

令和 7 年 6 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2024

課題番号：21K16672

研究課題名（和文）膝周囲骨切り術の最適化を目指した大規模バイオメカニクスデータベースの構築

研究課題名（英文）Development of biomechanical database for osteotomy around the knee

研究代表者

岩崎 浩司（Iwasaki, Koji）

北海道大学・医学研究院・特任助教

研究者番号：40771895

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：3次元動作解析を行った症例のデータを基に、内側開大式高位骨切り術（OWHTO）前後の膝内反モーメントと患者立脚型評価との相関が、従来の下肢アライメントよりも高いPelvis-knee-ankle angle（PKA）を開発した。PKAは膝荷重分布に基づいた膝周囲骨切りの指標となりうる。また、OWHTO術前後のCT画像からCT-osteabsorptiometry法により高骨密度領域を解析し、術後に応力が減少すると予測される内側関節面の最外側の部分の高骨密度領域が増加する症例の特徴がMPTAが94度以上であることを明らかにし、脛骨側だけの過矯正が成績不良とする生体力学的根拠を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膝周囲骨切り術前後の3次元動作解析、加速度解析データ、CT、MRI画像、及び患者立脚型評価のデータを集積を行った。膝周囲骨切り術は下肢アライメントを矯正することで、荷重分布を変化させることで、除痛、機能改善を図る術式であるが、これまで膝荷重分布を基にした膝周囲骨切り術の指標は明らかになっていなかった。今回開発したPKAはOWHTO術後のKAMとの相関が高く、これを発展させることで、膝周囲骨切り術の治療メカニズム、つまり患者の膝の荷重分布に基づいた膝周囲骨切り術の手術を行うことで、治療成績の向上につながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Based on data from patients who underwent three-dimensional gait analysis, we developed a novel parameter (Pelvis-Knee-Ankle angle (PKA)), which demonstrated a stronger correlation with KAM and PROMs before and after open-wedge high tibial osteotomy (OWHTO), compared to HKA. PKA may serve as a biomechanical index for osteotomy around the knee based on load distribution. Additionally, using CT-osteabsorptiometry, we analyzed regions of high subchondral bone density and found that patients showing an increase in the high-density area in the lateral-most part of the medial compartment, where mechanical stress is predicted to decrease postoperatively, shared a common feature of having MPTA of 94° or greater. These findings provide biomechanical evidence that overcorrection on the tibial side alone may lead to suboptimal surgical outcomes.

研究分野：Orthopedic surgery

キーワード：変形性膝関節症 膝周囲骨切り術 バイオメカニクス 加速度 動作解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

内側型変形性膝関節症 (OA) に対する高位脛骨骨切り術 (HTO) をはじめとする膝関節周囲骨切り術は、下肢アライメントを矯正することで、片側の関節コンパートメントにかかる荷重を軽減し、除痛を目的とする関節温存手術である。特に、2003年にロッキングプレートを用いた HTO が報告されて以降 (Staubli et al. Injury. 2003) その優れた固定性と術後リハビリの早期開始、合併症の減少により、若年・高活動性患者に対する治療として注目を集めている。

従来、HTO における下肢アライメント矯正の目標は %mechanical axis (%MA) 62.5% とされ (Fujisawa et al. Orthop Clin North Am 1979) 冠状面 (二次元) での矯正が主眼とされてきた。しかし、実際にこのアライメント矯正が膝内反モーメント (外的膝内反モーメント) といった力学的因子に与える影響は 3~4 割にとどまると報告されており (Hunt et al. Osteoarthritis Cartil. 2008) バイオメカニクスや術後成績にはアライメント以外の要因も関与している可能性が高い。さらに、HTO には閉鎖式楔状 HTO、開大式 HTO、遠位粗面下 HTO、逆 V 字型 HTO、脛骨顆外反骨切り術などの多様な術式が存在し、対象となる病態も、著明な内反変形を伴う末期 OA から、半月板・軟骨損傷を有する比較的早期の OA までと幅広い。こうした多様な患者背景と術式に対し、従来のように一律の矯正目標を適用することの妥当性には疑問が残る。

本研究では、こうした背景から、個々の患者の背景や術式に応じた最適な矯正目標の設定が、膝関節周囲骨切り術の治療成績を向上させる鍵であると考えた。これを実現するためには、二次元の下肢アライメント変化だけでなく、三次元的な歩容変化、さらには加速度センサーなどによる動的評価を組み合わせ、患者立脚型評価と術後成績との関連を大規模に調査する必要がある。

### 2. 研究の目的

三次元動作解析 (モーションキャプチャー + 床反力計) はバイオメカニクス研究の標準的手法として多くの知見を生んできたが、専用設備を要するため対象症例数に限界がある。そこで本研究では、従来の三次元動作解析に加えて、ウェアラブル加速度センサーを活用し、より多くの症例から歩容や荷重変化のデータを収集し、二次元・三次元・加速度情報を統合したデータベースを構築することを目的とする。最終的には、この大規模データをもとに、個々の背景に最適化された矯正目標を含む術前計画支援システムを構築することを目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 変形性膝関節症患者の二次元・三次元・加速度情報を統合したデータベースの構築

関連病院でデータベース構築のための共同研究を立ち上げ、2施設で膝周囲骨切り前後の xp、CT、MRI 撮像、3次元動作解析、加速度解析、患者立脚型評価を行い、残りの2施設では xp 撮像と加速度解析、患者立脚型評価を行い、二次元・三次元・加速度情報を統合したデータベースの構築を図った。

#### (2) 膝関節荷重分布に基づいた膝周囲骨切り術を目指したレントゲン指標の開発

変形性膝関節症における膝関節内外側の荷重分布の代表的な指標である Knee adduction moment (KAM) と従来の下肢アライメント (HKA) と相関はあるが、膝周囲骨切り術後の相関は高くはないことが知られており、術後の下肢アライメントを元にして KAM を予測、つまり内外側の荷重比を予測することは困難である。

膝モーメントとは、床反力 (GRF) とレバーアームの積として簡略化して表すことができる。GRF ベクトルは圧中心から体重心に向かい、片脚立位では体重心は第2仙椎の前方に位置する (図1)。我々は GRF ベクトルと KAM レバーアーム、さらに HKA との相対的位置関係を踏まえると、下肢アライメントと骨盤幅の両方を反映する X 線指標は、HKA よりも KAM レバーアームおよび KAM と高い相関を有するのではないかと仮説を立てた。そこで本研究では、全身立位 X 線写真で用いられる新たな X 線指標である Pelvis-knee-ankle angle (PKA) を考案した。PKA は、前上腸骨棘の中央点と膝関節中心を結ぶ直線と、下腿機能軸が為す角度として定義した (図2)。

本研究では共同研究施設である函館整形外科クリニックにおける HTO 前後の内反変形を伴う膝 OA 患者のデータを用いて、PKA と KAM および臨床成績との関連を調査した。

#### (3) HTO 後の内側荷重増加要因の探索

申請者は 2021 年の CT-osteodensitometry 法を用いた研究 (Iwasaki et al. AJSM. 2024 で、HTO 後に内側の高骨密度領域は減少し、外側が減少することを明らかにし、HTO 後に内側関節面にかかる応力は減少することを報告した。この研究におけるサブ解析で、全体として減少した内側関節面の高骨密度領域だ

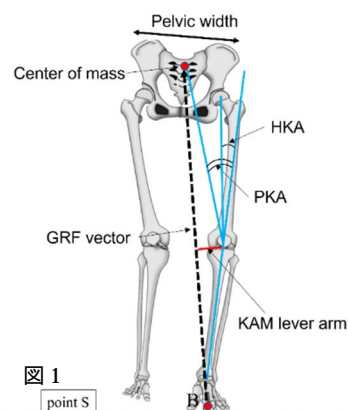


図1

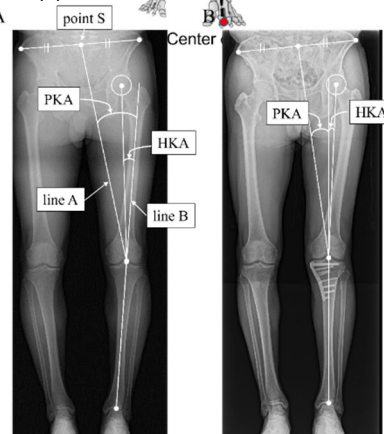


図2

が、最外側寄りの部分では平均として上昇したことを明らかにした。このことは HTO 後に一般的に減少するであろう考えられる内側関節面に加わる応力が、一部で増加することを示唆した。本研究ではこの本来減少する内側関節面で応力、高骨密度領域が増加する変化を Paradoxical change と定義した。蓄積された HTO 症例のデータを基に、膝関節内外側の関節面を各 4 等分した領域における、軟骨下骨の高骨密度領域 (関節面の上位 20%、High density area:HDA) を解析し (図 3) 各 4 領域における HDA の割合 (%HDA) を算出し、術前後で paradoxical change が起きた領域と、paradoxical change が起きた症例と起きない症例の 2 群間における、身体的特徴の違いを明らかにし、有意差の違いがある特徴の 2 群をわけるカットオフ値を ROC 曲線から求めた。

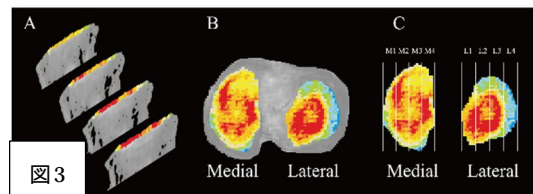


図 3

#### 4. 研究成果

##### (1) 変形性膝関節症患者の二次元・三次元・加速度情報を統合したデータベースの構築

4 施設で膝周囲骨切り前後の xp、CT、MRI 撮像、3 次元動作解析、加速度解析、患者立脚型評価が揃ったのは 200 例、xp、加速度解析、患者立脚型評価が揃ったのは 100 例であった。施設間で術後の評価実施の有無、レントゲン撮像方法の違いなどの統一が図れず、予想よりも少ない症例数の集積であったが、本研究期間後にも継続的に症例の集積を行い、これを基に個々の患者の背景や術式に応じた最適な矯正目標の設定に向けた解析を行う予定である。

##### (2) 膝関節荷重分布に基づいた膝周囲骨切り術を目指したレントゲン指標の開発

(Iwasaki K, et al. Knee Adduction Moment and Patient-Reported Outcomes After High Tibial Osteotomy. Am J Sport Med. 2023)

合計 54 人の患者が解析の対象となった。HTO 後、HKA、PKA、歩行速度、及び KAM 第 1 および第 2 ピーク値はすべて有意に変化した ( $P < 0.01$ )。術後の HKA と PKA の平均値および標準偏差は、それぞれ  $3.6^\circ \pm 1.4^\circ$ 、 $7.9^\circ \pm 1.9^\circ$  であった。KSS の合計点および各サブスケールスコアは HTO 後に有意に改善した。術後の PKA は HKA と負の相関を認めた ( $r = -0.42$ ,  $P < 0.01$ ) (図 3A)。HKA は、KAM 第 1 ピーク値 ( $r = -0.33$ ,  $P < 0.01$ ) および第 2 ピーク値 ( $r = -0.27$ ,  $P = 0.01$ ) と弱い関連が認められた。一方、HTO 前の PKA は KAM 第 1 ピーク値 ( $r = 0.45$ ,  $P < 0.01$ ) および第 2 ピーク値 ( $r = -0.45$ ,  $P < 0.01$ ) と中程度の相関を示した。術後の HKA は、KAM 第 1 ピーク値 ( $r = -0.26$ , 有意差なし) および第 2 ピーク値 ( $r = -0.20$ , 有意差なし) と有意な関連はなかった (図 3B、3C)。しかし、術後の PKA は、KAM 第 1 ピーク値 ( $r = 0.51$ ,  $P < 0.01$ ) および第 2 ピーク値 ( $r = 0.56$ ,  $P < 0.01$ ) と中程度の相関を示した (図 4)。

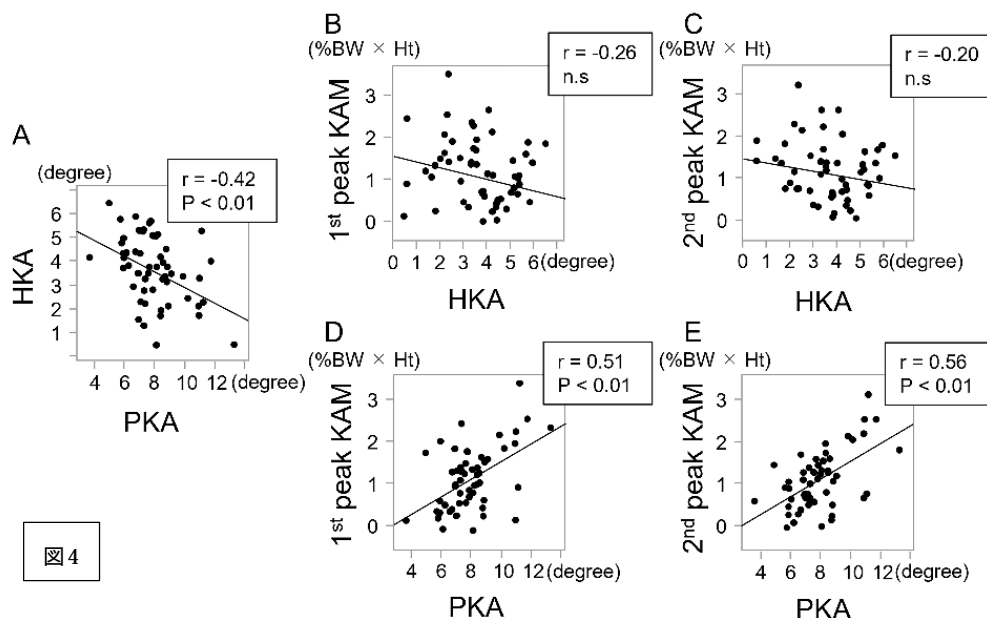


図 4

HTO は膝関節のアライメントを矯正し、膝関節における内外側荷重分布を変化させる。従って、荷重分布は HTO の成功における重要な因子である。しかし、床反力計とモーションセンサーを装備した 3 次元歩行解析システムが導入されている施設は限られているため、ほとんどの術者は荷重分布を特定することができない。HTO 後に PKA は KAM と有意な相関を示したが、HKA との間には関連が認められなかった。HTO の手術計画または評価において PKA を用いることで、術者は内外側荷重分布を考慮した HTO の施行や術後評価が可能となり、最終的には HTO の成績向上につながる可能性がある。

##### (3) HTO 後の内側荷重増加要因の探索

(Fujie Y, Iwasaki K, et al. Paradoxical Change in Subchondral Bone Density in the Medial Compartment of the Proximal Tibial Articular Surface After High Tibial Osteotomy: A

Detailed Subchondral Bone Density Analysis. Am J Sport Med. 2024)

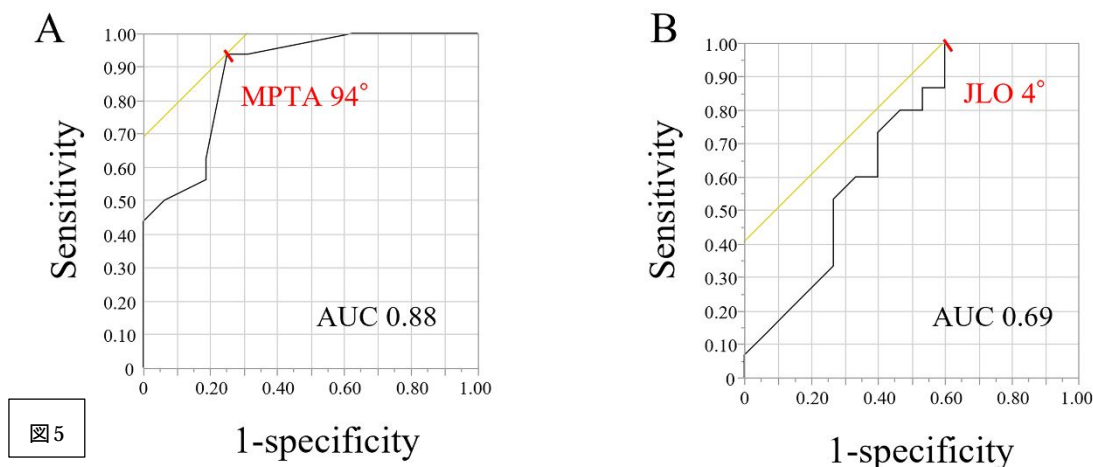
HTO 前後の 32 例が対象となった。先行研究と同様に本研究でも内側関節面を内外側に 4 等分した領域の中で、HTO 後に平均で paradoxical change を認めたは最外側である M4 領域であった。32 例中 paradoxical change を認めたのは 16 例 (50%)、認めなかったのは 16 例 (50%) であった。

M4 領域の paradoxical change の有無の 2 群間の身体的特徴は MPTA ( $p=0.03$ )と JLO( $p=0.04$ )であった (表 1)。有意差を認めた MPTA と JLO で paradoxical change 発症のカットオフ値は、MPTA が 94 度、JLO は 4 度であった (図 5)。

本研究の結果、HTO 後に応力が減少するであろうとされる内側関節面で軟骨下骨の高骨密度領域が増加、つまり応力の増加が示唆される paradoxical change が起きるのは、MPTA が 94 度以上、JLO で 4 度以上であることが示唆された。近年、外反矯正を行う際に大腿骨の内反変形を残したまま脛骨側だけで矯正を行うと、JLO が増加することが報告されている。また術後の JLO 増加の成績不良も指摘されている。本研究結果からも術後 MPTA 高値、JLO 高値つまり脛骨側での矯正が大きいことが本来減少するであろう内側関節面の応力増大につながることを示唆され、これまでの脛骨側での過矯正例が成績不良となる生体力学的要因を裏付けた。このことは膝周囲骨切り術において、術者は変形が大腿骨、脛骨のどちらにあるのか、または両者にあるのかをしっかりと認識し、変形がある部分での矯正を行うという、変形矯正の原則の重要性を認識すべきであることを示した。

表 1 M4 領域の Paradoxical change の有無により身体的特徴の違い

	Paradoxical change		P-value
	(+) (n = 16)	(-) (n = 16)	
Age, years	58.4 (53.4–63.6)	60.4 (55.5–65.4)	.39
Male:female	6:10	9:7	.47
BMI, $\text{kg}^2 \times \text{m}$	27.6 (25.3–28.9)	26.6 (24.3–28.9)	.46
HKA, degree	5.2 (4.3–6.2)	4.3 (3.4–5.3)	.20
Mechanical axis, %	70.5 (65.7–75.2)	66.2 (61.2–71.1)	.21
mLDFA, degree	88.1 (86.9–89.3)	87.8 (86.6–89.0)	.69
MPTA, degree	96.0 (94.9–97.0)	92.9 (91.8–94.0)	.03
PTS, degree	11.4 (9.5–13.3)	12.1 (10.2–14.0)	.60
JLO, degree	3.5 (2.0–5.1)	1.6 (–0.2–2.9)	.04
JLCA, degree	1.6 (0.8–2.6)	1.2 (0.4–2.0)	.47



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sugawara Yutaro, Iwasaki Koji, Suzuki Yuki, Hishimura Ryosuke, Matsubara Shinji, Matsuoka Masatake, Onodera Tomohiro, Kondo Eiji, Iwasaki Norimasa	4. 巻 12
2. 論文標題 Bone Density Distribution Pattern in the Lateral Wall of the Femoral Intercondylar Notch: Implications for the Direct Insertion of the Femoral ACL Attachment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Orthopaedic Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/23259671241236807	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Iwasaki Koji, Ohkoshi Yasumitsu, Hosokawa Yoshiaki, Chida Shuya, Ukishiro Kengo, Kawakami Kensaku, Suzuki Sho'ji, Maeda Tatsunori, Onodera Tomohiro, Kondo Eiji, Iwasaki Norimasa	4. 巻 51
2. 論文標題 Higher Association of Pelvis-Knee-Ankle Angle Compared With Hip-Knee-Ankle Angle With Knee Adduction Moment and Patient-Reported Outcomes After High Tibial Osteotomy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The American Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 977 ~ 984
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/03635465221150513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsubara Shinji, Onodera Tomohiro, Iwasaki Koji, Hishimura Ryosuke, Matsuoka Masatake, Kondo Eiji, Iwasaki Norimasa	4. 巻 50
2. 論文標題 Discrepancy in the Distribution Patterns of Subchondral Bone Density Across the Ankle Joint After Medial Opening-Wedge and Lateral Closing-Wedge High Tibial Osteotomy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The American Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 478 ~ 485
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/03635465211062235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fujie Yuki, Iwasaki Koji, Hamasaki Masanari, Suzuki Yuki, Matsuoka Masatake, Onodera Tomohiro, Kondo Eiji, Iwasaki Norimasa	4. 巻 52
2. 論文標題 Paradoxical Change in Subchondral Bone Density in the Medial Compartment of the Proximal Tibial Articular Surface After High Tibial Osteotomy: A Detailed Subchondral Bone Density Analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The American Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 2278 ~ 2286
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/03635465241256100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsubara Shinji, Onodera Tomohiro, Iwasaki Koji, Hishimura Ryosuke, Matsuoka Masatake, Kondo Eiji, Iwasaki Norimasa	4. 巻 50
2. 論文標題 Discrepancy in the Distribution Patterns of Subchondral Bone Density Across the Ankle Joint After Medial Opening-Wedge and Lateral Closing-Wedge High Tibial Osteotomy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The American Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 478 ~ 485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/03635465211062235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Koji Iwasaki, Yasumitsu Ohkoshi, Kazuki Sasaya, Kengo Ukishiro, Kensaku Kawakami, Shoji Suzuki, Tatsunori Maeda, Tomohiro Onodera, Eiji Kondo, Norimasa Iwasaki
2. 発表標題 Factors affecting the change in knee adduction moment of contralateral knee joint after high tibial osteotomy
3. 学会等名 Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Koji Iwasaki, Yasumitsu Ohkoshi, Yui Tateyama, Kengo Ukishiro, Kensaku Kawakami, Shoji Suzuki, Tatsunori Maeda, Tomohiro Onodera, Eiji Kondo, Norimasa Iwasaki
2. 発表標題 The biomechanical characteristics features of varus thrust in patients with medial knee osteoarthritis -Quantified by three dimensional gait analysis-
3. 学会等名 Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Koji Iwasaki; Yasumitsu Ohkoshi; Yoshiaki Hosokawa; Shuya Chida; Kengo Ukishiro; Kensaku Kawakami; Shoji Suzuki; Tatsunori Maeda; Tomohiro Onodera, Eiji Kondo; Norimasa Iwasaki
2. 発表標題 Higher Correlation Of A New Radiographic Parameter With Knee Adduction Moment And Patient-reported Outcomes After High Tibial Osteotomy: Pelvis-knee-ankle Angle
3. 学会等名 Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koji Iwasaki, Yasumitsu Ohkoshi, Sasaya Kazuki, Kengo Ukishiro, Kensaku Kawakami, Shoji Suzuki, Tatsunori Maeda, Tomohiro Onodera, Eiji Kondo, Norimasa Iwasaki
2. 発表標題 The Change In Center Of Gravity And Knee Adduction Moment Of Contralateral Knee Joint After High Tibial Osteotomy
3. 学会等名 Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koji Iwasaki, Yasumitsu Ohkoshi, Sasaya Kazuki, Shigeyuki Sakurai, Kengo Ukishiro, Kensaku Kawakami, Shoji Suzuki, Tatsunori Maeda, Tomohiro Onodera, Eiji Kondo, Norimasa Iwasaki
2. 発表標題 Factors Affecting The Change In Knee Adduction Moment Of Contralateral Knee Joint After High Tibial Osteotomy
3. 学会等名 21st ESSKA Congress (国際学会)
4. 発表年 2024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