

神経生理学的視点に立った前十字靭帯 (ACL) 損傷後の 新たなリハビリテーション戦略の開発

防衛大学校 小西 優
(共同研究者) 早稲田大学 衣笠 竜太

Establishment of Rehabilitation Strategy for the Patients with ACL Reconstruction

by

Yu Konishi
National Defense Academy
Ryuta Kinugasa
University of Waseda

ABSTRACT

The purpose of present study was to compare the activated volume within quadriceps between treatments applied subjects with anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. Previously, we hypothesized that hindrance of afferent feedback from ACL could reduce the recruitment of motor units via attenuation of Ia afferents due to deactivation of gamma motor neuron. Based on the hypothesis, methods that activate gamma motor neuron and those that increase the recruitment of high-threshold motor units in the Quadriceps Femoris muscle could be effective rehabilitation methods. Four patients (4 males) with ACL reconstruction were enrolled in the present study. Three kinds of exercise-task (1. knee extension exercise, 2. knee extension with Neuromuscular Electrical Stimulation, 3. knee extension with sensory stimulation) were imposed to all subjects. The order of these tasks performed was randomly assigned. They performed four sets of 15 repetitions of a knee extension exercise. The % -activated volume were compared among exercise-tasks. We assume that each

exercise-task would induce different response on the % -activated volume of each experimental group. However, the result of present study indicated that there was no significant difference among the groups.

要 旨

一連の先行研究では、損傷により起こる前十字靭帯 (ACL) 内のメカノレセプターからのフィードバックの欠落が γ 運動ニューロンの感受性を低下させ、結果として高閾値運動単位の動員が妨げられることがこの筋力低下のメカニズムであると報告されている。これらの研究結果から、ACL 損傷患者の場合、大腿四頭筋での高閾値運動単位の動員が妨げられた結果としてタイプ II 線維の筋活動が選択的に低下し、発揮できる最大筋力の低下が起こることがわかる。この筋力低下メカニズムを基に考えると随意収縮のみでは効果的な筋収縮を引き出せないことになる。そこで随意収縮中に神経筋電気刺激と触刺激を利用した膝関節周辺の皮膚への感覚入力の増加を実施した。本研究では、これら2種類のトリートメントを用いながらの筋力発揮課題を被験者に与え T2 値から ACL 患者の大腿四頭筋の活動部位を算出し、同一被験者においてトリートメントの活動部位を増加させる効果と比較した。その結果、いずれのトリートメントにおいても統計学的な有意差は認められなかった。

緒 言

前十字靭帯 (ACL) 損傷は膝関節の安定性を著しく低下させ、スポーツ活動を阻害する。また、競技復帰までのリハビリテーションには多大な時間を要し、その要因のひとつとして大腿四頭筋の最大随意筋力低下が長期化することが挙げられる。この ACL 損傷後の大腿四頭筋の最大筋力の低下は、なんらかの神経系の機能異常

により引き起こされていると報告されているが^{12,13)}、実際にどのような神経回路を介して起こっているかに関しては不明であった。しかしながら、我々は、一連の先行研究で靭帯損傷による ACL 内のメカノレセプターからのフィードバックの欠落が γ 運動ニューロンの感受性を低下させ、結果として高閾値運動単位の動員が妨げられることがこの筋力低下のメカニズムである根拠を報告してきた (図1)^{5,6,8)}。これらの研究

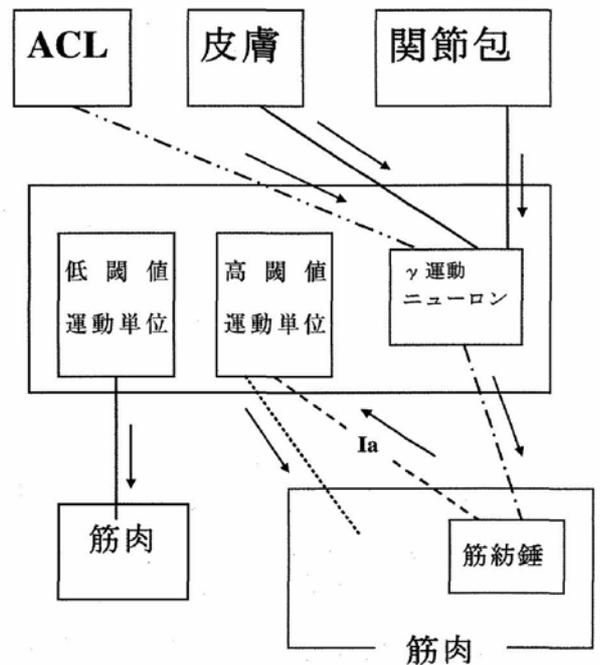


図1 前十字靭帯から出ている線1 (---) は ACL からのフィードバックが減弱していることを示している。前十字靭帯からの上行性フィードバックの減弱は γ 運動ニューロンの活動を弱める結果となる (線2; ···) がその他の組織からのフィードバックは正常である。 γ 運動ニューロンの活動低下は、筋紡錘の感受性を低下させ Ia 上行性神経からのフィードバックを弱める (線3; - - - - -)、その結果として高閾値運動単位の動員が阻害され、閾値の高い運動ニューロン (α MN) の活動が弱まる (線4; ······)。低閾値運動単位はこのメカニズムに影響されない。また詳細な神経経路は不明であるが、このメカニズムは患側から健側にも影響を与えている。

結果を基に考えると、ACL 損傷患者の場合、大腿四頭筋での高閾値運動単位の動員が妨げられた結果としてタイプII線維の筋活動が選択的に低下し、発揮できる最大筋力の低下や選択的な筋萎縮などが起こってってしまうことになる。実際にいくつかの先行研究では、ACL 損傷患者の大腿四頭筋でタイプII線維が特異的に萎縮していることを示唆している。このような状態では、いかに筋力トレーニングを行ったとしても、高閾値運動単位の動員は促されず筋力回復の効果は小さいものとなってしまふ。そのため効果的かつ早期の機能回復を求めるならば、このメカニズムを踏まえたりハビリが不可欠となる。これまで明らかになってきたこの筋力低下メカニズムを基に考えると随意収縮のみでは効果的な筋収縮を引き出せない。そこで随意収縮中に2種類のトリートメント(①速筋線維の動員を促すと② γ motor neuron (MN) へのフィードバックを強化する)を与えれば効果的な筋収縮を引き出すことができるはずである。①として本研究では神経筋電気刺激(NMES; Neuromuscular Electrical Stimulation)を用いた。NMESによる筋収縮は随意収縮と異なり速筋線維が優先的に動員される。さらに通電する筋自体を脱分極させ筋収縮を引き起こすため随意収縮とは異なり脳や脊髄からの司令やフィードバックとは関係なく収縮が起こせる。②として本研究では膝関節周辺への皮膚への感覚入力を触刺激を用いて増加させるという手法を用いた。関節周辺の様々な軟部組織(皮膚、半月板、関節包)からも γ MNへ上行性インパルスを送っていることがわかっており、本研究では非侵襲的にアプローチすることが容易い関節周辺の皮膚の感覚神経を触刺激を用いて賦活させることを目的とした¹⁾。

安静時の磁気共鳴画像(MRI: Magnetic Resonance Image)から得られたT2値(横緩和時間; transverse relaxation time)は、筋収縮運動

を行うことにより一定閾値以上の値が変化するため、筋力発揮時の筋の動員様相を評価することができる^{2,3)}。本研究では、この手法を利用し、これら2種類のトリートメントを用いながらの筋力発揮課題を被験者に与えT2値からACL患者の大腿四頭筋の活動部位を算出し、同一被験者内で各々のトリートメントが筋の活動部位を増加させる効果を比較することを目的とした。

1. 研究方法

1.1 被験者

本研究では、前十字靭帯を損傷して手術を行った4名(男:4名、平均年齢; 21.5 ± 0.5 歳(平均値 \pm 標準偏差)、平均身長; 169.0 ± 4.0 cm、平均体重; 71.2 ± 5.0 Kg)を被験者として用いた。本研究に用いられた前十字靭帯損傷患者に関しては、受傷後平均 13 ± 0.7 ヶ月以上経過していた。実験時には、疼痛、炎症反応、関節の不安定感が認められず、本研究で用いられる筋力発揮課題を問題なく遂行できる者のみを被験者として用いた。また本研究では、全ての被験者が磁気共鳴画像(MRI)撮影を行うため、ペースメーカー等の金属性体内埋入物の有無等の禁忌事項に当てはまらない者のみを使用した。また本研究は、防衛大学校倫理委員会の承認を受け、全ての被験者から研究同意書を得て行われている。

1.2 MRI撮影

被験者はMRI装置(Signa; GE Medical System, Milwaukee, WI)のベッドで仰臥位となり膝関節をベッドと水平になるように伸展させた。そして、予め測定した大腿中央部(大転子から外側間結節間の距離の中間点)をコイル(quad knee)の中心に合わせ脚を専用ベルトで固定し動かないようにした。MRI撮影は、大腿中央部より近位および遠位方向にそれぞれスライス厚10mm、スライス間隔15mmの設定で行い、計13枚の

横断面の画像を得た。また、マトリクスは、256 x 160mm、関心領域は、260 mm で撮影を行った。それぞれの画像は、MRI 撮影により得られ、DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) ファイル形式でパーソナルコンピュータ (FMV-DESKPOWER, Fujitsu, Tokyo) に保存した。

1. 3 活動部位 (% -activation volume) の算出

本研究では、運動によりおこる T2 値の変化を利用し大腿四頭筋の活動部位 (% -activation volume) を推定する手法を用いた。この手法は、異なる Echo time による T2 強調画像を筋力発揮課題の前後に撮影することにより、閾値以上の T2 値増加が観察された部位を活動領域と定義するものである^{2,3)}。大腿四頭筋全体に含まれる全ての画素の平均値から T2 値を算出するため Image J (NIH, Bethesda, MD) を用いて筋の縁をトレースし解析部位を同定した。また、同定した大腿四頭筋の横断面から筋組織以外の T2 値と考えられる 30 ms 以下 (血管等)、ならびに 55 ms 以上 (脂肪等: Adams et al と同様) のデータを除き、活動領域を算出した。安静時の T2 + 1SD より高値を示した画素を運動により動員された部分とみなし、運動により動員された相対体積 (% -activation volume) を筋の活動部位とした。この % -activation volume は筋収縮時の筋の動員様相を反映した指標であることが認められている^{2,3)}。

1. 4 筋力発揮課題

本研究に参加した被験者は、ニーエクステンションマシン (Knee extension and curl DX, Body Solid 社製 Forest Park, IL) (図 2) を用い、3 種類の筋力発揮課題 (①等張性収縮、②等張性収縮 + NMES、③等張性収縮 + 触刺激) を行った。それぞれの課題の負荷の設定 (1. 4. 1)、実施方

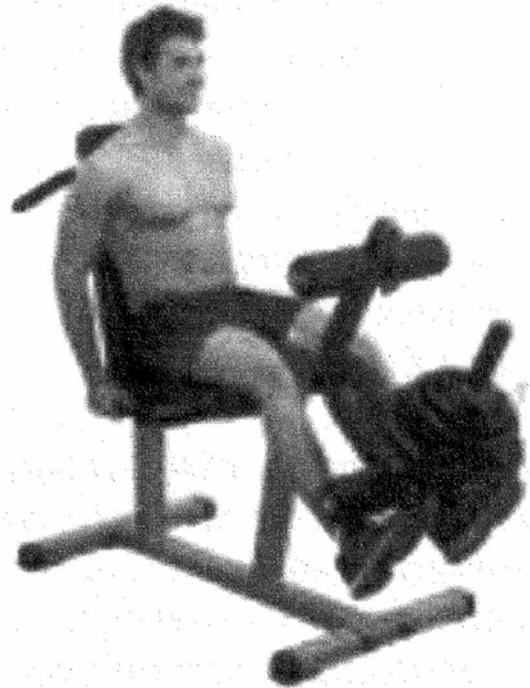


図 2 ニーエクステンションマシン

法 (1. 4. 2) に関しては以下で詳細を説明する。それぞれの課題の間は、2 時間以上空け次の課題に影響が出ないようにした。

1. 4. 1 負荷の設定

運動負荷は、各被験者が発揮できる最大負荷の 80% とした。各被験者は、事前に遂行可能な最大負荷の測定を行った。測定方法の詳細に関しては、以下のようなものである。ウォーミングアップ後、被験者はニーエクステンションマシンに端座位で腰掛けた。そして彼らが申告する重量に設定し、被験者のタイミングで約 90 度の膝屈曲位から完全伸展までその重量を挙上するように指示した。その試行に成功した場合、十分な休憩を挟み、さらに重量を上げて被験者に挙上するよう指示をした。約 90 度の膝屈曲位から完全伸展まで重量を挙上できなくなるまで重量を上げ、最後に成功した重量を最大負荷とした。

1. 4. 2 実施方法

1. 4. 2. 1 等張性収縮

被験者はニーエクステンションマシンに端座位で腰掛け膝伸展運動を行った。開始肢位は 90

度膝屈曲位とし、完全伸展位まで運動を行った。負荷は予め測定した最大負荷の80%とし、挙上回数は15回、セット数は4セット行ったが、後半のセットで、全可動域を通しての運動が不能となる場合は、随意筋収縮で、可能な限りの可動域での運動を行わせた。またセット間のインターバルは1分間とした。また被験者には、メトロノームに合わせ、極力2秒に一回のペースで課題を行わせた。

1.4.2.2 等張性収縮+NMES

運動方法、負荷設定、挙上回数、セット間のインターバル、可動域等、運動の実施方法は、1.4.2.1等張性収縮と同じだが、運動中に神経筋電気刺激(NMES)を被験者の大腿四頭筋に与えた。神経筋電気刺激は伊藤超短波製 ES-360 (東京)を用いて行った(図3)。5×5 cmの電極(Axelgaard



図3 神経筋電気刺激装置 ES-360

Manufacturing Co., Ltd, Fallbrook, CA) を4枚用いて大腿四頭筋の筋の走行に沿って大腿部の前面に貼付した。

1.4.2.3 等張性収縮+触刺激

運動方法、負荷設定、挙上回数、セット間のインターバル、可動域等、運動の実施方法は、1.4.2.1等張性収縮と同じだが、膝関節周辺の皮膚に運動中に触刺激を与えるため、皮膚の動きを妨げないように設計された伸縮性テープ(キネシオロジーテープ、日東メディカル株式会社(東京)で覆った。端座位のまま膝関節前面をテープにより膝蓋骨の上端約5 cmから脛骨粗面まで覆った。

1.4.3 実験手順

被験者は、まず大腿中央部を同定するためメジャーを使い大転子から外側間結節間の距離を測り、その中間点にマーキングした。その後、ベースラインとなるデータを得るため安静時の両大腿部のマーキングを中心にMRI撮影を行った。本研究では、3種類の筋力発揮課題(①等張性収縮、②等張性収縮+NMES、及び③等張性収縮+触刺激)を被験者に行わせたが、筋力発揮課題を行った順は、被験者毎でランダムにした。MRI撮影終了後、予め設定しておいた運動負荷を用いて15回×4セットのいずれかの筋力発揮課題を行わせた。被験者は、課題終了後、すぐにMRI撮影を行った。

その後、各筋力発揮課題間で、2時間以上の休憩を挟み、3種類全部の筋力発揮課題を行い、その都度、MRI撮影を行った。また、全てのMRI撮影では、課題終了から3分以内で撮影を開始した。

1.4.4 統計

データは全て平均値±標準偏差で示した。それぞれの課題(①等張性収縮、②等張性収縮+NMES、及び③等張性収縮+触刺激)の活動部位の値を求め、一元配置分散分析を用い解析を行った。

2. 研究結果

本研究では、MRI 画像から得られた T2 値を基に、活動している筋体積を総筋体積で除することにより算出された % -activated volume を 3 種類の筋力発揮課題 (①等張性収縮, ②等張性収縮 +NMES, 及び③等張性収縮 +触刺激) の間で比較した。等張性収縮での平均値 ± 標準偏差は、中間広筋で $10.3 \pm 7.9\%$ 、大腿直筋で $39.6 \pm 29.6\%$ 、外側広筋で $15.7 \pm 15.8\%$ 、内側広筋で $15.5 \pm 11.4\%$ 、等張性収縮 +NMES での平均値 ± 標準偏差は、中間広筋で $8.9 \pm 4.6\%$ 、大腿直筋で $31.5 \pm 16.0\%$ 、外側広筋で $11.7 \pm 4.9\%$ 、内側広筋で $12.8 \pm 4.0\%$ であった。等張性収縮 +触刺激での平均値 ± 標準偏差は、中間広筋で $12.3 \pm 3.4\%$ 、大腿直筋で $39.3 \pm 14.8\%$ 、外側広筋で $14.7 \pm 4.7\%$ 、内側広筋で $16.4 \pm 4.2\%$ であった (図 4)。一元配置分散分析では、それぞれの課題において群間に有意差は検出されなかった。

3. 考察

我々は一連の研究の中で、ACL 損傷患者の大腿四頭筋の慢性的な筋力低下は ACL 内にあるメカノレセプターから γ 運動ニューロンへのフィードバックが靭帯損傷により不全となり、

γ 運動ニューロンの活動低下が起こることにより高閾値運動単位の動員が阻害される可能性を示唆している (図 1)⁵⁻¹⁰⁾。この筋力低下メカニズムを基に考えると、随意収縮のみでは効果的な筋収縮を引き出せない。それゆえ、いかに筋力トレーニングを行ったとしても、高閾値運動単位の動員は促されず筋力回復の効果は小さくなってしまうことになる。これらの患者の筋力を適切に回復させるためには、 γ 運動ニューロンの活動を高めるか、直接、高閾値運動単位の動員を促していくことが重要となる。

そこで本研究では、 γ 運動ニューロンの活動を高めると考えられている皮膚からの感覚入力を増加させることを試みた。実際に、先行研究では、前十字靭帯損傷患者の筋力低下に類似したメカニズムで起こる長時間振動刺激後の筋力低下が触刺激により回復することを報告したことから⁴⁾、本研究では、この研究方法を基に随意収縮中に触皮膚の動きを妨げないように設計されたテープを膝周辺の皮膚に貼った。

さらに、通電による筋収縮では電気抵抗の少ない太い神経線維から先に動員されるので¹¹⁾、本研究では、高閾値運動単位の動員を促すために、随意収縮中に神経筋電気刺激 (NMES) を被験者の大腿四頭筋に与えた。本研究では、これ

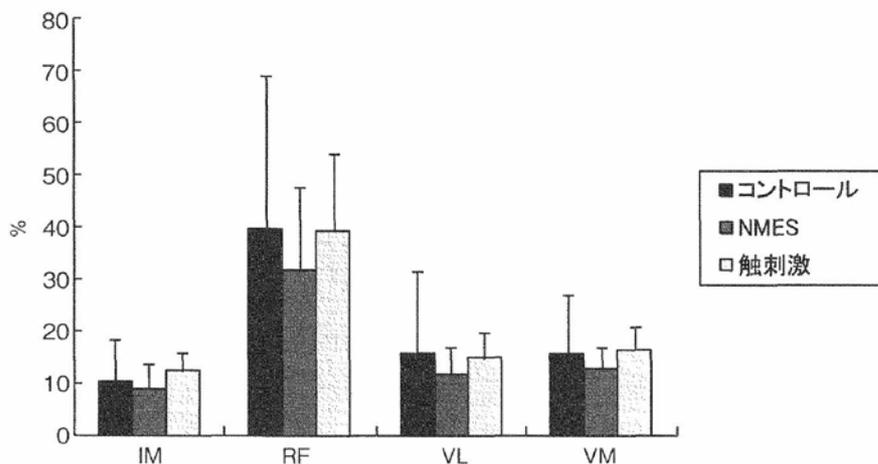


図4 各トリートメント後の各筋の活動部位の割合 (% -activation Volume)
IM: 中間広筋、RF: 大腿直筋、VL: 外側広筋、VM: 内側広筋

ら2つの方法の活動領域に及ぼす影響を muscle functional MRI を用いて随意収縮のみの筋力発揮課題と比較したが、いずれの方法にも有意な効果はみられなかった。

我々は、これらのトリートメントが ACL 損傷患者の大腿四頭筋での活動部位を増加すると仮定していたが、研究結果は我々の仮定とは異なる結果となった。しかしながら、本研究の結果には被験者の数やスクリーニング条件などの要因が影響している可能性も考えられる。本研究では、ACL を損傷しつつも比較的強度の高い運動課題を課さなければならないため、被験者のスクリーニングが非常に厳しいものとなった。そのため本研究では4人の被験者しか参加しておらず、今回の研究期間でリクルートした被験者数では未だ不十分な可能性がある。さらに筋力低下の度合いが被験者間で一定でない可能性が考えられる。今後は、筋力低下の度合いをより詳細に評価したうえで、より多くの被験者を募集し、これらの方法の ACL 損傷患者の筋力低下への効果を検証していく必要がある。

4. 結論

ACL 傷患者の大腿四頭筋の筋力を効率的に回復させるためには、これらの患者が持つ末梢神経系の異常メカニズムを踏まえた方法を用いたりハビリテーションを行っていく必要がある。そこで、本研究では理論上有効と考えられる皮膚への触刺激と通電による筋収縮の2種類の筋力発揮課題を被験者に与え、それぞれの収縮形態における筋力発揮課題後の大腿四頭筋% -activated volume を算出し、随意収縮のみの筋力発揮課題との動員様相と比較した。その結果、いずれの方法においても、% -activated volume には有意な差がみられなかった。今回の結果は、我々の仮説とは異なるものであったが、今後は、より多くの被験者を用いる必要がある。

謝 辞

本研究に対し助成を承りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝いたします。また、実験に協力してくださった兵庫教育大学 小田俊明先生、防衛大学校 佐藤かほり先生、防衛大学校 安藤大輔先生、被験者の皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Johansson H., Sjolander P., Sojka P., Receptors in the knee joint ligaments and their role in the biomechanics of the joint. *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 18:341-68(1991)
- 2) Kinugasa R., Kawakami Y., Fukunaga T., Muscle activation and its distribution within human triceps surae muscles. *J. Appl. Physiol.*, 99:1149-56(2005)
- 3) Kinugasa R., Kawakami Y., Fukunaga T., Quantitative assessment of skeletal muscle activation using muscle functional MRI. *Magn. Reson. Imaging.*, 24:639-44(2006)
- 4) Konishi Y., Tactile stimulation with Kinesiology tape alleviates muscle weakness attributable to attenuation of Ia afferents. *J. Sci. Med. Sport*(2012)
- 5) Konishi Y., Fukubayashi T., Takeshita D., Mechanism of quadriceps femoris muscle weakness in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 12:371-75(2002)
- 6) Konishi Y., Fukubayashi T., Takeshita D., Possible mechanism of quadriceps femoris weakness in patients with ruptured anterior cruciate ligament. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34:1414-18(2002)
- 7) Konishi Y., Ikeda K., Nishino A., Sunaga M., Aihara Y., Fukubayashi T., Relationship between quadriceps femoris muscle volume and muscle torque after anterior cruciate ligament repair. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 17:656-61(2007)
- 8) Konishi Y., Konishi H., Fukubayashi T., Gamma loop dysfunction in quadriceps on the contralateral side in patients with ruptured ACL. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35:897-900(2003)
- 9) Konishi Y., Oda T., Tsukazaki S., Kinugasa R., Fukubayashi T., Relationship between quadriceps

- femoris muscle volume and muscle torque at least 18 months after anterior cruciate ligament reconstruction. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 22:791-6 (2012)
- 10) Konishi Y., Oda T., Tsukazaki S., Kinugasa R., Hirose N., Fukubayashi T., Relationship between quadriceps femoris muscle volume and muscle torque after anterior cruciate ligament rupture. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.*, 19:641-5(2011)
 - 11) Robinson A.J. S-M.L., Clinical Electrophysiology. 2nd Edition ed. Baltimore: Williams & Wilkins (1995)
 - 12) Stokes M., Young A., The contribution of reflex inhibition to arthrogenous muscle weakness. *Clin Sci (Lond)*. 67:7-14(1984)
 - 13) Young A., Current issues in arthrogenous inhibition. *Ann Rheum Dis.*, 52:829-34(1993)