

令和元年6月11日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14554

研究課題名(和文)力学負荷条件と形状に基づいた膝関節靭帯断裂シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of a knee joint ligament rupture simulator based on mechanical loads and geometric conditions

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では力学負荷条件と形状に基づいた膝関節靭帯断裂メカニズムを解析した。まず、万能材料試験機、膝関節固定用治具、恒温高湿庫からなる膝関節靭帯断裂再現装置を作成し、膝関節の代替モデルとしてブタ後膝関節を用いた。膝関節固定用治具に膝モデルを設置し、万能材料試験機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。材料試験機は靭帯が損傷するまで膝モデルに繰り返し変位を与え、損傷に必要な荷重等の物性値を断定する。また、靭帯形状はMRIから靭帯部分のみを画像分割処理で抽出する。靭帯の物性値と形状を基に膝靭帯の有限解析モデルを構築し、膝の運動条件に伴う各靭帯の荷重状態を再現する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して次の成果を得た。一定の変位負荷の影響よりも1度の過剰な変位負荷が靭帯損傷に及ぼす影響が大きい。また、膝関節の姿勢により弛緩状態及び緊張状態の靭帯が存在するため、靭帯損傷の割合が異なる。さらに、既に断裂している靭帯が存在する場合、他の靭帯が損傷しやすくなる。これらの測定結果を基に膝関節靭帯断裂を再現するシミュレーションの構築した結果、本解析シミュレーションモデルを使用して正確に膝靭帯の支持力が推定可能となった。したがって、本研究全体を通して靭帯断裂メカニズムを定量的に推定可能となり、靭帯再建術の手術法の評価に応用されることが今後期待される。

研究成果の概要(英文)：The knee ligament rupture mechanism based on the mechanical load condition and the geometry was analyzed. First, a knee joint ligament experimental setup consisting of a universal material testing machine, a knee joint fixation jig, and a thermo hygrosat chamber was created. Porcine stifle joint was used as a substitute knee joint. The knee model was set in the knee joint fixation jig, and the load was measured via a force sensor located between the material testing machine and the joint fixation jig. The material testing machine applied a cyclic displacement to the knee model until the ligament was damaged. Then the mechanical property values, such as the load, required for ligament damage was determined. Furthermore, the ligament geometry was extracted from MRI by an image segmentation process. Based on the obtained mechanical properties and geometry of the ligaments, a finite element analysis model capable of reproducing knee joint ligament loads was constructed.

研究分野：機械工学

キーワード：膝関節 靭帯 損傷 変位負荷 サイクル負荷 有限要素モデル

## 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, 1991)。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。

従来、靭帯の断裂現象を調査した報告は少なく、これまでは主に膝関節に存在する 4 つの主要靭帯線維束（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)）が膝関節の安定性に寄与するかが研究されてきた。本来、膝靭帯の力学特性を調べる場合はヒト膝関節モデルを用いた力学試験を行う。万能材料試験機に正常なヒト膝関節を設置し、単軸引張 - 圧縮試験をする（Butler ら, 1980, Amis ら, 1996）。また、万能材料試験機の代わりに、6 自由度ロボットアームと力覚センサを併用した手法も存在する(Fujie ら, 1993)。これらは主に靭帯正常状態 vs. 靭帯欠損状態のヒト膝関節の支持力を測定して、その測定値の差分から欠損部分が本来持つ支持力を推定した。しかし、靭帯断裂が起こる際の引張荷重、ねじり、ラチェットひずみ等の物性値の報告は少ない。近年、靭帯断裂の評価を行った報告では Anderson らがスポーツ選手の MRI イメージから ACL の長さを測定し、性別、身長、体重、筋量と ACL 断裂状態の相関を報告した（2001）。統計上の相関は得られたが、力学特性との関連性の検証は行われていない。そこで、膝の中の 4 つの主要靭帯個々の断裂が起こる際の力学特性を定量的に測定することが可能であれば、靭帯断裂が起こりやすい膝の運動を推定できる共に、靭帯断裂を防ぐための膝関節用サポーター・装具設計の指標となると考えた。さらに、靭帯再建術法や人工靭帯の耐久性の評価が成果として期待される。以上の理由より、力学負荷条件に基づいた膝関節靭帯断裂シミュレータを開発する。

## 2. 研究の目的

本研究では力学負荷条件と形状に基づいた膝関節靭帯断裂メカニズムを解析する。まず、万能材料試験機、膝関節固定用治具、恒温高湿庫からなる膝関節靭帯断裂再現装置を作成する。膝関節の代替モデルとしてブタ後膝関節を用いる。膝関節固定用治具に膝モデルを設置し、恒温高湿庫内で試験を行うことで膝モデルの時間経過劣化を防ぐ。万能材料試験機と関節固定用治具間には力覚センサを介し荷重を測定する。材料試験機は靭帯が断裂するまで膝モデルに繰り返し変位を与え、損傷に必要な荷重等の物性値を測定する。また、靭帯形状は MRI から靭帯部分のみを画像分割処理で抽出する。靭帯の物性値と形状を基に膝靭帯の有限解析モデルを構築し、膝の運動条件に伴う各靭帯の荷重状態と損傷の様子を再現する。

## 3. 研究の方法

本研究では期間内に以下の項目を目的として調査を進めた：

### (1) 膝関節靭帯断裂再現装置を構築

膝関節代替モデルに断裂を再現し、変位と力学情報を測定できる実験装置を作成。装置は以下のような構成とした：万能材料試験機、6 軸力センサ、ヒト膝関節代替モデル(豚後膝関節)、恒温高湿庫、自由度解放可能な膝関節固定用治具。膝関節固定用治具は恒温高湿庫内に設置し、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、膝靭帯断裂を再現。本調査ではヒト膝関節と寸法 / 構造に近いことからブタ後膝を膝関節代替モデルとして用いた。

### (2) 靭帯組織断裂を引き起こす引張荷重とねじりを特定

4 つの主要靭帯が断裂を起こす際の力学条件を測定。膝モデルを(1)に設置し靭帯組織断裂試験を行った。膝関節は 6 自由度を有し、4 つの主要膝靭帯が寄与している自由度方向はそれぞれ異なったため、個々の主要靭帯が 6 自由それぞれに対する靭帯断裂試験を行った。さらに主要靭帯のいずれか一つしか存在しない単一靭帯膝モデルを作成した。単一靭帯膝モデルが断裂するまで 6 自由度の内一つの自由度のプラス / マイナス方向に対する並進変位を与え、力覚センサより断裂時の力学条件を測定するとともに膝全体の支持力に対する寄与率を推定。

### (3) 高サイクル負荷試験が靭帯の支持力及び自由度に及ぼす影響

膝関節モデルに繰り返し負荷試験を行った後に起こる支持力変化を計測。膝モデルに低サイクル繰り返し負荷試験を行った後、膝関節の支持力が約 30%低下した。これにより靭帯線維に繰り返し塑性 / ラチェット効果が表れたと考える。そのため、高サイクル荷繰り返し負荷試験を行った場合の支持力低下を測定。

### (4) 膝関節靭帯断裂シミュレータの構築

各靭帯線維束の形状と物性値を考慮し、変形の様子を再現。研究目標(2)で計測されたデータより得た断裂に関する物性値を基に膝関節靭帯断裂シミュレータを構築する。モデル作成に必要な形状データはマイクロ MRI 装置より計測し、大腿骨、脛骨、半月板、各靭帯線維束の形状データを抽出。これらの形状モデルを 3 次元 CAD ソフトウェア SOLIDWORKS (Dassault Systèmes 製)を介して 3 次元メッシュモデルに変換。さらに、3 次元膝メッシュモデルを汎用有限要素解

析ソフト ANSYS(Ansys, Inc 製)で取り込み, 各靱帯線維束の物性値を入力し 3 次元有限要素解析モデルを構築. 最後にアルゴリズムで変位を定義した後, 異なる運動・荷重・靱帯形状による各靱帯線維束の負荷状態を計算.

#### 4. 研究成果

##### 靱帯断裂模擬実験の成果

本研究では靱帯断裂を模擬した力学負荷と高サイクル負荷による靱帯支持力の影響を調べた. まず, 4 つの主要靱帯線維束が健全 (Intact) モデル, ACL と PCL が健全 (ACL+PCL) モデル, LCL と MCL が健全 (LCL+MCL) モデル, ACL のみ健全 (ACL only) モデル, PCL のみ健全 (PCL only) モデルという異なる靱帯線維状態の試験片を用意した. これらの試験片を開発した実験装置に取り付け, 靱帯断裂を模擬した過剰な変位負荷及び一定変位のサイクル負荷を与えた. 実験方法は図 1 に示す. 図 1 中の Neutral Position とは支持力の最大値と最小値の誤差が 5% 以下になる位置のことを指す (図 3). 尚ここでの支持力とは図 2 中の  $Fz_{max}$  と  $Fz_{min}$  の絶対値の和である Amplitude のことを指す.

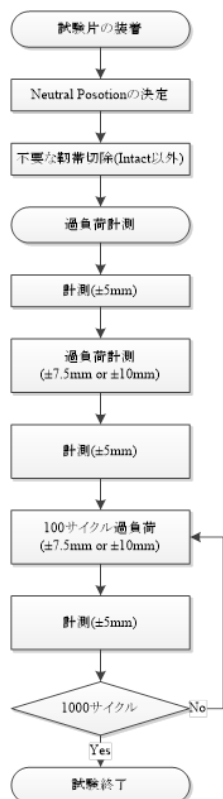


図 1 実験のフローチャート

Intact モデルに過剰な AP 方向変位 ( $\pm 5\text{mm}$ ,  $\pm 7.5\text{mm}$ ,  $\pm 10\text{mm}$ ) 与えた結果を図 3 に示す. 試験片には個体差があるため初期値の支持力を 100% としその後の変化を減少率で評価した. 縦軸を減少率, 横軸をサイクル数とした. 尚, 比較したサンプル数は  $n=3$  の Amplitude の平均値である. 図 3 から  $\pm 5\text{mm}$  は線形的に減少しているのに対し,  $\pm 7.5\text{mm}$  及び  $\pm 10\text{mm}$  は負荷後に急激に支持力減少率が低下していることが分かる. また, サイクル数を重ねても減少する割合が増加することはなく, むしろ減少している. このことから, 靱帯はサイクル数による影響よりも 1 度の過剰な変位負荷による影響が大きいと考えられる.

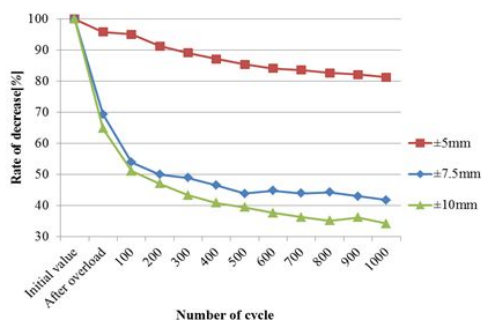


図 3 異なる変位による試験片の支持力減少率

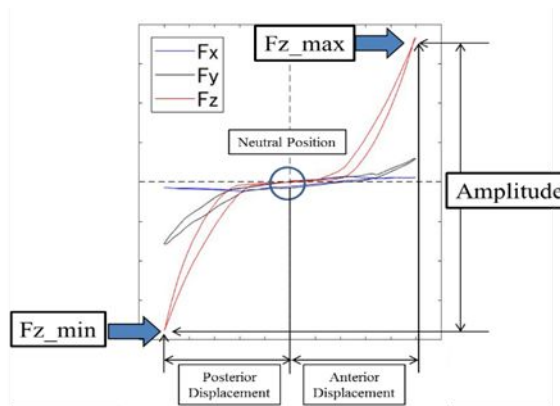


図 2 実験での荷重測定の定義

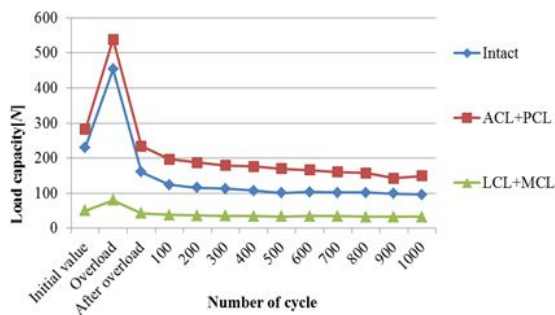


図 4 Intact, ACL+PCL, LCL+MCL モデルの支持力

続いて、どの靭帯に最も影響があるかを調べた。図4は縦軸を支持力、横軸をサイクル数とした。図4からLCL+MCLの支持力はACL+PCLやIntactに比べて明らかに小さい。支持力が小さいと負荷が小さく、結果として影響が小さいと考えられる。このことからLCLとMCLに対する支持力の影響は少ないと言える。よって靭帯の損傷はACLもしくはPCLのどちらかであると分かる。次に、図5は縦軸を減少率、横軸をサイクル数とした。±7.5mmの変位負荷時のACL only、PCL only および ACL+PCL モデルの減少率を示している。ACL only モデルは最も減少率が下がりにくいのにに対し、PCL only モデルは最も下がっていることが分かる。このことから、膝角度90度において最も損傷の影響が大きい靭帯はPCLと言える。

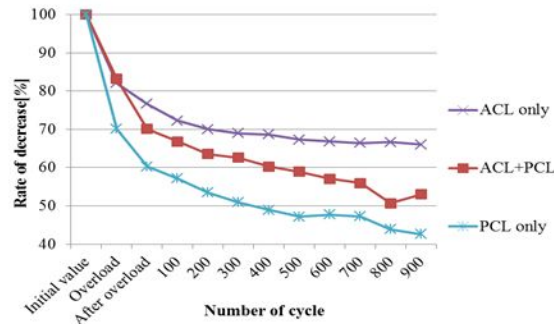


図5 ACL only ,ACL+PCL ,PCL only モデルの支持力減少率

### 膝関節靭帯断裂シミュレータ開発の成果

本研究で使用する3次元膝関節構造モデルの主な構成要素は大腿骨、脛骨、靭帯である。また考慮される主要な靭帯はACLとPCLである。大腿骨と脛骨の座標系は無負荷時、すなわち膝が完全に伸びた場合に一致するため、定義する座標系は1つのみである。本研究では、内側-外側(ML)方向をX軸、近位-遠位(PD)方向をY軸、前方-後方(AP)方向をZ軸として等方均質弾性体として参考文献からヤング率及びポアソン比を入力した。靭帯は生体軟組織であるため、負荷の立ち上がりは非線形な挙動を示す。そこで本研究では軟組織に用いられ、5パラメータMooney-Livlinモデルで力学モデルを定義した。5パラメータMooney-Rivlinモデルの材料物性値は表1に示す。

表1 ACLとPCLのMooney-Livlinモデル5パラメータ

Model	$C_{10}$ [MPa]	$C_{01}$ [MPa]	$C_{11}$ [MPa]	$C_{20}$ [MPa]	$C_{02}$ [MPa]
ACL	48.426	-47.619	2326.4	-5649.7	3448.5
PCL	16.818	-16.064	1060.4	-2634	1654.6

本研究では、有限要素静的構造解析法(FEM)を行った。解析には汎用有限要素解析ソフトウェア(ANSYS Workbench19.1, ANSYS Inc.)を用いた。解析方法の手順はモデルに材料物性値を入力し、解析モデルに膝関節引き出し試験と等しい境界条件を与えた。境界条件は大腿骨上部端面に変位を与え、脛骨の下部端面を完全固定とした。構築された膝関節シミュレーションモデルを図6に示す。

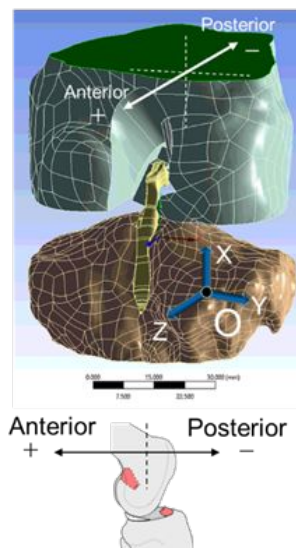


図6 膝関節シミュレーションモデルと変位方向の定義

ACL の物性値を用いて、静的構造解析の結果から得た力-変位曲線を図 7 に示す。縦軸が靭帯の支持力、横軸が変位量を示す。変位量 5mm において、ACL シミュレーションモデルの解析値は 105.3N の支持力を記録し、過去の実験値 (reference AP drawer result) との差が 7.4N 発生した。変位量 4.9-5.0mm を除く変位の領域では実験値との差が 3N 未満に収まった。PCL の物性値を用いて、静的構造解析の結果から得た力-変位曲線に示す。縦軸が靭帯の支持力、横軸が変位量を示す。変位量 6mm において、比較対象の実験値 (reference AP drawer result) は 54.2N の支持力を記録した。PCL シミュレーションモデルの解析値は 54.8N の支持力を記録し、差が 0.6N となった。全体において支持力の差は最大でも 5N 未満に収まった。

PCL の物性値を用いて、静的構造解析の結果から得た力-変位曲線を図 8 に示す。縦軸が靭帯の支持力、横軸が変位量を示す。変位量 6mm において、比較対象の実験値 (reference AP drawer result) は 54.2N の支持力を記録した。PCL シミュレーションモデルの解析値は 54.8N の支持力を記録し、差が 0.6N となった。全体において支持力の差は最大でも 5N 未満に収まった。

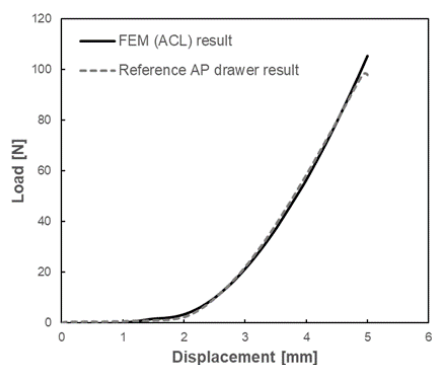


図 7 ACL シミュレーションモデルによる支持力推定

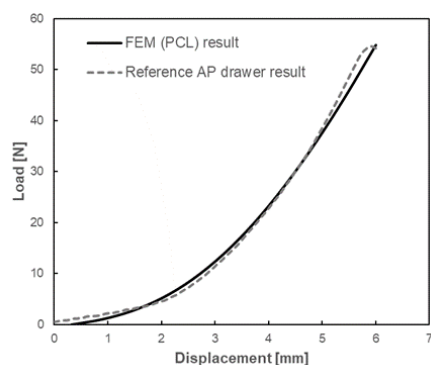


図 8 PCL シミュレーションモデルによる支持力推定

本研究では靭帯断裂を模擬した力学負荷と高サイクル負荷による靭帯支持力の影響を調べた。また、主要靭帯の内どの靭帯に最も影響があるのかを調べた。その結果、以下の結論を得た：

- ・ 一定のサイクル変位負荷の影響より 1 度の過剰な変位負荷が靭帯損傷影響が大きい。
- ・ 膝関節の姿勢により弛緩状態及び緊張状態の靭帯が存在するため、靭帯損傷の割合が異なる。膝屈曲角度 90 度において PCL が最も損傷の影響が大きかった。これは、膝屈曲角度 90deg において ACL は弛緩しているのに対し PCL は緊張していることが原因であると考えられる。
- ・ 既に断裂している靭帯が存在する場合、他の靭帯が損傷しやすくなる。PCL 単体では損傷しやすいが ACL と合わさることでその損傷の影響が減少した。膝屈曲角度 90deg では PCL は後方方向のみにしか制動しないのに対し ACL は前方方向のみではなく後方方向にも制動する力が存在し、それにより PCL の損傷の影響が減少したと考えられる。

また、膝関節靭帯断裂を再現するシミュレーションの構築に取り組んだ。結果、シミュレーションモデルの解析結果が参考実験値との差異が 3N 未満に収まることから、本解析シミュレーションモデルを使用して、実際の膝靭帯の支持力を推定できると考えられる。したがって、靭帯断裂メカニズムを定量的に推定可能となり、靭帯再建術の手術法の評価に応用されることが今後期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

Ryo Takeda, Makoto Genma, Katsuhiko Sasaki

Development of a knee joint structural analysis method considering joint geometry and ligament bundles loads

8th World Congress of Biomechanics 2018 年

弦間慎, 武田量, 佐々木克彦, 本田真也

膝関節靭帯線維束の材料物性値を考慮した解析モデルの開発

日本機械学会北海道支部 第 56 回講演会 2018 年

武田 量, 篠原 駿, 弦間 慎, 佐々木克彦

塑性力学の観点から見た膝関節靭帯線維束損傷リスク  
平成 30 年度塑性加工春季講演会 2018 年  
弦間慎, 武田量, 佐々木克彦  
靭帯線維束の支持力を考慮した膝関節構造解析手法の開発  
日本機械学会北海道支部 第 55 回講演会 2017 年  
Ryo Takeda, Lu Yu, Makoto Genma, Katsuhiko Sasaki  
Comparison of the Load Contribution of the Knee Joint Ligament Bundles: Computational  
Modelling vs Desmotomy  
The 26th Congress of the International Society of Biomechanics 2017 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。