

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11333

研究課題名（和文）三次元画像解析に基づく新規骨性パラメーターによる股関節疾患の遠隔画像診断法の確立

研究課題名（英文）Establishment of remote imaging diagnosis of hip joint disease based on three-dimensional image analysis

研究代表者

入江 徹 (Irie, Tohru)

北海道大学・医学研究院・客員研究員

研究者番号：30609839

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）：股関節痛の原因となる股関節適合性不良、不安定性、応力集中を評価しうる新規のパラメーターを用いて股関節骨形態を三次元的に定量評価する方法を確立した。また、それらを寛骨臼形成不全股、境界型寛骨臼形成不全股、正常股間で統計学的に比較した。さらに二次元動態撮影画像と三次元股関節骨モデルをマッチングさせることにより、股関節外転動作時の大腿骨頭変異パターンを評価し、大腿骨頭の変異は3パターンに分類可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本プロジェクトは、各種骨形態パラメーターによる三次元骨形態評価、二次元動作画像と三次元骨モデルのマッチングによる関節不安定性評価によって、骨形態学的特徴と関節動態を合わせて評価することにより、個々の症例において画像情報に基づいた正確な病態把握を可能となることを示唆した。これらは直接的な身体所見診察が困難な状況や診断医の経験不足等を補完しうるもので、遠隔医療にも発展可能である。また股関節疾患のみならず、スポーツ医学領域全般に応用可能なもので、画像データに基づく正確かつ検者間誤差を排除した個々の患者の診断、発症リスク予測、治療法選択に発展しうる。

研究成果の概要（英文）： We developed new parameters to assess hip congruity, instability, and stress concentration, which cause hip pain, and established a three-dimensional quantitative evaluation method for hip joint morphology. The results were statistically compared among acetabular dysplastic hips, borderline acetabular dysplastic hips, and normal hips.

Image matching was performed using X-ray images of hip abduction with a three-dimensional hip model. The displacement of the femoral head center and its trajectory length were measured. A cluster analysis was conducted to classify the displacement pattern of the femoral head center, and trajectory lengths were compared. Displacement was classified into three patterns: medialization, hinge abduction, and centering.

研究分野：股関節外科学

キーワード：股関節 骨形態解析 三次元画像解析 寛骨臼形成不全

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

都市部への人口集中と医師の偏在は地域間医療格差を招き、遠隔医療へのニーズと期待が高まった。診断に身体所見が占める要素が多いスポーツ医学領域では、遠隔医療は立ち遅れていると言わざるを得ない。スポーツ医学領域において画像情報の三次元解析に基づいて詳細に病態の把握が可能となれば、直接的な身体所見診察の欠如を補完できる可能性がある。

股関節スポーツ障害による関節唇損傷、軟骨損傷の主因の一つとして、寛骨臼形成不全による関節不安定性と寛骨臼外側への応力の集中がある。寛骨臼形成不全は、主に両股正面 X 線像による lateral center-edge angle (LCEA) によって診断され、種々の LCEA 計測法が報告されている。寛骨臼側の計測点として単純 X 線上での関節荷重面を表す sourcil の外側縁を用いる方法 (sourcil LCEA) が最も頻用され、寛骨臼の最外側点で計測する bony LCEA も用いられる。また CT 画像を用いて大腿骨頭中心を通る plane にて計測する CT based LCEA も用いられる。しかし各種 LCEA の計測点が寛骨臼上のどの位置に相当するかは解明されていなかった。

寛骨臼形成不全の治療方針決定には三次元的な寛骨臼被覆の把握が重要で、通常、前方、後方等の被覆状態に基づいて「anterior deficiency」、「posterior deficiency」など 3 または 4 型に分類される。そしてその分類には acetabular sector angle が頻用されるが、計測部の局所的な被覆状態や撮像時の骨盤傾斜の影響を受けるという問題がある。

寛骨臼形成不全股では円靭帯の大腿骨測付着部である大腿骨頭窩が、頭側に位置することが多い (fovea alta) ことが報告されている。骨頭窩は陥凹しているため頭側に位置し骨盤側の関節面である寛骨臼月状面と相対すると大腿骨頭・寛骨臼間の有効な接触面積を減少させ、関節応力の集中を引き起こし変形性股関節症への進行に影響を与える可能性がある。実際の有効接触面積の評価は三次元的に行われる必要があるが、fovea alta に関する報告は、定性的なもの、または 2 次元画像による評価のみで、三次元的に定量評価する方法は確立されていない。

寛骨臼形成不全股では関節不安定性を生じることは広く認識されているが、一方で実際に股関節の安定性を評価することは非常に困難であり種々の試みはなされているものの、その評価方法は未だ確立されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的として、まず(1) 股関節適合性、不安定性、応力集中に寄与する股関節の骨形態を評価する独自のパラメーターを確立し、それらを用いて三次元的に股関節骨形態を定量評価する方法を確立すること、さらに (2) 二次元動態撮影画像と三次元股関節骨モデルをマッチングさせることにより、股関節不安定性評価法を確立することとした。

3. 研究の方法

(1)倫理規定

本研究は北海道大学病院自主臨床研究審査委員会承認(016 0149、019-0131)のもと実施した。

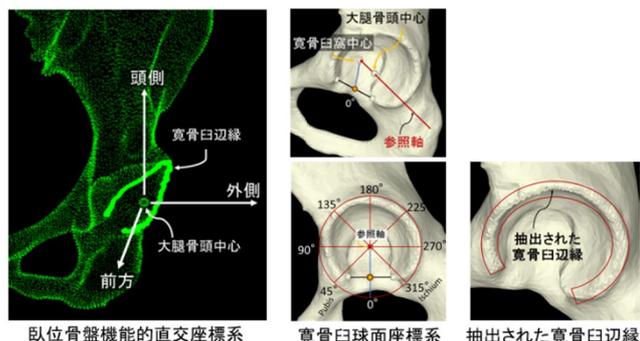
(2)対象 三次元的骨形態評価は、2015 年 1 月～2017 年 12 月に偏心性寛骨臼回転骨切り術 (ERAQ)、彎曲内反骨切り術 (CVO)、人工股関節全置換術 (THA) を施行された 16 歳から 60 歳の患者の対側股 59 股を対象とした。手術既往歴、非球形骨頭、大腿骨頭壊死症、LCEA 40 度、変形性股関節症の 50 股は除外した。LCEA が 20 度以下の形成不全股が 17 股、CCEA が 20～25 度の境界型形成不全股が 20 股、正常股が 20 股であった。

股関節不安定性評価は 2015 年 4 月～2020 年 3 月に ERAQ、CVO 術前評価目的に股関節外転位撮影が実施されていた 30 股 (形成不全 10 股、境界型形成不全 10 股、正常 10 股) を用いた。

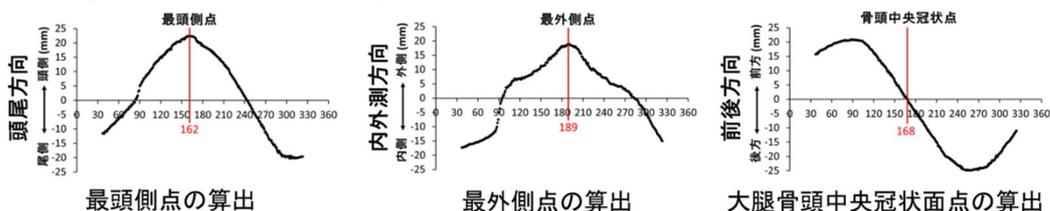
(3)評価方法

三次元的股関節骨形態評価 各種 LCEA と寛骨臼辺縁の間の三次元的位置関係性評価

Sourcil LCEA、bony LCEA、CT based LCEA の計測点に相当する領域が、寛骨臼辺縁上のどこに位置するかを三次元的に計測した。まず術前評価 CT から Mimics (Materialise, Leuven, Belgium) を用いて大腿骨、寛骨臼の三次元骨モデルを作成した。独自のソフトを用いて、大腿骨頭中心位置を算出し、大腿骨頭中心を原点とする臥位骨盤直交座標系を設定した。次に寛骨臼窩中心点と大腿骨頭中心点を結ぶ線を寛骨臼参照軸として設定し、寛骨臼切痕前縁と後縁の中点と寛骨臼窩中心を結ぶ線を 0 度とし、寛骨臼辺縁に前方から後方にかけて 1 度刻みの球面座標系を設定した。さらに寛骨臼辺縁頂部を点の集合として自動抽出し、抽出された各点の座標を寛骨臼球面座標系 (0～360°)、骨盤直交座標系 (頭尾、内外測、前後方向) にて算出した。



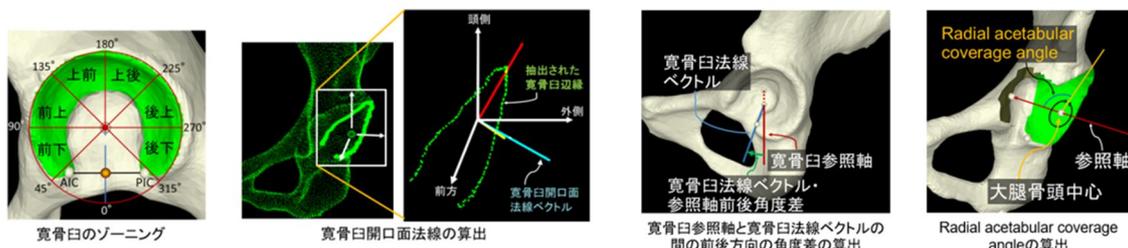
骨盤直交座標系における最頭側点 (Sourcil LCEA の計測点に相当) 最外側点 (Bony LCEA の計測点に相当) 大腿骨頭中央冠状面点 (CT based LCEA の計測点に相当) を同定し、寛骨臼球面座標系上での座標を算出した。各点の位置関係性を各群 (正常股、境界型形成不全股、形成不全股) で統計学的に比較した。



寛骨臼開口面の法線ベクトルに基づく新規寛骨臼形成不全分類法の確立
 寛骨臼球面座標系において寛骨臼の 45° から 315° の範囲を 45° 間隔で 6 領域 (前下、前上、上前、上後、後上、後下) にゾーニングした。抽出された寛骨臼辺縁頂部全体の集合から開口面の法線ベクトルを骨盤直行座標系で算出した。

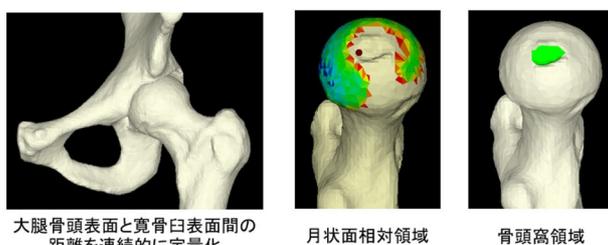
寛骨臼参照軸と寛骨臼法線ベクトルの間の前後方向の角度差を算出し、前後方向角度差の平均値とその標準偏差 (SD) に基づいて前向き型 (前後角度差 +0.5SD 以上) 中間型 (-0.5SD ~ +0.5SD) 後ろ向き型 (-0.5SD 以下) の 3 型に分類した。

大腿骨頭中心と寛骨臼辺縁を結ぶ線と参照軸がなす角を radial acetabular coverage angle とし、放射状に計測し、各ゾーン内の radial acetabular coverage angle の平均値を、zonal-acetabular coverage として算出した。Zonal-acetabular coverage を三群 (前向き型、中間型、後ろ向き型) 間でゾーン毎に統計学的に比較した。



大腿骨頭窩の影響を考慮した大腿骨頭・寛骨臼間の三次元的接触面積評価
 大腿骨頭窩が大腿骨頭・寛骨臼間の接触面積に与える影響を三次元的に定量評価した。

大腿骨頭表面と寛骨臼表面間の距離を連続的に定量化し、軟骨厚に基づいて、その距離が 4.5mm 以下の大腿骨頭表面領域を月状面相對領域と定義し、その表面積を算出した。大腿骨頭窩領域の位置と表面積を算出し、骨頭窩領域の位置情報と月状面相對領域の位置情報を対比し、重複部分の表面積を算出した。月状面相對領域に占める骨頭窩・月状面重複領域の面積比率を算出することにより関節の大きさの影響を標準化した。各計測値を各群 (正常股、境界型形成不全股、形成不全股) で統計学的に比較した。



股関節外転運動における関節不安定性評価
 二次元股関節動態撮影画像と三次元股関節骨モデルをマッチングさせ、股関節外転時の大腿骨頭外方化量を定量化することにより股関節不安定性定性評価を実施した。

大腿骨、寛骨臼の三次元骨モデルの関節面より、最小二乗法で大腿骨頭中心と寛骨臼中心座標をそれぞれ算出した。股関節外転 0°、10°、20°、30°、最大外転位の正面 X 線透視二次元画像と三次元骨モデルを Joint track (SourceForge, USA) を用いて、マッチングした。



大腿骨頭外方化 Index (寛骨臼中心と大腿骨頭中心の差/涙痕間距離の2分の1)を用いて、中間位から最大外転位までの骨頭外方化量をそれぞれ標準化した。階層的クラスター分析で大腿骨頭外方化 Index の変位パターン分類を行い、股関節外転時の大腿骨頭中心変位パターンを、三型に分類した。

さらに外方化したのち急激に内方化に転じる特徴的な大腿骨頭中心変位パターンを示す Hinge action 型は、いびつな大腿骨頭形状が関与しているとの仮説のもと、その病態の解明を試みた。大腿骨、寛骨臼の三次元骨モデルより大腿骨頭の重心を大腿骨頭中心とした近似球を作成し、この近似球から半径+0.5mm と-0.5mm の仮想球を作成した。これらを二次元股関節動態撮影画像とマッチングし、最大外方化から内方化に転じる Hinge action 時の各仮想球における大腿骨頭と寛骨臼の接触面積変化を算出した。

4. 研究成果

結果 各種 LCEA と寛骨臼辺縁の間の三次元的位置関係性評価

最頭側点 (Sourcil LCEA の計測点に相当) 最外側点 (Bony LCEA の計測点に相当) 大腿骨頭中央冠状面点 (CT based LCEA の計測点に相当) の各点は、正常股群では三次元的にほぼ同じ位置を示しており、3 点間で有意差を認めなかった。境界型形成不全股群では最頭側点是最外側点よりも優位に前方に位置していた。形成不全股群では最頭側点、大腿骨頭中央冠状面点とはとも最外側点よりも優位に前方に位置していた。

正常股

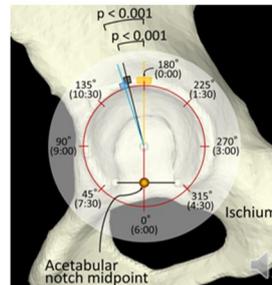
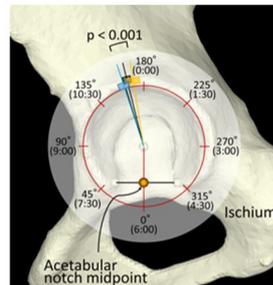
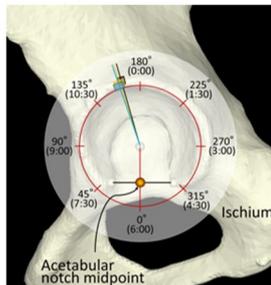
最頭側点: 162.0 ± 9.1
最外側点: 162.2 ± 10.0
中央冠状面点: 165.8 ± 6.7

境界型形成不全股

最頭側点: 162.1 ± 10.6
最外側点: 171.3 ± 15.2
中央冠状面点: 165.8 ± 7.0

形成不全股

最頭側点: 160.7 ± 10.4
最外側点: 180.0 ± 17.7
中央冠状面点: 164.1 ± 8.3

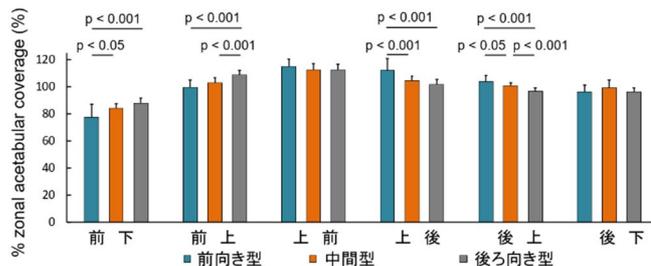


各点の寛骨臼辺縁上での位置関係

*線: 平均値、扇: 95%信頼区間

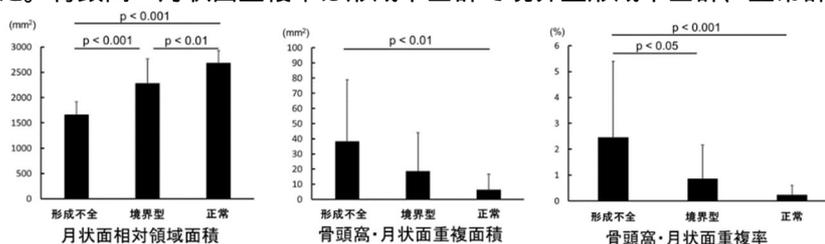
寛骨臼開口面の法線ベクトルに基づく新規寛骨臼形成不全分類法の確立

寛骨臼参照軸と寛骨臼法線ベクトルの前後方向の角度さは平均 $5.7 \pm 4.2^\circ$ だった。前後角度差に基づき、17 股が前向き型、19 股が中間型、21 股が後ろ向き型に分類された。寛骨臼法線ベクトルに基づく分類と各領域の骨性被覆の関係は、前向き型では前下、前上領域の被覆が優位に少なく、後ろ向き型では上後、後上領域の被覆が優位に少ないことが示された。



大腿骨頭窩の影響を考慮した大腿骨頭・寛骨臼間の三次元的接触面積評価

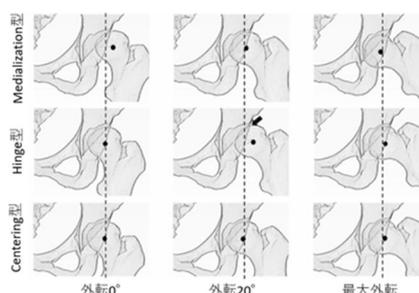
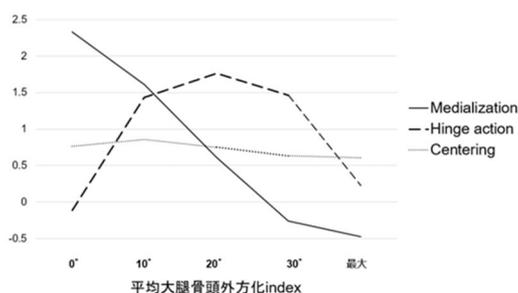
大腿骨頭窩領域と月状面相對領域の重複は、形成不全股では 11 股で認めたのに対し、正常股では 6 股のみだった。月状面相對領域は、境界型形成不全群で形成不全群より優位に大きく、正常股群より小さかった。骨頭窩・月状面重複領域は形成不全群で正常群よりも優位に大きかった。骨頭窩・月状面重複率は形成不全群で境界型形成不全群、正常群よりも優位に高かった。



股関節外転運動における関節不安定性評価

股関節外転時の大腿骨頭外方化パターンは外転するごとに内方化していく Medialization 型、外方化したのち急激に内方化に転じる Hinge action 型、内方化も外方化もほとんど生じない

Centering型に分類可能であった。正常股では全例でCentering型を示した。一方で、形成不全股では大半（7股）がMedialization型を示し、Hinge action型が2股で、Centering型は1股のみであった。境界型形成不全股は3型に分布していた（Medialization型：2股、Hinge action型：5股、Centering型：3股）。



Hinge action型で最大外方化したときの大腿骨頭の総接触面積は、近似球から半径-0.5mmの仮想球で平均 $1265.9 \pm 242.4 \text{mm}^2$ 、+0.5mmの仮想球で $33.9 \pm 33.1 \text{mm}^2$ であった。一方、内方に転じるときは、近似球から-0.5mmの仮想球で $1426.3 \pm 236.0 \text{mm}^2$ 、+0.5mmの仮想球で $20.8 \pm 28.9 \text{mm}^2$ に変化した。

考察 各種 LCEA と寛骨臼辺縁の間の三次元的位置関係性評価

最頭側点の位置は正常股、境界型形成不全股、形成不全股とも平均 $160 \sim 162^\circ$ と、大腿骨頭中心のやや前方のほぼ同じ位置にあり、形成不全の重症度の影響を受けないことが示された。一方で最外側点は正常股で平均 162° 、境界型形成不全股で 171° 、形成不全股で 180° と形成不全の重症度に応じて後方にシフトしていくことが示された。単純 X 線像に基づく評価時には、形成不全股では、sourcil LCEA と bony LCEA の計測点の位置に三次元的な隔たりが大きいことを認識することが重要であると考えられた。

寛骨臼開口面の法線ベクトルに基づく新規寛骨臼形成不全分類法の確立

前壁の形成不全が主体である Anterior deficiency pattern では、寛骨臼開口面は前方に傾き、逆に後壁の形成不全が主体である Posterior deficiency pattern では、寛骨臼開口面は後方に傾く、という理論的背景より寛骨臼開口面法線ベクトルに基づく新規寛骨臼形成不全分類法を提唱した。この寛骨臼開口面法線ベクトルによる分類に基づいて、実際の寛骨臼被覆を三次元的に評価すると、寛骨臼開口面法線ベクトルが前方に傾いている群では、前方の被覆が有意に少なく、後方に傾いている群では後方の被覆が有意に少ないことが示された。寛骨臼開口面法線ベクトルは、三次元的寛骨臼被覆を反映しており、形成不全分類に有用なパラメーターとなることが示唆された。

大腿骨頭窩の影響を考慮した大腿骨頭・寛骨臼間の三次元的接触面積評価

これまで大腿骨頭窩と寛骨臼窩の位置関係の評価には、角が用いられてきたが、一平面による頭尾方向の評価であり、前後方向や三次元的位置関係は評価不能であった。我々は、大腿骨頭表面と寛骨臼表面間の距離を連続的に定量化する独自の方法により、寛骨臼窩を除いた寛骨臼月状面を大腿骨頭表面に投影し、骨頭窩と寛骨臼窩の位置関係を三次元的かつ直感的に評価可能とする方法を確立した。形成不全股では、大腿骨頭窩と寛骨臼月状面が overlap する症例が多いことが示され、骨頭窩の位置と形状が大腿骨頭・寛骨臼間の接触面積に影響を与え、応力集中の一因となる可能性が示唆された。

股関節外転運動における関節不安定性評価

これまで股関節不安定性の評価法として、単純 X 線像による関節適合性分類や加速度計を用いてその振幅を計測するものなどが、報告されているが、実際の股関節の動揺性から不安定性を評価する方法は未だ確立されているとは言えない。我々は本研究で、股関節中間肢位から外転肢位への X 線透視画像データを CT による三次元骨モデルとマッチングすることにより、大腿骨頭の変位パターンを評価し、外転することにより内方化していく Medialization 型、外方化したのち急激に内方化に転じる Hinge action 型、内方化も外方化もほとんど生じない Centering 型に分類可能であることを示した。本手法は実臨床での股関節安定性評価に有用で、治療方針決定の一助になる可能性が示唆された。

以上の結果から本プロジェクトは、各種骨形態パラメーターによる三次元骨形態評価、二次元動作画像と三次元骨モデルのマッチングによる関節不安定性評価によって、微細な骨形態学的特徴と関節動態を合わせて評価することにより、個々の症例において画像情報に基づいた正確な病態把握を可能とすることを示唆した。これらは直接的な身体所見診察の欠如や診断医の経験不足等を補完しうるもので、遠隔医療にも発展可能である。また股関節疾患のみならず、スポーツ医学領域全般に応用可能なもので、画像データに基づく正確かつ検者間誤差を排除した個々の患者の診断、発症リスク予測、治療法選択に発展しうる。各種骨形態パラメーターが関節動態に与える影響は未知な部分も多く、さらなる研究を継続していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kizawa Fumiya, Suzuki Daisuke, Nagoya Satoshi, Kanaizumi Arata, Shimizu Tomohiro, Irie Tohru, Takahashi Daisuke, Iwasaki Norimasa	4. 巻 111
2. 論文標題 Joint instability in patients with borderline developmental dysplasia of the hip	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Clinical Biomechanics	6. 最初と最後の頁 106136 ~ 106136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.clinbiomech.2023.106136	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 喜澤 史弥、鈴木 大輔、名越 智、小助川 維摩、金泉 新、入江 徹、清水 智弘、高橋 大介、岩崎 倫政
2. 発表標題 股関節外転運動における関節不安定性と大腿骨頭形状の関係
3. 学会等名 第49回日本股関節学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 入江 徹、高橋大介、岩崎倫政
2. 発表標題 Lateral center-edge angleと寛骨臼辺縁の間の三次元的位置関係性評価
3. 学会等名 第48回日本股関節学会学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江 徹、喜澤史弥、高橋大介、岩崎倫政
2. 発表標題 寛骨臼開口面の法線ベクトルに基づく新規寛骨臼形成不全分類法の確立
3. 学会等名 第48回日本股関節学会学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江 徹、高橋大介、岩崎倫政
2. 発表標題 寛骨臼形成不全股における寛骨臼辺縁形状の三次元的定量評価法の確立
3. 学会等名 第48回日本股関節学会学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江 徹、入江朋世、高橋大介、井上 望、岩崎 倫政
2. 発表標題 大腿骨頭窩の影響を考慮した大腿骨頭・寛骨臼間の三次元的接触面積評価
3. 学会等名 第36回日本整形外科学会基礎学術集会
4. 発表年 2021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	金井 理 (Kanai Satoshi) (90194878)	北海道大学・情報科学研究院・特任教授 (10101)	

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
---------	---------