

平成 28 年 10 月 25 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25861329

研究課題名(和文) 人工膝関節置換術後動態解析のコンピュータシミュレーションによる実現化

研究課題名(英文) Analysis of kinematics after total knee arthroplasty with a computer simulation

研究代表者

水内 秀城 (Mizu-uchi, Hideki)

九州大学・医学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80643741

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)：人工膝関節置換術における術後膝関節モデルを術後CT画像より作製しKneeSIM、BodySIMなどのシミュレーションソフトを用いて、歩行、階段昇降、深屈曲動作などの日常生活における様々な動きを再現させた。症例が透視下にて行った実際の動きを解析し、データをソフトにとりこむことで、より生体内に近い動態の再現が可能となった。インプラントの設置状態と動態の関連性をより詳細に解析できただけでなく、靱帯張力、筋力、関節内接触力といった術後成績に影響するにもかかわらず、実際には測定不可能な因子をシミュレーションで計測することで、人工膝関節置換術における様々な問題点を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：We constructed patient-specific models from computed tomography data after total knee arthroplasty to predict kinematics of some daily activities. Computer-aided design models of the femoral and tibial implants were directly aligned to the 3-dimensional bone models for making the patient-specific model. The bone and implant geometry was imported into a dynamic, musculoskeletal modeling program (KneeSIM and BodySIM; LifeModeler, Inc, San Clemente, California) to simulate some daily activities (gait, stair climbing and weight-bearing deep knee bend). We performed a real kinematic simulation with analyzing in vivo data from the fluoroscopic image of patients. Under the simulation, we evaluated the relationship between position of the implants and kinematics. In addition, we measured ligament force, muscle force and knee contact force which are not able to be checked in human body directly. From our analysis, we can find several problems in performing total knee arthroplasty.

研究分野：整形外科学

キーワード：人工膝関節置換術 コンピュータシミュレーション 動態解析

1. 研究開始当初の背景

人工膝関節置換術（total knee arthroplasty: 以下 TKA）は変形性膝関節症に伴う症状に対して、除痛、変形矯正、可動域の獲得を目的とする手術で、患者の QOL 向上に大いに役に立つ治療である。手術件数は現在約 8 万で年々増加しており、さらに需要の増加が予想される。術後 15 年で 90% は問題のない安定した長期成績であるが、数% の人はゆるみなどで再手術を要することに加え、長期成績の安定に伴い、最近はより満足度の高い結果を求められるようになり、屈曲角度の獲得、スポーツへの参加といった期待がよせられている。

術後の下肢アライメント、軟部組織バランス、インプラント形状などにより、生体内のインプラント接触圧や膝関節屈曲伸展に必要な下肢筋力は容易に変化し、術後成績や満足度に影響を及ぼす。これらの計測については、新鮮凍結屍体膝や有限要素法や剛体バネモデルなど数値解析を用いた応力解析といった研究が行われてきたが、日常生活における膝関節の動きを再現しているとは言い難く患者の満足度との関連も検討することができない。コンピュータシミュレーションは患者に侵襲をあたえることなく、様々な影響因子を検討することが可能であるが、日本国内では未発達の領域であり、TKA と関連した研究を行っている施設は皆無である。

2. 研究の目的

本研究の目的は変形性膝関節症に対して行われた人工膝関節置換術における術後動態解析をコンピュータシミュレーションにて再現し、下肢筋力や膝関節内の接触力などを計測することである。

〈1〉 術後患者特有の 3 次元膝関節モデル及び全身モデルを作製しシミュレーションを行う：透視を用いた動態解析のデータを用いて限りなく現実に近い膝関節運動を再現する。

〈2〉 シミュレーションで、大腿四頭筋などの下肢筋力、インプラント間の接触力及び接触圧などを算出し、術後アライメント、術中軟部バランス、インプラント形状による違いなどを検討する。

3. 研究の方法

当施設における TKA では、より正確に手術を行うために様々なレントゲンに加え術前 CT を用いて綿密な術前計画を行っている。同意が得られた症例に対しては経過観察評価目的にて術後 CT を撮影している。これらの画像は通常診療を目的に得られるもので、本研究だけを目的に行うものではない。本研究参加に同意が得られた症例に対して、術後疼痛が軽減した状態で運動解析を行った。また得られたデータを保存し各種ソフトウェアで解析を行っていった。

具体的には以下の通りに進行していった。

〈1〉 各症例に適した軟部組織特性を考慮した術後膝関節モデルの作製及び実際の運動解析とのマッチング（KneeSIM における術後膝関節モデルとシミュレーションの改良）

まず術後 CT 画像から術後 3 次元膝関節モデルを作製する。得られた DICOM 画像を 3 次元画像処理ソフト MIMICS (Materialise 社) によってセグメンテーションを行い大腿骨及び脛骨の輪郭を抽出し、切骨された 3 次元骨モデルを構築した (図 1)。ついでインプラント CAD モデル (図 2) の輪郭を CT 画像に投影させ術後 3 次元膝関節モデルを作製した。モデルを STL file として Rhinoceros (Robert McNeel 社) にインポートし、大腿骨機能軸と大腿骨機能軸に垂直な平面に大腿骨上顆ラインを投影した線から成り立つ 3 次元空間座標を設定し、脛骨インサート中心を原点として術後 3 次元膝関節モデルの位置合わせを行った (図 3)。

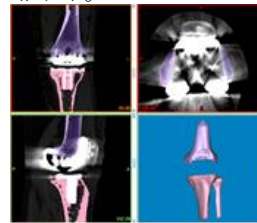


図 1 切骨モデル

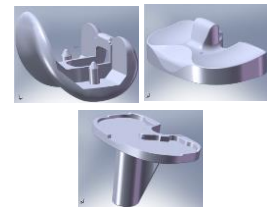


図 2 CAD model

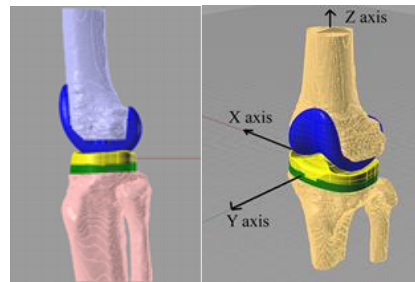


図 3 Rhinoceros における位置合わせ

完成したモデルを KneeSIM にインポートしてシミュレーションを行った。KneeSIM 内にはデフォルトとしての歩行、階段昇降、深屈曲動作といった動きが備わっているが、過去の工学的論文を参考に動きを spline としてコントロールしているため、シミュレーションの際には実際の患者が行った動態解析のデータを参考に修正を加えた。

動態解析は、まず患者に透視下で歩行、階段昇降、深屈曲動作をしていただき、イメージマッチング法にてインプラント間の動態解析を行った。当施設はイメージマッチング法に関する論文を過去に何度も報告しており、解析は問題なく行うことが可能であった。

屈曲角度とインプラントの位置の関係を参考に KneeSIM 内の動作 spline を変更していき、術中計測した屈曲伸展 gap の値などを参考にして、内外側副靱帯、膝蓋支帯、関節包といった軟部組織の stiffness や balance などの値を変更していき、各症例に適した術後膝関節モデルを作製しコンピュータ上で

の運動解析を再現した。

〈2〉 コンピュータシミュレーション上における術後因子計測（術後膝関節モデルにおける四肢筋力、接触力、接触圧などの計測）
完成した術後膝関節モデルを用いて、様々な動作における大腿四頭筋などの四肢筋力、コンポーネント間の接触力、接触圧を測定した。また同一症例の術前骨モデルに様々なインプラントを設置することで機種間の比較検討も行った。

〈3〉 コンピュータシミュレーションを用いた日常診療における TKA 術前計画の評価
現在多くの施設で行われている評価は、X線を用いた2次元計測が主であり、検者間の誤差が大きい信頼できるものではない。コンピュータシミュレーションを用いて、術前評価（アライメント評価）の重要性も検討した。

4. 研究成果

① 各症例に適した軟部組織特性を考慮した術後膝関節モデルを作製し、生体膝に近い動態を実現化した。作製した膝関節モデルを使用してKneeSIMを用いて階段昇降のシミュレーションソフトを行った(図4)。実際の患者の動態解析結果をシミュレーションデータとして取り込むことでより生体内に近い動態を実現化することができた(図5)。また膝関節モデルをとりいれた全身モデルをBodySIMにて作製し、スクワット動作における膝関節内接触力の予測を行った。

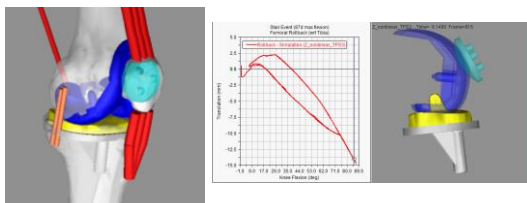


図4 KneeSIMにおけるシミュレーション

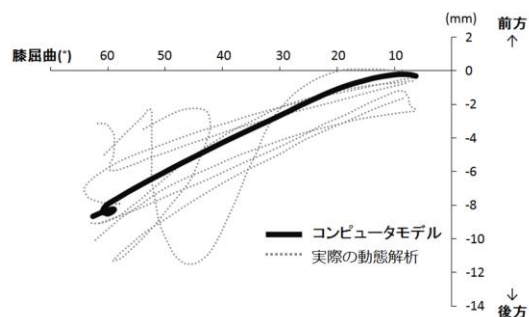


図5 実際の動態解析との比較(大腿骨コンポーネント前後移動量は症例間の範囲にとどまっており信頼できるものである)

② ①で作製した膝関節モデル及びシミュレーションを用いて、手術手技やインプラント形状の影響を検討した。

手術手技は最も議論の分かれる課題のひとつである脛骨の後傾骨切りに関して評価を行った。どの角度で骨切りを行うことが術後成績に有利であるかを、参照軸に対して0-15

度の角度を用いて検討した。

結果は、後傾をつければ階段昇り動作に必要な大腿四頭筋筋や膝蓋大腿関節接触力は減らすことは可能であったが、15度まで後傾をつけても0度と比較して6-15%程度でしかなかった半面、術後動態において、後傾5度以上つくると踏込み時(屈曲65度)において、大腿骨コンポーネントが後方に滑る動き、すなわち脛骨のanterior slidingが出現し(図6)、後傾10度以上つくると伸展位付近において、ポスト前方のインピンジメントによる大腿骨コンポーネントの前方移動が出現した(図6)。長期成績を考えると後傾は5度以下が良いのではないかという結論に達した。

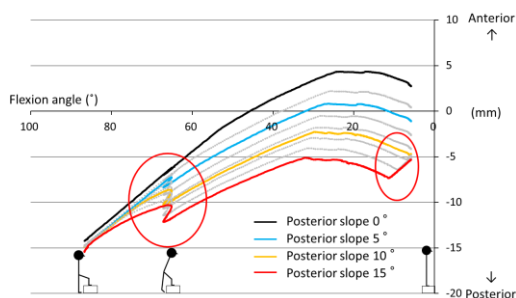


図6 脛骨後傾と術後動態の関連

インプラント形状の影響については、現在国内で使用される形状の異なる2機種(図7)を用いて内側側副靱帯にかかる張力を計測したところ、伸展～屈曲にかけての張力パターンが全く異なっており、術中手技や術後の膝関節安定性に強く影響する可能性があることがわかった(図8)。

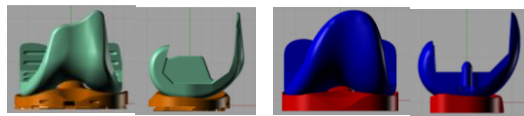


図7 形状の異なる2機種のCADモデル

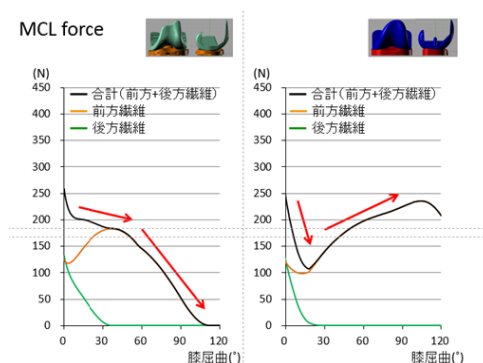


図8 膝伸展～屈曲における緊張パターン

③ 通常のTKA術前計画において回旋設置の計画は精度が悪く内旋設置となる可能性が高かった。

現在多くの施設で行われている評価は、X線やCTスライスを用いた2次元計測と、コンピュータシミュレーションによる3次元計測を比較した(図9)。2次元計測は検者間、検者内誤差が多く、また設置位置が理想より3

度誤差が生じれば、術後成績に左右するといわれるが、2次元計画ではすでに計画の時点で3度以上誤差が生じる割合が10%ほどあった。また2次元計画によって、膝関節痛や屈曲拘縮の原因であるインプラントの内旋設置の計画となりやすいことがわかった。

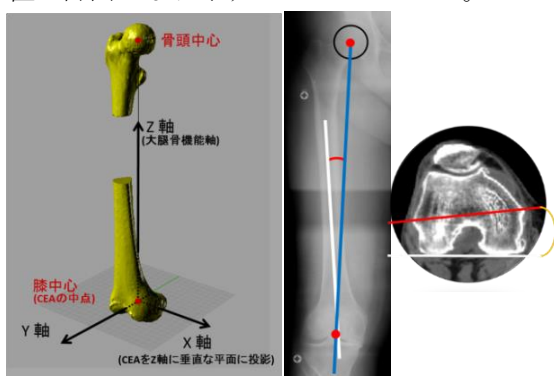


図9 (左)3次元計画 (右)2次元計画

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)

[雑誌論文] (計9件)

- Okamoto S, Mizu-Uchi H, Okazaki K, et al. Two-dimensional planning can result in internal rotation of the femoral component in total knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016 Jan;24(1):229-35.
- Nishikawa K, Mizu-Uchi H, Okazaki K, et al. Accuracy of Proximal Tibial Bone Cut Using Anterior Border of Tibia as Bony Landmark in Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2015 Dec;30(12):2121-4.
- Okamoto S, Mizu-uchi H, Okazaki K, et al. Effect of Tibial Posterior Slope on Knee Kinematics, Quadriceps Force, and Patellofemoral Contact Force After Posterior-Stabilized Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2015 Aug;30(8):1439-43.
- Kuwashima U, Okazaki K, Tashiro Y, Mizu-Uchi H, et al. Correction of coronal alignment correlates with reconstruction of joint height in unicompartmental knee arthroplasty. *Bone Joint Res.* 2015 Aug;4(8):128-33.
- Mizu-Uchi H, Colwell CW Jr, Flores-Hernandez C, et al. Patient-Specific Computer Model of Dynamic Squatting After Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2015 May;30(5):870-4
- Nakahara H, Okazaki K, Mizu-Uchi H, et al. Correlations between patient satisfaction and ability to perform daily activities after total knee

arthroplasty: why aren't patients satisfied? *J Orthop Sci.* 2015 Jan; 20(1):87-92.

- Tashiro Y, Matsuda S, Okazaki K, Mizu-Uchi H, et al. The coronal alignment after medial unicompartmental knee arthroplasty can be predicted: usefulness of full-length valgus stress radiography for evaluating correctability. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2014 Dec; 22(12):3142-9.
- Okazaki K, Tashiro Y, Mizu-uchi H, et al. Influence of the posterior tibial slope on the flexion gap in total knee arthroplasty. *Knee.* 2014 Aug; 21(4):806-9.
- Bugbee WD, Mizu-Uchi H, Patil S, et al. Accuracy of implant placement utilizing customized patient instrumentation in total knee arthroplasty. *Adv Orthop.* 2013;2013:891210.

[学会発表] (筆頭のみ計28件)

<招待>

- 第4回大阪関節外科研究会 (2015.8.29 大阪) Computer simulationを用いた人工膝関節置換術の研究
- Zimmer Persona Seminar (2015.7.11 大阪) 患者様の満足度向上へのあくなき研究～良好なアライメントを得るための手術手技
- 第88回日本整形外科学会学術集会 (2015.5.21～24 神戸) 脛骨側非対称性コンポーネント設置の臨床上の有用性：Zimmer PERSONAを用いた検討

<国際学会における発表：筆頭のみ記載>

- The 2015 International Congress of Joint Reconstruction (ICJR) Pan Pacific Orthopaedic Congress (Jul. 22-25, 2015, Hawaii, USA) Mizu-uchi H, Okazaki K, Okamoto S, et al. Effect of tibial posterior slope on knee kinematics and patellofemoral contact force after total knee arthroplasty.
- The 2015 International Congress of Joint Reconstruction (ICJR) Pan Pacific Orthopaedic Congress (Jul. 22-25, 2015, Hawaii, USA) Mizu-uchi H, Okazaki K, Okamoto S, et al. Two-dimensional Planning Can Result in Internal Rotation of the Femoral Component in Total Knee Arthroplasty.
- The 61st Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society (Mar. 28-31, 2015, Las Vegas, USA) Mizu-uchi H, Okazaki K, Okamoto S, et

al. Effect of Tibial Posterior Slope on the Kinematic and Patellofemoral Contact Force After Posterior-stabilized Total Knee Arthroplasty.

7. The 27th Annual Congress of the International Society for Technology in Arthroplasty: ISTA 2014 (Sep 24-27, 2014, Kyoto, Japan)
Mizu-uchi H, Okazaki K, D'Lima DD, et al. Postoperative Tibial Alignment was Improved by Considering Ankle Rotation in Total Knee Arthroplasty.
8. Computer Assisted Radiology and Surgery 28th International Congress and Exhibition (June 25-28, 2014, Fukuoka, Japan)
Mizu-uchi H, D'Lima DD, Flores C, et al. In vivo validated computer model of dynamic squatting after total knee arthroplasty.
9. The 60th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society (Mar. 15-18, 2014, New Orleans, USA)
Mizu-uchi H, Okazaki K, Nishikawa K, et al. Postoperative Tibial Alignment Was Improved By Using Anterior Border Of The Tibia As Reference In Total Knee Arthroplasty.

など

その他、日本整形外科学会学術集会、人工関節学会、日本バイオメカニクス学会等で発表を行った。

〔図書〕(計1件)

1. 水内秀城, 岡本重敏, 松田秀一, 岡崎賢, 濱井敏, 岩本幸英 Computer simulation: どこまで予測できるか? 整形・災害外科(増大号) 56:1125-1131, 2013

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水内秀城 (MIZU-UCHI, Hideki)
九州大学・医学(系)研究科(研究院)・助教
〒812-8581
福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

研究者番号: 80643741

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし