

学位論文題名

# Biomechanical Comparisons of Three Posterior Cruciate Ligament Reconstruction Procedures with Load-controlled and Displacement-controlled Cyclic Tests

(荷重制御および変位制御繰り返し負荷試験を利用した  
膝後十字靭帯再建術3術式の生体力学的比較)

## 学位論文内容の要旨

膝後十字靭帯再建術の基本的臨床成績は未だ満足のものではない。そのため、これまでに様々な手術手技が報告され、また実際に種々の手技が行われている。しかしそれらを生体力学的に比較した研究は極めて少ない。我々は過去の一連の研究においてヒト膝関節と形態が類似しているブタ膝関節を用いた膝十字靭帯再建モデルとその力学的評価のための繰り返し負荷試験法を確立させ、膝十字靭帯再建術の生体力学的評価を行ってきた。本研究の目的は、臨床において実際に行われている膝後十字靭帯再建術3術式を、荷重制御および変位制御による繰り返し負荷試験を用いて生体力学的に比較することである。

実験には前述したブタ膝関節モデルを用い、幅10mmの骨付き膝蓋腱(以下BTB)と、断面積を14および7mm<sup>2</sup>に調整した2本のブタ深指屈筋腱を、それぞれヒトの骨付き膝蓋腱と膝屈筋腱の代用材料とした。45膝関節を無作為に15膝ずつ3群に分け、以下に示す膝後十字靭帯再建術を行った。A群は鏡視下一皮切手技で再建を行なうために開発された屈筋腱—エンドボタン術式である。この術式では二重折りにした2本の深指屈筋腱を大腿骨側は2本のポリエステル糸とエンドボタンを用いて固定し、脛骨側は4本のポリエステル糸でスクリューポストに固定した。B群は最も標準的なBTBの両端を骨孔内でinterference screwにて固定する術式である。C群はBTBの骨片を脛骨後面の後十字靭帯脛骨付着部に作成した骨溝にはめ込んで皮質骨スクリューで固定し、大腿骨側は骨片を骨孔内でinterference screwで固定するいわゆるBTB—inlay法である。各群に対してそれぞれ膝後十字靭帯再建術を行ったのち、各大腿骨—移植材料—脛骨複合体を摘出し、膝90度屈曲位で万能試験機に固定し、関節に摺動型変位計を取り付けた。45膝を無作為に15膝ずつ3群に分け、各群に対してそれぞれ術式A、B、およびCを用いて膝後十字靭帯再建術を行った。前処置に続いて89Nの静的後方荷重を2分間与えた後、各群の5膝には3mmの一定の後方剪断変位を5000回加えて荷重の変化を経時的に測定し、別の5膝には25N~89Nの一定の荷重を5000回加えて変位の変化を経時的に測定し、その後に破断試験を行った。残りの5膝には繰り返し負荷を加えずに破断試験を行った。各群の比較には多重比較を考慮した分散分析を用いた。

結果を以下に述べる。荷重制御繰り返し負荷試験では、いずれの群においてもPeak変位は最初の1000回で著明に増加し、その後も徐々に増加を示した。5000回目のPeak変位を比較すると、A群は他の全ての群より有意に大きかった。一方、B群とC群との間には有意差は認められなかった。変位制御繰り返し負荷試験では、いずれの群にお

いても Peak 荷重は最初の1000回で著明に減少し、その後も徐々に低下を示した。5000回目の Peak 荷重を比較すると、A 群は他の全ての群より有意に低かった。また B 群は C 群より有意に低かった。

最大破断荷重は、いずれの群においても繰り返し負荷試験によって有意の変化を示さなかった。最大破断荷重は、B 群および C 群間には有意差を認めなかったが、A 群は他の 2 群に比べて有意に低い値を示した。10N 荷重による初期変位量は、いずれの群においても荷重制御繰り返し負荷試験によって有意の増加を示したが、変位制御繰り返し負荷試験によっては有意の変化を示さなかった。線形剛性値は、A 群および B 群において荷重制御繰り返し負荷試験により有意の増加を示したが、C 群は有意の変化を示さなかった。

本研究は、いずれの再建術に対しても繰り返し負荷試験は後十字靭帯再建膝の生体力学的特性に重大な影響を与えることを示した。したがっていずれの膝後十字靭帯再建術後においても、これらの負荷を避けた後療法を行うことが必要であると考えられた。術式間の比較において、屈筋腱—エンドボタン術式は繰り返し負荷の影響を最も大きく受け、BTB-inlay 法は生体力学的見地において他の全ての術式より優れていることを示した。しかしながら、この評価がそのまま臨床における有用性を示すものではない。本研究は *in vitro* の評価であり、移植腱が骨孔内で固着される以前の評価である。臨床における価値は、いうまでもなく、臨床成績を含む多くの要素によって決まるものである。しかし本研究の結果が示す各術式の基本的な生体力学的特性の差を知ることは各術式の後療法の決定などに重要であると考えられた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浪 明 男

副 査 教 授 福 田 諭

副 査 教 授 安 田 和 則

学 位 論 文 題 名

## Biomechanical Comparisons of Three Posterior Cruciate Ligament Reconstruction Procedures with Load-controlled and Displacement-controlled Cyclic Tests

(荷重制御および変位制御繰り返し負荷試験を利用した  
膝後十字靭帯再建術 3 術式の生体力学的比較)

膝後十字靭帯 (PCL) 再建術の基本的臨床成績は未だ満足のものではない。そのため、これまでに様々な手術手技が報告され、また実際に種々の手技が行われている。しかしそれらを生体力学的に比較した研究は極めて少ない。我々は過去の一連の研究においてヒト膝関節と形態が類似しているブタ膝関節を用いた膝十字靭帯再建モデルとその力学的評価のための繰り返し負荷試験法を確立させ、膝十字靭帯再建術の生体力学的評価を行ってきた。本研究の目的は、臨床において実際に行われている PCL 再建術 3 術式を、荷重制御および変位制御による繰り返し負荷試験を用いて生体力学的に比較することである。

実験には前述したブタ膝関節モデルを用い、幅 10mm の骨付き膝蓋腱 (以下 BTB) と、断面積を 14 および 7 mm<sup>2</sup> に調整した 2 本のブタ深指屈筋腱を、それぞれヒトの骨付き膝蓋腱と膝屈筋腱の代用材料とした。45 膝関節を無作為に 15 膝ずつ 3 群に分け、以下に示す PCL 再建術を行った。A 群は鏡視下一皮切手技で再建を行なうために開発された屈筋腱-エンドボタン術式である。この術式では二重折りにした 2 本の深指屈筋腱を大腿骨側は 2 本のポリエステル糸とエンドボタンを用いて固定し、脛骨側は 4 本のポリエステル糸でスクリューポストに固定した。B 群は最も標準的な BTB の両端を骨孔内で interference screw にて固定する術式である。C 群は BTB の骨片を脛骨後面の PCL 脛骨附着部に作成した骨溝にはめ込んで皮質骨スクリューで固定し、大腿骨側は骨片を骨孔内で interference screw で固定するいわゆる BTB-inlay 法である。各群に対してそれぞれ PCL 再建術を行ったのち、各大腿骨-移植材料-脛骨複合体を摘出し、膝 90 度屈曲位で万能試験機に固定し、関節に摺動型変位計を取り付けた。各群に対してそれぞれ術式 A、B、および C を用いて PCL 再建術を行った。前処置に続いて 8.9N の静的後方荷重を 2 分間与えた後、各群の 5 膝には 3mm の一定の後方剪断変位を 5000 回加えて荷重の変化を経時的に測定し、別の 5 膝には 25N~89N の一定の荷重を 5000 回加えて変位の変化を経時的に測定し、その後破断試験を行った。残りの 5 膝には繰り返し負荷

を加えずに破断試験を行った。各群の比較には多重比較を考慮した分散分析を用いた。

荷重制御繰り返し負荷試験では、いずれの群においても Peak 変位は最初の 1000 回で著明に増加し、その後も徐々に増加を示した。5000 回目の Peak 変位を比較すると、A 群は他の全ての群より有意に大きかった。一方、B 群と C 群との間には有意差は認められなかった。変位制御繰り返し負荷試験では、いずれの群においても Peak 荷重は最初の 1000 回で著明に減少し、その後も徐々に低下を示した。5000 回目の Peak 荷重を比較すると、A 群は他の全ての群より有意に低かった。また B 群は C 群より有意に低かった。

最大破断荷重は、いずれの群においても繰り返し負荷試験によって有意の変化を示さなかった。最大破断荷重は、B 群および C 群間には有意差を認めなかったが、A 群は他の 2 群に比べて有意に低い値を示した。10N 荷重による初期変位量は、いずれの群においても荷重制御繰り返し負荷試験によって有意の増加を示したが、変位制御繰り返し負荷試験によっては有意の変化を示さなかった。線形剛性値は、A 群および B 群において荷重制御繰り返し負荷試験により有意の増加を示したが、C 群は有意の変化を示さなかった。

本研究は、いずれの再建術に対しても繰り返し負荷試験は PCL 再建膝の生体力学的特性に重大な影響を与えることを示した。したがっていずれの PCL 再建術後においても、これらの負荷を避けた後療法を行うことが必要であると考えられた。術式間の比較において、屈筋腱-エンドボタン術式は繰り返し負荷の影響を最も大きく受け、BTB-inlay 法は生体力学的見地において他の全ての術式より優れていることを示した。しかしながら、この評価がそのまま臨床における有用性を示すものではない。本研究は *in vitro* の評価であり、移植腱が骨孔内で固着される以前の評価である。臨床における価値は、いうまでもなく、臨床成績を含む多くの要素によって決まるものである。しかし本研究の結果が示す各術式の基本的な生体力学的特性の差を知ることは各術式の後療法の決定などに重要であると考えられた。

口頭発表の後、副査の福田教授からは BTB/Inlay 法が力学的に優れていた理由などについて、安田教授からは研究結果の臨床的意義などについて、また主査の三浪教授からは実験モデルとヒト膝関節の特性の差などについて質問があった。これらに対して申請者は自己の研究結果と文献的知識に基づいて概ね妥当な回答を行った。さらに会場の 1 名の出席者から移植材料のみの特性に関する質問があった。これらに対して申請者は自己の研究結果と文献的知識に基づいて概ね妥当な回答を行った。

本研究は繰り返し負荷に対する PCL 再建膝の動的挙動を始めて詳細に解析し、PCL 再建術の進歩のために有用な多くの情報を与えるものであった。審査員一同はこれらの成果を高く評価し、申請者が博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。