

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04269

研究課題名（和文）関節滑液を考慮した膝関節安定性評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of knee joint stability evaluation method considering joint synovial fluid

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）：本研究では膝関節安定性のメカニズムを調査した。まず、膝関節組織の材料物性値が測定可能な膝関節実験用のプラットフォームの構築した。本プラットフォームを用いて関節包・関節滑液が靭帯支持力に及ぼす影響を調査した。結果、関節包、関節滑液は関節靭帯線維と比較して深い屈曲角では膝関節の支持力には大きな影響は確認されなかった。しかし、浅い屈曲角度では支持力に寄与する可能性があることは分かった。最後にCT画像を基に膝関節の実形状数値解析モデルを構築した。任意の角度姿勢で膝関節の引出し運動を再現することが可能で、膝関節安定性に大きく寄与する十字靭帯線維束の荷重状態を推定した。先行研究との比較で妥当性も検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

関節包や関節滑液には靭帯線維束の保護機能や軟骨組織の潤滑機能等があり、膝関節の安定性に深く関係しているのにも関わらず、その機械的な力学特性を定量的に報告した例は少ない。本研究では実験と数値解析を通して、関節包、関節滑液、半月板、靭帯線維束が膝関節安定性のメカニズムに及ぼす影響を明らかにした。従来、靭帯断裂や変形性関節症の患者の術後経過は定性的なアンケート評価を行う事が多い。そのため、本研究で開発した解析手法を用いることで患者の膝関節の力学状態を定量的に提示することが可能となる。今後解析精度が向上した場合、臨床現場における関節症の診断・手術手法の評価、術後経過の観察に用いることが可能だと考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the mechanism behind knee joint stability. First, we constructed a platform for knee joint experiments that can measure the material properties of knee joint tissues. We investigated the effect of joint capsule and synovial fluid on ligament bearing capacity using this platform. As a result, the joint capsule and synovial fluid did not have a significant effect on the bearing capacity of the knee joint at deep flexion angles compared to the ligament fibers. However, it was found that at shallow bending angles may have an affect on the bearing capacity. Finally, a geometrically accurate numerical analysis knee joint model was constructed based on CT image segmentation. It was possible of reproducing the knee joint drawer tests at any flexion angles. As a result the load state of the cruciate ligament fiber bundles, which greatly contributes to the stability of the knee joint, was estimated. The validity was verified by comparison with previous studies.

研究分野：機械工学

キーワード：膝関節 膝関節包 膝関節靭帯 有限要素法 力学試験 膝関節安定性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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 2 年の約 43.8 万人から平成 26 年には約 125 万人まで増加している(厚生労働省：平成 26 年患者調査)。関節症は特に高齢者で多く報告される傾向があり、社会の高齢化に伴い今後もこの人数は増加すると予想される。特に膝関節症の約 40%は靭帯損傷に起因するものである(Miyasaka ら, 1991)。靭帯(Ligament)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。靭帯の損傷や断裂を保護するため、膝関節包内(Joint Capsule)には関節滑液(Synovial Fluid)が存在する。正常であれば膝関節包内には少量の関節滑液が入っており軟骨(Cartilage)、半月板(Meniscus)、靭帯が受ける衝撃を吸収し、軟骨がすれる際の摩擦を減らし、摩擦を防ぐ役割を果たしている。

関節滑液には膝関節の安定性に深く関係しているのにも関わらず、その機械的な力学特性を定量的に報告した例は少ない。これまでは主に膝関節安定性に関わる研究では膝関節靭帯、軟骨、骨を対象とした調査が多い(Amis ら, 1996)。しかし、これらの調査では膝関節包を取り除いているため、関節包や関節滑液の影響は無視されている。

本研究では 関節組織の物性値測定、 数値解析モデル構築と 膝モデル実験を通して膝関節安定性のメカニズムを調査する。では力学試験を通して膝関節の各組織の物性値を特定する。で得られた結果を のモデルで入力し、関節各組織内の圧力・応力分布を計算する。では Ex-vivo 実験では膝モデルの関節包や関節滑液を残し、関節運動時に掛かる荷重・トルクを測定する。と の結果を比較して数値解析モデルの評価・検証する。これまで膝関節各組織(靭帯組織、骨組織、半月板、滑液)の相互作用を考慮した解析方法は無かったため、学術的及び独創的な結果が予想される。

2. 研究の目的

膝関節安定性のメカニズムを解析するため以下の研究目標を基に研究計画を進めた：

研究目標 A)	実験プラットフォームの構築
研究目標 B)	膝関節組織材料物性値測定実験
研究目標 C)	膝関節滑液が靭帯支持力に及ぼす影響を調査
研究目標 D)	膝関節解析モデルの構築

3. 研究の方法

実験プラットフォームの構築

専用の膝関節固定用治具が取り付けられた万能試験機に任意の屈曲角度で大腿骨、脛骨を固定し、大腿骨に変位を与えた。万能試験機上部に設置されたの静電容量型 6 軸力覚センサによって荷重とトルクを測定した。

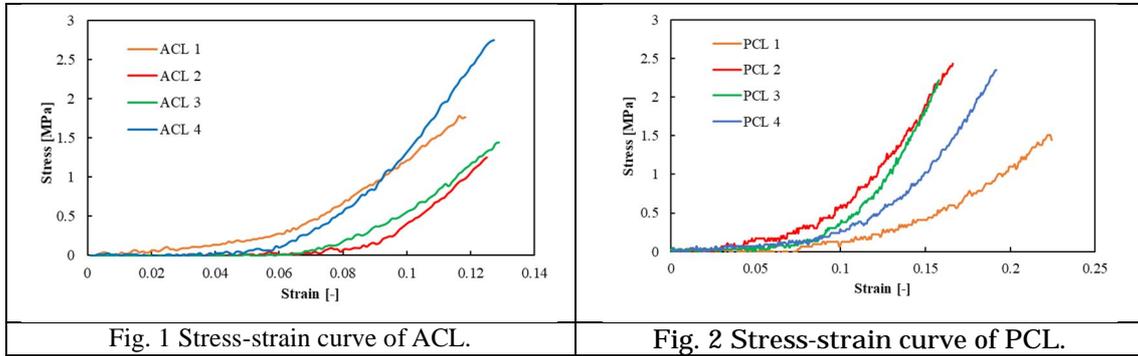
万能材料試験機のヘッドは膝関節の前後(AP; Anterior-Posterior)方向に移動し垂直の変位を与える。万能材料試験機のヘッド側では、屈曲伸展(FE; Flexion-Extension)方向に任意の開放・固定が出来る。万能材料試験機の土台側では、ベアリング機構により内外旋(IE; Internal-External)方向、内外側(ML; Medial-Lateral)方向、近遠位(PD; Proximal-Distal)方向、内外反(VV; Varus-Valgus)方向の自由度(DOF; Degrees of Freedom)を調節可能である。

膝関節組織材料物性値測定実験

本研究では、林ら(2003)が行った ACL の引張試験を参考に膝関節靭帯の物性値測定を実施した。ACL の物性値の測定、PCL の物性値の測定を各 4 本ずつ行うため、試験片を計 8 本用意した。試験片の識別のために各試験片に番号を振った。ACL の試験片を ACL 1-ACL 4、PCL の試験片を PCL 1-PCL 4 に振り分けた。

算出した応力-ひずみの関係を図 1 と図 2 に示す。ACL、PCL とともに変位を与えても力が作用しない弛緩領域と、変位を与え続けると力が加わり始める靭帯の緊張領域が見られた。また応力の比較のため ACL ではひずみが 0.12、PCL ではひずみが 0.15 における応力を比較した。変位と力の関係の比較の際と同様に、ACL、PCL それぞれの応力の平均値をとり、その平均値を標準値として各試験片の応力の割合を算出した。ACL の平均値は 1.60 MPa となり、応力の最大値が測定された ACL 4 では 50.4%の誤差、最小値が測定された ACL 2 では-33.5%の誤差であった。また同様に PCL については平均値 1.30 MPa となり応力の最大値が測定された PCL 4 では 46.8%の誤差、最小値が測定された PCL 1 では-68.3%の誤差であった。誤差は大きいものの変位と力の関係と同様、靭帯は断面積、長さ、また支持力において個人差があり誤差範囲が大きいので、これら 4 つのデータを全て解析で使うものとした。靭帯は生体材料であるため個体差はあるものの Butler ら(1980)や Kristof ら(2017)が行った靭帯の実験結果から提唱しているように靭帯

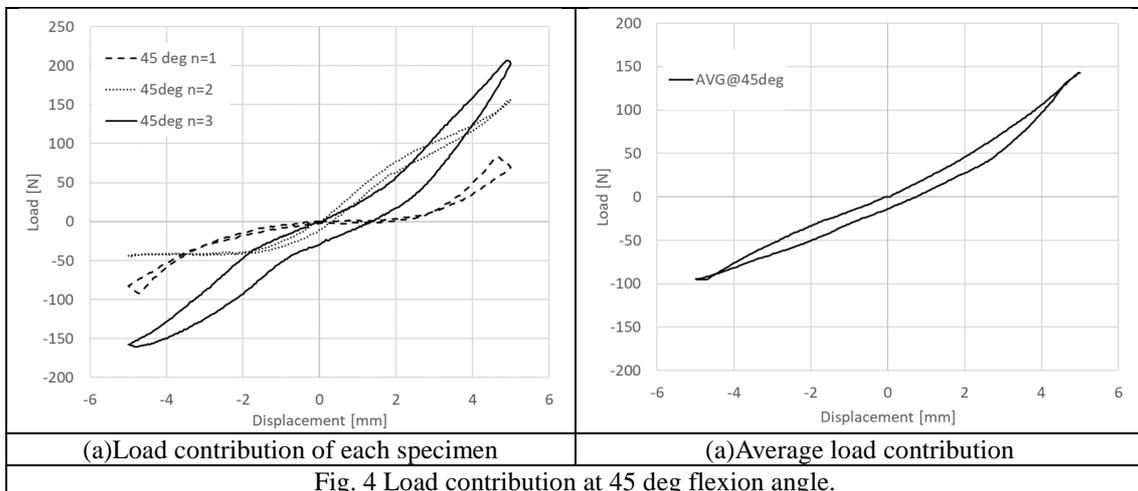
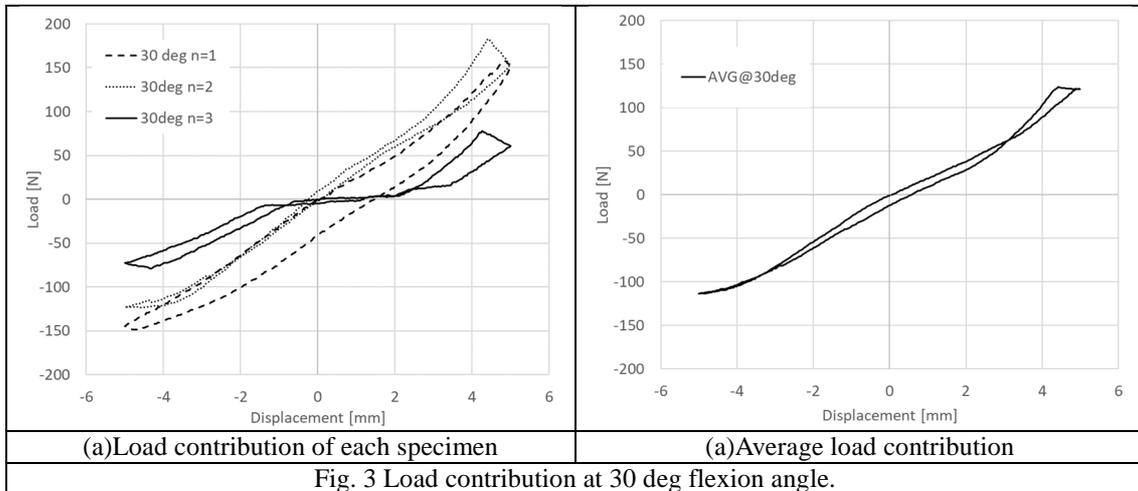
によっては 40%程度の誤差があるとの報告もある。



関節包・関節滑液が靭帯支持力に及ぼす影響を調査

本研究では開発した実験プラットフォームを用いて膝関節包・滑液・半月板が靭帯の支持力に及ぼす影響について調査した。試験片は冷凍状態で保存されたブタ後脚膝関節を用い、使用する際は 24 時間冷蔵で解凍を行った。大腿骨、脛骨、ACL、PCL、LCL、MCL、半月板、関節包のみを残し、他の組織は切除した。実験は膝関節屈曲角度 30、45、60、90 deg で実施した。各関節角度で試験片 (n=3) を用意した。各屈曲角度における変位-荷重曲線を図 3-6 に示す。縦軸は荷重 (N) 横軸は実験プラットフォームで与えた変位 (mm) である。

本実験と靭帯のみを残した先行研究の結果と比較した結果、屈曲角度 30、60、90 deg では大きな差異は見られなかった。しかし、屈曲角度 45 deg では膝関節前方方向 (Anterior) に約 50% 大きな荷重が測定された。本結果から半月板、関節包、関節滑液は関節靭帯線維と比較して深い屈曲角では膝関節の支持力には大きな影響は確認されなかった。しかし、45 deg の浅い屈曲角度では支持力に寄与する可能性があることは分かった。今後は他の膝関節組織の切除試験を通して物性値を推定する必要がある。



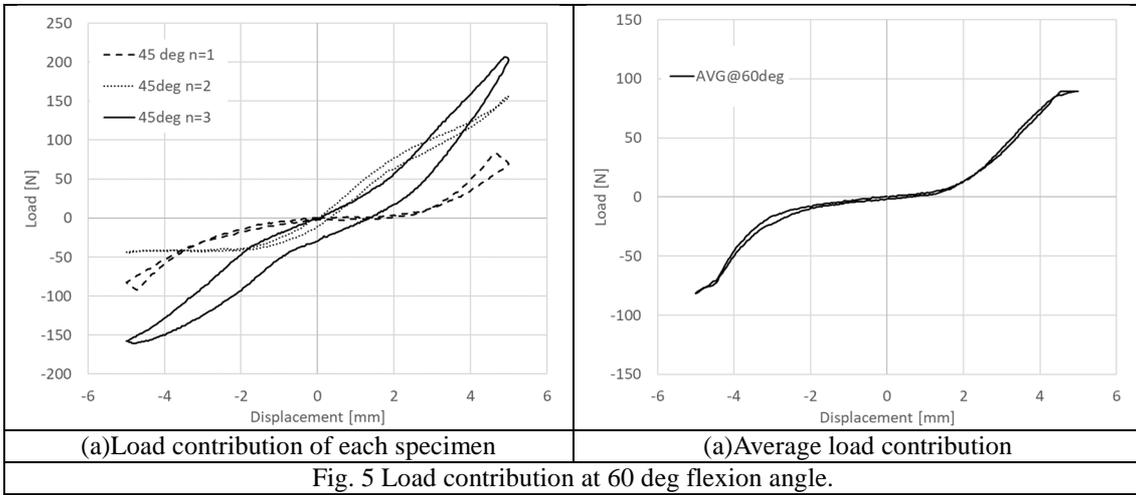


Fig. 5 Load contribution at 60 deg flexion angle.

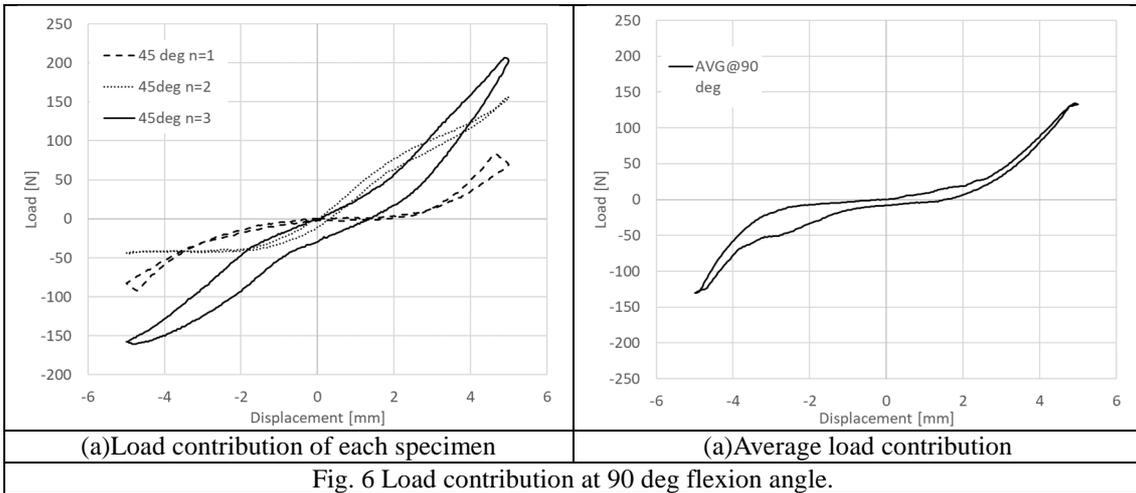


Fig. 6 Load contribution at 90 deg flexion angle.

膝関節数値解析モデルの構築

本研究では CT 画像から膝関節モデルを作成した．本研究ではヒトの膝代替モデルとして生後 3-6 か月前後のブタ後脚膝関節を基に解析モデルを作成した．

完成した解析モデルモデルを図 7 に示す．今回の解析モデルを構築するにあたり，関節包の作成も試みたしかし，複数の CT 画像及び MRI の撮影を行ったが，関節包の形状は抽出できなかった．これは関節包の膜の薄さに起因しており，より解像度が高い MRI 装置や工業用 CT 画像装置などを利用することで解決できると考えている．今後はこれらの装置での撮影の可能性を探る必要がある．

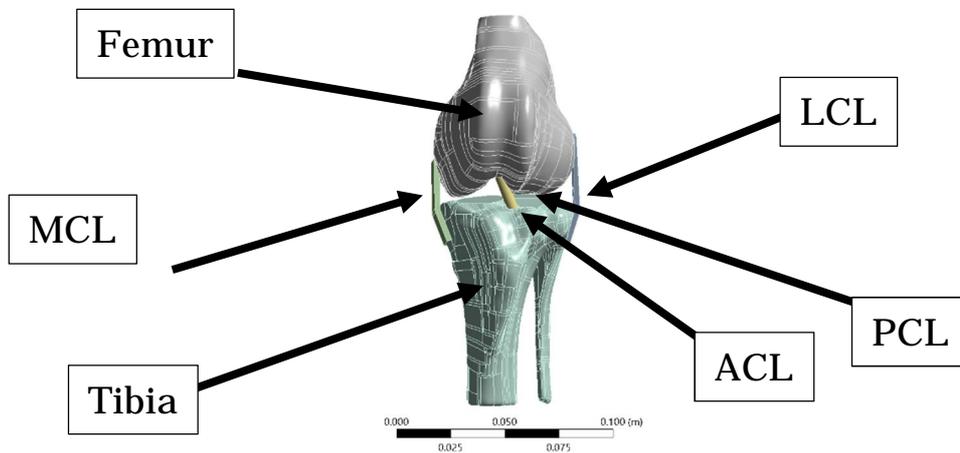


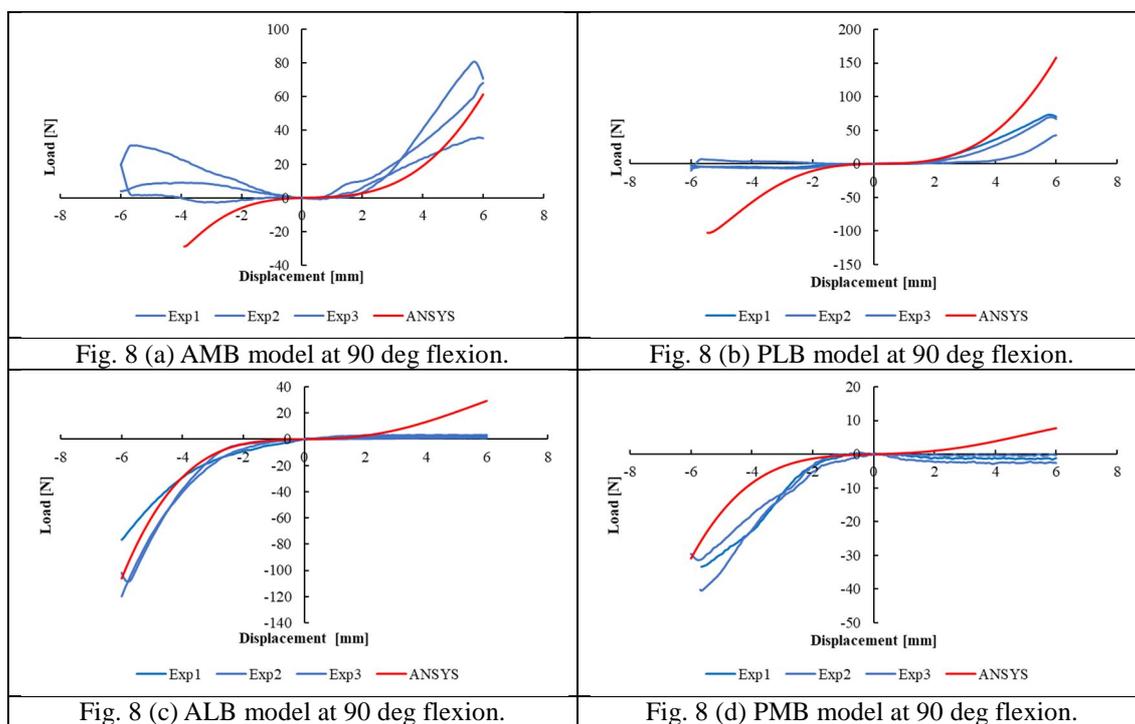
Fig. 7 Complete numerical simulation knee joint model.

構築した装置解析モデルの先行研究結果との比較・検証

Colombet ら (2006) や Andrew ら (2007) の先行研究を参考にし ACL 及び PCL の付着面積を分

割し、簡易的に線維束を再現した。作成した膝関節モデルを用いて解析を行った。解析条件は先行研究の条件と同様の条件を与え、解析結果を比較した。図8に屈曲角度 90 deg の解析結果、(a) AMB モデル、(b) PLB モデル、(c) ALB モデル、(d) PMB モデルの解析結果を示す。縦軸は荷重 (N) 横軸は実験プラットフォームで与えた変位 (mm) である。青線は先行研究の結果で赤線が本解析で得られた結果である。

誤差が生じた部分は (a) と (b) の Posterior 方向、(c)、(d) の Anterior 方向であった。これは靭帯の圧縮挙動を再現できていないためこのような結果となったと考えられる。また変位 6 mm における反力の結果を比較した。最も大きな誤差は (b) の Anterior 方向で 88.0 N、55.7%であった。これは解析結果において (b) のモデルである PLB の影響が実験結果よりも大きく、誤差が生じたと考えられる。解析上では PLB の影響を考慮しながら解析を行う必要があると考えられる。また (c) の Anterior 方向では 26.0 N、88.8%の誤差が生じた。これは PCL の線維束である ALB のモデルも圧縮挙動を再現できず、Anterior 方向で力が出力されたため誤差が生じたと考えられる。一方で他の膝関節モデルの誤差は一桁に収まっており妥当であると考えられる。



4. 研究成果

本研究では膝関節安定性のメカニズムを解析するため研究計画を進めてきた。以下の通りの結論が得られた：

- 膝関節実験プラットフォームの構築し、膝関節組織材料物性値測定実験を実施することで膝関節靭帯組織の材料物性値を測定可能にした。
- また関節包・関節滑液が靭帯支持力に及ぼす影響を調査した結果、関節包、関節滑液は関節靭帯線維と比較して深い屈曲角では膝関節の支持力には大きな影響は確認されなかった。しかし、45 deg の浅い屈曲角度では支持力に寄与する可能性があることは分かった。
- 実験結果の再現性の高い膝関節数値解析モデルの作成を目的として、膝関節の CT 画像を用いたモデル抽出及び数値解析と実験の比較を行った。また任意の屈曲角度で靭帯がどのように荷重を受けるのかを明らかにするため、作成した膝関節モデルを用いて膝関節引き出し実験を再現した解析を行い、先行研究と比較することで結果の妥当性を調べた。
- ACL, PCL の線維束の反力を測定する解析を行った。各屈曲角度の膝関節数値解析モデルの付着部位を変更することで簡易的に靭帯線維束を再現した。各屈曲角度において実験結果と同様の傾向が見られたが、靭帯の圧縮挙動を再現できなかった。また解析において Anterior 方向では PLB、Posterior 方向では ALB の影響が大きいことが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryo Takeda, Koudai Watanabe, Katsuhiko Sasaki, Shinya Honda
2. 発表標題 Simulating the Constraining Forces of the Knee Joint Ligaments considering Ligament Attachment Area and Material Properties
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 航大, 武田 量, 佐々木 克彦, 本田 真也
2. 発表標題 膝関節十字靭帯の形状及び力学特性を考慮した有限要素モデルの開発
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田 量, 篠原 駿, 佐々木 克彦, 本田 真也
2. 発表標題 内側側副靭帯の長さ変化を考慮した膝関節シミュレーション モデルの開発
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊航大, 武田量, 佐々木克彦, 本田真也
2. 発表標題 屈曲伸展動作による膝関節靭帯形状変化の推定
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会 第49回 学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠原 駿, 佐々木 克彦, 本田 真也, 武田 量
2. 発表標題 膝関節屈曲角度による膝内側靭帯組織長の変化
3. 学会等名 日本機械学会年次大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Takeda, Makoto Genma, Katsuhiko Sasaki
2. 発表標題 Development of Knee Joint Finite Element Analysis Model considering Ligament Geometry and Material Properties
3. 学会等名 ISB/ASB 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関