

## 原著論文

# 前十字靭帯再建術後における拮抗筋電気刺激を用いた リハビリテーションの有効性

櫻井 敬 晋<sup>1)</sup> 笹木 正 悟<sup>1)</sup>  
久保 慶 東<sup>2)</sup> 福 林 徹<sup>3)</sup>

**Effect of the Musculoskeletal Rehabilitation with Electrical Stimulated Eccentric Contraction of Antagonist on the Quadriceps Femoris after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction:**

Takakuni Sakurai<sup>1)</sup>, Shogo Sasaki<sup>1)</sup>, Yoshiaki Kubo<sup>2)</sup>, Toru Fukubayashi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Judo-therapy, Faculty of Health Sciences, Tokyo Ariake University of Medical and Health Sciences, Japan.

<sup>2)</sup> The Japan School of Judo-Seifuku Therapy, Japan

<sup>3)</sup> Faculty of Sports Science, Waseda University, Japan

**Abstract:** Regaining muscle volume and strength is important for recovery and a quick return to sport activities following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. Previous studies reported a long term decrease in muscle volume and strengthen after surgery. However, no research is available that identifies the recovery process in muscle function.

Neuromuscular electric stimulation (NMES) is widely used to lessen muscle atrophy, to strengthen muscles, and to improve function in people with neuromuscular disabilities. NMES research typically focuses on the direct stimulation of the muscles to be exercised. Although this approach may be little more effective than traditional resistance training programs, we decided to investigate a new rehabilitation approach with NMES that the antagonist of the muscle being exercised was stimulated.

The purpose of this study is to investigate the recovery from ACL reconstruction with electrical stimulated eccentric contraction of antagonist on the quadriceps femoris compared with traditional resistance training by measuring the quadriceps volume, strengthen, and muscle activation.

This study found that the muscle exercise with electrical stimulated eccentric contraction of antagonist is more effective in increasing quadriceps volume, strengthen, and muscle activation than is the conventional rehabilitation program we used in this study. This result suggests that eccentric contraction of antagonist with NMES might speed up recovery from ACL reconstruction.

**Key words:** ACL reconstruction, electrical stimulation, antagonist

**要旨:** 前十字靭帯 (ACL) 再建術後のリハビリテーションには長期間を要することが周知される一方、競技復帰に向けて加速化が図られている。最近では回復度合いや競技レベルなどに応じたリハビリテーションが一般的になってきている。しかしながら、術後に内側広筋を中心とした筋萎縮の発症について多くの報告があり、この防止が ACL 再建術後のリハビリテーションの検討課題のひとつである。筋萎縮の要因として、再建靭帯の生体への適合までの期間は、再断裂リスクなどの観点から、膝関節に対するリハビリテーションに限界があることが挙げられる。そこで今回、低周波電気刺激を用い、ACL 再建術後の筋機能低下に対する新たなリハビリテーションメニューの構築を目的とし、拮抗筋電気刺激による遠心性収縮を伴う運動連鎖筋力増強法を ACL 再建術後のアスレティックリハビリテーションに応用し、その効果を検討した。その結果、通常のアスレティックリハビリテーションに比べ、本法を用いた場合に筋トルク、神経筋協調性、筋体積の回復に効果的な結果が得られた。このことから、本法は ACL 再建術後のリハビリテーション法として有効であると示唆された。

**キーワード:** 前十字靭帯再建、電気刺激、拮抗筋

<sup>1)</sup> 東京有明医療大学保健医療学部柔道整復学科 E-mail address: t-sakurai@tau.ac.jp

<sup>2)</sup> 日本柔道整復専門学校

<sup>3)</sup> 早稲田大学スポーツ科学学術院

[平成 22 年 12 月 8 日受付, 平成 23 年 2 月 7 日受理]

査読者: 泉 秀幸, 寺井 政憲

## I. はじめに

前十字靭帯（以下 ACL）の損傷は、ノンコンタクトスポーツ・コンタクトスポーツ両方において多くみられる傷害でスポーツパフォーマンスに大きな影響を与えるため、スポーツ外傷では最も注目されている疾患の1つである。従来、ACL 損傷に対する研究は再建術法<sup>1,2)</sup>、あるいは再建術後の筋力低下や動揺性に対する定量的評価などの面から数多く検討され報告されてきている<sup>3-7)</sup>。その損傷のメカニズムはコンタクト・ノンコンタクトで異なるが、スポーツ活動への復帰には ACL 再建術とその後のアスレティックリハビリテーションが不可欠である<sup>8-10)</sup>。しかし ACL 再建術後、長期にわたり膝伸筋群の筋萎縮および単位面積当たりの筋力（固有筋力）低下が生じることが報告されている<sup>11)</sup>。このことが筋機能の改善のためのアスレティックリハビリテーションを行ったとしても復帰に時間を要することや、術前のスポーツレベルまで回復できない1つの要因となるといわれている<sup>12)</sup>。

ACL 再建術後の大腿四頭筋の筋力低下について Caillet<sup>13)</sup>は、膝関節周辺の痛みが活発な大腿四頭筋の収縮を抑制して徐々に筋力低下、さらに萎縮を起こさせるとし、痛みによって起こる不安が関節を動かす大腿四頭筋の収縮を躊躇させ、萎縮を起こすのであろうと述べている。また大腿四頭筋の中でも特に内側広筋は萎縮しやすいと言われているが、Ludvik ら<sup>14)</sup>は内側広筋長線維と斜線維の組織学的、形態学的特徴について内側広筋の長線維は斜線維に比べて、Type I 筋線維の比率が有意に高く、Type IIb 筋線維の比率が有意に低いと報告している。また、Type I、Type IIa 筋線維の直径が有意に小さいがその差はわずかとして、表在部よりも深層部で Type I 筋線維の比率が増加し、深層部より表在部で Type IIa 筋線維、Type IIb 筋線維の比率が増加したと述べている。このことは萎縮した筋の体積を元の体積まで回復させたとしても、筋力発揮の特性が変化する可能性を示唆している。

また神経生理学的側面から井原<sup>15-17)</sup>は、諸活動において身体を制御するのは上位中枢によって統合された運動制御としての神経運動協調機構であり、体幹-股-膝-足関節の動きが連動して始めて精巧巧妙な運動が可能になるが、従来のリハビリテーションは個々の細分化された訓練であると指摘し、ある特定の筋力を強化するだけでは意味がないと述べている。また、Ia 線維からのフィードバックは、高閾値の運動神経を動員するのに重要だといわれているが、ACL 損傷膝では最大膝伸展筋力が低下するとの報告がある<sup>11)</sup>。Konishi ら<sup>18)</sup>は ACL 等を含む Joint Receptor からのフィードバックが阻害されることにより最大筋力が低下する理論的背景として、“final common input hypothesis”<sup>19,20)</sup>とよばれる、関節内に存在するメカノレセプターからのフィードバックが、 $\gamma$  運動神経を興奮させ  $\alpha$  運動神経に影響をあたえるという仮説を元に、健常者の膝関節包内に局所麻酔剤を注入し、関節内のメカノレセプターか

らのフィードバックを遮断することによって、 $\gamma$  運動神経へのフィードバックが低下し、さらに Ia 線維のフィードバックが低下することを検証し、結果から高閾値の運動神経の動員が阻害されている可能性があると述べている。さらに ACL 損傷患者の筋力低下も ACL 損傷によって、もともと関節包内のメカノレセプターからのフィードバックが抑制されているため健常者とは違った応答を示すと結論づけ、膝伸展トルクの回復には関節内のメカノレセプターなどの神経生理学的な回復が重要であるとしている。ACL 再建患者の中で術後1年経過しても膝伸展力が回復しきらない症例がみられるが、再建 ACL の神経学的回復が影響を及ぼしている可能性が考えられる<sup>21)</sup>。

一方、リハビリテーションを行う上で考慮しなければならないもう1つの側面として、器質的回復が挙げられる。器質的回復に対し、機能的回復とは文字通り膝関節の筋力や全身運動能力の回復と考えられ、術後リハビリテーションの中で主にアスレティックリハビリテーションとして認知されている部分である<sup>22)</sup>。それに対し、器質的回復とは骨孔の閉鎖、再建 ACL への再生血管の流入といったリモデリングが挙げられ、少なくともリモデリングの不十分な術後8週までは再建 ACL の脆弱性と再断裂のリスクを認識しなければならない<sup>23)</sup>。

## II. 目的

前述のように ACL 再建術後のリハビリテーションには様々な障壁がある。中でも筋萎縮に代表される筋機能の低下を如何に防ぐかが重要な問題である。Yanagi ら<sup>24)</sup>は拮抗筋を電気刺激し遠心性収縮を行う筋力増強法を提唱しているが、名護<sup>25)</sup>は本法の利点として「①主動、拮抗筋が同時収縮、②主動筋は自発求心性収縮、拮抗筋は電気刺激遠心性収縮、③電気刺激が届かない深部筋は自動運動で収縮、④運動時骨長軸に荷重が加わる、⑤機器がコンパクト、⑥電気刺激は医療に用いられる安全な技術、⑦電気刺激遠心性収縮は筋張力が大きく、より弱い刺激電流を用いることができる、⑧個々の筋への電気刺激は短時間、⑨自発収縮を行うため遅筋線維も賦活する、⑩重力に抗する運動ではなくても、拮抗筋の抵抗により人工的に運動抵抗を作製でき、体位を選ばない」とし、廃用性筋萎縮防止を目的として筋力増強法を検討している。

そこで今回我々は、柔道整復師の臨床でもしばしば用いられる低周波電気刺激を用い、ACL 再建術後の筋機能低下に対する新たなリハビリテーションメニューの構築を目的とし、拮抗筋の遠心性収縮を伴う運動連鎖筋力増強法を ACL 再建術後のアスレティックリハビリテーションに応用し、その効果を検討することとする。

## III. 対象

研究に影響を与えるような障害を合併していない ACL

の再建を行った患者の中で、東洋医学研究所附属クリニックでのリハビリテーション経過を観察できた16例（男性10例、女性6例）を対象とした。平均年齢は23.5±3.9歳、受傷側は左7例、右9例である。スポーツレベル別では、競技レベルの活動をしている者13例、レクリエーションレベルの者3例である。コントロール群9例（男性6例、女性3例）と拮抗筋刺激群7例（男性4例、女性3例）に群分けを行い、拮抗筋刺激群には通常のリハビリテーションに加え、拮抗筋の遠心性収縮を伴う運動連鎖筋力増強法を施行した。コントロール群には電気刺激を行わずに拮抗筋刺激群と同様の施行を行った。ACLの再建術式は同側の半腱様筋腱を用いた二重束再建術を採用した。リハビリテーションメニューはACL再建術後の標準的なものを採用し、術後6ヶ月経過時に元の競技に復帰することを目指した。なおジョギング及びダッシュは60deg/secの等速性膝伸展運動でピークトルク値の体重比の健患比がそれぞれ60%と80%に回復した段階で許可した。アジリティトレーニングを行なって不安感や怖さがなくなり、スムーズな動きを習得できた段階で元のスポーツへの復帰を許可した。装具は術後1ヶ月までは日常生活でも装着させたが、それ以降はリハビリテーションを行なう際や元の競技に復帰した後に適宜装着させた。

#### IV. 方 法

##### 1. 拮抗筋電気刺激による ACL リハビリテーション法 術後2ヶ月まで

腹臥位にて膝関節75°で伸展ブロックがかかる肢位にて大腿二頭筋筋腹に低周波刺激装置 Compex（日本シグマックス社製）の電極を貼付し筋収縮を確認した後、漸増的に電圧を上げ、それに抗して大腿四頭筋に意識をさせつつ、膝関節を伸展させた。この際、再建術後早期はダイナミックな動きではなく、電気刺激によるハムストリングの収縮に抗して膝関節75°屈曲位をキープするように指導した（図1a）。術後経過とともに膝関節の屈曲角度を45°まで徐々に浅くしていくよう施行した。大腿四頭筋側の電気刺激であるが、ハムストリングの刺激と同日に十分な休息の後、肢位は座位にて膝関節75°で伸展ブロック、90°で屈曲ブロックがかかる肢位にて、内側広筋と外側広筋部に電極を貼付し施行した。ハムストリングを電気刺激した時と同様に、筋収縮を確認した後、漸増的に電圧を上げ、それに抗して膝関節を伸展位をキープさせた（図1b）。膝関節90°で屈曲ブロックをかける目的は半腱様筋を用いた再建術の場合、膝伸展と屈曲のバランスが崩れ屈曲方向に進んだ際に、残存する半腱様筋の近位短縮の危険性があり、それを防止するためである。

##### 術後4ヶ月まで

正常歩行が可能となった後のリハビリテーションであるが、疼痛や関節水腫のない状態を確認し施行した。まず膝

伸展方向の運動は、正常歩行獲得以前はダイナミックな運動は行わずに施行したが、正常歩行獲得後はハムストリングの収縮に抗して膝関節を能動的に伸展させる運動を施行する。実際の施行方法は、電極貼付位置を術後早期リハビリテーションと同様とし、座位にて膝関節約80°の位置からハムストリングに電気刺激を加え、屈曲方向に下腿が動かされはじめる位置まで刺激強度を上昇させる。下腿が動き出すことが確認された後、それに抗して膝関節45°屈曲位まで膝関節伸展運動を施行した。術後経過とともに、最終的には最大屈曲位から最大伸展位まで運動域を広げた。次に膝屈曲方向の運動であるが、電極貼付位置は正常歩行獲得前と同様とし、座位にて膝関節45°屈曲位から90°屈曲位まで膝関節屈曲運動を行った。伸展運動と同様に術後経過とともに、最終的には最大伸展位から最大屈曲位まで運動域を広げた。この際屈曲を意識させるのではなく、遠心性収縮する大腿四頭筋に意識をさせた。

##### 2. 等尺性膝伸展筋力の測定

BIODEX SYSTEM 3（BIODEX社製）を用い、等尺性膝伸展筋力を測定した。測定時期は術後4, 6, 9ヶ月とし、患者を座位姿勢にて測定用の椅子に肩、腹、大腿部を専用ベルトにより固定し、測定角度は膝関節45°屈曲位とした（図1c）。測定は2回ずつ最大努力により試行させ、全例に対して、ピークトルク値(ft-lbs)の体重比(% body/weight, % BW)を算出した。

##### 3. 筋放電量の記録

膝伸展トルクの測定と同時に内側広筋の表面筋電図を1000Hzで記録した（バイオモニター ME6000：MEGA社製）。

表面電極を装着するに先立ち、電極間抵抗（皮膚抵抗）を減らすため電極装着部位を消毒用アルコールで皮膚上の油脂を拭き取り、角質層を除去した後に測定を行った。信号ミスなど内側広筋の波形に影響を及ぼすような異常がないかを確認する目的で、大腿直筋、外側広筋の筋電波形も記録した。

直径1.5cmのディスプレイ型 Blue Sensor 電極（日本メディックス社製）を電極間距離3cmで筋の走行に合わせて装着した（図1d）。筋電図波形を全波整流した後、トルクが安定した1秒間における積分値を求め、筋放電量の指標とした（I-EMG）。

##### 4. MRI の撮像

MRIの撮像は術後3, 6, 9ヶ月での撮像を行った。撮像は、東洋医学研究所附属クリニックに設置されている東芝社製静磁場強度0.5Teslaの超伝導MR装置を使い、大腿部の筋体積を計測するために大腿周囲筋の筋弛緩時の撮像を行った。撮像中は肢位を仰臥位・膝伸展位とした。撮像条件は、TR 700mm/sec, TE 15mm/secでT<sub>1</sub>強調画像を用いた。得られた大腿部の縦断像より大腿骨大転子の

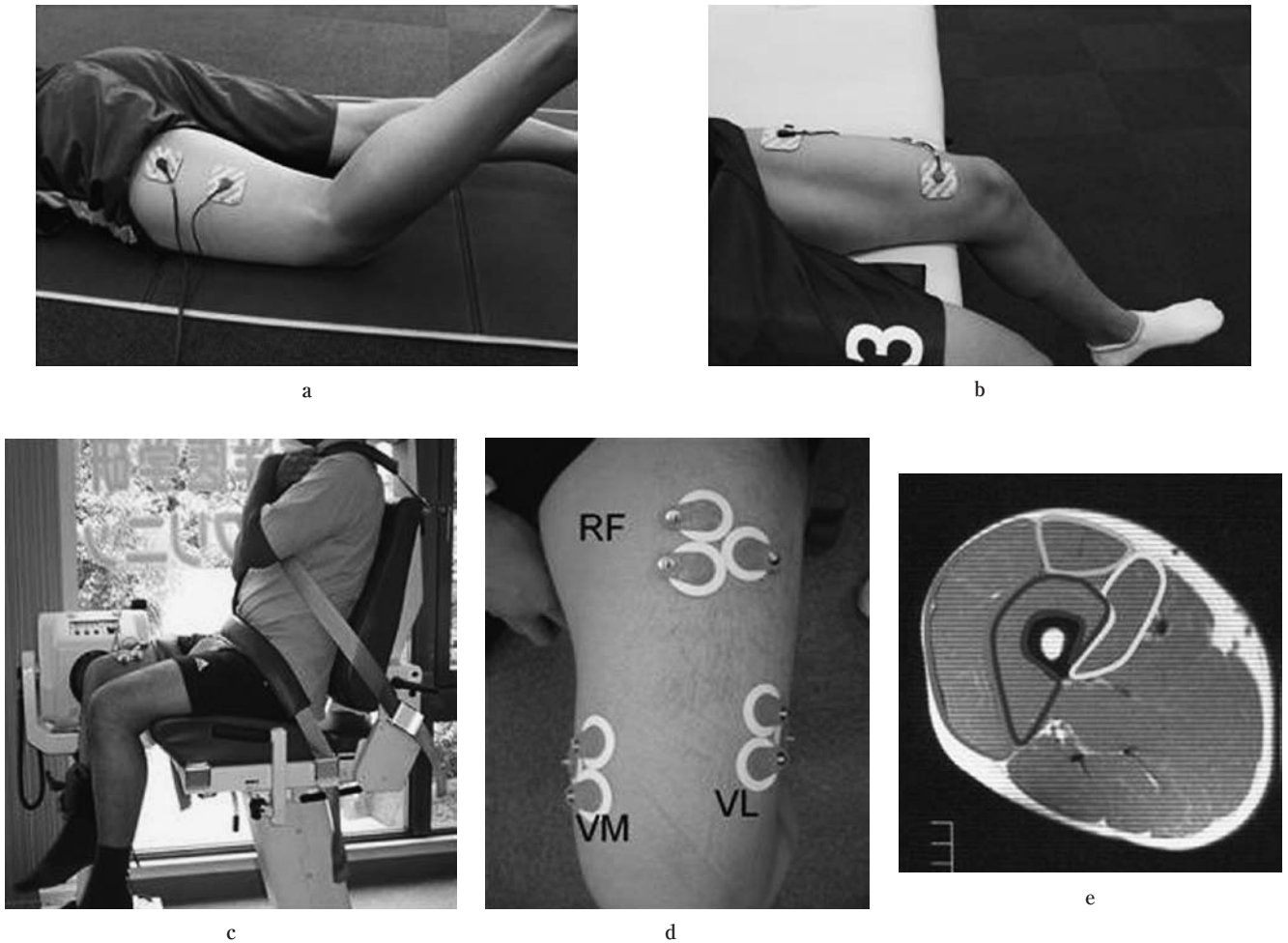


図1

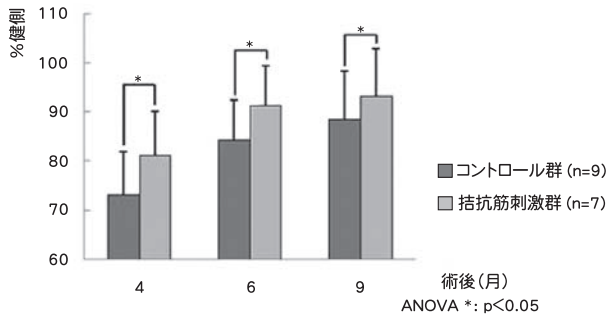
- a: 大腿二頭筋筋腹の電極貼付位置  
腹臥位にて膝関節 75° 屈曲位にて電気刺激に抗して、元位置をキープするよう指導する。
- b: 大腿四頭筋筋腹の電極貼付位置  
座位、股関節 90° にて遠位側電極を内側広筋、外側広筋に貼付する。膝関節 45° 屈曲位にて電気刺激に抗して、元位置をキープするよう指導する。
- c: 等尺性膝伸展筋力の測定  
術後 4, 6, 9 ヶ月経過時に膝関節 45° 屈曲位にて等張性膝伸展筋力を測定した。
- d: 表面筋電の記録位置  
(RF: 大腿直筋, VM: 内側広筋, VL: 外側広筋)  
直径 1.5cm のディスク型 Blue Sensor 電極を電極間距離 3 cm で筋の走行に合わせて装着し、膝伸展トルクの測定と同時に内側広筋の表面筋電図を 1000Hz で記録した。
- e: 大腿四頭筋各コンポーネントの区分け  
(右: 内側広筋, 中央上: 大腿直筋, 中央下, 中間広筋, 左: 外側広筋)  
大腿骨大転子の近位端と膝関節の脛骨顆間隆起の頂点間を、遠位方向へスライス厚 10mm, スライス間隔 2 mm で連続的に撮像した。得られた画像から横断面積を求め、連続的に加算することにより体積を算出した。

近位端と膝関節の脛骨顆間隆起の頂点間を 100 等分し遠位の脛骨顆間隆起を 0% 部位、近位の大転子を 100% 部位とした。100% から 70% 部位では筋肉の同定が困難なため 70% 部位を起始とし、遠位方向へスライス厚 10mm, スライス間隔 2 mm で連続的に撮像した。

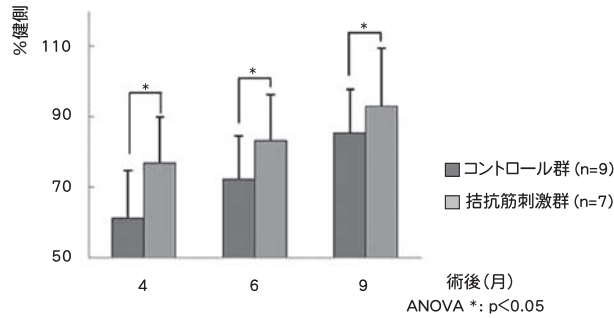
### 5. 内側広筋筋体積の算出

画像の解析は画像解析ソフト (scion image, Scion Corporation) を用いた。体積は、撮像した画像の横断面積を

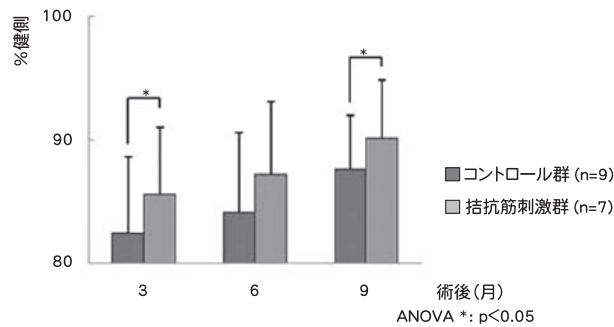
連続的に加算することにより体積を求めた。解析方法として、まず MRI により得られたフィルム画像をあらかじめトレーシングペーパーに鉛筆を用いて筋肉を大腿直筋、内側広筋、中間広筋、外側広筋の各コンポーネントに分けた (図 1e)。次にスキャナーを用いてパソコンに取り込み、ソフト上で任意の切断平面の計測メニューに従って、内側広筋の面積を求めた。最後にスライスごとの横断画像を加算してスライス厚 10mm とスライス間隔 2 mm を足した 12mm を乗じることにより体積を算出した。



a



b



c

図2

- a: 膝関節 45° 屈曲位での等尺性膝伸展トルクの経時的変化  
等尺性膝伸展トルクの比較では、拮抗筋刺激群がコントロール群に対し有意に高値を示した。
- b: 膝関節 45° 屈曲位での I-EMG の経時的変化  
I-EMG の比較では、拮抗筋刺激群がコントロール群に対し有意に高値を示した。
- c: 内側広筋の筋体積の経時的変化  
内側広筋の筋体積の比較では、拮抗筋刺激群がコントロール群に対し有意に高値を示した。

## 6. 統計処理

各項目の値は、平均と標準偏差を求めた。月ごとの比較には一元配置の分散分析を用いて検討し、危険率5%で有意とした。

## 7. 倫理規定について

本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、東京有明医療大学倫理審査委員会の承認を受け、本研究のすべての被験者にはあらかじめ実験内容を十分に説明し、文書にて参加の同意を得た（有明医療大倫理委承認第23号）。

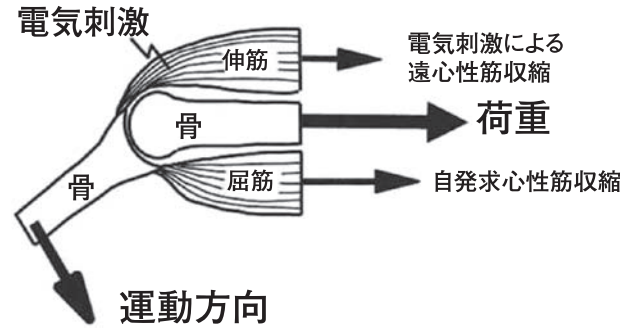


図3 拮抗筋電気刺激リハビリテーションの模式図（名護らを一歩改変）

運動抵抗が身体内部の拮抗筋にかかり、運動時骨長軸にモーメントが加わることにより、どのような肢位でも拮抗筋の収縮を伴う疑似的な抗重力運動，“疑似閉鎖性運動連鎖”を再現できる。

## V. 結果

### 1. 膝伸展トルクについて（測定した健側を100とした対健側比による比較）

膝関節 45° 屈曲位における等尺性膝伸展筋力は術後 4, 6, 9ヶ月のいずれの月においても、拮抗筋刺激群がコントロール群に対し有意に高値を示した ( $p < 0.05$ ) (図 2a)。

### 2. I-EMG について（筋放電量の健側を100とした対健側比による比較）

膝関節 45° 屈曲位における I-EMG は術後 4, 6, 9ヶ月のいずれの月においても、拮抗筋刺激群がコントロール群に対し有意に高値を示した ( $p < 0.05$ ) (図 2b)。

### 3. 内側広筋の体積について（健側の筋体積を100とした対健側比）

内側広筋の筋体積は術後 3, 9ヶ月において、拮抗筋刺激群がコントロール群に対し有意に高値を示した ( $p < 0.05$ ) (図 2c)。

## VI. 考察

本研究結果より、通常のアスレティックリハビリテーションに比べ、電氣的刺激を加えたほうが筋回復に効果的な結果が得られた。さらに、I-EMGの結果より電氣的刺激を加えた場合に筋の動員は増加していることがわかった。これらのことから、神経筋協調機能に対して、拮抗筋電気刺激による ACL リハビリテーション法は、一定の効果があると推測される。

一般的傷害に対するリハビリテーションでは安全面の観点から、open kinetic chain (OKC) から開始する。一方、ACL 損傷膝では OKC よりも closed kinetic chain (CKC) のほうが膝関節面の圧迫と大腿四頭筋、腓腹筋の同時収縮により脛骨変位量は少なく安全であるとしている<sup>26)</sup>。ま

た、ACL 再建術後の代表的 CKC 運動療法であるスクワットトレーニングの安全性に関する報告がある。こういった CKC 運動療法における安全面の配慮の重要なポイントは、まだ再建靭帯が生着していない状態での不適当な角度設定や負荷量による下腿前方変位による骨孔拡大や再建靭帯の損傷の防止である<sup>27)</sup>。大腿四頭筋とハムストリングに電気刺激を加え運動療法を行った場合、名護ら<sup>23)</sup>の②と④と⑩から OKC でありながら安全に CKC と同様のリハビリテーションを行うことができる。そういった点を考慮すると、OKC と CKC の両方の側面を併せ持つ、本法の ACL 再建患者への応用は安全性が高く、大腿四頭筋とハムストリングを協調させて運動させることにより、その後のリハビリテーションを円滑に行うことが期待できる (図 3)。

すなわち、運動抵抗が身体内部の拮抗筋にかかり、運動時骨長軸にモーメントが加わることにより、どのような肢位でも拮抗筋の収縮を伴う疑似的な抗重力運動、“疑似閉鎖性運動連鎖”を再現でき、安全性が高いと示唆される。これに加え、本法は自発運動する主動筋の筋力増強が目的であり、刺激筋そのものが増強目的であった従来法とは作用機序が異なり、同時に電気刺激し遠心性収縮する拮抗筋の筋力増強効果も期待できる。

## Ⅶ. おわりに

ACL のリハビリテーションは長期を要する。そういった中で医療現場では筋機能の回復のみならず、全身的な回復を目指し、ACL 損傷のリスクファクターを抽出し改善することに加え、再受傷防止のプログラムを処方するといった幅広いリハビリテーションが求められる。柔道整復師の臨床現場で、より簡便な本法の活用法の確立が今後の課題である。

本研究は東京有明医療大学特別研究費によって行われた。

## 参考文献

- 1) 宗田 大. 二重束 ACL 再建術の概念と変遷. 臨床スポーツ医学 2005 ; 22(3) : 257-64.
- 2) 安田和則. 解剖学的膝前十字靭帯再建術. 臨床スポーツ医学 2005 ; 22(3) : 265-72.
- 3) 金子文成, 中村祥和, 川口浩太郎 ほか. 膝前十字靭帯再建術後における大腿四頭筋機能変化の要因とリハビリテーションプログラムへの応用. アスレティック・リハビリテーション 1993 ; 12 : 377-9.
- 4) 中村英一, 水田博志, 工藤智志 ほか. 膝屈筋腱を用いた ACL 再建術後の採取腱の再生と膝屈筋力について. 整形外科と災害外科 2001 ; 50(1) : 130-3.
- 5) 堤康次郎, 水田博志, 中村英一 ほか. 膝屈筋腱を用いた前十字靭帯再建術後の膝伸筋力の回復について. 整形外科と災害外科 2002 ; 51(2) : 287-90.
- 6) Schaible H and Schmidt RF. Responses of fine medial ar-

- ticular nerve afferents to passive movements of knee joint. *Journal Neurophysiol* 1983 ; 30 : 387-96.
- 7) 船元太郎, 帖佐悦男, 園田典生 ほか. 女性の膝前十字靭帯再建術施行例における術後筋力評価. 整形外科と災害外科 2005 ; 54(2) : 247-50.
  - 8) 浦辺幸夫. 膝前十字靭帯損傷治療の経験と損傷予防の視点. *スポーツメディスン* 2005 ; 17(5) : 32-5.
  - 9) 八木正義, 黒田良祐, 水野清典 ほか. 生態力学的な検討から考えられる ACL 再建術. *臨床スポーツ医学* 2005 ; 22(3) : 239-45.
  - 10) 安田和則. ACL 再建術後の筋力低下に対する早期リハビリテーションの現況と将来の展望. *臨床スポーツ医学* 1995 ; 12(8) : 867-72.
  - 11) 堤康次郎, 水田博志, 中村英一 ほか. 膝屈筋腱を用いた前十字靭帯再建術後の膝伸筋力の回復について. 整形外科と災害外科 2002 ; 51(2) : 287-90.
  - 12) 仁賀定雄. 前十字靭帯再建術後のスポーツへの復帰と現場での問題点. *臨床スポーツ医学* 2001 ; 18(5) : 535-40.
  - 13) Cailliet 著, 萩島秀男訳. 膝の痛みと機能障害. 第 3 版. 東京 : 医歯薬出版 ; 1993.
  - 14) Ludvik T, Franjo P and Ida E. Histochemical and morphometric characteristics of the normal human vastus medialis longus and vastus medialis obliquus muscles. *Journal of anatomy* 1995 ; 187(Pt2) : 403-11.
  - 15) 井原秀俊, 高柳清美, 三輪 恵 ほか. 下肢の神経筋機能からみた性差. *日災医誌* 1995 ; 43 : 282-86.
  - 16) 井原秀俊. 神経運動協調としての動的関節制動訓練. *日本整形外科スポーツ医学雑誌* 1996 ; 70 : 583-93.
  - 17) 井原秀俊. 前十字靭帯損傷陳旧例における神経生理的機能評価 3 方法の関連. *日本整形外科スポーツ医学雑誌* 1994 ; 14(1) : 7-12.
  - 18) Konishi Y, Fukubayashi T and Takeshita D. Mechanism of quadriceps femoris muscle weakness in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 2002 ; 12 : 371-5.
  - 19) Johansson H, Sjölander P and Sojka P. Activity in receptor afferents from the anterior cruciate ligament evokes reflex effects on fusimotor neurons. *Neuroscience Research* 1990 ; 8 : 54-9.
  - 20) Johansson H, Sjölander P and Sojka P. A Sensory Role for the Cruciate Ligaments *Clinical Orthopaedics and Related Research* 268 July, 1991.
  - 21) Ochi M, Iwasa J, Uchio Y, et al. Induction of somatosensory evoked potentials by mechanical stimulation in reconstructed anterior cruciate ligaments. *Journal of Bone and Joint Surgery - British Volume* 2002 ; Jul 84(5) : 761-6.
  - 22) 福林 徹, 黒坂昌弘. アスレティックリハビリテーションの現状—スポーツ復帰はどこまで可能か? *日本臨床スポーツ医学雑誌* 2005 ; 13(3) : 334.
  - 23) 堀之内達郎, 阪本桂造, 雨宮雷太 ほか. ACL 再建術における MRI 評価と骨密度. *日本臨床スポーツ医学雑誌* 2006 ; 14(3) : 279-3.
  - 24) Yanagi T, Shiba N, Maeda T, et al. Agonist contractions against electrically stimulated antagonists. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 2003 ; Jun 84(6) : 843-8.
  - 25) 名護 健, 松瀬博夫, 萩野美佐 ほか. Hybrid 訓練法による大腿四頭筋への筋力増強効果. *整形外科と災害外科* 2005 ; 54(4) : 656-9.
  - 26) 日本整形外科学会診療ガイドライン委員会, ACL 損傷ガイドライン策定委員会. 前十字靭帯 (ACL) 損傷診療ガイドライン. 東京 : 南光堂 ; 2007.
  - 27) 前 達雄, 史野根生, 松本憲尚 ほか. 自動的膝伸運動時に再建 ACL に加わる張力. *日本臨床バイオメカニクス学会誌* 2006 ; 27 : 9-13.