

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560074

研究課題名（和文） 下肢関節における 3 次元荷重伝達機構の生体内測定

研究課題名（英文） In vivo measurement of 3D load transfer mechanism in the lower extremity

研究代表者

小林 公一 (KOBAYASHI KOICHI)

新潟大学・医歯学系・助教

研究者番号：70296317

研究成果の概要（和文）： 下肢関節における荷重伝達機構を検討するため、生理的荷重下における膝関節（脛骨大腿関節および膝蓋大腿関節）軟骨の接触状態と、膝蓋腱の変形挙動を被験者個別に作成した 3 次元関節形状モデルと X 線動画を用いることにより生体内で評価した。膝関節の屈曲角度の変化に伴い、脛骨大腿関節および膝蓋大腿関節における接触領域、膝蓋腱の相対的伸び、および膝関節に作用する荷重の大きさおよび方向が変化することを定量的に示した。

研究成果の概要（英文）： In order to investigate the 3-dimensional (3D) load transfer mechanism in the lower extremity, articular contact behavior at the tibiofemoral and patellofemoral joints and deformation of the patellar tendon were evaluated in vivo using 3D joint models and images of joint motion captured by calibrated x-ray systems. As the flexion angle of the knee changed, the location of the contact area also altered. The relative elongation of the patellar tendon increased as the knee flexed up to 60°. Beyond 60°, the elongation in the lateral portion of the tendon decreased. The direction and the amplitude of the force applied across the tibiofemoral and patellofemoral joints also varied with the knee motion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：生体力学

1. 研究開始当初の背景

私たちが歩く、走る、階段を昇り降りするといった日常動作を行う際、下肢を構成する膝関節や股関節は、体重の何倍もの力を支えながら、円滑に運動を行っている。これはと

ても過酷な状況と言えるが、通常これらの関節は生涯にわたって問題なく機能し続ける。しかし、激しいスポーツや転倒などで過度の力が加かった場合や、不自然な姿勢を長期間続けた場合、また、年齢とともに骨や筋肉が

弱ったとき、関節に障害を生じ日常生活に支障を来すことがある。このような関節障害の発生要因を解明し、より効果的な予防法および治療法を開発するためには、関節にかかる力を詳しく測定することがとても重要である。従来、関節に作用する力の推定法については数多くの研究がなされてきたが、個々人の骨・関節の3次元形状はほとんど考慮されてこなかったため、得られる結果も大まかなものであった。

申請者らは2方向X線像にCTから構築した下肢全長の骨形状モデルおよび人工関節CADモデルの投影像をイメージマッチングすることにより3次元位置情報を得る「3次元下肢アライメント評価システム」を開発し、3次元下肢アライメント評価、人工膝および人工股関節手術の3次元術前設置位置計画および術後評価を可能とした。このシステムにより、従来2次元のX線像や、3次元であっても臥位で撮影したCTスキャン画像を使って行われていた下肢アライメント評価が、立位で、すなわち関節に荷重をかけた状態で3次元的に出来るようになった。

しかしながら、下肢関節における荷重伝達機構を検討する上で不可欠な生理的荷重下における関節軟骨の接触状態について、詳細は明らかになっていない。

2. 研究の目的

上記「1. 研究の背景」を踏まえ、本研究課題では、①CTまたはMR画像から構築した3次元膝関節モデル(骨・軟骨形状モデル)と、1方向または2方向から撮影した連続X線画像を用いたイメージマッチングにより脛骨大腿関節と膝蓋大腿関節における関節軟骨の接触挙動を評価する、②膝蓋大腿関節においては、膝深屈曲(最大屈曲角150°)時における膝蓋腱のキネマティクスと、接触点の軌跡および膝蓋腱と大腿四頭筋の方向から膝関節の伸展機構を明らかにする、③イメージマッチングによって求めた関節の接触領域を実験的に検証する、ことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 3次元膝関節モデルの構築

3次元骨形状モデル構築のためCTスキャンまたはMRIスキャンを行った。CTスキャンはXvisionGX (Toshiba) を用いて下肢全長を撮像した。MRIスキャンでは装置の構成上、膝関節を含む大腿骨遠位部と脛骨近位部のみを撮像した。得られたスライス画像から、市販のモデリングソフトを用いて大腿骨および脛骨の3次元骨形状モデルを作成した。3次元軟骨形状モデルはMRIスキャンデータから構築した(図1)。撮像条件および使用したモデリングソフトは上記と同じである。

(2) 連続X線撮影

1方向連続X線撮影にはフラットパネルディテクター(平面デジタルX線検出器)を用いた。Frame rate 15 f/sである。一方、2方向連続X線撮影は、2台のフルオロスコープを直角に配置することで行った。Frame rate 15 f/sである。なお、1方向連続X線撮影ではフォースプレートを設置することで床反力を同時測定した。

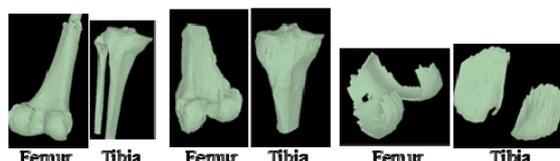


図1. 3D bone and cartilage models of femur and tibia.

(3) イメージマッチング

1方向および2方向X線撮影ともに、カメラ校正によってX線照射源と画像平面の空間位置を規定することでコンピュータ上に仮想X線撮像空間を構築した(図2)。そして仮想画像平面に実際のX線像を表示した後、3次元骨形状モデルを配置し、仮想画像平面に投影された骨形状モデルの輪郭と実際のX線像における骨画像の輪郭が一致するようにモデルの3次元位置を決定する。

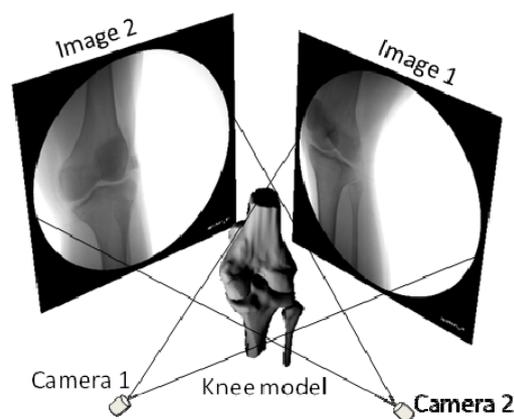


図2. Calibrated bi-planar x-ray imaging system.

(4) 脛骨大腿関節の接触測定

健康男性2名(23歳、39歳)を対象とした。フォースプレート上で、片足の歩行周期のうち立脚相すなわち踵接地から爪先離れまでと、片脚スクワット動作を行い、側方から1方向連続X線装置により撮影した。3(3)で述べた手法によりCTから構築した大腿骨と脛骨モデルの空間位置を規定した後、それぞれの関節軟骨モデルを手動でフィッティングし、両者の干渉領域を接触と判定した。

(5) 膝蓋大腿関節の接触測定

健正常7膝（年齢23-49歳、男性5名、女性2名）を対象とした。伸展位から最大屈曲までの範囲で設定した屈曲角（15°、30°、60°、90°、120°および150°）に達したところで姿勢を保持するように指示し、2方向連続X線装置で撮影した。3(3)で述べた手法によりMRIから構築した大腿骨と膝蓋骨モデルの空間位置を規定した後、それぞれの軟骨モデルを付与した。そして両軟骨モデルの干渉領域を接触領域、干渉領域の図心を接点と定義した。なお、MRIから構築した骨モデルと軟骨モデルの座標系は共通なのでフィッティングを行う必要はない。

(6) 膝蓋腱のキネマティクス測定

脛骨粗面と膝蓋骨遠位端において膝蓋腱の付着部を決定し、外側、中央および内側に3分割した。そして付着部同士を結ぶ3直線により膝蓋腱を表した。なお、屈曲時にこの直線が脛骨表面と干渉した場合は付着部から骨表面に引いた接線と骨表面を沿う線で膝蓋腱を表した。膝蓋腱の運動に関するパラメータとして、膝屈曲に伴う相対的伸びを次の式で算出した。 $\epsilon=(L-L_0)/L_0$ 。ここで、Lは各屈曲角における膝蓋腱の長さ、L₀はMRI撮像時における膝蓋腱の長さである。

(7) 膝関節伸展機構の解析

大腿骨矢状面に大腿四頭筋と膝蓋腱を投影し両者の交点を求めた。この交点と接点を結ぶ直線と、大腿四頭筋および膝蓋腱との成す角をそれぞれ大腿四頭筋角および膝蓋腱角と定義した。そして、接点から交点に向かう方向を関節反力の作用方向と想定し、膝蓋腱と大腿四頭筋に作用する力の比を次の式で求めた。

$$\frac{\text{膝蓋腱力}}{\text{大腿四頭筋力}} = \sin(\text{大腿四頭筋角} / \text{膝蓋腱角})$$

(8) 接触領域の実験的検証

ヒト切断肢を対象に、イメージマッチングにより、軟骨形状モデル同士の干渉量から判定した軟骨接触領域と、圧力センサを用いて直接測定した接触圧力分布と比較した。重錘により切断膝へ任意の圧縮荷重を作用させることが可能な自作装置に切断膝を設置し、膝関節前方から内側および外側関節面に感圧センサを挿入した。荷重を作用させたままの状態2方向X線撮影を行い、得られたX画像の骨輪郭とCT骨モデルとMRI骨モデルの投影輪郭との重ね合わせにより大腿骨と脛骨の3次元位置を決定した。3次元位置決定後の大腿骨および脛骨形状モデルにそれぞれMRI軟骨モデルをフィッティングし、軟骨モデル同士が重複した部分を接触領域とみなした。

4. 研究成果

(1) 大腿脛骨関節

表1に歩行立脚相における最大および最小床反力作用時の接触面積を示した。床反力の増加に伴い接触面積にも増加傾向が見られた。表2にスクワット動作時における屈曲角と接触面積の関係を示した。屈曲角に依らず床反力はほぼ一定であったが、接触面積は屈曲角の増加に伴い減少した。

表1 Articular contact area during stance phase

	Flexion angle, °	GRF, N		Contact area, mm ²	
		Min	Max	Med	Lat
Subject A	21	447	447	335	124
	39	948	948	377	203
Subject B	2	346	346	353	469
	10	514	514	337	477

GRF: Ground Reaction Force.

表2 Articular contact area during knee flexion

	Flexion angle, °	GRF, N	Contact area, mm ²	
			Med	Lat
Subject A	30	623	431	299
	60	620	420	290
	90	631	286	281
Subject B	30	483	298	406
	60	462	272	388
	90	455	167	315

GRF: Ground Reaction Force.

(2) 膝蓋大腿関節

図3に膝蓋骨関節面における接点の軌跡を示す。屈曲角15°では被験者7名のうち3名だけで接触が見られたが、屈曲角30°以上では全ての被験者で接触が観察された。膝蓋骨関節面中心を基準とした場合、接点は屈曲角15°でやや遠位外側に位置し、膝が90°まで屈曲するに伴い上方に移動した。90°と120°において7膝中3膝で内側と外側の2箇所接触領域が分離した。150°では6膝で分離が見られた。分離した接点は膝屈曲に伴いそれぞれより内側またはより外側へと移動した。膝蓋腱の相対的伸び(図4)は外側、中央および内側とも膝屈曲角60°までは増加したが、90°以降は部位によって差異が見られた。外側と中央では90°と120°で減少したものの、150°で再び増加した。一方、内側では150°まで減少を続け、150°で中央より有意に小さかった。

膝蓋腱力と大腿四頭筋力の比は、屈曲角15°において1を越えていたが、屈曲角90°まで単調に減少し、以降、150°まで一定値(およそ0.7)を保った。

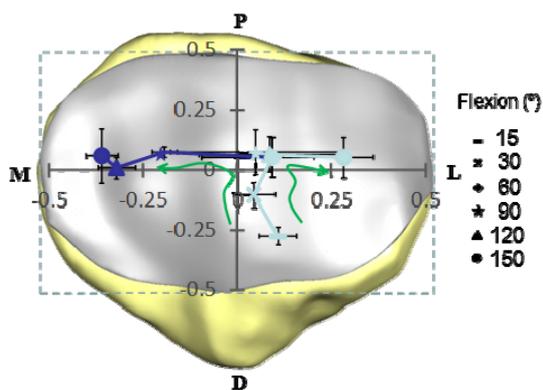


図 3. Contact point location of the patellar surface during deep knee flexion.

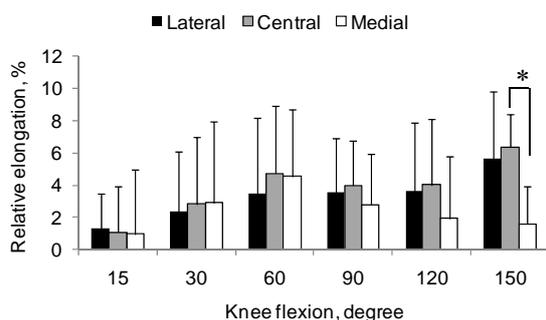


図 4. Relative elongation of patellar tendon during deep knee flexion.

(3) 接触領域の実験的検証

軟骨モデル同士の接触深さと測定圧力は膝関節内側ではいずれも関節面前方に、外側は関節面中央に分布した。また、圧縮荷重が増加すると接触深さと圧力は増加し、分布領域も大きくなった (図 5)。この結果から、イメージマッチングにより得られた接触深さ分布および近接量分布から関節における接触状態を推定する方法は有効であることが示された。

(4) 結果の総括および今後の展望

生理的荷重下における脛骨大腿関節と膝蓋大腿関節の軟骨接触挙動および膝蓋腱の変形挙動が生体内で評価した。また、床反力を同時測定することで膝関節に作用する力と、脛骨大腿関節における接触領域の関係を評価した。さらに、膝蓋大腿関節における軟骨接触挙動から、膝関節伸展機構を解析した。これにより、従来困難であった生理的荷重下における膝関節軟骨の接触状態評価が可能であることが示されたと同時に、関節に作用する荷重との関係を解析することが可能となった。今後、本実験データを基にした下肢関節生体力学モデル構築へ展開できることが期待される。

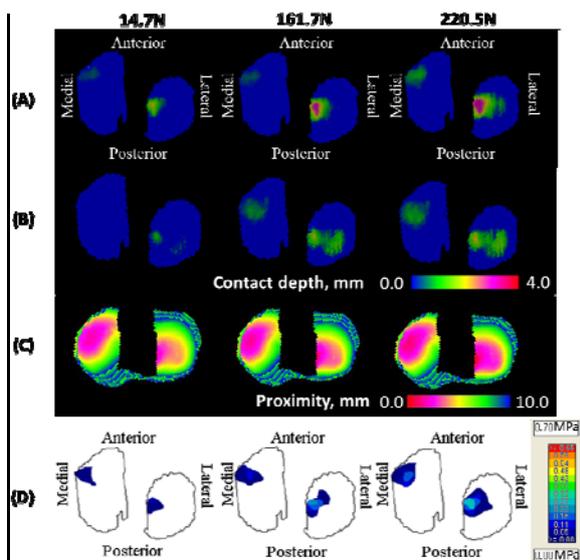


図 5. Change in contact behavior with applied compression forces. Contours of contact depth determined by image registration method using CT bone model + MRI cartilage model (A), MRI bone model + MRI cartilage model (B), proximity between CT models (C), and contact pressure distributions measured by pressure sensor (D).

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 13 件)

- ① Kobayashi K, Hosseini A, Sakamoto M, Qi W, Rubash HE, Li G, In-Vivo Kinematics of the Extensor Mechanism of the Knee during Deep Flexion, ASME J. Biomech. Eng., 査読有, 2013, DOI 10.1115/1.4024284.
- ② Mochizuki T, Sato T, Tanifuji O, Kobayashi K, Koga Y, Yamagiwa H, Omori G, Endo N, In vivo pre- and postoperative three-dimensional knee kinematics in unicompartmental knee arthroplasty, J. Orthop. Sci., 査読有, 18(1), 54-60, 2013.
- ③ Kobayashi K, Sakamoto M, Hosseini A, Rubash HE, Li G, In-vivo patellar tendon kinematics during weight-bearing deep knee flexion, J. Orthop. Res., 査読有, 30, 1596-1603, 2012.
- ④ Tanifuji O, Sato T, Kobayashi K, Mochizuki T, Koga Y, Yamagiwa H, Omori G, Endo N, Three-dimensional in vivo motion analysis of normal knees employing transepicondylar axis as an evaluation parameter, Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc., 査読有, 2012, DOI 10.1007/s00167-012-2010-x.
- ⑤ Tanifuji O, Sato T, Kobayashi K, Mochizuki

T, Koga Y, Yamagiwa H, Omori G, Endo N, Three-dimensional in vivo motion analysis of normal knees using single-plane fluoroscopy, J. Orthop. Sci., 査読有, 16(6), 710-718, 2011.

⑥ 豊田貴嗣, 小林公一, 坂本信, 大森豪, 古賀良生, 田邊裕治, イメージマッチングによる膝関節接触状態評価法の実験的検証, 臨床バイオメカニクス, 査読有, 32, 483~487, 2011.

⑦ 解晨, 坂本信, 西野勝敏, 湊泉, 古賀良生, 佐藤卓, 小林公一, 大森豪, 田邊裕治, 人工股関節摺動面における応力分布の数値解析, 臨床バイオメカニクス, 査読有, 32, 283~289, 2011.

⑧ 坂本信, 牧岡諒太, 吉田秀義, 小林公一, 笹川圭右, 田邊裕治, MRI を用いた脛距関節における接触領域の In Vivo 解析, 臨床バイオメカニクス, 査読有, 31, 283~289, 2010.

⑨ Shin K, Sakamoto M, Kobayashi K, Minato I, Numerical analysis of pressure on cup surface after THA, J. JSME, 査読有, 10, 251-255, 2010.

⑩ Kubota Y, Sakamoto M, Kobayashi K, Yoshio K, Tanabe Y, Accuracy verification of image-matching in a setting method for the stem during total hip arthroplasty, J. JSME, 査読有, 10, 247-250, 2010.

⑪ 小田川健一, 豊田貴嗣, 小林公一, 谷藤理, 笹川圭右, 佐藤卓, 坂本信, 古賀良生, 田邊裕治, 大森豪, イメージレストレーション法による膝関節の接触動態解析, 臨床バイオメカニクス, 査読有, 31, 349~355, 2010.

⑫ 笹川圭右, 坂本信, 小林公一, 古賀良生, 田邊裕治, 大森豪, 佐藤卓, MRI 骨・軟骨モデルを用いた3次元下肢アライメント評価システムの精度評価, 臨床バイオメカニクス, 査読有, 31, 341~348, 2010.

⑬ 解晨, 笹川圭右, 古賀良生, 佐藤卓, 谷藤理, 坂本信, 小林公一, 田邊裕治, 脛骨骨形状コンピュータモデルの座標系自動構築法, 臨床バイオメカニクス, 査読有, 31, 333~340, 2010.

[学会発表] (計23件)

① 小林公一, 坂本信, Li G, 膝蓋骨トラッキングの生体内測定と有限要素法による膝蓋大腿関節の接触解析, 第25回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 293~294, 2013, つくば.

② 小林公一, 坂本信, 豊田貴嗣, 田邊裕治, 川上健作. イメージマッチングによる膝関節接触状態評価法の実験的検証, CT 骨モデルと MRI 骨モデルの比較, 日本非破壊検査協会春季講演大会, 145~146, 2012, 東京.

③ 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, イメージレストレーションによる膝関節接触機構評価法の実験的検証, 日本機械学会 2012 年度

年次大会, S022026, 2012, 金沢.

④ Sasagawa K, Kobayashi K, Koga Y, Sakamoto M, Tanabe Y, Omori G, Sato T, The anatomic coordinate system setting to knee MRI model, Trans. 57th ORS, #866, 2011, Long Beach, USA.

⑤ Kai S, Kobayashi K, Tokunaga K, Koga Y, Sato T, Omori G, Sakamoto M, Tanabe Y, Accuracy examination of automated image registration for hip alignment assessment, Trans. 57th ORS, #1001, 2011, Long Beach, USA.

⑥ Kobayashi K, Toyoda T, Sakamoto M, Tanabe Y, Omori G, Koga Y, In vivo articular contact behavior of tibiofemoral joint during weight-bearing activities, Trans. 57th ORS, #1344, 2011, Long Beach, USA.

⑦ Mochizuki T, Sato T, Yamagiwa H, Tanifuji O, Kobayashi K, Omori G, Koga Y, In vivo pre and postoperative three-dimensional knee kinematics in unicompartmental knee arthroscopy, Trans. 57th ORS, #1350, 2011, Long Beach, USA.

⑧ Kai S, Koga Y, Sato T, Omori G, Sakamoto M, Kobayashi K, Tanabe Y, An automated method to construct joint coordinate system (JCS) for the femur, Trans. 57th ORS, #1358, 2011, Long Beach, USA.

⑨ Kobayashi K, Li G, Estimation of in-vivo quadriceps forces of the knee - combined in-vivo patellofemoral joint kinematics measurement and finite element prediction -, ASME 2011 Summer Bioengineering Conf. #53521, 2011, Farmington, USA.

⑩ 笹川圭右, 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, 古賀良生, 下肢アライメント評価法における MRI の影響. 日本機械学会第23回バイオエンジニアリング講演会, 563-564, 2011, 熊本.

⑪ 棚橋功祐, 解晨, 小林公一, 田邊裕治, 徳永邦彦, 湊泉, 古賀良生, 佐藤卓, 股関節3次元アライメント評価における自動イメージマッチング法の精度検証, 日本機械学会第23回バイオエンジニアリング講演会, 565-566, 2011, 熊本.

⑫ 小林公一, 坂本信, Li G, 膝深屈曲時における膝蓋大腿関節の生体内接触特性評価, 日本非破壊検査協会応力・ひずみ測定部門講演会, 21-26, 2011, 名古屋.

⑬ 小林公一, 坂本信, Li G, 膝深屈曲時における膝蓋大腿関節と膝蓋腱のキネマティクス, 日本非破壊検査協会秋季講演大会, 81-84, 2011, 淡路.

⑭ 小林公一, 坂本信, Li G, 田邊裕治, 古賀良生, 佐藤卓, 大森豪, 膝関節における生体内接触動態解析, 第38回日本臨床バイオメカニクス学会, 121, 2011, 神戸.

⑮ Kobayashi K, Odagawa K, Toyoda T, Sakamoto M, Tanabe Y, Omori G, Koga Y, Articular contact behavior of tibiofemoral joint during weight-bearing activities measured using

an image registration technique. Abst. 6th World Congress of Biomechanics, 103, 2010, Singapore.

⑮ Toyoda T, Kobayashi K, Odagawa K, Sakamoto M, Sasagawa K, Tanabe Y, Omori G, Koga Y, Creation of three-dimensional digital model for evaluating articular contact behavior. Abst. 6th World Congress of Biomechanics, 582, 2010, Singapore.

⑯小田川健一, 豊田貴嗣, 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, イメージレジストレーションによる大腿脛骨関節の運動力学解析, 日本機械学会第 22 回バイオエンジニアリング講演会, 162, 2010, 岡山.

⑰野田口洋成, 牧岡諒太, 吉田秀義, 田邊裕治, 小林公一, 坂本信, ヒト脛距関節における接触面積の生体内評価, 日本機械学会第 22 回バイオエンジニアリング講演会, 273, 2010, 岡山.

⑱小林公一, 小田川健一, 豊田貴嗣, 坂本信, 田邊裕治, イメージレジストレーションによる膝関節の生体内接触挙動評価, 日本機械学会北信越支部第 47 期総会・講演会, 341, 2010, 新潟.

⑲笹川圭右, 小林公一, 坂本信, 田邊裕治, 古賀良生, 膝骨幹端モデルによる立位下肢状態解析の精度検証, 日本機械学会北信越支部第 47 期総会・講演会, 343, 2010, 新潟.

⑳豊田貴嗣, 小林公一, 坂本信, 大森豪, 古賀良生, 田邊裕治, イメージマッチングによる膝関節接触状態評価法の実験的検証, 第 38 回日本臨床バイオメカニクス学会, 154, 2010, 京都.

㉑望月友晴, 佐藤卓, 山際浩史, 谷藤理, 小林公一, 渡辺聡, 古賀良生, 大森豪, 遠藤直人, 透視 X 線画像を用いた人工膝関節単顆置換術前後の 3 次元運動解析, 第 38 回日本臨床バイオメカニクス学会, 155, 2010, 京都.

㉒笹川圭右, 小林公一, 古賀良生, 坂本信, 田邊裕治, 佐藤卓, 大森豪, MRI モデルを用いた下肢アライメントの 3 次元評価法一切断肢による検証一, 第 38 回日本臨床バイオメカニクス学会, 178, 2010, 京都.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 公一 (KOBAYASHI KOICHI)
新潟大学・医歯学系・助教
研究者番号：70296317

(2) 研究分担者

坂本 信 (SAKAMOTO MAKOTO)
新潟大学・医歯学系・教授
研究者番号：80215657

田邊 裕治 (TANABE YUJI)
新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：60143020

大森 豪 (OMORI GO)
新潟大学・研究推進機構超域学術院・教授
研究者番号：70283009

(3) 連携研究者

(該当者なし)