

# ラット後脚を用いた切断指 (肢) 再接着モデルの手術術式

朝村真一 磯貝典孝 上垣内郁  
田中英俊 上石 弘

近畿大学付属病院形成外科

## 抄 録

微小血管吻合による切断指 (肢) 再接着の術直後生着率は、マイクロサージェリーの基礎研究の進展に伴い、近年飛躍的に向上した。一方、再接着組織に生ずる術後機能不全や形態変化の詳細については、適切な動物モデルの不足が原因で、未だ不明な点が数多く残されている。そこで、今回、我々はラット後脚を用いた再接着モデルを見直し、手技と解剖の詳細を明らかとする目的で標準術式を確立した。

**Key words:** 切断指, 再接着, ラット動物モデル, マイクロサージェリー

## 緒 言

マイクロサージェリーは、手術顕微鏡下に術野を拡大しながら微小な組織を対象とする。このマイクロサージェリーの手技は、1960年代半ばに初めて切断指再接着術に臨床応用され世界の注目を浴び<sup>1</sup>、その後、モデルを用いた基礎研究や、顕微鏡下で組織を取り扱うためのトレーニングが数多く行われてきた。

マイクロサージェリーのトレーニングにおいて、血管吻合用のモデルとして多用されてきた動物はラットである。通常、ヒト血管を想定しながら、ラットの大動脈や大腿動静脈を用いて、血管吻合のトレーニングが行われる。しかし、ヒトの指では血管の他、神経や腱も対象とする必要があるため、この血管吻合のトレーニングのみでは複雑な指 (肢) 再接着術の全過程は習得し得ない。

指 (肢) 再接着術用動物モデルとして、これまでにウサギ耳介<sup>2-4</sup> やラット尾<sup>5</sup>、ラット耳介<sup>6</sup> を用いた報告がなされている。これらは、血管径の細い単なる血管吻合のトレーニングモデルであり、本格的な指 (肢) 再接着術の技術習得には適さなかった。一方、ウサギの後脚を用いた報告<sup>7</sup> では、再接着自体の技術の複雑さが原因で、簡明なトレーニング用の動物モデルとしては確立し得なかった。

そこで、我々は、初歩的な指 (肢) 再接着術のトレーニング用動物モデルとして、ラット後脚再接着モデル<sup>8,9</sup> を見直し、標準モデルを確立するため、その手技と解剖<sup>10</sup> の詳細を明らかとする目的で、この研究を行った。

## 実験動物

実験には、日本エスエルシー株式会社 (浜松) より購入した Wistar/ST ラット30匹 (28週令, 雄, 平均体重440 g) を使用した。飼料 (日本クレア株式会社) 及び飲料用水道水は、自由摂取とし12時間明暗サイクルの動物舎内で通常の飼育を行った。

## ラット後脚の局所解剖

ラット後脚を用いた再接着術のモデルでは、ラット大腿中央部で後脚を切断して、再接着術のトレーニングに用いる。手術過程はヒトの再接着術過程と基本的に同じであり、大腿動静脈を血管吻合する。ヒトの指には二本の固有指動静脈と固有指神経が走っているが、ラットの大腿には一組の血管神経束が存在するのみである。

血管: 腹部大動脈は外腸骨動脈に続き、外腸骨動脈は途中で骨盤腔及び生殖器に細い分岐を出しながら、大腿動脈へ至る。大腿動脈は、鼠径靭帯より始

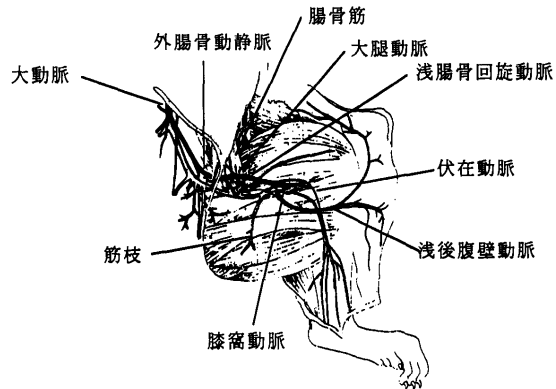


図1 ラット大腿部における血管走行

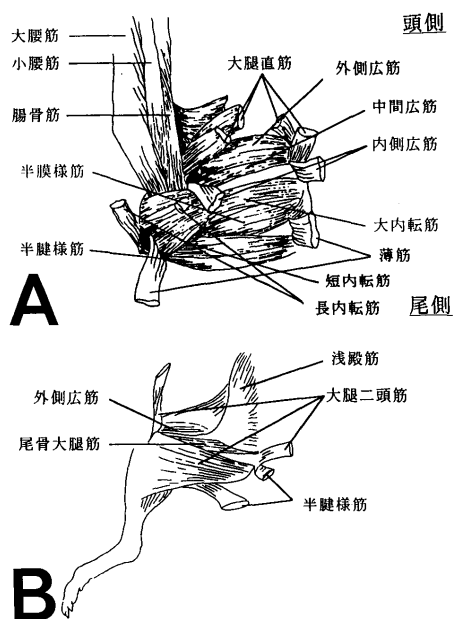


図2 ラット大腿部における筋群  
A. 前筋群, B. 後筋群.

まり、短内転筋と尾骨大腿筋の間まであり、これを境に、膝窩動脈へ連なる。この大腿動脈の分岐として、浅腸骨回旋動脈、筋枝、浅後壁動脈、伏在動脈などがある(図1)。

筋肉：大腿部の筋肉は、前筋群及び後筋群の2つの主要な筋群に分けることができる。大腿骨は両筋群に挟まれ、大腿血管神経束は前筋群上に、坐骨神経は、後筋群内にそれぞれ位置する。前筋群は大腿骨より頭側に位置する大腿四頭筋群(大腿直筋、外側広筋、中間広筋、内側広筋)と、尾側に位置する筋群(薄筋、長内転筋、大内転筋、短内転筋、恥骨筋)に細分割される(図2A)。

一方、後筋群は、ハムストリング筋群(半腱様筋、半膜様筋、尾骨大腿筋、大腿二頭筋)より構成され

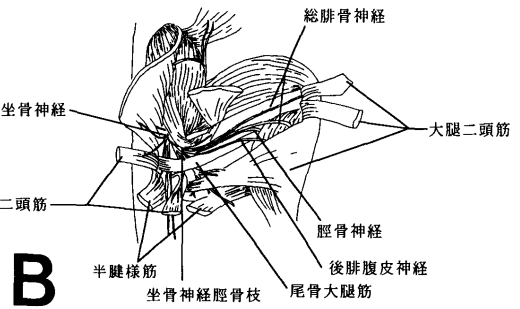
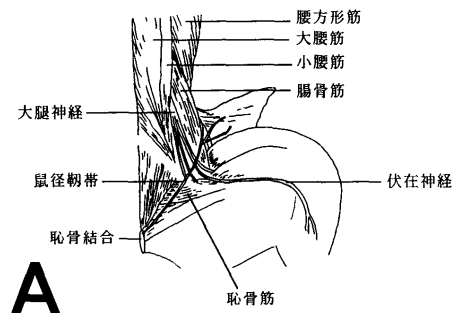


図3 ラット大腿部における神経束  
A. 伏在神経, B. 坐骨神経.

る(図2B)。

神経：ラット後脚には、二つの主要な神経がある。一つは、大腿血管神経束内の伏在神経である。もう一つは、後筋群内に位置する坐骨神経である。大腿神経は、小腰筋と腸腰筋の間よりあらわれ、鼠径靭帯下を外腸骨動静脈と共に通過する。大腿領域に入る前に、この神経は前・後枝に分かれる。前枝は、腸骨筋と恥骨筋への筋枝となる。一方、後枝は、大腿四頭筋への筋枝及び伏在神経となる。この中で、伏在神経が、大腿動静脈と伴に走行し、下行枝、内枝を大腿内側に送る(図3A)。

坐骨神経は一つの軸のように見えるが、神経鞘を取り除くと、脛骨神経と総腓骨神経の二つの終末枝に分かれているのがわかる。すなわち、大腿ハムストリング筋群へ向かう神経は脛骨神経であり、大腿二頭筋へは総腓骨神経が走行し、これを神経支配する(図3B)。

骨：ラットの大腿骨は、ヒトの指節骨に比べかなり脆弱である。ラットの大腿骨は、ヒトと同じく、膝関節につながり、膝蓋骨も認めれる。

#### 再接着術の手術術式

ウレタン (500 mg/kg, ethyl carbamate, Sigma Chemical Co, St. Louis, USA)- $\alpha$ -クロラロース (50 mg/kg,  $\alpha$ -chloralose 和光純薬, 大阪) 混合液を腹腔内投与し、全身麻酔を行った。術中、ラットに疼痛反射が認められた場合は、1/2量の麻酔剤を追加投

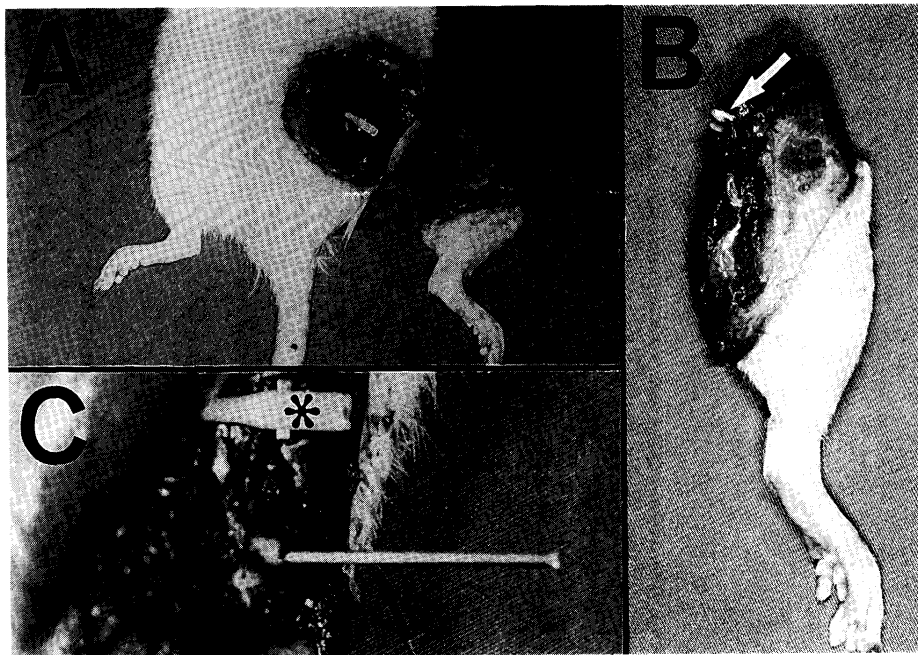


図4 切断された後脚  
 A. 大腿部中央より切断されたラット後脚。B. 切断後脚の拡大像。矢印は大腿動静脈を示す。  
 C. 大腿骨の骨固定部。矢印は大腿骨の骨髓中に挿入された16G注射針を示す。＊は血管クリップを示す。

与した。術前に鼠径部を剃毛し、ラットを手術台へ固定する。ラット後脚を用いた再接着術を再建手順より次の五段階に分けた。

#### 第一段階・ラット後脚の切断

予め剃毛された鼠径部に円弧状に切開を加え、粗な結合組織に覆われた前筋群を露出し、同様の操作で大腿血管神経束を展開する。多量の出血を防止するために、鼠径靭帯の近位側で大腿動静脈に血管クリップをかけ、浅腸骨回旋動静脈を結紮、周囲の脂肪組織と共に牽引することにより大腿動静脈が展開される。大腿動静脈と伏在神経は、手術顕微鏡下にて、鼠径靭帯と浅後腹壁動静脈の中央部にてマイクロ剪刀を用いて切断する。

筋群も同様に、坐骨神経も含めて鋭利に切断する。以上の操作で露出した大腿骨は、吻合操作時の骨短縮術が行えるよう、両端に少なくとも1 cm 剥離する。切断はできるだけ大腿骨中央部とし、ワイヤーカッターを用いて鋭利に切断する（図4 A, 4 B）。

この段階から、ヒトの切断指（肢）再接着術を想定した実際のトレーニングが始まる。以降の吻合操作のため、大腿動静脈及び伏在神経よりなる大腿血管神経束を、手術顕微鏡下でそれぞれ分離する。引き続き筋群、坐骨神経、最後に大腿骨を分離する。温阻血時間は、血管のクランプの時間でコントロールする。

#### 第二段階：骨固定

再接着術においては、骨固定を最初に行う。確実な骨固定がなされない場合、引き続いて行う血管吻合操作が行えない。そのため、安定した強固な骨固定は指再建において必須となる。まず、大腿骨を両端各々約0.5 cm ずつ短縮している。これにより創部の緊張は取り除かれ、以降の操作は容易となる。16G注射針での髓内固定を行う。この固定法によって、ラットの骨折部には確実な安定が得られる（図4 C）。

#### 第三段階：筋縫合

ラットの筋縫合は、ヒトの指（肢）再接着術における腱縫合、または四肢切断再接着における筋・腱縫合に相当する。腱縫合は、断端の新鮮化と特殊な縫合法（Kessler法）<sup>11</sup>を用いて行い、術後の機能回復を期待する。一方、筋群の修復では、断端を合わせて縫合する。再接着モデルでは、まず後筋群に筋縫合を行い骨固定の補助とする。次に、後筋群内を走る坐骨神経も同時に顕微鏡下に縫合しておく。次に、前筋群の筋組織を縫合する（図5 A）。

#### 第四段階：血管・神経吻合

顕微鏡下で行う血管吻合術は、以前より、マイクロサージェリーの見せ場であり、困難を伴うものと考えられてきた。しかし、吻合部での緊張が充分に解除されていれば、術後の吻合血管開存度は高まる。

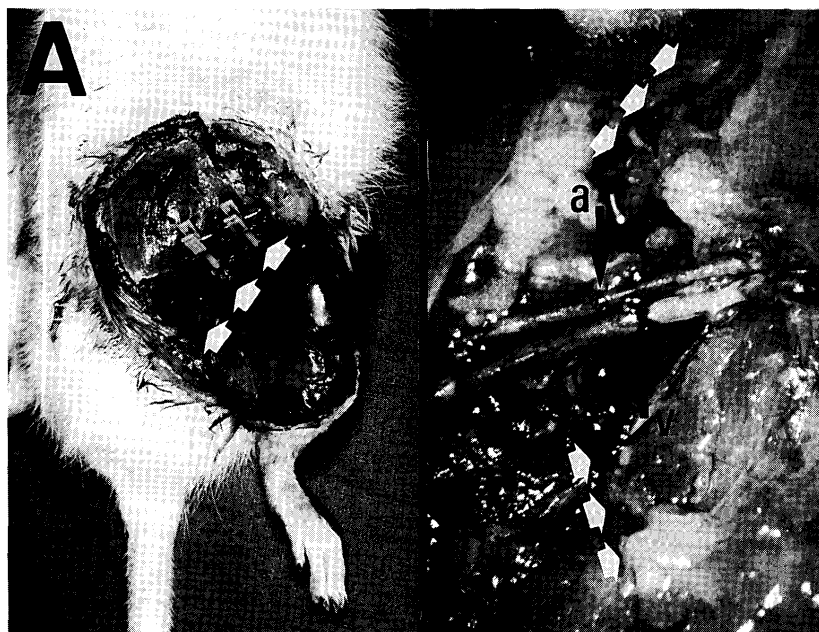


図5 筋縫合と血管吻合  
A. 筋縫合. 矢印は骨固定の後, 行われた筋縫合を示す.  
B. 血管吻合. 黒矢印 a は大腿動脈吻合部, 黒矢印 b は大腿静脈吻合部, 白矢印は筋縫合部を示す.

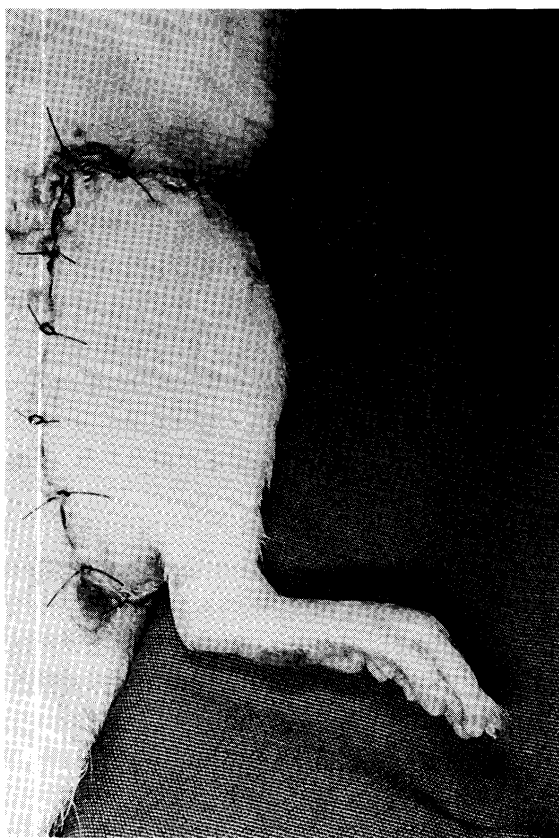


図6 再接着されたラット後脚

これには, 骨短縮及び補強的な筋縫合が大きな役割を果たしている。また, 患肢の内転及び内旋により, 更に吻合部の緊張を減少させることができる。血管

及び神経の吻合は, 手術顕微鏡下に10-0ナイロン糸を用いて縫合する<sup>12</sup> (図5 B)。

#### 第五段階: 創閉鎖と血管開存の確認

ヒトの切断指再接着術においては, 術後の腫脹のため, 吻合した動静脈に圧迫がかからないように皮膚を縫合する<sup>13</sup>。ラットの場合も同様の点に注意して, 創閉鎖する。創閉鎖後の再接着部における血管開存の確認方法としては, (1)皮膚色の変化(2)皮膚の緊張(3)皮膚温(4)リターン現象などがある。血管が開存していれば, 血管吻合後数分以内に, 患肢の皮膚色が, ピンクの色調に変化するのが確認できる (図6)。

#### 考 察

切断指 (肢) 再接着術に関して, 各組織修復の順序は, (1)骨(2)腱(3)血管(4)神経(5)皮膚である。断端部は組織の挫滅・引き抜きなどの混合損傷を伴っている。損傷組織は切除するが, この際, 皮膚のデブリジメントの量より, やや多く骨組織をデブリジメントすることで, 血管, 神経の緊張を軽減することができる。確認された神経は全て, 縫合しなければならない<sup>14</sup>。神経回復の良否は, 再接着指 (肢) の術後機能に大きく影響を及ぼすため, 顕微鏡下での正確な縫合が大切である。

ラット再接着モデルにおいても, これらの手術操作の順序と手技や組織再接着に対する考え方は全て同じである。ところが, これまでの報告された動物モデルは, 解剖を含めた手術手技について詳細に説明されておらず, 臨床の場を想定した再接着の技術

を獲得するモデルとしては、再現性の面で不十分であった。Ashur は、切断部位に関して、膝関節より中枢側、Yamada<sup>15</sup>らは、大腿中央部と抽象的で正確な解剖学的部位を説明していない。今回の実験で、我々は切断指(肢)モデルとしての再現性を考慮し、切断部位は鼠径部に皮膚切開後、鼠径靭帯と浅後腹壁動脈の中央部と設定した。また、この切断部位では、血管吻合において、大腿動脈が腸骨筋上を横切る際に、血管外側面より分岐する浅腸骨回旋動脈を結紮し、周囲の脂肪組織と共に牽引することにより、大腿動脈から浅後腹壁動脈の分岐まで約2 cm 展開され、吻合操作が容易になることが認められた。

本モデルとヒトの再接着術との相違点としては、骨固定術が挙げられる。ヒトの指節骨では、ミニプレートやKワイヤーを用いて骨固定を行っている。しかし、ラットの骨皮質は、薄く脆弱なため、ミニプレートで強く固定することは難しい。Whitney<sup>16</sup>は、Kワイヤーを用いて大腿骨骨固定を行っているが、16G針のほうがの方がより強固な骨固定が得られることが確認された。

我々は、標準モデルを確立するため、ラット後脚の外科解剖を明らかにした上で、同部位再接着術の手術過程を五段階に分け、更に、各段階における基本操作の一つ一つの手順を詳細に記述した。

これまで、実験者個々が、独自の再接着モデルを作成していたが、本モデルを活用するにより、共通の再接着モデル作成が可能となった。そして、本モデルは実際の再接着術における複雑な手順や手技に習熟することができ、術中に遭遇し易い問題点や様々な損傷状況に応じた対処法について学ぶことができる。更に、離断条件を変えることにより、各種の混合損傷を作成することができるという利点もある。

今後、この実験モデルを基盤とした研究を予定しており、臨床上問題となる再接着指(肢)のカウザルギー発生メカニズムの解明や複合組織同種移植の基礎研究に役立てたいと考えている。

## 文 献

1. Komatsu S, Tamai S (1968) Successful replantation of a completely cut-off thumb. *Plast Reconstr Surg* 42: 374-378
2. Henrich DE (1995) Composite graft survival. An auricular amputation model. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 10:1137-1142
3. Suzuki Y (1994) Microcirculatory analysis on the rabbit ear model. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg* 28:15-18
4. Haines P, Nicher LS, Morgan RF (1985) A digit replantation model. *Microsurgery* 6:70-72
5. Bao JY (1995) Rat tail: a useful model for microvascular anastomosis. *Microsurgery* 16:122-125
6. David TW (1989) Rat ear reattachment as an animal model. *Plast Reconstr Surgery* 85:782-788
7. Seaber AV (1985) Laboratory design in preparing for elective microvascular surgery. *Hand Clin* 1:233-245
8. Ashur H (1979) Replantation of completely amputated rat limbs. *Int Surg* 68:45-50
9. Gordon L (1977) Models and techniques for microsurgery research. *Orthop Clin North Am* 8:273-280
10. Greene EC (1963) ラットの解剖図譜. 望月公子訳監修学窓社.
11. Kessler I (1973) The grasping technique for tendon repair. *The Hand* 5:253-255
12. Buncke HJ (1975) Manual of microvascular surgery davies. Medical Center.
13. 磯貝典孝, 上石 弘(1996) 指末節部の再接着. マイクロサージェリー最近の進歩, 原料孝雄, 波利井清紀編著. 東京: 克誠堂, 129-139
14. Isogai N, Kamiishi H (1991) The observation of endothelial cell in vein graft by the enface silver staining method. *Microsurgery* 12:96-100
15. Yamada T (1994) Effect of parathyroid hormone on replantation of amputation legs in a rat model. *J Reconstr Microsurg* 10:61-64
16. Whitney TM (1997) Reduction of ischemic reperfusion edema with corticotropin-releasing factor (CRF) in rat hind limb replantation. *Ann Plast Surg* 38:416-419