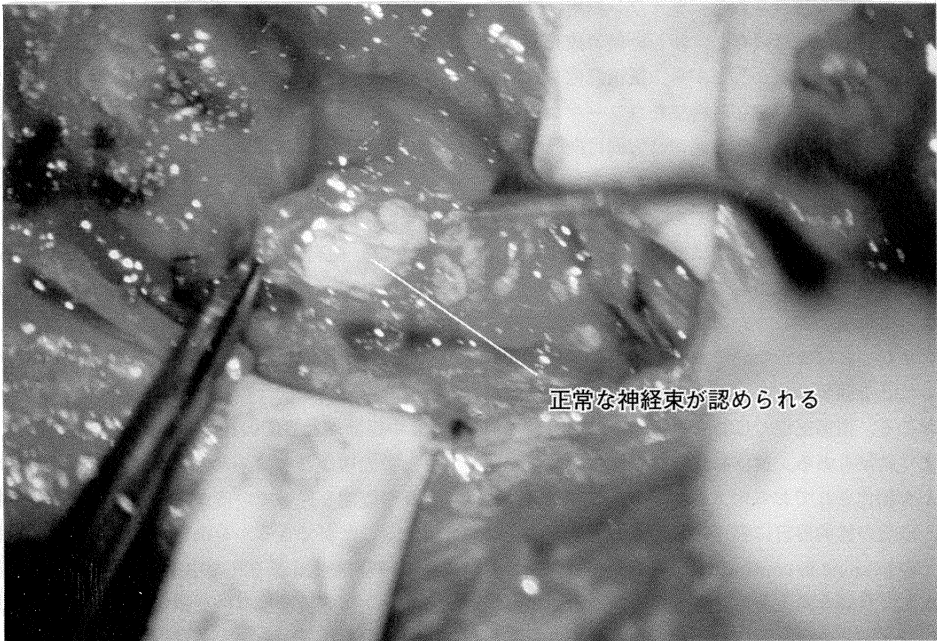


図 15-a. 中枢段端の評価

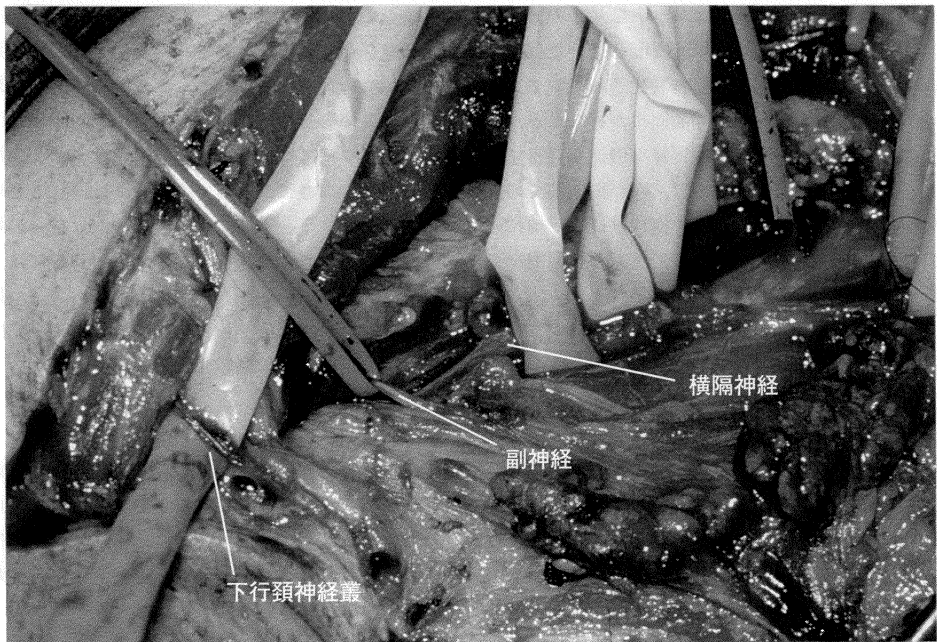


図 15-b. 神経移行術に用いられる神経



図 16-a. 神経腫切除前



図 16-b. 神経腫切除後

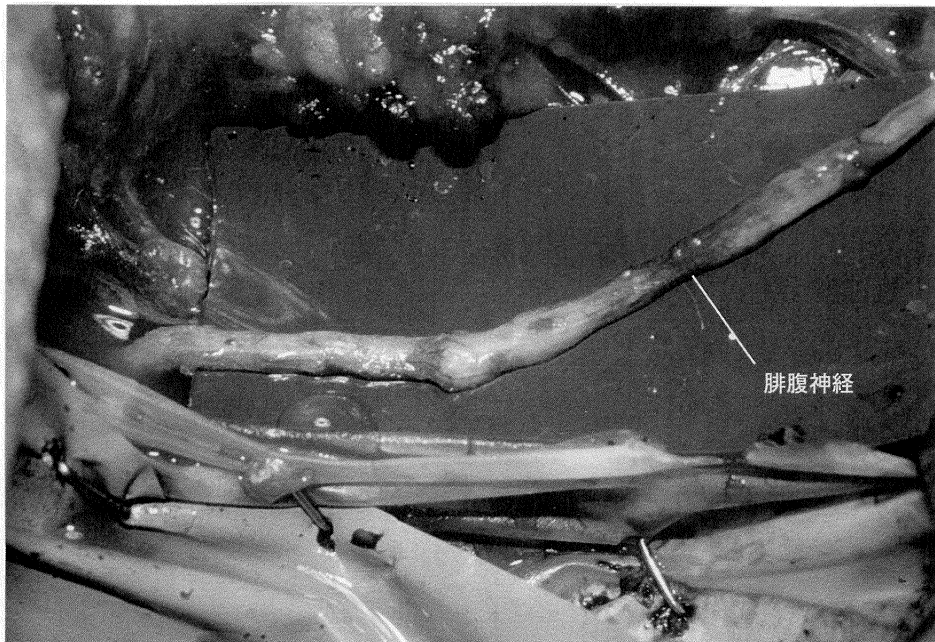


図 16-c. 神経移植後

図 16. 腓腹神経を用いた神経移植術

し乾燥しないように保存しておく。グラフトは8-0から9-0のナイロン糸で縫合する。糸はグラフトの神経上膜と断端の剥離された神経束の神経周膜を通すようにする。通常、おのおののグラフトに対して2,3針の縫合でよい。

15. 神経グラフトの採取

donor nerve は、採取しても大きな支障をきたさない知覚神経を用いる。腓腹神経が末梢神経移植においてもっとも多く利用される。(図17-a)これは、下腿側面と後方1/3, 足, かかとの側面の皮膚感覚を支配する。この神経は比較的簡単に、患者より仰臥位で取ることができる。採取する側の下肢を、臀部、膝部で屈曲させ、足首は背屈させる。足首の外側から膝窩にいたる縦皮肉切開を行えば、損傷することなく、多くの神経グラフトを得ることができる。通常30から50cmの長さを得られる。(図17-b)採取後の合併症として、神経腫、感覚異常が認められることがあるが、耐えられる程度のことが多い。他に、内側前腕皮神経、大耳介神経などが神経グラフトとして用いられる。

16. 神経移行術 (neurotization)

伸展損傷による腕神経叢の完全な神経根の引き抜きに対

しては、機能回復が期待できるのは神経移行術によるのみである。損傷部位の近くの donor nerve を剥離し、支配筋より切除する(図18-a)。この中枢断端は、再建すべき神経に直接または神経グラフトを用いて縫合される。(図18-b)神経移行術に用いられる神経は、副神経、下行頸神経叢、肋間神経、横隔神経、および反対側第7頸神経である。しかし神経移行術にもいくつかの問題点がある。Donor nerve と recipient nerve に含まれる神経線維の数の不均等の問題がある。Donor nerve の神経線維の数が少ないときは神経再生が十分に行われない。また、通常 donor neuron は従来の機能を含めて二重支配となることから、手のコントロールなどの大変複雑な機能には適応しにくい点がある。例えば、肋間神経—筋皮神経移行術を行えば、呼吸機能と上腕の機能を持つことになる。術後しばらくは、呼吸とともに上腕が動くようになる。その後、bio-feedbackを用いた訓練を行い、呼吸を分離して屈曲ができるようになる。しかしながら、より細かい動きを要する手のような機能改善には限界がある。

17. 手術成績に影響を与える術前または術中の因子

神経移植術および神経移行術の手術成績に影響を与え



図 17-a. 腓腹神経の採取

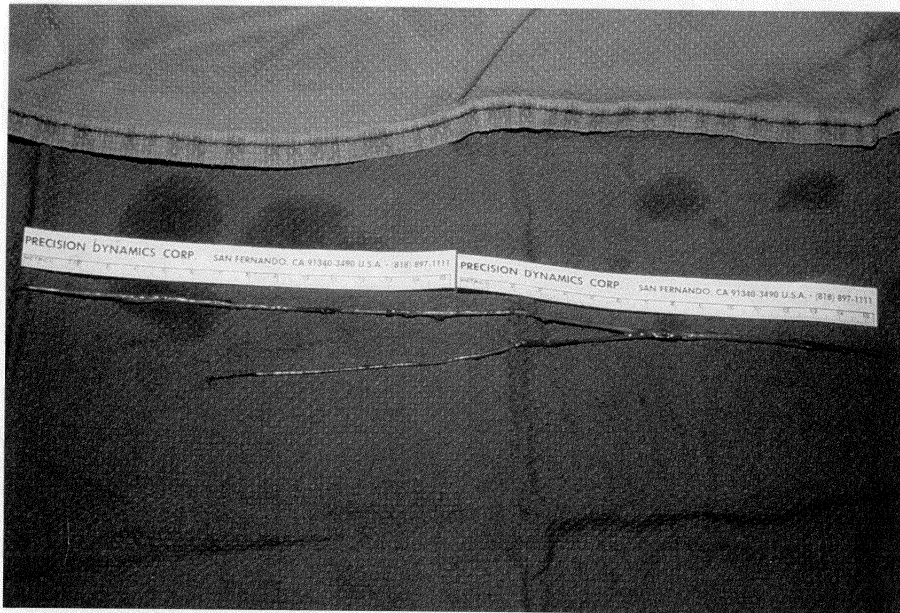


図 17-b. 採取した腓腹神経

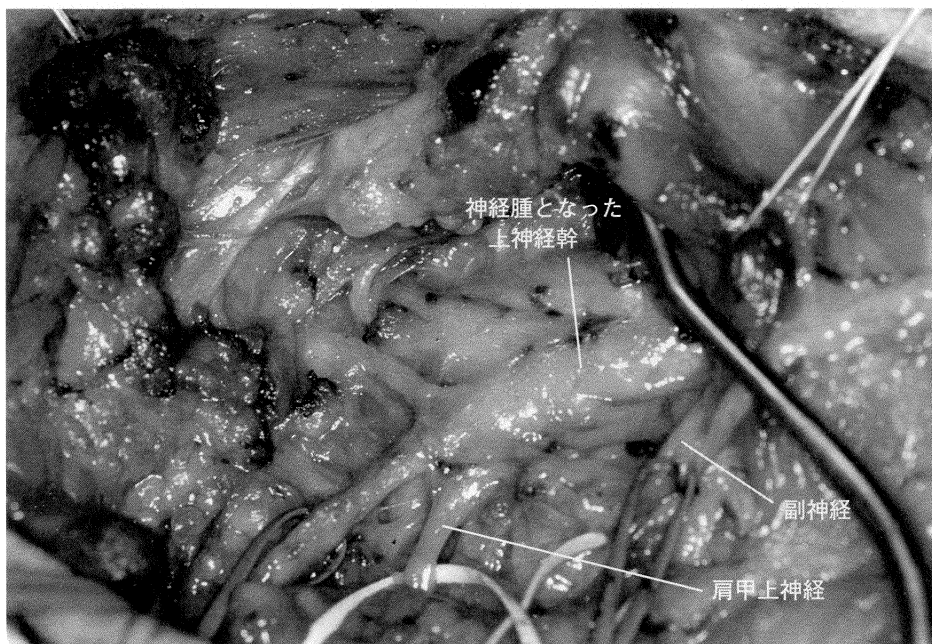


図 18-a. 移行術前

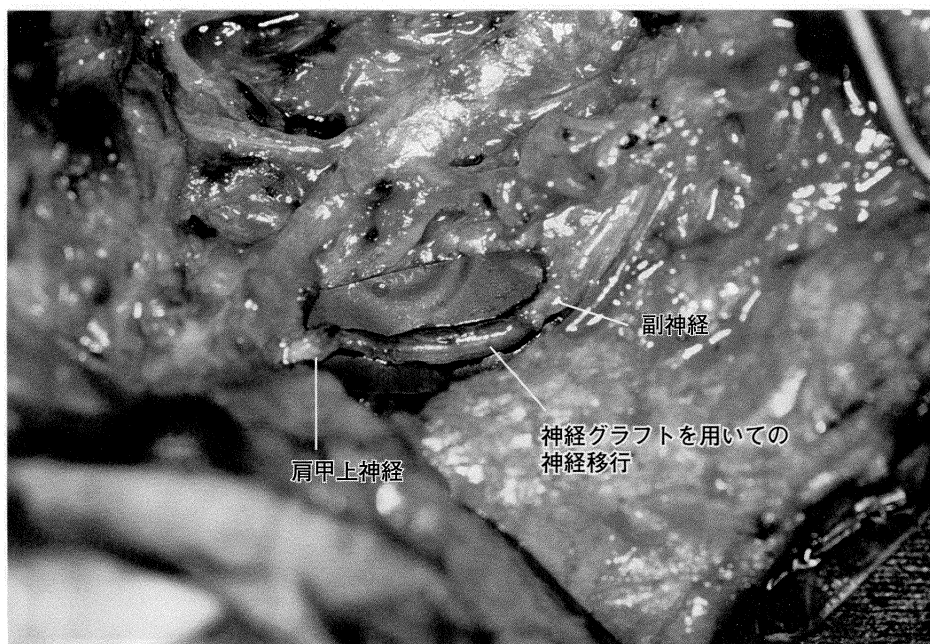


図 18-b. 移行術後

図 18. 副神経—肩甲上神経移行術

るもっとも重要な因子のうちのひとつとして受傷から手術までの期間がある。これまでに、腕神経叢の早期(受傷から4から6ヶ月)の外科的治療を推奨する多数の報告がなされてきた。Narakasらは、手術治療が、受傷後8から12ヶ月でなされるならば、神経移植または移行術の手術成績は極めて悪くなるとし早期の治療を推奨している³⁹⁾。Millesiも早期(3から6ヶ月)と晩期(6から12ヶ月)に分けて検討して結果、自然回復が認められないならば早期に腕神経叢の外科的治療を行うことの重要性を強調している³⁰⁾。Samiiらは、6ヶ月以内、6から12ヶ月、12ヶ月以上の3群に分け、神経移植術と移行術についてそれぞれ検討している。神経移植術においては、MRCのG3以上のuseful recoveryを示したのは、62%、44%、12.5%であった。神経移行術においても、同様に71%、43%、0%であり、6ヶ月以内の成績が有意に良好であった³⁵⁾。Late repairの成績がよくない主な原因としては、筋線維の線維化をともなった変性と筋内の瘢痕組織形成と神経の遠位部での変性である。筋線維の変性の兆候は損傷後3から4週間で認められ、2から3年で完全に瘢痕組織により筋線維は置き換えられる³⁰⁾。

次の因子としては、移植神経の長さである。1970年代は、移植神経の長さとは術後成績とは関連性がないとされていた³⁷⁾。移植神経の血行は、中枢側の神経または遠位側の神経より来るのではなく、周りの組織からの血管新生によるものである。そのため、短い移植神経と比較しても、長い移植神経が、虚血により侵されることはないという根拠からである。しかしながら、Chuangらは、128例の腕神経叢損傷に対して、肘関節屈曲機能改善のために神経移行術を行った手術成績において、移植神経が10cmより長い短いかで有意な差があると報告している³⁸⁾。またSamiiらも、筋皮神経再建のための神経移植術および神経移行術において、12cmより短い移植神経の場合は、長い場合と比べて有意に高率に再神経再生がおり、useful recoveryも高率であったと報告している。その理由としては、長い移植神経を要するような損傷は、広範囲でかつ大量の線維化が生じるため成績が悪くなると病変自体をその原因としている^{35,39)}。

最近、再生軸策が運動終板に筋肉までに到達する時間をほとんどなくし再神経支配を短い期間で行えるように、移植神経を用いないで直接筋の運動終板の近くに神経移行することに注目が集められている。C5,6の引き抜き損傷に限定されるが、ユニークな術式が行われている。もともと上腕二頭筋の運動神経は小さく、再建に太い神経を必要としない。それに比して近くにある尺骨神経は太いため、その1,2本の神経線維束を顕微鏡下で慎重に剥

離すればneurotizerとして用いることができる。Oberlinらは、4症例に部分的尺骨神経を筋皮神経に移行術を行ったところ、全例にuseful recoveryを得て、手においては尺骨神経の脱落症状はなかったと報告している²⁰⁾。Sungpetらは正中神経の1神経線維束を用いて5例に筋皮神経に移行して再建をおこない、全例に良好な結果を得ている⁴⁰⁾。興味深いのは、腕神経叢損傷の手術に関して、脳神経外科医は、神経移植術を優先し、整形外科医、形成外科医は神経移行術を選択する傾向にある。神経移植術は、損傷の場所でどうにか修復しようとするコンセプトであり、より中枢側での再建である。一方神経移行術は、より遠位で痛んだ部位は触らないでそのままにして、新しい神経を用いての再建であり、日ごろの治療に対するスタンスの差が如実に現われていて面白い。

18. 最近神経移行術に用いられるようになった神経

損傷を受けた腕神経叢の中樞端が線維化して正常な神経線維束が認められない時や引き抜き損傷のときは、神経再建において中枢端の神経(neurotizer)として、肋間神経、副神経脊髄枝、横隔神経が主として用いられている。これらの神経を用いての上肢の機能再建は現在のところもっとも有効とされている方法である。しかしながら、より良い機能予後を得るために他のneurotizerを用いる試みがなされてきている。Yamadaらは、C5,6神経根の引き抜き損傷に対して、C3,4の神経のanterior ramiをneurotizerとして用いて良好な成績を得ている(26)。今までBrunelliらにより頸神経叢を用いた移行術が行われていたが^{8,41)}、この方法はより近位のC3,4のanterior rami全体に(横隔神経のちょうど遠位)upper trunkと神経縫合するのである。より中枢側での神経を用いるので、十分な有髄神経を含んでいるため良い成績が得られる。頸部筋を支配しているC3,4の機能は損なわれることになるが、この部分は多数の神経根により支配されているために目立った機能障害は起こらない。

最近、肩及び肘の機能においても良好な結果を得られている。遠位の前腕機能においては、従来のneurotizerを用いては満足な結果を得られなかった。GuらおよびChuangらはそれぞれ独自に、反対側の正常なC7神経根を用いて神経移行術を行い、わずかな神経脱落症状のみで、手指の屈曲と手掌の知覚の回復を得たと報告している^{25,42,43)}。病側の尺骨神経を血管付または、そのまま移植神経として使い、正中神経に神経移行する。Guらは、運動は63%、知覚は87%に良好な結果を得られたと報告している。Chuangらによると、合併症状としてはC7神経根を用いた上肢において、運動障害(上腕三等

筋、総指伸筋)が19%、手掌の知覚障害を52%に生じたと報告している。Songcharoenらは、C7神経根の半分を用いることにより、健側上肢の機能低下を最小にとどめようとした。C7においても、肩を支配している神経線維束を選択するようにした。結果として、運動機能障害は3%と著明に低下し、知覚回復もC7全体を用いるのと変わりなかった。しかしながら、運動機能回復は29%と低下した⁴⁴⁾。以上より、この反対側の正常なC7神経根を利用する術式は複雑な機能をもつ正中神経の再建にのみ用いるべきであり、たとえわずかな機能低下といえども、ほかの術式がないという段階となつてから使用すべきであると思われる。

19. 肘関節屈曲機能の回復成績

機能評価は、Medical Research Council (MRC) gradeを用いて、重力に抗して収縮が認められるG3以上をgood recoveryとして、各手術において成績を検討した。神経移植においては、46.3%から82%にgood recoveryを認めている^{48,35,45)}。神経移行術は肘間神経を用いる場合と、副神経脊髄枝を用いる場合がある。肘間神経移行術では、50%から88.9%^{8;22;46-48)}、副神経脊髄枝移行術では、20%から75%にgood recoveryを認めている^{8,39,49)}。Oberlin methodでは、75%であった⁵⁰⁾。以上より肘関節屈曲機能の各手術における成績にはほとんど差は認められない。引き抜き損傷で、中枢端の神経を利用できない場合に行われる神経移行術においても、悲観的な結果ではないと思われる。

- Nerve grafting
 - 57.4% (109 of 190 pts) (Kline, 1995)
 - 46.3% (25 of 54 pts) (Samii, 1997)
 - 74.3% (of 35 pts) (Ochiai, 1996)
 - 82% (14 of 17 pts) (Songcharoen, 1998)
- Intercostal neurotization
 - 81.2% (52 of 64 pts) (Millesi, 1986)
 - 70.9% (100 of 114 pts) (Nagano, 1989)
 - 50% (15 of 30 pts) (Narakas, 1988)
 - 88.9% (8 of 9 pts) (Ogino, 1995)
 - 65% (11 of 17 pts) (Songcharoen, 1998)
 - 64% (16 of 25 pts) (Mallesy, 1998)
- Spinal accessory neurotization
 - 20% (3 of 15 pts) (Allieu, 1984)
 - 75% (Songcharoen, 1998)
 - 51.3% (20 of 39 pts) (Samii, 2003)
- Oberlin method
 - 75% (24 of 32 pts) (Oberlin, 2004)

20. 脊髄神経根の脊髄への再移植(reimplantation of avulsed spinal nerve root)

引き抜き損傷に対しては、神経移行術が行われているが、遠位神経は脊髄と完全に分離しているため脊髄の細胞は二次的な変性を受けて細胞死に至る。

1990年前半より、引き抜かれた神経根を直接脊髄に再移植する動物実験が行われ、運動機能の回復が得られることが示された^{51,52)}。それに基づき、臨床において初めてCarlstedtらは脊髄神経根の脊髄への再移植を行った。C6, 7のventral rootをreimplantし上肢の近位筋において筋電図において収縮を得たと報告している⁵³⁾。以後症例を積み重ねて、Carlstedtらは10症例において30%にuseful recoveryを得て、部分的には知覚の回復も得たと報告している⁵⁴⁾。Bertelliらも、8症例に行ったが、1例にのみM4の運動機能回復を示しただけであり、まだ臨床応用には疑問が残ると述べている⁵⁵⁾。中枢神経の白質においては、選択的に存在する髄鞘の膜蛋白が神経細胞の成長を強力に阻害することがわかっている⁵⁶⁾。Fourierらは、reimplantの成績の良くないのは、reimplantの場所が不適當であるとして、運動神経細胞の多く集まる腹側灰白質の位置を組織学的に検討して適切な位置を示している。軟膜より2mmの深さで腹外側溝沿って挿入するのが理想を述べており⁵⁷⁾、またそのためには前、中斜角筋間より多椎体に渡る斜めよりの椎体切除(lateral interscalenic multilevel oblique corpectomy)が視野を得るのに良いと述べている⁵⁸⁾。

21. 外科治療後のマネージメント

手術の性質上、神経の再生が認められ、最終の結果を評価するには18から24ヶ月を要することを銘記しなければならない。患者は理学的療法を続けて関節の可動域を努力して良好に保たなければならない。最大の努力を持ってしても、十分な機能回復が得られないとき、筋または腱の移行術のような軟部組織の再建術か肩関節の固定術を行うことを考慮する。受傷から3年目には、できる限りの再建術をおこなうべきである。患者は回復の程度を理解し、腕の機能を受け入れなければならない。治療後症状は決して直ぐには改善せず、患者は重いhandicapを持っていくことになる。術者と患者はお互いに協力して、腕神経叢損傷の本質を理解し、一緒に治療のゴールに到達できるように努力しなければならない。

22. 歴史的背景

90年を超える間、神経外科医は腕神経叢損傷の外科治

療の成績を向上させようとしてきた。しかしながら、その結果はなされた努力にかかわらず不良であった。第一次世界大戦時、Platt は、腕神経叢損傷の患者を治療したが、非常に労を伴う病態であることを痛感した⁵⁹⁾。Kennedy は 1903 年に腕神経叢損傷の断裂は回復の可能性があると示した。サルを用いた実験で、腕神経叢を切断したのち二本もしくはそれ以上の神経根を接合したのちに機能の回復が認められたと報告した⁶⁰⁾。反対に、第二次世界大戦から、Seddon らは腕神経叢損傷に懸命に取り組んだが、外科的修復はしばしば望みなばかりか、散々たる結果であった。C5-C6 の伸展損傷に対して神経移植を行った 3 例について報告している。2 例は不成功に終わり、1 例は不完全な回復であった。うまくいかなかった原因として、損傷した神経の不十分な切除と手術時期が遅すぎたことを指摘している⁶¹⁾。Brooks は、1949 年に第二次世界大戦で経験した 42 人の患者について報告している。22 例において、展開を行い 4 本の神経が切れているのを認め、3 例に修復を行った。予後は神経はくり術によって良好な結果は得られるとは限らないと結論している⁶²⁾。Bonny は、19 例の完全鎖骨上損傷に対して二年以上経過を追った。機能の自然回復はほとんど認められなかった。回復が認められたとしても、時間がかかり、近位筋に限られていた。そのうち 15 人に対して診断をつけるために、展開を行ったが修復は行わなかった。有効な回復が、三角筋に 3 例、上腕二頭筋に 6 例、上腕三等筋に 6 例に認められたのみであった。手首、指の伸展筋や手の内在筋の回復は認められなかった。神経縫合や移植は神経叢が断裂されている場合にのみ行うべきであると、Lesion in continuity の概念はなかったようである⁶³⁾。Luskin と Cambell は、1973 年に 20 例の腕神経叢損傷に展開を行い、鈍的損傷に対してはより積極的にアプローチするように提唱した。手術により次のような病態のときに改善があることを示した。腕神経叢周辺の瘢痕により伝達障害の起こっているとき。神経腫を切除して正常な神経線維束が認められるとき。この場合には神経はくり術と神経移植術をすべきであるとしている⁶⁴⁾。Nagano は、さまざまな損傷程度の節後損傷の患者において保存的療法のみで、良好な自然回復期待できることを示した。全体の 40% 以上の患者が良好な転帰を得ている⁶⁵⁾。1981 年に Narakas らは、比較的積極的に選択的な外科的アプローチを報告している。615 例中 237 例に手術を行った。内容は、展開 4 例、神経はくり術 20 例、神経移行術 26 例、神経移植 127 例等である。全体として 41% に良好な結果を得たが、神経移植術に関しては 15 例のみが良好な結果を得ただけであった。そこで、神経移植術

では良い結果は得られないと結論している⁶⁶⁾。1984 年に Millesi は、顕微鏡を用いて手術を行った節後損傷 50 例について良好な結果が得たと報告している。特に C5, C6 によって支配される筋の機能回復が顕著であった。彼は、内神経はくりを行うことによって機能を改善することができる主張した⁶⁷⁾。Millesi に影響されたのか、以後精神的に腕神経叢損傷の治療に取り組む人々が現れた。1995 年に Songcharoen は、520 人の患者のうち 350 例に行った手術を報告した。手術は、314 例の神経移行術、38 例の神経はくり術、23 例の神経移植術等であった。神経移行術と神経移植術により予後が向上することを示した。良好な結果を得られるのは、上位型損傷と外側神経束と後神経束の限局した鎖骨下損傷であるとした⁶⁸⁾。Kline らは、神経移植術を行った多数の症例について詳細に報告している。204 例の鎖骨上損傷と 119 例の鎖骨下損傷である。全体として 58% に良好な結果を得ており、術中神経活動電位の測定の重要性と有用性について述べている⁶⁹⁾。今まで多くの報告がされているが、いまだ保存的療法か外科的療法どちらが優れているのか結論は出ていない。術式においてさえもまだ議論のあるところである。それゆえ、腕神経叢の手術は技術の進歩とともにまだまだ発展していく余地はあるのではないと思われる。

ま と め

腕神経叢損傷の治療は、神経外科医および機能再建外科医にとって非常に挑戦的な分野である。また、治療において夢を打ち壊されてきたことも事実である。過去の病態にしてしまっただけとはいけない。実際苦しんでいる患者さんはいるのである。それゆえ、積極的に取り組んでいかなくてはいけない分野である。外科医は腕神経叢損傷を扱う時には、腕神経叢の解剖を理解し、神経損傷の診断、神経修復の方法を駆使しなければならない。それにより、より良い結果が患者さんにもたらされると思われる。

謝 辞

本総説の執筆の機会を与えてくださったことに対し、奈良医大脳神経外科学神寿右教授に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Bonney, G. : The value of axon responses in determining the site of lesion in traction injuries of the brachial plexus. *Brain*. **77** : 588, 1954.
- 2) Barnes, R. : Traction injuries of the brachial

- plexus in adults. *J. Bone. Joint. surg. (Br)*. **31**:10-16, 1949.
- 3) **Midha, R.** : Epidemiology of brachial plexus injuries in a multitrauma population. *Neurosurgery* **40** : 1182-1189, 1997.
 - 4) **Kline, D. G.** and **Hudson, A. R.** : Nerve injuries : Operative Results from Major Nerve Injuries, Entrapments, and Tumors. Philadelphia, WB Saunders, 1995.
 - 5) **Beghi, E., Kurland, L. T., Mulder, D. W.** and **Nicolosi, A.** : Brachial plexus neuropathy in the population of Rochester, Minnesota, 1970-1981. *Ann.Neurol.* **18** : 320-323, 1985.
 - 6) **Clancy, W. G., Brand, R. L., and Bergfield, J. A.** : Upper trunk brachial plexus injuries in contact sports. *Am. J. Sports. Med.* **5** : 209-216, 1977.
 - 7) **Birch, R.** : Traction lesions of the brachial plexus. *Br. J. Hosp. Med.* **32**:140-143, 1984.
 - 8) **Songcharoen, P.** : Brachial plexus injury in Thailand : a report of 520 cases. *Microsurgery* **16** : 35-39, 1995.
 - 9) **Bentolila, V., Nizard, R., Bizot, P.** and **Sedel, L.** : Complete traumatic brachial plexus palsy. Treatment and outcome after repair. *J. Bone. Joint. Surg. Am.* **81** : 20-28, 1999.
 - 10) **Dubuisson, A. S.** and **Kline, D. G.** : Brachial plexus injury : a survey of 100 consecutive cases from a single service. *Neurosurgery* **51** : 673-682, 2002.
 - 11) **Dvali, L.** and **Mackinnon, S.** : Nerve repair, grafting, and nerve transfers. *Clin. Plast. Surg.* **30** : 203-221, 2003.
 - 12) **Fogarty, B. J.** and **Brennen, M. D.** : Upper root brachial plexus trauma; patient selection and reconstruction. *Injury.* **33** : 57-62, 2002.
 - 13) **Narakas, A.** : Surgical treatment of traction injuries of the brachial plexus. *Clin. Orthop.* **133** : 71-90, 1978.
 - 14) **Antoniadis, G.** and **Richter, H. P.** : Neurotization for brachial plexus lesions. *Zentralbl Neurochir (suppl)*, **66**, 1995.
 - 15) **Brandt, K. E.** and **Mackinnon, S. E.** : A technique for maximizing biceps recovery in brachial plexus reconstruction. *J. Hand. Surg.[Am]*. **18** : 726-733, 1993.
 - 16) **Yamada, S., Lonsner, R. R.** and **Iacono, R. P.** : Bypass coaptation procedures for cervical nerve root avulsion. *Neurosurgery* **38** : 1145-1152, 1996.
 - 17) **Leechavengvongs, S., Wittoonchart, K., Uerpairrojkit, C., Thuvasethakul, P.** and **Ketmalasiri, W.** : Nerve transfer to biceps muscle using a part of the ulnar nerve in brachial plexus injury (upper arm type) : a report of 32 cases. *J. Hand. Surg.* **23A** : 711-716, 1998.
 - 18) **Carvalho, G., Nikkhah, G. Matthies, C., Penkert, G., and Samii, M.** : Diagnosis of root avulsions in traumatic brachial plexus injuries : value of computerized tomography myelography and magnetic resonance imaging. *J. Neurosurg.* **86** : 69-76, 1997.
 - 19) **Alnot, J. Y.** : Traumatic brachial plexus lesions in the adult. Indications and results. *Hand. Clin.* **11** : 623-631, 1995.
 - 20) **Narakas, A. O.** : Lesions found when operating traction injuries of the brachial plexus. *Clin. Neurol. Neurosurg.* **95** : Suppl : S56-S64, 1993.
 - 21) **Belzberg, A. J., Dorsi, M. J., Storm, P. B.** and **Moriarity, J. L.** : Surgical repair of brachial plexus injury : a multinational survey of experienced peripheral nerve surgeons. *J. Neurosurg.* **101** : 365-376, 2004.
 - 22) **Malessy, M. J. A.** and **Thomeer, R. T. W. H.** : Evaluation of intercostal to musculocutaneous nerve transfer in reconstructive brachial plexus surgery. *J. Neurosurg.* **88** : 266-271, 1998.
 - 23) **Songcharoen, P., Mahaisavariya, B., and Chotigavanich, C.** : Spinal accessory neurotization for retraction of elbow flexion and avulsion injuries of the brachial plexus. *J. Hand. Surg.* **21** : 387-390, 1996.
 - 24) **Chuang, D. C. C., Lee, G. W., Hashem, F.** and **Wei, F. C.** : Restriction of shoulder abduction by nerve transfer in avulsed brachial plexus injury : evaluation of 99 patients with various nerve transfers. *Plast. Reconstr. Surg.* **96** : 122-128, 1995.
 - 25) **Gu, Y. D., Zhang, G. M., Chen, D. S., Yan, J. G., Cheng, X. M.** and **Chen L.** : Seventh cervical

- nerve root transfer from the contralateral healthy side for treatment of brachial plexus root avulsion. *J. Hand Surg.[Br.]* **17** : 518-521, 1992.
- 26) Yamada, S., Petterson, G. W., Soloniuk, D. S. and Will, A. D. : Coaptation of the anterior rami of C-3 and C-4 to the upper trunk of the brachial plexus for cervical nerve root avulsion. *J. Neurosurg.* **74** : 171-177, 1991.
- 27) Oberlin, C., Beal, D., Leechavengvongs, S., Salon, A., Dauge, M. C. and Sarcy, J. J. : Nerve transfer to biceps muscle using a part of ulnar nerve for C5-C6 avulsion of the brachial plexus : anatomical study and report of four cases. *J. Hand Surg.* **19A** : 232-237, 1994.
- 28) Kline, D. G. : Surgical repair of brachial plexus injury. *J. Neurosurg.* **101** : 361-363, 2004.
- 29) Malessy, M. J., de Ruyter, G. C., de Boer, K. S. and Thomeer, R. T. : Evaluation of suprascapular nerve neurotization after nerve graft or transfer in the treatment of brachial plexus traction lesions. *J. Neurosurg.* **101** : 377-389, 2004.
- 30) Merrell, G. A., Barrie, K. A., Katz, D. L. and Wolfe, S. W. : Results of nerve transfer techniques for restoration of shoulder and elbow function in the context of a meta-analysis of the English literature. *J. Hand Surg. [Am.]* **26** : 303-314, 2001.
- 31) Kline, D. G. and Hackett, E. R. : Management of the neuroma in continuity. In Wilkins, R. H. and Rengachary, S. S. (eds), *Neurosurgery*, pp. 1864-1871. New York, McGraw Hill, 1984.
- 32) Tiel, R. L., Happel, L. T. and Kline, D. G. : Nerve action potential recording method and equipment. *Neurosurgery* **39**[1] : 103-109, 1996.
- 33) Narakas, A. O. : The treatment of brachial plexus injuries. *Int. Orthop.* **9** : 29-36, 1985.
- 34) Millesi, H. : Brachial plexus injuries : Nerve grafting. *Clin. Orthop. Related. Res.* **237** : 36-42, 1988.
- 35) Samii, M., Carvalho, G. A., Nikkhah, G. and Penkert, G. : Surgical reconstruction of the musculocutaneous nerve in traumatic brachial plexus injuries. *J. Neurosurg.* **87** : 881-886, 1997.
- 36) Kline, D. G. and Judice, D. J. : Operative management of selected brachial plexus lesions. *J. Neurosurg.* **58** : 631-649, 1983.
- 37) Millesi, H., Meissl, G. and Berger, A. : The interfascicular nerve-grafting of the median and ulnar nerves. *J. Bone. Joint. Surg. Am.* **54A** : 727-750, 1972.
- 38) Chuang, D. C., Epstein, M. D., Yeh, M. C. and Wei, F. C. : Functional restoration of elbow flexion in brachial plexus injuries : results in 167 patients (excluding obstetric brachial plexus injury). *J. Hand Surg. [Am.]* **18** : 285-291, 1993.
- 39) Samii, A., Carvalho, G. A. and Samii, M. : Brachial plexus injury : factors affecting functional outcome in spinal accessory nerve transfer for the restoration of elbow flexion. *J. Neurosurg.* **98** : 307-312, 2003.
- 40) Sungpet, A., Suphachitwong, C. and Kawinwonggowit, V. : One-fascicle median nerve transfer to biceps muscle in C5 and C6 root avulsions of brachial plexus injury. *Microsurgery.* **23**:10-13, 2003.
- 41) Brunelli, G. : Neurotization of avulsed roots of the brachial plexus by means of anterior nerves of the cervical plexus. *Clin. Plast. Surg.* **11** : 149-152, 1984.
- 42) Gu, Y. D., Chen, D. S., Zhang, G. M., Cheng, X. M., Xu, J. G., Zhang, L. Y., Cai, P. Q. and Chen, L. : Long-term functional results of contralateral C7 transfer. *J. Reconstr. Microsurg.* **14** : 57-59, 1998.
- 43) Chuang, D. C., Cheng, S. L., Wei, F. C., Wu, C. L. and Ho, Y. S. : Clinical evaluation of C7 spinal nerve transection : 21 patients with at least 2 years' follow-up. *Br. J. Plast. Surg.* **51** : 285-290, 1998.
- 44) Songcharoen, P., Wongtrakul, S., Mahaisavariya, B. and Spinner, R. J. : Hemi-contralateral C7 transfer to median nerve in the treatment of root avulsion brachial plexus injury. *J. Hand Surg. [Am.]* **26** : 1058-1064, 2001.
- 45) Junttila, T., Recharadt, L., Cao, Y., Hokfelt, T. and Pelto-Huikko, M. : Distribution of acidic fibroblast growth factor-like immunoreactivity in rat skeletal muscle fibers. *Brain Research* **707** : 81-87, 1996.

- 46) **Narakas, A. and Hentz, V. R.** : Neurotization in brachial plexus injuries. indication and results. *Clin. Orthop.* **237** : 43-56, 1988.
- 47) **Nagano, A., Tsuyama, N., Ochiai, N., Hara, T. and Takahashi, M.** : Direct nerve crossing with the intercostal nerve to treat avulsion injuries to the brachial plexus. *J. Hand. Surg.* **14A** : 980-985, 1989.
- 48) **Ogino, T. and Naito, T.** : Intercostal nerve crossing to restore elbow flexion and sensibility of the hand for a root avulsion type of brachial plexus injury. *Microsurgery* **16** : 571-577, 1995.
- 49) **Allieu, Y., Privat, J. M. and Bonel, F.** : Paralysis in root avulsion of the brachial plexus : neurotization of the spinal accessory nerve. *Clin. Plast. Surg.* **11** : 133-137, 1984.
- 50) **Teboul, F., Kakkar, R., Ameer, N., Beaulieu, J. Y. and Oberlin, C.** : Transfer of fascicles from the ulnar nerve to the nerve to the biceps in the treatment of upper brachial plexus palsy. *J. Bone. Joint. Surg. Am.* **86A** : 1485-1490, 2004.
- 51) **Carlstedt, T.** : Experimental studies on surgical treatment of avulsed spinal nerve roots in brachial plexus injury. *J. Hand. Surg.* **16B** : 477-482, 1991.
- 52) **Bertelli, J. A. and Mira, J. C.** : Brachial plexus repair by peripheral nerve grafts directly into the spinal cord in rats. Behavioral and anatomical evidence of functional recovery. *J. Neurosurg.* **81** : 107-114, 1994.
- 53) **Carlstedt, T., Grane, P., Hallin, R. G. and Noren, G.** : Return of function after spinal cord implantation of avulsed spinal nerve roots. *Lancet* **346** : 1323-1325, 1995.
- 54) **Carlstedt, T., Anand, P., Hallin, R., Misra, P. V., Noren, G. and Seferlis, T.** : Spinal nerve root repair and reimplantation of avulsed ventral roots into the spinal cord after brachial plexus injury. *J. Neurosurg.* **93** : 237-247, 2000.
- 55) **Bertelli, J. A. and Ghizoni, M. F.** : Brachial plexus avulsion injury repairs with nerve transfers and nerve grafts directly implanted into the spinal cord yield partial recovery of shoulder and elbow movements. *Neurosurgery* **52** : 1385-1389, 2003.
- 56) **Schwab, M. E.** : Molecules inhibiting neurite growth : a minireview. *Neurochem. Res.* **21** : 755-761, 1996.
- 57) **Fournier, H. D., Menei, P., Khalifa, R. and Mercier, P.** : Ideal intraspinal implantation site for the repair of ventral root avulsion after brachial plexus injury in humans. A preliminary anatomical study. *Surg. Radiol. Anat.* **23** : 191-195, 2001.
- 58) **Fournier, H. D., Mercier, P. and Menei, P.** : Lateral interscalenic multilevel oblique corpectomies to repair ventral root avulsions after brachial plexus injury in humans : anatomical study and first clinical experience. *J. Neurosurg.* **95** : 202-207, 2001.
- 59) **Platt, H.** : Operation on nerves. In Carson, H. W. (ed), *Modern operative surgery*, pp. 331-338. London, Cassell and Co. Ltd, 1924.
- 60) **Kennedy, R.** : Suture of the brachial plexus and birth paralysis of the upper extremity. *Br. Med. J.* **1** : 298, 1903.
- 61) **Seddon, H. J.** : The use of autogenous grafts for the repair of the large gaps in peripheral nerves. *Br. J. Surg.* **35** : 151-167, 1947.
- 62) **Brooks, D. M.** : Open wounds of the brachial plexus. *J. Bone. Joint. Surg.* **31B** : 17-33, 1949.
- 63) **Bain, J. R., Mackinnon, S. E. and Hudson, A. R.** : The peripheral nerve allograft : a dose - response curve in the rat immunosuppressed with cyclosporin A. *Plast. Reconstr. Surg.* **82** : 447-455, 1988.
- 64) **Luskin, R., Campbell, J. B. and Thompson, W. A. L.** : Post-traumatic lesions of the brachial plexus. *J. Bone. Joint. Surg.* **55A** : 1159-1176, 1973.
- 65) **Nagano, A., Tsuyama, N. and Hara, T.** : Brachial plexus injuries. Prognosis of postganglionic lesions. *Arch. Orthop. Trauma. Surg.* **102** : 172-178, 1984.
- 66) **Narakas, A.** : Brachial plexus surgery. *Orthop. Clin. North. Am.* **12** : 303-323, 1981.
- 67) **Millesi, H.** : Brachial Plexus injuries. Management and results. *Clin. Plas. Surg.* **11[1]** : 115-120, 1984.