

## 学位論文の要旨

学位の種類	博士	氏名	佐々木 祐介
<b>学位論文題目</b> Effect of fixation angle and graft tension in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction on knee biomechanics (膝前十字靭帯再建術における靭帯の脛骨固定手技が膝安定性に与える影響について、人屍体膝を用いたバイオメカニクスに関する研究)			
<b>共著者名</b> Shih-Sheng Chang · Masataka Fujii · Daisuke Araki · Junjun Zhu · Brandon Marshall · Monica Linde-Rosen · Patrick Smolinski · Freddie H. Fu			
Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy Published online: 1 March 2015			
<b>研究目的</b> スポーツの現場において膝前十字靭帯 (ACL) 断裂は頻度の多い怪我であり、ACL 断裂に対する関節鏡下 ACL 再建術は一般的な手術術式となっている。2000 年頃に関節鏡下で行う解剖学的再建が報告されてからは、ACL 再建術について多くの研究がなされてきた。 解剖上、ACL は前内側束 (AMB) と後外側束 (PLB) の二本の線維束からなり、本来の ACL 機能を再建するためには AMB と PLB の両方を再建する解剖学的二重束再建術が有用であると近年報告されてきた。また、再建にあたり、靭帯を通す骨孔の位置や靭帯を固定する角度や緊張、再建靭帯の太さなど多くの点が議論されてきた。しかし、過去の報告において再建靭帯を脛骨に固定する手技は様々であり、未だ一定のコンセンサスは得られていない。本研究の目的は、ACL 二重束再建における脛骨固定手技の違いが、再建膝の安定性に与える影響を調べることである。			
<b>材料・方法</b> ヒト新鮮凍結屍体膝 14 体を用い、ロボットシステム (CASPAR Stäubli RX90 robot, Orto MAQUET, Germany) を使用して膝関節安定性を調べた。屍体膝は、膝関節面から近位・遠位 20cm の部位で脛骨・大腿骨を切断し、膝関節面から近位・遠位 10cm の部位より近			

位・遠位の筋・軟部組織は取り除いた。大腿骨はクランプを介して支持台にとりつけられ、脛骨もクランプと Universal Force-moment sensor(UFS; Model 4015, JR3 Inc, Woodland,CA)を介してロボットアームに取り付けた。ロボット試験において、脛骨前方引き出し力 (ATL) および外反と内旋を合わせた外力 (Simulated Pivot-Shift (PS)) を負荷し、正常膝、不全膝および ACL 二重束再建膝における ATL と Simulated PS 下での前方移動量 (ATT, Coupled ATT)、および靭帯内フォース (ISF) を測定した。軸設定・In situ force 算出は Fujie らの過去の報告に従った。各膝に対する ACL 二重束再建術は、以下のように行った。1, 関節鏡を用いて、靭帯付着部の残存線維を参照に骨孔作成部位を決定。2, 専用器具を用いて大腿骨・脛骨の骨孔を作成 3, 各膝から採取したハムストリングス腱を用いて再建靭帯グラフトを作成 4, 大腿骨側はエンドボタンを使用し、脛骨側はスクリューとワッシャーのデバイスを用いて脛骨に固定した。固定手技は後に示す4種類を順次行った。ロボット試験に際して、各膝に対して6種類の条件で計測を行った。計測条件は、健常 ACL 膝、ACL 不全膝および4種類の脛骨固定手技を用いた ACL 二重束再建とした。4種類の脛骨固定手技は、AMB と PLB を固定する膝角度と初期張力を各々以下のようにした。(再建1): 30° /20N、0° /20N、(再建2): 30° /30N、0° /10N、(再建3): 45° /20N、15° /20N、(再建4): 45° /30N、15° /10N。ATT と ISF のデータ処理には、靭帯間・各関節角度を2要素とする2-way ANOVA を行った後 Sheffe の Post hoc Test を行った。統計学的有意差は  $p < 0.05$  とした。

#### 成 績

ATL、Simulated PS に関して、ATT および Coupled ATT は正常膝および各再建間にて有意差はなかった。ATL に関して、再建3における AMB の ISF はすべての角度において健常 ACL 膝よりも優位に低値であり、PLB の ISF はすべての角度で健常 ACL 膝よりも優位に高値であった。また、すべての再建方法における AMB の ISF は、完全伸展以外のすべての角度で健常 ACL 膝の ISF よりも優位に低値であった。

Simulated PS に関して、すべての再建方法における AMB の ISF は、すべての角度で健常 ACL 膝の ISF よりも優位に低値であった。また再建1と再建2では、PLB の ISF は有意に低値であり、再建3では、PLB の ISF は有意に高値となった。

#### 考 案

この研究において、すべての固定プロトコールにおける ATT は健常膝と同等の安定性を得ることができた。しかし、各固定プロトコールともに PLB の ISF は再建されていた

が、AMB の ISF はすべての固定プロトコールで特に Simulated P S 下において健常膝と比べ優位に低値であった。また AMB と PLB それぞれの ISF は各固定プロトコールにおいて様々なバランスであった。この結果が示すことは、臨床上で徒手的に安定性を得られた膝においても、AM、PL 束間での靭帯内力のアンバランスを起こしている可能性が示される。

Vercillo らは、今回の再建 3 のプロトコールが健常膝のキネマティクスを再建すると報告しているが、この研究の再建術式における大腿骨孔の作成法は通常解剖学的再建とは異なり骨孔は一つである。また、過去の報告では、脛骨固定手技における固定張力は 40 N が理想とされてきたが、Mae らは解剖学的 ACL 再建術での脛骨固定手技における臨床的に必要な固定張力は 20 N と報告した。本研究では、大腿骨の骨孔を二つ作成する解剖学的再建術を用いて、Vercillo らのプロトコールと Mae らの報告を元に決定した 4 種類の脛骨固定角度におけるキネマティクスを比較した。

しかし、本研究における AMB の ISF は、すべてのプロトコールで健常膝よりも低値であり、新たなプロトコールを用いる必要があると言える。一方で、すべてのプロトコールにおける ATT および Coupled ATT は、健常膝のキネマティクスと優位差をもたなかった。臨床的に安定している膝においても同様の現象が起こっている可能性があり、AM 束および PL 束の機能分担が正常でないことによる術後の単束損傷の危険性が考えられる。

本研究の Limitation を以下に示す。1、本研究の結果は靭帯の修復などの生体内の治癒経過を反映しないものである。2、ロボット試験中に、再建術にて固定したグラフト張力が漸減している可能性がある。3、使用した屍体の平均年齢は 56 歳と高齢であり、通常 ACL 再建を行う年齢層とは異なる。

#### 結 論

全ての固定手技で正常膝の安定性が再現されたが、安定性の獲得が必ずしも AMB・PLB それぞれの機能を再現しているとは限らないことが示された。




## 引 用 文 献

- 1, Chhabra A, Starman JS, Ferretti M, Vidal AF, Zantop T, Fu FH (2006) Anatomic, radiographic, biomechanical, and kinematic evaluation of the anterior cruciate ligament and its two functional bundles. *J Bone Joint Surg Am* 88(Suppl 4):2-10
- 2, Koga H, Muneta T, Yagishita K, Ju YJ, Sekiya I (2012) The effect of graft fixation angles on anteroposterior and rotational knee laxity in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: evaluation using computerized navigation. *Am J Sports Med* 40(3):615-623
- 3, Vercillo F, Woo SL, Noorani SY, Dede O (2007) Determination of a safe range of knee flexion angles for fixation of the grafts in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a human cadaveric study. *Am J Sports Med* 35(9):1513-1520

## 参 考 论 文

- 1, Livesay GA, Fujie H, Kashiwaguchi S, Morrow DA, Fu FH, Woo SL (1995) Determination of the in situ forces and force distribution within the human anterior cruciate ligament. *Ann Biomed Eng* 23(4):467-474
- 2, Fujie H, Livesay GA, Woo SL, Kashiwaguchi S, Blomstrom G (1995) The use of a universal force-moment sensor to determine in situ forces in ligaments: a new methodology. *J Biomech Eng* 117(1):1-7
- 3, Fujie H, Mabuchi K, Woo SL, Livesay GA, Arai S, Tsukamoto Y (1993) The use of robotics technology to study human joint kinematics: a new methodology. *J Biomech Eng* 115(3):211-217

## 学位論文の審査結果の要旨

報告番号	第 号		
学位の種類	博士(医学)	氏名	佐々木 祐介
<p>審査委員長 <u>大田 哲生</u> </p> <p>審査委員 <u>吉田 貴彦</u> </p> <p>審査委員 <u>柿崎 香宏</u> </p>			
<h3>学位論文題目</h3>			
<p><b>Effect of fixation angle and graft tension in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction on knee biomechanics</b> (膝前十字靭帯再建術における靭帯の脛骨固定手技が膝安定性に与える影響について、人屍体膝を用いたバイオメカニクスに関する研究)</p>			
<p>膝前十字靭帯損傷再建術の手技に関しては、再建靭帯を通す際に用いる大腿骨や脛骨にあけるトンネルの数や、再建靭帯を固定する際の張力、また、固定時の膝関節角度において、様々な方法があるものの、確立された方法はない。今回、最も適切な膝前十字靭帯の再建方法をバイオメカニクスの観点から明らかにするために研究を行った。</p> <p>対象は平均年齢 56.7 歳の人屍体 14 体を用いた。評価には <b>Universsal force/moment sensor</b> と <b>robotic manipulator</b> を使用して膝関節部の移動距離、靭帯の張力を測定している。これらの評価項目を靭帯再建前、再建後で比較して、再建前の状態に近い再建方法を検討している。</p> <p>再建術は大腿骨および脛骨に再建靭帯を通す 4 つのトンネルを用いて、膝前十字靭帯の前内側束 (AM) と後外側束 (PL) を別々に再建する方法を用いた。再建靭帯には半腱様筋と薄筋の腱を用いている。術者はすべて同一であり、内視鏡的手法を用いて再建された。</p>			

評価の際には、膝関節の角度を full extension から屈曲 15 度、30 度、45 度、60 度、90 度に適宜変化させている。また、臨床におけるテストを模して下腿の前方引出しおよび下腿に外反内旋力を加えた肢位において下腿の前方移動量、靭帯の in situ force を測定している。

靭帯再建のモデルとして、特に今回 AM, PL 再建時の張力および膝関節角度について 4 つのモデルを作成して比較検討した。モデルは以下の通りである。① AM30 度/20N、PL0 度/20N ②AM30 度/30N、PL0 度/10N ③AM45 度/20N、PL15 度/20N ④AM45 度/30N、PL15 度/10N。

その結果、臨床的に良好な結果をえられていると考えられている再建方法であっても、バイオメカニクスの観点からは in situ force は不十分であることが示されるとともに、条件によっては PL に過剰な負担がかかることが明らかとなった。膝の安定性の観点からは十分な force を得ることが重要であるが、過剰な負担は PL の再断裂につながることもあり、前十字靭帯再建時の固定方法には十分注意すべきと言える。今回のモデルの中では、4 番目のモデルが再建前の状態に近いと判断された。

本研究は今回のモデルを参考に、今後、膝前十字靭帯再建術の最適な方法を探るうえで重要な示唆を与えるものとする。

論文提出者は、各審査員の質問に対して的確に答えることができ、関連領域についての諮問にも適切に答えられており、十分な学力を有していることが示された。また、本研究における限界も十分に考察されており、審査委員会は本論文を学位論文として適切なものであると判断した。