外傷性末梢神経障害の治療とそのリハビリテーション治療の実際—腕神経叢損傷—

[Surgical Treatment and Postoperative Rehabilitation Therapy for
Traumatic Peripheral Injury : Brachial Plexus Injury]

柿木良介* Ryosuke Kakinoki

近畿大学医学部整形外科教室

Key words : 腕神経叢損傷／リハビリテーション治療／神経再建術／筋肉移植術

はじめに

腕神経叢は、第5頸髄神経根から第1胸髄神経の5本の神経根から形成されるが、ときに第4頸髄神経根や第2胸髄神経根が関与する症例があり、それぞれ、prefixed, postfixedと呼ばれている。腕神経叢損傷は、この腕神経叢部の神経障害である。腕神経叢損傷は、節前損傷と節後損傷に大別される。節前損傷は後根神経節より中枢での損傷で、神経根の引き抜き損傷のことである。一方、節後損傷は、後根神経節より末梢に発生した末梢神経障害であり、その損傷および術後の経過は、Seddon分類¹⁾に従う(表1)。神経根引き抜き損傷では、一般に引き抜かれた神経根を単に脊髄に縫着しても、神経再生はほとんど起こらないとされていて、その治療は、副神経、横隔神経、肋間神経などを麻痺神経に移行する神経移行術や麻痺を免れた筋肉を移行する筋移行(移植)術が適応となる。一方、節後損傷は、末梢神経損傷であるので、神経縫合術、神経移植術もその適応となる。腕神経叢損傷の発生原因としては、オートバイによる転倒など高エネルギー外傷がほとんどで、ときに腕神経叢部への刺創、医原性損傷などがある。

本論文では、第5頸髄神経根から第1胸髄神経の5本の神経根すべての引き抜き損傷である全型腕神経叢損傷に焦点を置いて、筆者の行っている外科的治療とリハビリテーション治療を説明する。

全型腕神経叢引き抜き損傷

1. 神経移行, 移植術と筋肉移行, 移植術

一般的に神経移行, 移植術は、受傷後6カ月以内の損傷に適応があり、筋肉移行, 移植術は合併する脳損傷などの影響などで診断が遅れ、受傷後6カ月以上経った症例が適応となる。6カ月以上脱神経状態が続くと、筋の線維化、神経筋接合部の変性が進み、神経再建しても良好な運動回復が期待されないからである。ただし、最近では全型腕神経叢損傷の治療として、積極的に手指運動の再建を行うようになり、その場合は遊離筋肉移植が適応となる。

2. 外科的治療

手術法にはいくつかあるが、ここではDoiらの開発したdouble muscle法²⁾について説明する(図1)。この術式は、両側薄筋を用いて、肘屈曲および手指伸展と手指屈曲を再建し、交差神経移行術にて、肩、肩甲骨機能、肘関節伸展機能、手指知覚機能を再建する方法である。移行する神経としては、肋間神経、副神経、横隔神経、ときに健側の

* 近畿大学医学部整形外科教室
(〒589-8511 大阪府大阪狭山市大野東 377-2)
E-mail : rkakinoki@med.kindai.ac.jp
DOI : 10.2490/jjrmc.55.939

第7頸髄神経根を用いる。

1) 第1回目手術

健側下肢から支配神経である閉鎖神経、栄養動脈である内側大腿回旋動静脈をつけた薄筋を採取し、薄筋の中枢を患側鎖骨に、末梢を患肢総指伸筋と長母指伸筋に縫合する。薄筋の閉鎖神経を移植部の副神経と、内側大腿回旋動静脈を胸肩峰動静脈と顕微鏡下で縫合する。次に、横隔神経を麻痺した肩甲上神経と縫合し、腱板機能を回復させる。

2) 第2回目手術

患側下肢より第1回目と同様に薄筋を採取し、薄筋の中枢を第2、3肋骨に、末梢を長母指屈筋および深指屈筋に縫合して指屈曲機構を再建する。薄筋の閉鎖神経は患側の第2、3肋間神経と、内側

大腿回旋動静脈は胸背動静脈と縫合する。第4、5肋間神経を橈骨神経上腕三頭筋枝へ移行して肘関節伸展機能を再建し、さらに第6肋間神経を長胸神経に移行して肩甲骨の安定化を図る。採取した肋間神経外側枝（知覚神経主体）は損傷腕神経叢の外側神経束から分かれる正中神経枝に縫合し、手指の知覚を再建する。

ときに、健側第7神経根を患側後側神経束に縫合し、肘伸展機能と肩外転機能を再建する場合もある³⁾。

その後神経回復を待つ、手指の中手指節（MP）関節もしくは近位指節間（PIP）関節の固定術や手関節の固定術を追加する。

3. 術後リハビリテーション

1) 運動療法

筋肉移植の術後3週間目から移植筋肉に緊張のかからない範囲で他動肘関節運動を開始する。術後5週目より移植筋に徐々に緊張をかけるようにして、他動肘関節運動範囲を拡大させる。また、肩関節も徐々に可動域を拡大させる。術後8週目より肘関節は、完全屈曲から伸展-30°ぐらいを目安に可動域を拡大させ、肩関節も外転、屈曲90°

表1 末梢神経障害の分類（Seddon の分類）

1度 Neurapraxia（一過性神経伝導障害）
髄鞘のみの損傷—自然回復可能
2度 Axonotmesis（軸索の断裂）
Tinel 徴候がみられる—ときとして自然回復可能
3度 Neurotmesis（完全断裂）
損傷部位より遠位で Waller 変性が起こる—自然回復は困難

図1 Double muscle 法

- a：第1回目の薄筋移植。遊離薄筋は、鎖骨と総指伸筋腱、長母指伸筋腱の間に移植して、関節屈曲と手指伸展を再建した。遊離薄筋の閉鎖神経は副神経と、内側大腿回旋動静脈は胸肩峰動静脈と縫合した（破線は移植筋肉）。
- b：第2回目の薄筋移植。遊離薄筋は、第2肋骨と深指屈筋腱、長母指屈筋腱の間に移植して、手指屈曲を再建した。遊離薄筋の閉鎖神経は肋間神経と、内側大腿回旋動静脈は胸背動静脈と縫合した（破線は移植筋肉）。

までを目処に拡大させるが、それ以上の可動域の拡大は行わない。この術式では、指運動は肘完全伸展時に可能となるため、筋肉移植時の肘最大伸展は -30° までにしておくことと ADL 上、手指運動に有利で、かつ肘関節屈曲トルクが小さくなり肘屈曲がしやすい。

2) 修復神経への電気刺激の影響

再生神経への電気刺激に関しては、いくつかの基礎研究がある。Al-Majed ら⁴⁾は、外科的に修復した神経への電気刺激は、運動神経に対し preferential motor reinnervation (PMR) を亢進させるが、知覚神経では preferential sensory reinnervation を示さなかったと報告している。また、前角細胞への電気刺激への影響に関して、Al-Majed ら⁵⁾は、神経縫合直後に神経縫合部中枢を supramaximal stimulation で 1 時間、20 Hz、100 μ 秒で刺激すると、前角細胞での brain derived neurotrophic factor (BDNF) 発現を増やしたと報告、Geremia ら⁶⁾は、3~5 V、1 時間、20 Hz、100 μ 秒の刺激は、後根神経細胞での GAP43 の発現を増やしたと報告している。以上により、神経修復直後に修復神経を低周波刺激すると、神経再生は促進し PMR も亢進するようであるが、1 時間に及ぶ刺激時間を臨床的に使用できるか問題もある。

3) 末梢神経再生過程での運動の影響

Tam らは、ラットで第 4 第 5 腰髄神経引き抜き損傷モデルを作成し、1 日 8 時間運動させた群、1 日 8 時間 FES (supramaximal pulse, 100 μ 秒、20 Hz) で坐骨神経を刺激した群、ケージ内で運動させなかった群を作成した。その結果、運動群、FES 刺激群の前脛骨筋、腓腹筋での axonal sprouting は、ケージ内で何もさせなかった群より悪かったと報告している⁷⁾。また、Tam らは、第 4 腰髄神経を引き抜いて、部分的に前脛骨筋を脱神経させたラットモデルを使って、ケージ内で何も運動させなかった群と 1 日 8 時間運動させた群を比

較したところ、運動をさせたラットでは、再生神経から神経再支配されていない endplate に向けてのシュワン細胞によるシナプス間架橋形成が不良であることを報告した⁸⁾。部分脱神経筋支配の筋肉を低周波刺激したり、激しい運動負荷を加えると、筋肉内の神経の側芽形成を抑制するという研究結果が示されている。

以上のように、末梢神経手術後の電気療法、運動療法の併用については、議論の多いところであるが、筆者は神経再支配が筋肉に起こり筋収縮が認められようになれば、筋収縮をアシストして筋肉内の代謝を促す目的で、低周波刺激、自動運動を積極的に行っている。

4) Biofeedback の活用

Double muscle 法を行った症例では、患側僧帽筋に力を入れれば、手指伸展、肘関節屈曲筋に力が入り、大きな呼吸をして患側胸部に力を入れれば、手指屈曲、肘伸展筋が作動する。術後患者では、この手指、肘関節の伸展および屈曲運動の分離が神経回復初期に困難となる。手指、肘屈曲筋と手指、肘伸展筋上に電極を設置し、筋収縮時に収縮音が流れるようにして、手指、肘関節の屈曲、伸展運動の分離を行っている (図 2)。

脳可塑性

Malessy ら⁹⁾によれば、肋間神経を筋皮神経に移行し、肘屈曲再建を行った患者に機能的 MRI 検査を行ったところ、肘屈曲力が回復してくると、再建肘関節屈曲運動により誘発される脳活動部位は、受傷以前に肘屈曲時に活動していた部位と同一であることが示された。われわれは、機能的近赤外線スペクトロスコピー (NIRS) を用いて、健側第 7 頸髄神経根移行 (CC7 術) により患側上肢の運動神経を再建した患者の脳活動部位を検査したところ、術後 2~3 年の時点では、患側上肢の再建運動により患側大脳皮質運動野の活動が誘発され

図2 Double muscle 法術後の biofeedback を用いたリハビリテーション治療

19 歳、男性。左腕神経叢全型引き抜き損傷。Double muscle 法を施行した。1 回目の移植薄筋 (a) で左肘屈曲、手指伸展を再建 (駆動神経：左副神経)、2 回目の移植薄筋 (b) で左手指屈曲を再建した (駆動神経：左肘間神経)。左肘伸展は、健側の C7 神経根を橈骨神経上腕三頭筋枝に移行して再建した (CC7 術) (c)。左僧帽筋に力を入れて、左肘屈曲と手指伸展、大きな呼吸と左肘間筋に力を入れて左指屈曲、右側の肘伸展筋に力を入れて左肘伸展を行わせた。この複雑な再建運動の分離に biofeedback 装置は効果を発した。

たが、6～7 年経過すると、次第に健側の大脳皮質運動野の活動が誘発される傾向のあることがわかった¹⁰⁾。すなわち、CC7 術後早期では、患側上肢の再建運動は、患側大脳皮質 (健側第 7 頸髄神経根を支配) に支配されているが、時間の経過とともに、もともと患側上肢運動を支配していた健側大脳皮質運動野の支配に移行することがわかった。また、患側上肢の再建運動機能の高い症例ほどこの傾向が強く、患側上肢の運動機能の回復不良な症例では、術後 6～7 年経過した時点でも、患側上肢運動で、患側大脳皮質運動野の活動がみられた。知覚神経についても同様の傾向がみられ、CC7 術で再建した患側上肢の知覚刺激では、術後 2～3 年の時点で健側第 7 頸髄神経根支配の患側大脳皮質体性感覚野が活動していたが、術後 6～7 年経過すると、知覚回復の良好な症例では、もともと患側上肢の知覚を支配していた健側大脳皮質体性感覚野が活動することがわかった¹⁰⁾。

以上のように末梢神経から大脳への刺激は、脳

可塑性を誘発し、末梢神経手術後の患者では、この脳可塑性を誘発させるためにも末梢からの刺激の input が大切で、末梢神経再建術後のリハビリテーション治療の充実、さらなる科学的分析の必要性を痛感する。

文 献

- 1) Seddon HJ : Surgical disorders of peripheral nerve. Churchill Livingstone, Edinburgh, London, 1972
- 2) Doi K, Muramatsu K, Hattori Y, Otsuka K, Tan SH, Nanda V, Watanabe M : Restoration of prehension with the double free muscle technique following complete avulsion of the brachial plexus. Indications and long-term results. J Bone Joint Surg Am 2000 ; **82** : 652-666
- 3) Gu YD, Zhang GM, Chen DS, Yan JG, Cheng XM, Chen L : Seventh cervical nerve root transfer from the contralateral healthy side for treatment of brachial plexus root avulsion. J Hand Surg Br 1992 ; **17** : 518-521
- 4) Al-Majed AA, Tam SL, Gordon T : Electrical stimulation accelerates and enhances expression of regeneration-associated genes in regenerating rat femoral motoneurons. Cell Mol Neurobiol 2004 ; **24** : 379-402
- 5) Al-Majed AA, Brushart TM, Gordon T : Electrical stimulation accelerates and increases expression of BDNF and trkB mRNA in regenerating rat femoral motoneurons. Eur J Neurosci 2000 ; **12** : 4381-4390
- 6) Geremia NM, Gordon T, Brushart TM, Al-Majed AA, Verge VM : Electrical stimulation promotes sensory neuron regeneration and growth-associated gene expression. Exp Neurol 2007 ; **205** : 347-359
- 7) Tam SL, Gordon T : Neuromuscular activity impairs axonal sprouting in partially denervated muscles by inhibiting bridge formation of perisynaptic Schwann cells. J Neurobiol 2003 ; **57** : 221-234
- 8) Tam SL, Archibald V, Jassar B, Tyreman N, Gordon T : Increased neuromuscular activity reduces sprouting in partially denervated muscles. J Neurosci 2001 ; **21** : 654-667
- 9) Malessy MJ, Bakker D, Dekker AJ, Van Duk JG, Thomeer RT : Functional magnetic resonance imaging and control over the biceps muscle after intercostal-musculocutaneous nerve transfer. J Neurosurg 2003 ; **98** : 261-268
- 10) Kakinoki R, Duncan SFM, Ikeguchi R, Ohta S, Nankaku M, Sakai H, Noguchi T, Kaizawa Y, Akagi M : Motor and sensory cortical changes after contralateral cervical seventh nerve root (CC7) transfer in patients with brachial plexus injuries. J Hand Surg Asian Pac Vol 2017 ; **22** : 138-149