

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K11004

研究課題名（和文）人工膝関節の三次元動的術前計画が可能な新しい筋骨格シミュレータの開発

研究課題名（英文）Development of novel musculoskeletal computer simulation system capable of three dimensional dynamic preoperative planning in total knee arthroplasty

研究代表者

栗山 新一（Kuriyama, Shinichi）

京都大学・医学研究科・助教

研究者番号：90722942

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：従来のコンピュータシミュレータを用いて、前十字靭帯温存型人工膝関節置換術の合併症の原因を調査した。正常膝関節と比較して、術後膝関節靭帯の過緊張を生じることで、関節動態の悪化を生じていた。関節形態に合わせたインプラント設置により靭帯の過緊張と異常動態が緩和された。歩行解析と従来のシミュレータの結果を参考に、膝関節動態と関節間接触応力を同時に算出可能な、有限要素解析を応用した新しいコンピュータシミュレータを完成させた。本シミュレータにより、関節内靭帯温存の有無が、人工膝関節の動態のみならず、インプラント間の接触応力にも異なる影響を及ぼすなど、今までには検出不能であった有益な情報を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

前十字靭帯温存型人工膝関節置換術においては、変形性膝関節症を持ち、就労困難となった中年以降の患者に行うことで、術後早期社会復帰が期待されているものの、術後疼痛や関節拘縮が報告されていた。本研究により、合併症を生じる原因を解明し、安全な手術法を確立したことは、学術的意義の高いものである。また、膝関節動態と関節間接触応力を同時に算出可能な、本邦初の膝関節筋骨格コンピュータシミュレータを新規開発した。このシミュレータを使用することで、新しい手術方法の効果や合併症の検討、様々な難治膝関節疾患等の病態解明のために、バーチャルリアリティで精度の高い解析が可能になり、社会的意義も高いものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We investigated the causes of complications after anterior cruciate ligament-retaining total knee arthroplasty using a conventional computer simulator. As compared with the normal knee analyses, excessive knee ligament tensions caused abnormal knee kinematics after surgery. The implant setting according to both femoral and tibial joint morphologies reduced excessive ligament tensions and abnormal knee kinematics. With reference to our gait analyses and the results of the conventional knee simulator, we completed a new computer simulator that applied finite element analysis. Our new simulator can simultaneously calculate knee joint kinematics and kinetics. With this simulator, it is possible to obtain useful information that was previously undetectable, such as whether or not preservation of intra-articular ligaments affects not only the knee joint kinematics but also the interarticular or implant-bone contact stresses.

研究分野：関節病学

キーワード：前十字靭帯・後十字靭帯温存型人工膝関節置換術 新しい筋骨格コンピュータシミュレータ 運動学
運動力学 術後合併症 高齢化社会 医療・福祉 シミュレーション工学

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本邦の高齢化社会において、中年以降の就労と健康に関わる変形性膝関節症治療に、人工膝関節全置換術 (TKA) は必需であり、関節の安定性に寄与する前十字靭帯 (ACL) を切除して手術を行う TKA が一般的である。しかし、ACL を切除することによる術後膝関節不安感が社会復帰の障壁となっている。そのため、安定した膝の再現を目標に、ACL 温存型 TKA が臨床応用され、術後より良い機能回復が期待された。一方、手術手技が難化し、また変形の強い日本人に対する明確な適応基準がないため、ACL 温存型 TKA の安全使用に懸念が残されている。本研究の目的は、本邦初の動態解析と有限要素解析が同時に算出できる筋骨格コンピュータシミュレータを開発し、動的な術前計画から、ACL 温存型 TKA を安全かつ効果的な手術にすることである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、本邦初汎用型筋骨格コンピュータシミュレータの開発を行い、二次元の静的な術前計画から、三次元の動的なものに刷新し、ACL 温存型 TKA であっても、術前に理想的なインプラント設置と術後機能・予後予測を可能にさせることである。

3. 研究の方法

(1) 妥当性が既に検証されたが、すでに販売が中止された筋骨格コンピュータシミュレータを用い、患者の術前 CT 画像から 3 次元モデリングを行い、ACL 温存型 TKA による従来までの静的な術前計画による設置モデルと、動的に検証されたモデルの動態解析比較を行い、動的術前計画の優位性を立証する。

(2) 動的術前計画に準じて ACL 温存型 TKA インプラントの設置を行う患者を対象に、光学式マーカを用いたモーションキャプチャにより術前後の膝関節動態の変化を評価することで、動的術前計画の妥当性を検証する。

(3) 先行しておこなった (1)(2) のデータを基礎に、本邦で市販され、既に確立された有限要素解析ソフトウェアに、本邦初の筋骨格シミュレータの機能を新しく開発・付加し、従来までの筋骨格モデルと同等の動態解析を行うことが可能で、かつ有限要素解析も同時に行うことができるシステムを構築する。

4. 研究成果

(1) 正常膝関節と、今までの方法の術前計画に沿ってインプラントを設置した ACL 温存型 TKA の、膝関節屈伸時の関節動態を比較した。結果、膝関節伸展時には ACL 温存型 TKA は正常膝関節と同等の動態を示した。しかし、膝関節を屈曲するに従い、正常膝関節は、脛骨に対して大腿骨が回旋しながら後方に移動するが、ACL 温存型 TKA は、回旋角度、後方移動量ともに正常膝関節よりも減じた (図 1)。また、膝関節には、関節を安定化させる 4 つの靭帯が存在するが、その中でも、外側と後方の靭帯 (外側側副靭帯および後十字靭帯) の緊張が、正常膝関節よりも ACL 温存型 TKA の方が過緊張になることを確認した。これらの靭帯の過緊張が、ACL 温存型 TKA の関節動態を悪化させて、術後膝関節痛や膝関節拘縮の原因になることが本研究で判明した。

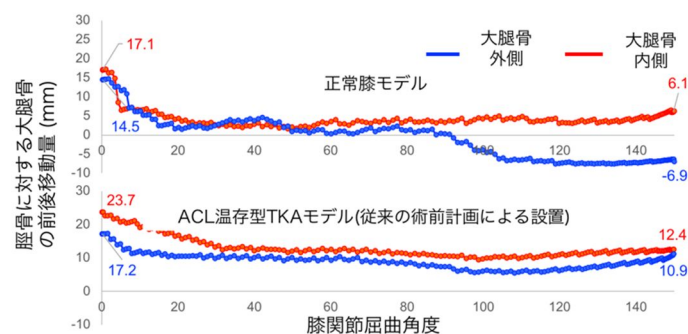


図 1 シミュレータによる正常膝と ACL 温存型 TKA 術後の関節動態の違い

関節靭帯の過緊張を正常膝関節に近づける方策を考えるにあたり、動的術前計画を筋骨格シミュレータで行った。4 つの対応策 (インプラントを正常膝関節の関節面形状に合わせて設置する、大腿骨インプラントの後方の張り出しを小さくする、脛骨関節面の後方への傾斜を大きくする、脛骨関節面を低くする) において動的術前計画を行ったところ、前者の 2 つの対応策が靭帯の過緊張を緩和することがわかった。特に、対応策 が外側側副靭帯の過緊張の低減に、対応策 が後十字靭帯の過緊張の低減に効果を示した。したがって、動的術前計画から、ACL 温存型 TKA を設置する場合、患者個々の関節面形状に合わせて大腿骨および脛骨インプラントを設置し、かつ大腿骨インプラントの後方の張り出しを正常膝関節よりも大きくしないように留意すれば、術後関節動態への悪影響を最小限に抑えられると考えられた。

本研究の解析結果から、本施設で使用する予定であった ACL 温存型 TKA は、本邦で認可がおりている唯一のインプラントであった。しかし、対応策 は術中に問題なく施行可能であるが、対応策 のインプラント設置法が推奨されるデザインではなかった (現状インプラントデザインを関節面に合わせて傾斜させ設置することは、早期インプラントの緩みを惹起する可能性が

あった)。したがって、本邦で行われている ACL 温存型 TKA の各施設からの術後合併症報告も鑑みて、本施設で ACL 温存型 TKA の今後の使用を見合わせた。また、本研究の解析結果を学会等で報告を行い、ACL 温存型 TKA 術後合併症の原因を整形外科医に周知するとともに、対応策の手術法がインプラント設計段階で加味されて開発された ACL 温存型 TKA デザインの必要性を報告した。その後、米国から膝関節面形状に合わせて設計された ACL 温存型 TKA が別途開発され、本邦でも認可され、使用可能な状況となった。ただし、日本人の膝関節面形状は、欧米人の膝関節面形状と異なるため、新しく導入された ACL 温存型 TKA においても日本人に適合するとは限らず、安全性を追加検討している。本研究の解析結果は、すでに欧米英文雑誌に投稿しており、近日出版される予定となっている。

(2) 光学式マーカを用いたモーションキャプチャを本施設リハビリテーション室に新設されたため、解析を行った。しかし、研究(1)の解析結果により、今後現状の ACL 温存型 TKA を患者に設置していくことは問題であることがわかった。したがって、研究計画・方法の、研究が当初の計画通りに進まない時の対応で規定したように、従来型の TKA で研究を進める方針とした。本施設倫理委員会の承認を受け、従来型 TKA の術前術後の歩行について、手術側の下肢、非手術側の下肢ともに、赤外線反射マーカを用いた動作解析と床反力および膝関節モーメントの測定を行った。その結果、TKA を行った下肢については、術前に 0 脚方向への慣性(モーメント)が大きく働いていたが、正常に近く改善し、術後患者立脚型評価(2011 Knee Society Score)が術前と比較して有意に改善した。また、健常側下肢への好影響も観察された。これらの床反力等のデータを、検討(3)の新しいコンピュータシミュレータへ応用し、シミュレータの正確性検証に役立てた。また、本研究の歩行動態解析結果も、現在欧米英文雑誌に投稿準備中である。

(3)本邦で開発された有限要素解析ソフトウェアにおいて、従来までは膝関節が静止した状態での荷重荷役に対する関節間の応力しか測定できていなかった。また、関節靭帯等軟部組織の再現も不十分であった。本研究では、骨盤・股関節から足関節を含む下肢全体の靭帯や筋肉を可能なかぎり(1)(2)の研究データから有限要素解析ソフトウェアに代入した。その上で動作解析ができるようにプログラムを行い、動作を確認しながら、必要な靭帯など軟部組織の構造や剛性等の調整を行った。結果、スクワット運動による膝関節の動作解析が可能となり、同時にインプラント間やインプラントと設置した骨の間に加わる応力を解析できるようになった(図2)。

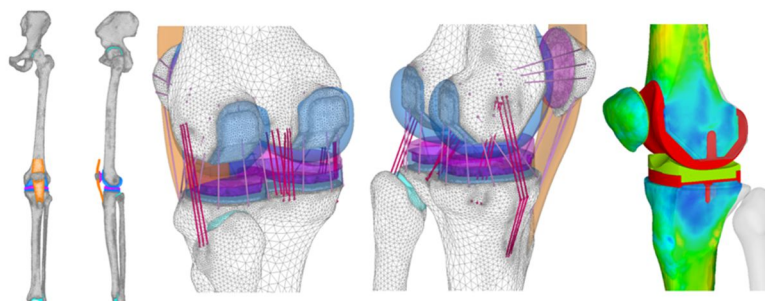


図2 有限要素解析を用いた新しい膝関節筋骨格コンピュータシミュレータ

このシミュレータを用いて、後十字靭帯を温存した TKA モデルと、靭帯が部分損傷したモデル、そして靭帯の完全損傷により靭帯の機能を代償させた TKA モデル二種類の比較検討を行った(図3)。後十字靭帯を温存したほうが、より正常に近い関節動態を示したが、代償モデルの方が人工関節と骨間の剪断応力がやや減少するなど、今まで知ることのできなかつた情報を取得することができた。現在この結果を、欧米英文雑誌に投稿予定である。このように、本研究の最終目標であった、従来の筋骨格コンピュータシミュレータ以上の情報を得ることが可能である本邦初汎用型筋骨格コンピュータシミュレータを完成させることができた。今後の課題は、このシミュレータを基に、人工関節を行う前の正常もしくは変形した膝関節を再現することに取り掛かっており、より複雑な関節内構造物である半月板や関節軟骨などの構造を再現して、検討を進めている。また、これだけの情報量をもって解析するには、演算時間をかなり要するため、より短い時間で解析可能になるように、プログラムの最適化を進めている。

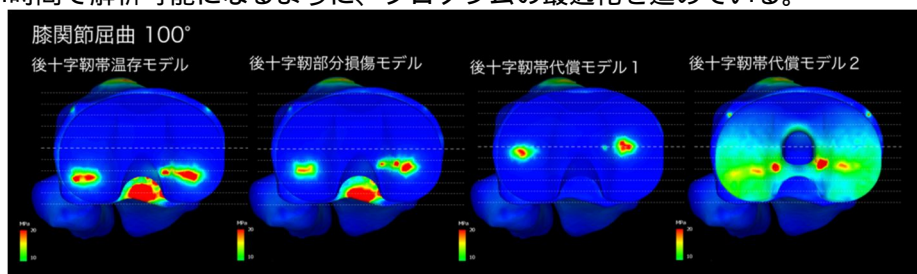


図3 後十字靭帯の機能を変化させた4つのTKAモデルにおける関節動態と接触応力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 ACL/PCL温存型人工膝関節置換術により前後不安定性は改善するが膝屈曲時に外側支持機構とACL/PCLの過緊張を生じる
3. 学会等名 第91回日本整形外科学会学術総会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 人工膝関節置換術における術後患者満足度に関する因子 コンピュータ動態解析から周術期管理まで
3. 学会等名 第41回日本骨・関節感染症学会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinichi Kuriyama
2. 発表標題 Bi-cruciate retaining total knee arthroplasty exhibits no paradoxical anterior motion but shows excessive lateral collateral ligament and bi-cruciate ligament tightness during knee flexion
3. 学会等名 American Academy of Orthopaedic Surgeons (AAOS) 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 ACL/PCL温存型人工膝関節置換術により前後安定性は維持されるが外側支持機構とACL/PCLの膝屈曲時過緊張を生じる
3. 学会等名 第48回日本人工関節学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 コンピュータシミュレーションに基づくTKAデザイン
3. 学会等名 第49回日本人工関節学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 新しい膝関節のコンピュータシミュレーション開発
3. 学会等名 第13回日本CAOS研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 BCR-TKAのコンピュータシミュレーション解析
3. 学会等名 Smith & Nephew Knee Forum（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 次世代人工膝関節コンピュータシミュレーションの開発
3. 学会等名 2019メカニカルファインダーユーザー研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 Kinematic analysis of BCR-TKA using KneeSIM: What is the optimal surgical technique?
3. 学会等名 JOURNEY II Lunch Symposium (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 コンピュータシミュレーションを用いたTKA研究
3. 学会等名 第34回日本整形外科学会基礎学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗山 新一
2. 発表標題 次世代コンピュータシミュレーションによるTKA評価
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会 (招待講演)
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
研究 分担者	松田 秀一 (Matsuda Shuichi) (40294938)	京都大学・医学研究科・教授 (14301)	