

皮膚表面電気刺激による大腿筋の筋力強化

——膝靱帯損傷後のギプス固定例に対して——

大阪労災病院	川村次郎
(共同研究者) 同	小野仁之
同	江崎重昭
同	広瀬一史
川崎医科大学	伊勢真樹
大阪電気通信大学	西原一嘉
大阪府立大学	東山篤規

Electrical Stimulation in Strengthening Thigh Musculature After Anterior Cruciate Ligament Surgery

by

Jiro Kawamura, Hitoshi Ono, Shigeaki Ezaki

and Hitoshi Hirose

Osaka Rosai Hospital

Masaki Ise

Kawasaki Medical School

Kazuyoshi Nishihara

Osaka Electro-Communication University

Atsuki Higashiyama

Osaka Prefectural University

ABSTRACT

Twenty patients who received anterior cruciate ligament reconstruction were divided randomly in the electrical stimulation group (n=10) or the control group (n=10). Rehabilitation programme in both groups were exactly identical except using electrical stimulation or not.

Patients in the electrical stimulation group received low frequency electrical stimulation fifteen minutes a day simultaneously on quadriceps

femoris and hamstring muscles.

Results indicated that the thigh circumference changes and period of disappearance of the extension lag after the surgery was improved in the electrical stimulation group, but not significant statistically. Period of disappearance of collapps of knee joint during walking was significantly more rash in the electrical stimulation group than in the control group.

We are now planning to make further improvement of programme of electrical stimulation and methods of evaluation.

要 旨

膝前十字靭帯損傷の再建術を受けた20例を、無作為に刺激群10例と対照群10例に分け、電気刺激以外はまったく同じリハビリテーション・プログラムを実施した。刺激群には、大腿四頭筋とハムストリングスの同時電気刺激を、1日1回、15分間加えた。大腿周径の変化とエクステンション・ラグの消失時期は、電気刺激により改善する傾向を認めた。歩行中の膝折れの消失時期は、電気刺激により早められ、有意であった。電気刺激による、再建靭帯の再断裂、ゆるみなどは認めなかった。

電気刺激による筋力強化法は、安全で確実な方法であることが確認できたが、さらに効果的なものとするため、今後装置の改良、評価法の改善を行っていくつもりである。

はじめに

皮膚表面から電気刺激を加え、筋力を強化してスポーツ選手の記録を向上させる試みはすでに行われており、ソビエトの選手に対するものがロシア法としてとくに有名である¹⁾。電気刺激による筋力強化の有利な点は、対象とする選手ごとに、その選手に必要な最大筋力や持久力などに応じて最適の条件を設定し、合理的な訓練を行えること

である。このような電気刺激の特徴は、スポーツ外傷後のリハビリテーションにおける微妙な条件下の訓練を、安全・確実に行うためにも役立つと考えられる。われわれは、スポーツによって膝前十字靭帯(以下 ACL) 損傷を生じ、靭帯の再建手術を受けた患者に、電気刺激による大腿筋力の強化を行い、良好な結果をえたので報告する。

I. 方 法

1. 症例：対象症例は、昭和62年1月から昭和63年3月までの期間に、膝前十字靭帯損傷に対して、大阪労災病院整形外科にて再建手術を施行し、大阪労災病院リハビリテーション診療科にて術後のリハビリテーション・プログラムを実施した20名である。手術の方法は、損傷膝の膝蓋靭帯の中央3分の1を遊離靭帯として利用し、前十字靭帯を再建する自家靭帯遊離移植法である。遊離移植靭帯の両端は、脛骨側は螺子にて、大腿骨側はプルアウトワイヤ法にて固定された²⁾。

20名のうち、無作為に選んだ10例(以下刺激群)には電気刺激を行い、残りの10例を対照群とした。刺激群は、男性5例、女性5例、平均年齢24才、受傷から手術までの期間は平均20カ月、半月板、側副靭帯などの損傷を合併するもの6例であった。非刺激群は、男性3例、女性7例、平均年齢22才、受傷から手術までの期間は平均15カ

月，半月板，側副靭帯などの損傷を合併するもの8例であった。

2. 電気刺激の方法：両群とも，再建手術終了後の手術台上で，大腿部に電極を貼付した．使用した電極は， $9 \times 4.5\text{cm}$ の導電性ゴムに導電性ゲルを付着させた電極（メドトロニック社，ニューロ・エイド，製品番号 7790）で，電極自体が粘着性を有し，無刺激性で，長期間の電気刺激を安定して行える特徴がある．電極の貼付位置は，大腿四頭筋に対しては大腿前面の上部および下部に，ハムストリングスに対しては大腿後面の上部および下部である．それぞれの電極にリード線を取り付け，リード線を上方に出してから大腿から下腿部にかけてのギプス固定を行った．ギプス固定の膝屈曲角度は約50度とした（図1）．

電気刺激は，術後2日目から12日目，平均6日目から開始した．電気刺激装置はメドトロニック社のレスポンドを用いた（図2）．刺激は大腿四頭筋とハムストリングを同時に，周波数 30Hz，パルス幅 0.2msec の矩形波を，立ち上がり時間 0.5 sec で5秒間刺激し，5秒間休止し，1日1回15分間行った．電極は大腿の前後面とも，近位側を刺激装置の+側に，遠位側を-側にそれぞれ

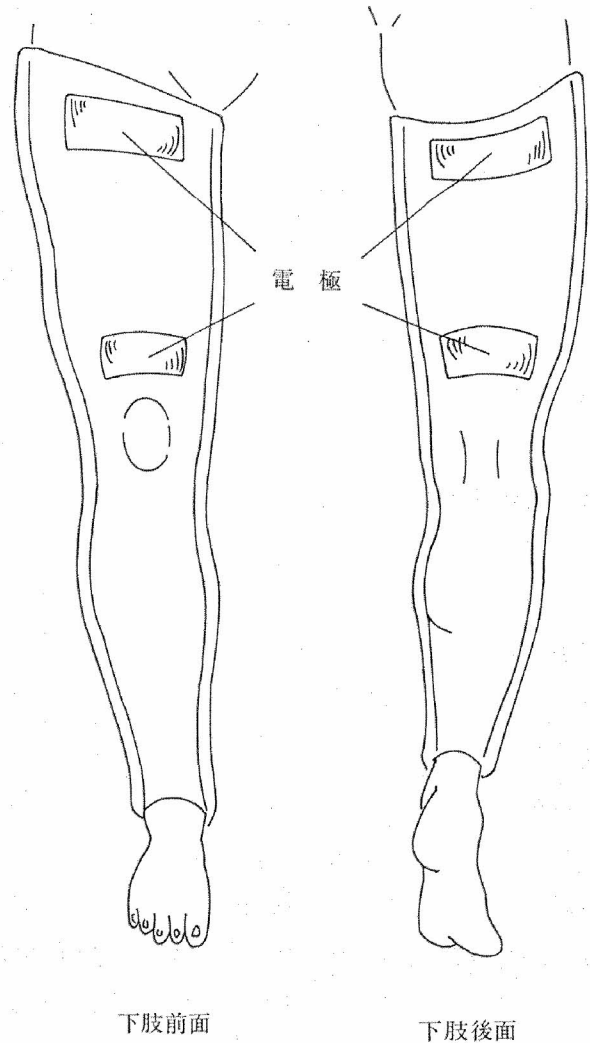


図1 電極の貼付位置とギプス固定の範囲

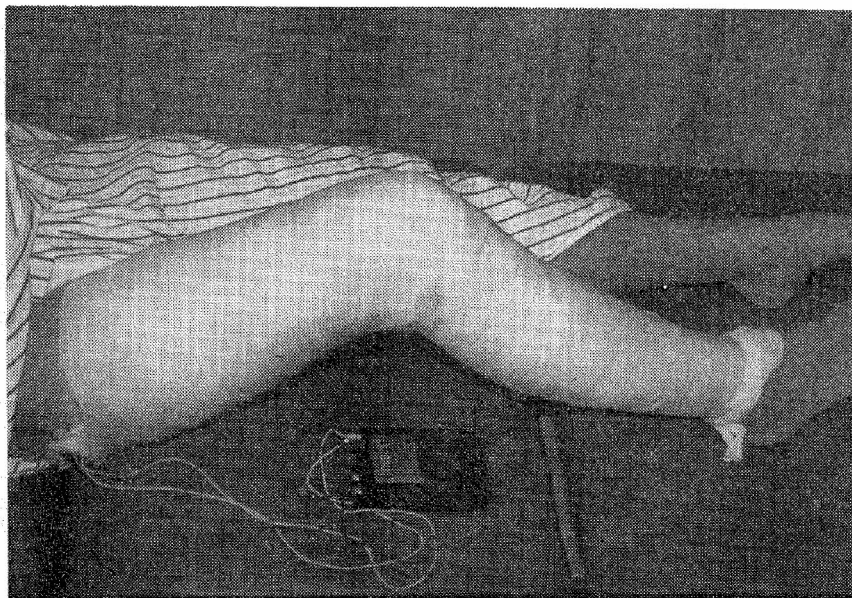


図2 ギプス固定期間中の電気刺激

接続した。刺激の強さは、刺激群では筋収縮を十分生じ、患者の我慢できる範囲とし、対照群では筋収縮を起こさず、電気刺激を感じる最低の強さとした。ギプス固定除去後も、リハビリテーション・プログラムの実施期間中は電気刺激を継続した。

3. リハビリテーション・プログラム：電気刺激をのぞくりハビリテーション・プログラムは、刺激群と対照群の両群とも同一である。ギプス固定は4週間行った。屈曲方向の関節可動域訓練は、術後6週までに屈曲120度まで、術後8週までの期間に全可動域を獲得することを目標に、自動および他動運動により行った。伸展方向の関節可動域訓練は他動運動のみによって、術後6週までに伸展マイナス15度まで、術後8週までに全可動域を獲得することを目標として行った。筋力強化訓練は、ギプス固定期間中からリハビリテーション・プログラム期間中を通じて、大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮を随時行うように指導し、術後5週からハムストリングスの抵抗運動を、術後9週から大腿四頭筋の抵抗運動を開始し、術後11週から最大筋力による抵抗運動を行った。体重負荷は術後9週から、体重の3分の1か

ら開始し、術後11週から全荷重とした（図3）。

4. 評価法：電気刺激の効果の評価は、大腿周径の測定、エクステンション・ラグの消失時期、歩行中の膝折れの消失時期、それ以外の一般的臨床症状の観察を、術後6カ月まで行った。

① 大腿周径の測定：膝関節裂隙より15cm上方の大腿周径を、術直前およびギプス除去時から毎週測定した。

② エクステンション・ラグの消失時期：患者を腰掛けさせて自動的な最大膝伸展を行わせ、他動的な膝伸展可動域との差（エクステンション・ラグ）の有無を検査した。エクステンション・ラグの検査は、術後8週から毎週行った。

③ 歩行中の膝折れの消失時期：歩行開始後に、立脚相初期における膝折れの有無を、毎週患者から報告を受けて記録した。

④ 臨床症状の観察：膝関節の関節可動域テスト、Lachman テスト、大腿四頭筋およびハムストリングスの筋力テストなどを、適当な時期に行った。

II. 結 果

1. 大腿周径について：ギプス除去時の大腿周

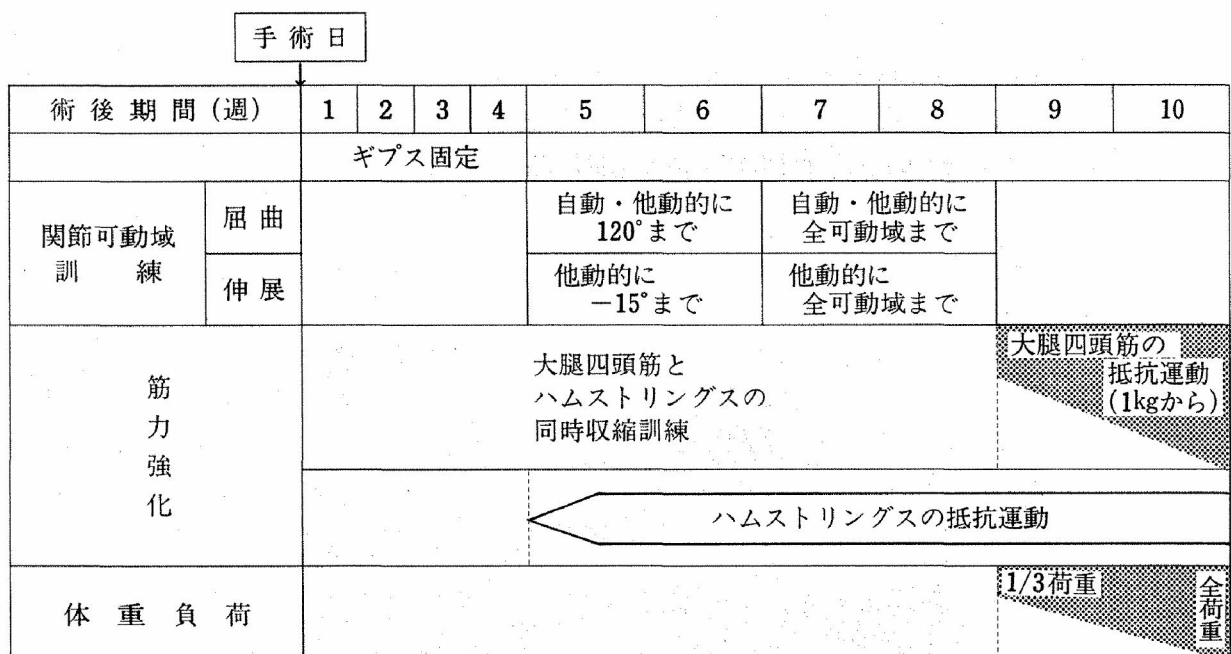


図3 リハビリテーション・プログラム

径は、術前と比べて刺激群では96%に、対照群では92%に減少していた。ギプス除去以後は、両群とも周径の変化はほとんどなかった。分散分析によれば、術後期間要因の主効果のみが有意であった ($F(6, 108) = 15.8, p < 0.001$)。電気刺激条件の要因の主効果と、電気刺激条件と術後期間の交互作用は有意でなかった (図4)。

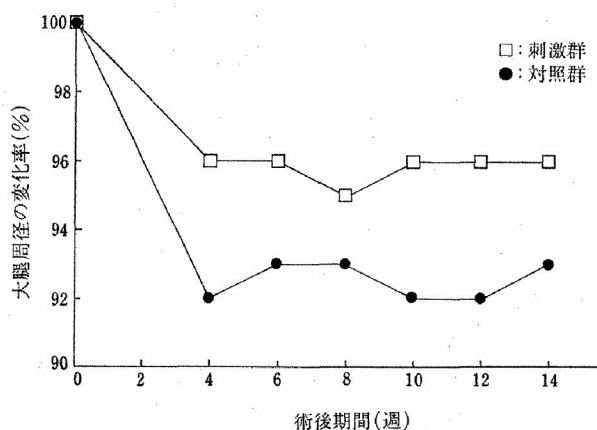


図4 大腿周径の変化率

2. エクステンション・ラグの消失時期について：刺激群のエクステンション・ラグは術後8週から18週の間、平均11週で消失した。対照群のエクステンション・ラグは、9例については、術後8週から20週、平均12週で消失したが、1例は術後20週までには消失しなかった。最後までエクステンション・ラグの消失しなかった1例をのぞく19例のt検定によれば、両群間に有意差がなかった (図5)。

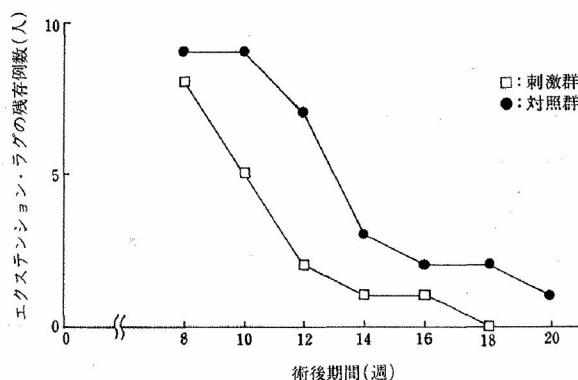


図5 エクステンション・ラグの消失時期

3. 膝折れの消失時期について：歩行時の膝折れは、刺激群では術後10週から18週、平均12週で消失した。対照群では、9例については、術後10週から24週、平均15週で消失したが、1例は術後24週までには消失しなかった。膝折れの消失しなかった1例をのぞく19例のt検定 ($f(17) = 2.27, p < 0.05$) によれば、有意であった (図6)。

4. 臨床症状：刺激群、対照群とも、再建靭帯の再断裂やあきらかな弛緩を認めなかった。日常生活上支障をきたすような関節可動域制限を認めず、患者の自覚的評価も満足すべきものであった。

III. 考 察

1. ACL 損傷のリハの問題点：できるだけ早期の社会復帰を実現し、さらにスポーツへの復帰を果たすためには、ACL 再建手術後すぐにも大

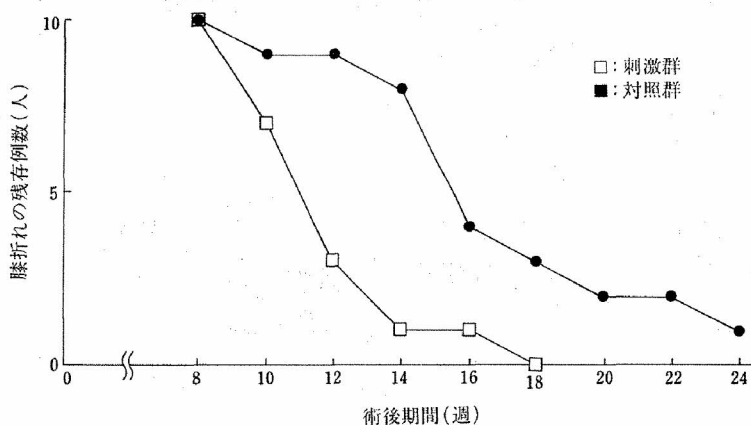


図6 膝折れの消失時期

腿筋の強化訓練を開始する必要がある。しかし、再建手術後の ACL は機械的強度が弱く、その完全修復には9カ月以上は必要といわれ、その期間中に過度の緊張力を加えることは再断裂の危険を生じる³⁾。大腿四頭筋には、脛骨を前方へ引き出し、ACL に対し引張り力として働く作用があるため、従来は ACL 再建術後の大腿四頭筋強化は、してはならないこととされてきた(図7)。

最近、このような危険を避けて筋力強化を行う

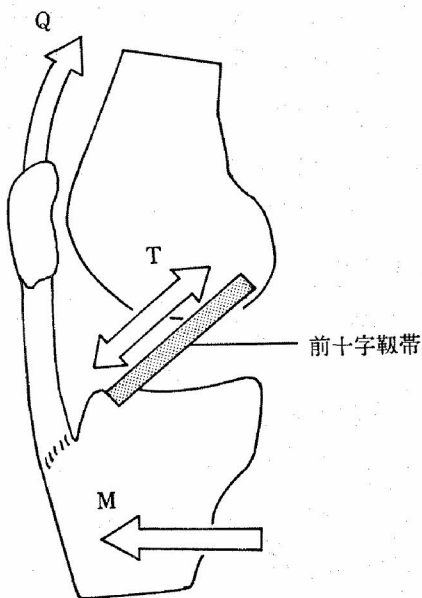


図7 大腿四頭筋の収縮は前十字靭帯の緊張を生じる

ための訓練方法として、ACL に緊張のかからない関節角度である膝関節70度以上屈曲位における大腿四頭筋の等尺性収縮と、膝関節に伸展モーメントを生じない大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮が用いられるようになった。しかし、膝屈曲位における訓練のみでは、臨床的に重要な膝伸展位における筋力を十分には強化できないと考えられ、また同時収縮によってえられる筋収縮力は、筋電図学的解析から、単独最大随意収縮力の30~60%と推定されており^{4,5)}、同時収縮のみによっては、十分な筋力強化がやはり困難と考えられる。

電気刺激では、筋収縮力を正確にコントロールしながら、拮抗筋の同時収縮を起こすことは容易であり、ACL 再建術後のリハビリに適した、安全で確実な筋力強化が可能である。

2. 電気刺激法について：麻痺筋を電気刺激によって治療することはかなり以前から行われているが⁶⁾、最近のエレクトロニクス技術の進歩にしたがって装置の小型・軽量化が進み、正常筋の筋力強化にも電気刺激が用いられるようになってきている⁷⁾。体表面から電気刺激によって筋収縮を起こす方法には、神経を介して刺激する方法と筋

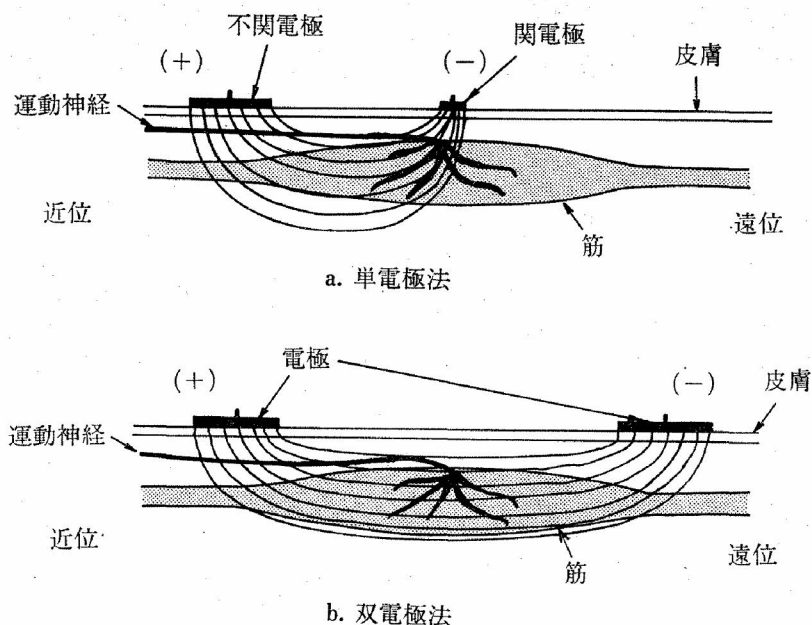


図8 筋の刺激法

を直接に刺激する方法の2種類がある。筋の直接刺激法にも、モータポイントとよばれる興奮しやすい小さい領域を小さい関電極で刺激する単電極法と、モータポイントをはさんで同じ大きさの二つの電極によって刺激する双電極法がある(図8)。

大腿筋の強化のように多数のモータポイントを同時に刺激したいときには、双電極法によって筋を直接刺激する方法が適している⁸⁾。

電極は電気抵抗が低い、電気刺激感が良い、長期間使用しても皮膚がかぶれない。取り扱いが簡単であるなどの条件に、経済性が加わって選択される。従来の金属板と水を含んだ布などで構成される電極は、安価であるばかりでなく、電気抵抗が低く、電気刺激感もすぐれているが、使用のたびに水を含ませる手間が必要であり、水分が蒸発するため長時間刺激に適さず、固定のためのバンドが必要などの欠点もある⁹⁾。導電性ゴム電極は、経済性では金属板電極に劣るが、薄く製作で

き、柔軟性があり、粘着性のある半固形ゲルと一体化が可能であるので固定のためのバンドなどが必要でないなどの特徴をもつ(図9)。

電気刺激装置：皮膚表面からの電気刺激では、電気刺激によって火傷を生じたり、不快感を与えることなく、十分な筋収縮をえられることが必要である。実際にもちいられている刺激波形は、低周波と断続高周波の二つに大別できる(図10)。低周波はもっともよくもちいられ、実際に臨床的にもちいられているのは周波数20~50Hzの矩形波である。一般に最大収縮力の強化のためには50Hz付近の高い周波数を、持久力の強化には20~30Hzの低い周波数をもちいる。パルス幅は長いほど筋収縮力が大きくなるが、不快感も強くなるので、普通は0.1~0.3msecの範囲をもちいる。刺激の強度は、電圧の振幅を調節する定電圧出力と電流を調節する定電流出力があるが、定電流出力の方が皮膚抵抗の影響を受けにくく、振幅の大きさに応じて安定した刺激効果が得られる利点がある

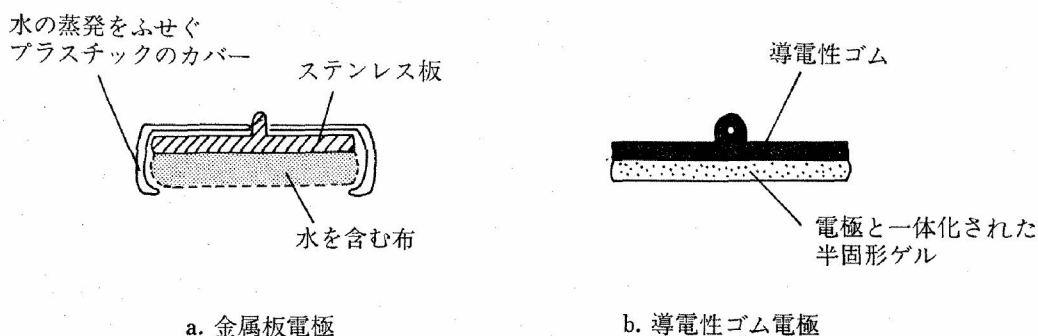


図9 代表的な表面電極

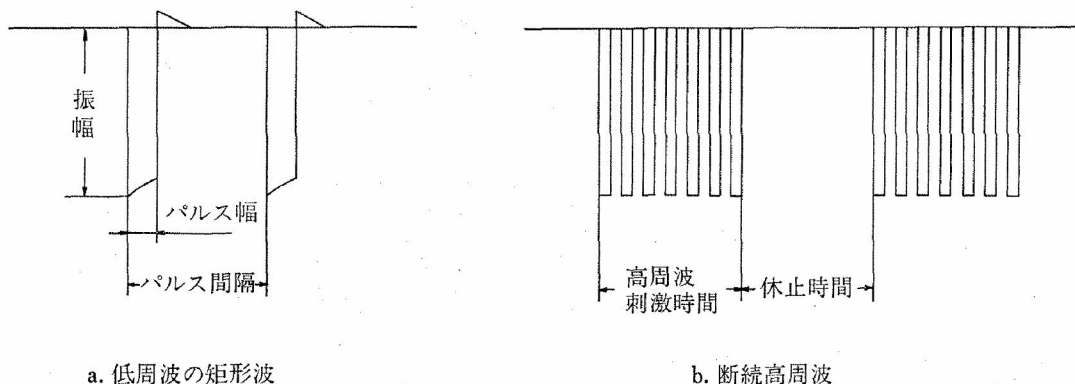


図10 刺激波形

ある。しかし定電流出力の場合に、もし電極と皮膚間の密着性が悪いと、皮膚のごく狭い領域に電流が集中して皮膚を損傷する危険があり、両方式には一長一短があるので、実際には両方式がもちいられている。筋収縮をおこすために必要な振幅は、電圧で数10Vから100V、電流で数mAから数10mAの範囲である。連続的に刺激すると筋疲労を生じるので、刺激時間(on-time)と休止時間(off-time)を設けるが、刺激時間と休止時間の比、duty cycleは1:1から1:5の間が普通である。刺激感を和らげ、滑らかな運動をえるため、刺激時間の開始時には振幅が緩やかに上昇する立ち上がり時間(rise-time)を設ける。

高周波は、皮膚の電気抵抗が低く、不快感もすくないことからもちいられる。しかし高周波では筋の収縮が起こらないので、周期的に断続することにより筋収縮をえている。断続高周波は、ロシア法の紹介以来カナダとアメリカでよくもちいられており、搬送周波数としては2.5KHz付近、変調周波数は50Hz付近、刺激時間10秒、休止時間50秒、10回(10/50/10法)、一日一回がよくもちいられる^{10,11)}。断続高周波の欠点は、消費電流が大きく、装置が大きくなり、電池駆動も困難なので、携帯性に難を生じることであろう。

3. 評価法：筋力強化の効果の評価は筋力の測定によって行うのが自然であるが、すでにのべたような危険があるので、今回は間接的に筋力を評価した。大腿周径の測定は簡便で安全な方法であるが、当然誤差も大きく、われわれの測定結果でも、電気刺激により改善する傾向がみられたが、有意ではなかった。エクステンション・ラグと歩行中の膝折れは、臨床的に重要な膝伸展位付近の大腿四頭筋の筋力を反映していると考えられる。エクステンション・ラグは電気刺激群で消失時期が早くなる傾向がみられたが有意ではなかった。膝折れの消失時期は刺激群で早く、有意でもあった。臨床的には、Lachmanテストなどによって

も、再建靭帯の断裂やゆるみなどの症状はみられず、電気刺激の安全性は確かめられた。

む す び

ACL 損傷の再建術後例に対する電気刺激による筋力強化法は、安全で効果的な方法であることを確認することができた。今後はさらに、効果的で電気刺激の不快感も少ない刺激法、より客観的な評価法を開発していきたい。

文 献

- 1) Johnson D.H., Thurston P., Ashcroft P.J.; The Russian technique of faradism in the treatment of chondromalacia patellae. *Physiotherapy Canada*, **29**: 266—268 (1977)
- 2) 広瀬一史, 土井照夫, 尾原善和ほか; 自家遊離膝蓋靭帯中 $\frac{1}{3}$ 使用による前十字靭帯再建術の検討, 中部整災誌, **29**: 336—338 (1986)
- 3) Pascale M.S. & Indelicato P.A.; Anterior cruciate ligament insufficiency of the knee. Grana W.A., Lombardo J.A.(eds), *Advance In Sports Medicine and Fitness*, Vol. 1, Year Book, Chicago, pp 183—215 (1988)
- 4) 安田和則, 佐々木鉄人, 白土修ほか; 膝前十字靭帯再建術後の筋力訓練(第1報) —大腿四頭筋および膝屈筋の単独等尺性収縮が前十字靭帯に及ぼす力—, 日整会誌, **59**: 1041—1049 (1985)
- 5) 安田和則, 佐々木鉄人, 白土修ほか; 膝前十字靭帯再建術後の筋力訓練(第2報) —大腿四頭筋および膝屈筋同時等尺性収縮法の開発とそのバイオメカニクス—, 日整会誌, **59**: 1051—1058 (1985)
- 6) 川村次郎; 義肢に血の通ふまで (Neural prostheses のすすめ), バイオメカニズム学会編, バイオメカニズム **7**, 東京大学出版会, pp 1—4 (1984)
- 7) Weineck J. (有働正夫監訳, 中山治人, 中山エバ共訳); 電気刺激, 最適トレーニング, オーム社, pp 95—96 (1984)
- 8) 川村次郎; 機能的電気刺激—表面電極法, 日本災害医学会会誌, **36**: 22—28 (1988)
- 9) Nelson H.E., Smith M.B., Bowman B.R., Waters R.L.; Electrode effectiveness during transcutaneous motor stimulation. *Arch Phys Med Rehabil*, **61**: 73—77 (1980)

10) Kramer J.F., Mendryk S.W.; Electrical stimulation as a strength improvement technique; *A review J Orthop Sports Phys Ther*, 4 : 91—98 (1982)

11) Owens J., Malone T.; Treatment parameters of high frequency electrical stimulation as established on the Electro-Stim 180, *J Orthop Sports Phys Ther*, 4 : 162—168 (1983)