

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820079

研究課題名(和文) 膝関節靭帯再建術評価装置の開発

研究課題名(英文) Development of a Knee Joint Ligament Reconstruction Evaluation Device

研究代表者

武田 量 (Takeda, Ryo)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90645095

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では膝関節靭帯再建術評価装置を開発した。本装置は材料試験機に設置された膝関節固定用治具、6軸力センサと慣性センサから構成される。膝の全6自由度を本装置で制御可能とした。実験は人工樹脂膝関節及びブタ後膝関節モデルを作成した。これらモデルを用いて異なる膝靭帯再建術法及び異なる人工靭帯材料が膝の支持力と可動範囲に及ぼす影響を測定した。結果、人工靭帯に用いられている材料の荷重変位曲線は生体内の靭帯のものとは異なった。また本装置で特定の線維束が膝の回転運動と6軸支持力に及ぼす影響を明らかにした。本研究では異なる靭帯束には異なる機能を有することが確認され、膝靭帯二重束再建術手法の有効性が示された。

研究成果の概要(英文)：A knee joint ligament reconstruction evaluation device was developed. This device consisted of a novel knee joint fixation rig attached to a material testing machine, a 6-axis force sensor and inertial measurement units. This device was capable of controlling all 6 degrees of freedom of the knee. Experiments were performed on an artificial resin knee joint and a porcine knee joint. They were used to determine the effects of various reconstruction techniques and artificial ligament materials on the knee joint load and range of motion. As a result, the load/displacement curves for artificial ligaments were different from those of natural ligaments. In addition, this device was capable of measuring the 6-axis load contributions and the rotational motion caused by the individual ligament bundles within the knee joint. The result of this research determined the different functions of different ligament bundles and supported the effectiveness of double bundle reconstruction techniques.

研究分野：機械工学

キーワード：膝関節 靭帯 再建術 支持力 評価

### 1. 研究開始当初の背景

日本において、関節症の総患者数は平成 11 年の約 75 万人から平成 20 年の約 118.5 万人まで増加している (厚生省：平成 11 年患者調査患者調査、平成 20 年患者調査患者調査)。関節症は特に高齢者で多く報告される傾向があり、人口の高齢化に伴い今後この人数は増加すると予想される。膝関節の疾患で約 40% は靭帯損傷によるものである (Miyasaka ら, American Journal of Knee Surgery, 1991)。膝関節には、前十字靭帯 (ACL)、後十字靭帯 (PCL)、外側側副靭帯 (LCL)、内側側副靭帯 (MCL) の 4 つの主要靭帯が存在する。これらの靭帯は運動時における膝の安定性に深く関わっており、断裂した場合は膝関節が脱臼しやすくなり、変形性関節症 (Osteoarthritis: OA) の発症にも繋がる。そこで、断裂した靭帯の機能を復元するには靭帯の再建術が必要となる。靭帯再建術には主に 2 種類存在する：

- 移植腱再建術：損傷膝関節靭帯の代わりに、他の器官から腱組織を切除して移植。移植元となる器官：膝蓋腱、半腱様筋腱、膝腱。
- 人工靭帯再建術：損傷膝関節靭帯の代わりに、人工材料 (ポリエステル繊維等) を移植。

しかし、膝関節靭帯再建術には課題はまだ多く、標準的処置方法は定まっていない。まず、移植腱再建術を行った場合、他の器官も損傷してしまうため、治療の回復に時間が必要になると感染症を引き起こすリスクが高くなってしまふ。その反面、人工靭帯再建術を用いた場合、生体材料と異なった力学特性を示すため、本来の膝関節靭帯の機能を復元できない点と耐久性が低いという点が課題となっている (Legdarni, Int Orthop, 2010)。その他、再建靭帯の固定に用いられる Canal (骨に空ける靭帯の穴) の位置や移植する靭帯束の数 (Single, double Bundle Reconstruction) など標準となる処置方法が定まっていない (Mulcahey ら, The Knee, 2012)。その主な理由は、再建術の評価方法にある。現在、術後の患者に対して SF-36 等のアンケート形式の質疑応答により再建術方法が成功又は失敗したかを評価している (Ochiai ら, Arch Orthop Trauma Surg, 2012)。アンケートは患者の定性的な評価が影響するため、患者の術後の回復経過を評価することは可能だが、ある再建術手法を他の再建術手法と定量的に比較するのは難しい。そこで、靭帯再建術方法を定量的に評価できる手法が存在すれば、新しい靭帯再建術の開発や新人工靭帯の材料開発を進展させると共に標準となる処置方法を定めることが可能である。

### 2. 研究の目的

本研究では膝関節靭帯再建術及び人工靭帯を評価するための装置を開発した。まず、万能材料試験機と膝関節固定用治具からな

る実験装置を作成した。実験では膝関節の代替モデルとして人工靭帯による靭帯再建術を再現した医療用樹脂膝関節モデルや動物膝モデルを用いた。万能材料試験機の先端と関節固定用治具間には力覚センサを介し荷重を測定した。また、膝関節モデルの大腿骨部と脛骨部には加速度・角速度センサを取り付け、それぞれの相対的な位置姿勢を計測した。関節固定用治具にはベアリングとリニアベアリングが内蔵され、万能材料試験機によって与えられる垂直変位により、膝関節の屈曲伸張動作を実装した。膝関節の可動範囲、支持力、回転中心軸の移動により異なる人工靭帯と靭帯再建術を比較可能とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 膝関節靭帯再建術評価装置

本研究では膝関節靭帯再建術評価装置の設計・開発・製作を行った (図 1)。装置の構成は以下の通り：

- ・ 万能材料試験機 (島津製作所製 EzGraph)
- ・ 6 軸力覚センサ (ワコーテック製 DynPick)
- ・ 角速度加速度センサ IMU (ATR-Promotion 製 TSND121)
- ・ 自由度解放可能な膝関節固定用治具 (自作開発)

本装置にヒト膝代替モデルを設置し、万能材料試験機により垂直方向に対する変位を与えることにより、膝関節に荷重を与えた。

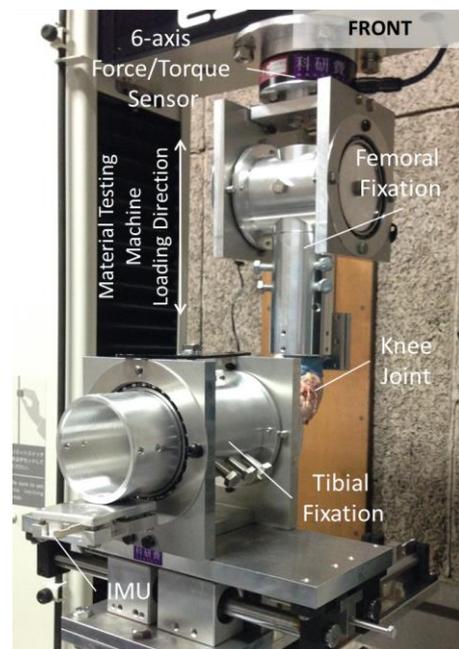


図 1. 本研究開発の節靭再建術評価装置

膝関節固定用治具は大腿骨固定部と脛骨固定部に分けた。大腿骨固定部は大型回転ベアリングを内蔵し、膝の屈曲・伸張の 1 つの回転自由度を任意に開放・拘束可能とした。また、脛骨固定部にも同様、回転ベアリングを内蔵し膝の内旋・外旋と内反・外反の 2 つ

の回転自由度を解放・拘束可能にした他，リニアベアリングで膝の内側・外側と近位・遠位の 2 並進自由度を解放・拘束可能にした．膝関節の運動には 6 自由度存在する．その 6 自由度の内この治具で 5 自由度，材料試験機により変位を与える前方・後方の 1 自由度を制御した（図 2.）．さらに，治具の大腿骨固定部と脛骨固定部にはそれぞれ IMU センサを設置し，測定される角速度と加速度から回転自由度角度を測定した．

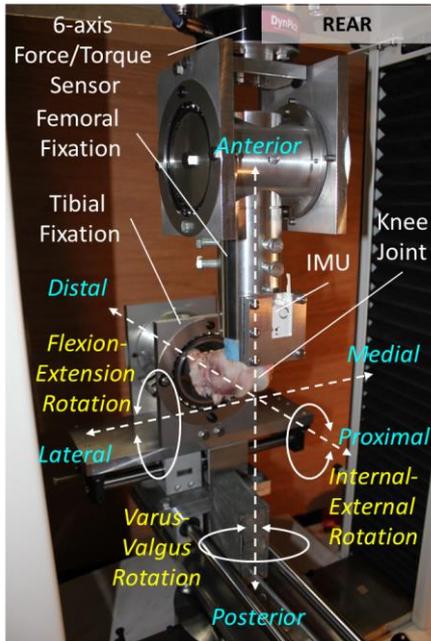


図 2. 装置と膝関節運動自由度の関係  
(並進自由度：青，回転自由度：黄色)

(2) ヒト膝関節代替モデル

本研究では 2 つのヒト膝関節代替モデルを用意した．

- ・ 医療用樹脂膝関節モデル：ヒトの成人男性実寸法の樹脂骨モデル（Sawbone 製）より作成．人工靭帯材料による再建術を再現（図 3.）．
- ・ 動物膝関節モデル：構造と力学的特性がヒトと似ていることから，ブタ後膝関節を使用．異なる靭帯再建術状態を再現（図 4.）．

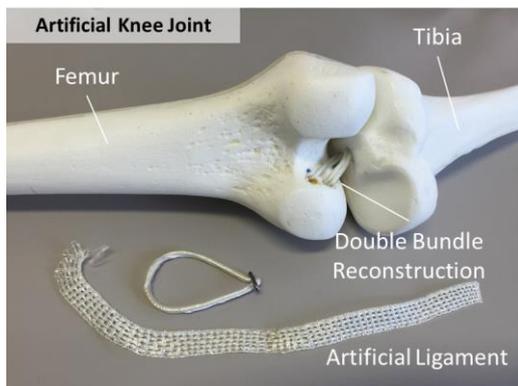


図 3. 人工靭帯再建術モデル

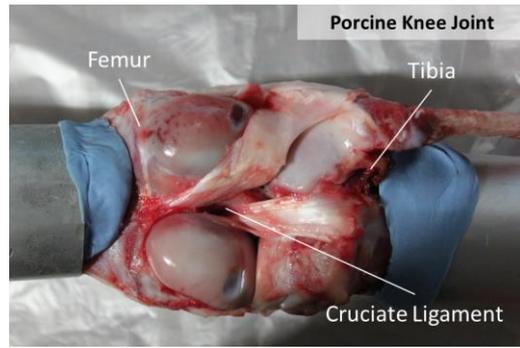


図 4. 靭帯再建術法再現モデル

4. 研究成果

再建術の Single と double bundle reconstruction の違いは，靭帯を構成する線維が単一束か二重束と見なすかの見解に基づく．本研究では，その一段階として膝十字靭帯二重束説に基づいて，ACL と PCL を 2 つの線維束に分離して支持力を測定した．動物膝関節モデルを用いて，実験で得られた支持力計測例を図 5. に示す．

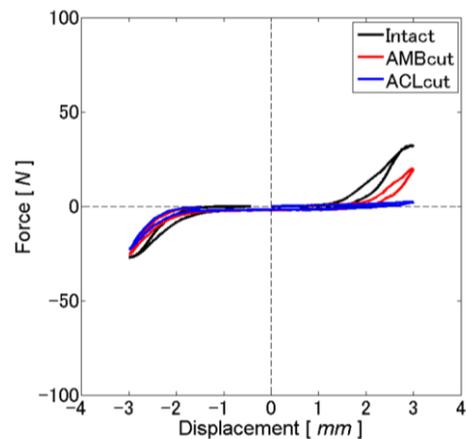


図 5. 異なる線維束状態の荷重変位曲線

膝関節膝関節靭帯再建術評価装置によって与えた前後方向（AP）の変位に対する AP 方向の前十字靭帯の支持力を現した．実験では関節モデルの二線維束を順に切除し，健全な状態（Intact）と比較した．それぞれの十字靭帯を構成する線維束は以下の通り：

- ・ ACL : Anteromedial Bundle (AMB) と Posterolateral Bundle (PLB)
- ・ PCL : Posteromedial Bundle (PMB) と Anterolateral Bundle (ALB)

また，本研究で開発した装置の特徴でもある，自由度開放・拘束機能を用いて，膝自由度を順に開放していった場合による支持力の変化も測定した．得られた 6 軸支持力結果をまとめたものを図 6-11 に示す．測定された支持力方向は以下の通り：

- ・ 前方後方 Anterior-Posterior (AP)

- 近位遠位 Proximal-Distal (PD)
- 内側外側 Medial-Lateral (ML)
- 屈曲伸展 Flexion-Extension (FE)
- 内旋外旋 Internal-External (IE)
- 内反外反 Varus-Valgus (VV)

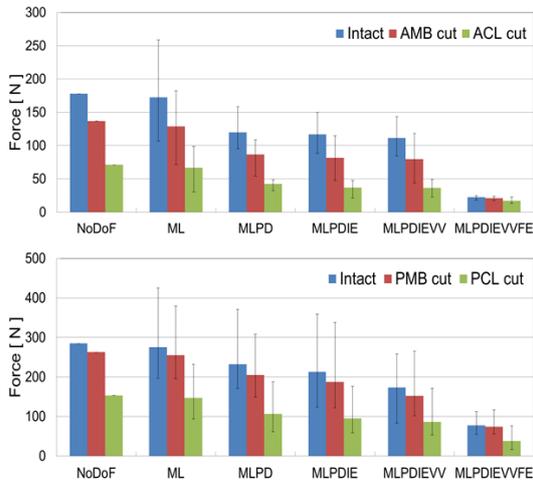


図 6. ACL 及び PCL の AP 方向支持力

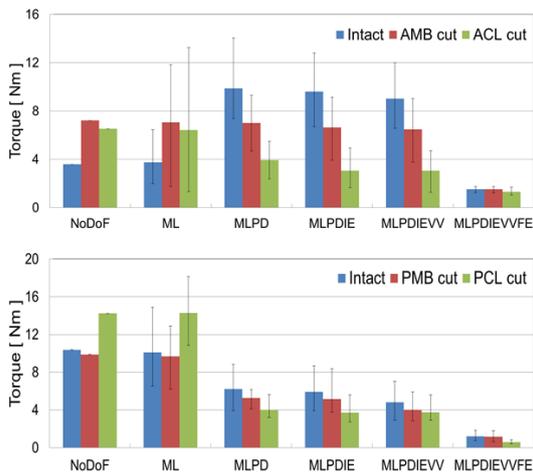


図 7. ACL 及び PCL の FE 方向支持力

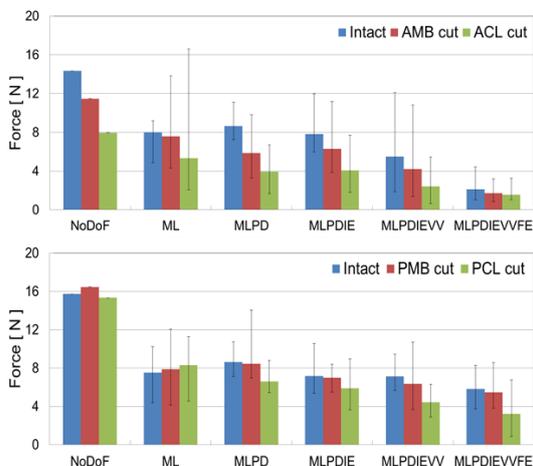


図 8. ACL 及び PCL の ML 方向支持力

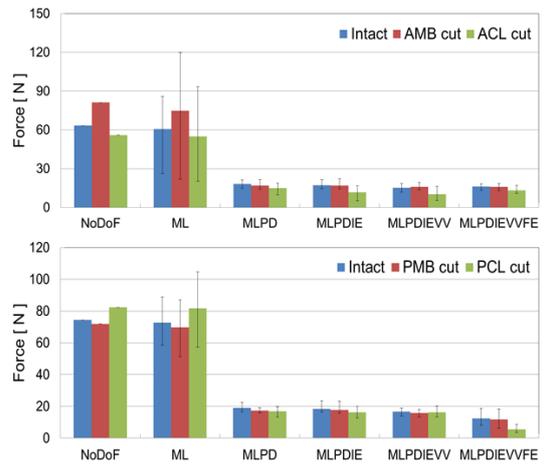


図 9. ACL 及び PCL の PD 方向支持力

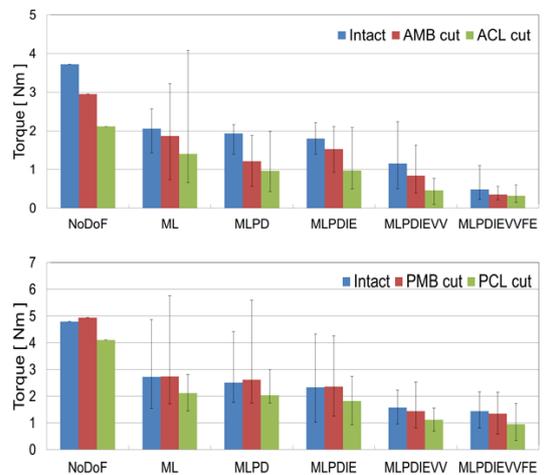


図 10. ACL 及び PCL の IE 方向支持力

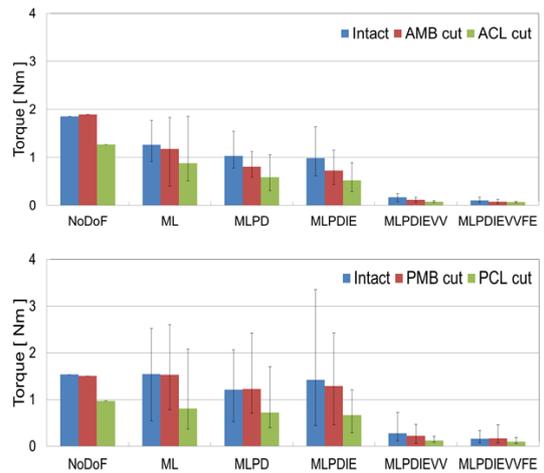


図 11. ACL 及び PCL の VV 方向支持力

結果, ACL 内の AMB と PLB がそれぞれ 30% と 70%, PCL 内では PMB と ALB がそれぞれ 20% と 68% 支持力に寄与していることが判明した。また, 膝自由度の開放に伴い, 支持力は大きく低下した。本来生体内では, 実験室内での測定のように拘束されないため, 本研究で開発した装置は自然な膝の状態に近い支持力値が得られたと考える。尚, 本研究では

線維束が膝関節の安定性に異なる機能があることが判明し、膝関節十字靭帯二重束再建術の有用性が確認された。

その他、人工靭帯材料を用いた再建術モデルを行った。支持力は変位に対して線形的に変化し、生体材料に見られる支持力弛緩現象は現れなかった。また、人工靭帯を通す骨孔の位置や靭帯をアンカする際のプレテンション量による支持力の差異が確認された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 武田量, 奥住啓介, 佐々木克彦. 後十字靭帯束が膝関節安定性に及ぼす影響. 日本機械学会 第26回バイオフィロンティア講演会. 2015年10月2日
- ② Ryo Takeda, Keisuke Okuzumi, Yasuyuki Kawaguchi, Katsuhiko Sasaki. Investigations of the Load Contributions of the PM and the AL Bundles of the PCL. The 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics. 2015年9月16日
- ③ Ryo Takeda, Keisuke Okuzumi, Katsuhiko Sasaki. Investigation of the Load Contributions of the Anterior Cruciate Ligament Bundles against Degree of Freedom Release. The 25th Congress of the International Society of Biomechanics. 2015年7月12日
- ④ ※武田量, 奥住啓介, 佐々木克彦. 十字靭帯束が膝関節安定性に及ぼす影響の評価. 日本材料学会第64期通常総会・学術講演会. 2015年5月23日
- ⑤ 奥住啓介, 武田量, 于路, 佐々木克彦. 異なる靭帯再建術が膝関節可動範囲に及ぼす影響と支持力の測定. 日本機械学会 第25回バイオフィロンティア講演会. 2014年10月3日

[その他]

## 受賞

学会発表④にて:

日本材料学会 日本材料学会第64期優秀講演発表賞. 2015年5月

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 量 (TAKEDA, Ryo)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号: 90645095