

令和元年6月11日現在

機関番号：31201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K01562

研究課題名(和文) 3Dイメージングによる新たな解剖学的膝靭帯再建術の開発

研究課題名(英文) Development of new anatomical knee ligament reconstructions using with three-dimensional images

研究代表者

田島 吾郎 (Tajima, Goro)

岩手医科大学・医学部・講師

研究者番号：90382605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：前十字靭帯や後十字靭帯と共に膝関節の安定性に重要な役割を担っている、内側側副靭帯や後斜走靭帯を含む後内側構成体と、外側側副靭帯や後膝窩腓骨靭帯、大腿二頭筋腱を含む後外側構成体などの付着部の解剖学的な位置情報と骨性指標を3Dイメージ上で明らかにした。さらに膝蓋骨脱臼の重要な脱臼抑制因子の一つである内側膝蓋大腿靭帯と靭帯再建術の際の移植腱材料であり重要な膝伸展機構の一部である膝蓋腱などなどの付着部の解剖学的な位置情報と骨性指標も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、今まで明らかにされていなかった膝関節の靭帯や腱の付着部位置情報を術前に把握し、手術中に正確に同定することが可能となり、複数の靭帯が同時に損傷される複合靭帯損傷や膝蓋骨脱臼の治療成績をより向上させることに寄与する。

研究成果の概要(英文)：We clarified the insertions of the medial collateral ligament, posterior oblique ligament, lateral collateral ligament, popliteofibular ligament, and biceps femoris tendon and their related osseous landmarks on three-dimensional images. Additionally, we also clarified the insertions of the medial patellofemoral ligament and patella and their related osseous landmarks. These findings may improve understanding of the anatomy of their insertions and may assist surgeons in performing anatomical reconstructions to improve clinical results for the multiple ligament injuries and patella dislocation.

研究分野：整形外科

キーワード：膝関節 靭帯付着部 解剖

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

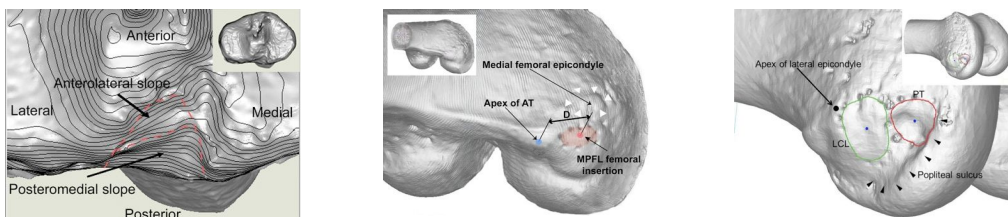
人体最大の関節である膝関節は、その解剖学的構造から骨性には極めて不安定であり、重要な支持機能である多くの靭帯などの軟部組織により制動されている。この膝関節にスポーツ外傷や交通事故などによる大きな外力が作用すると、その外力の方向により様々な靭帯損傷を生じ、時として膝関節に不可逆的で極めて重篤な機能障害を引き起こす。

近年、市民におけるスポーツ人口の増加から、膝靭帯損傷は年々増加傾向にあり、特に前十字靭帯 (ACL) は本邦でも年間 1 万 5 千件以上の手術治療が行われており、ACL の正常靭帯や移植靭帯の力学的強度や特性などの生体力学的研究や、治療法や手術術式の違いによる治療成績、術後リハビリテーションなどの臨床的研究が数多く行われてきた。これらの結果から、より正常な膝関節のキネマティクスを再現するため、移植靭帯を解剖学的に正常靭帯に近似させる「解剖学的再建術」が試みられるようになり、靭帯付着部の詳細な解剖学的研究が行われるようになった。特に ACL 大腿骨側付着部前縁の骨性隆起である「resident's ridge」の存在が広く知られるようになり、より正確度と再現性を増した前十字靭帯に対する「解剖学的再建術」の手術成績は飛躍的に向上した。

一方、交通事故や高エネルギーによるスポーツ外傷などにより複数の靭帯が同時に損傷される「複合靭帯損傷」は、単独の靭帯損傷に比べて高度の膝不安定性を呈し、半月板損傷や軟骨損傷の合併頻度も高いため、より重篤で複雑な機能障害をきたす。この機能障害を改善するために、より正確で再現性のある「解剖学的修復術」や「解剖学的再建術」が、全ての損傷靭帯について行われるべきであるが、後十字靭帯 (PCL: Posterior cruciate ligament)、内側側副靭帯 (MCL: Medial collateral ligament)、後斜走線維 (POL: Posterior oblique ligament) を含む後内側支持機構 (PMC: Posteromedial corner)、外側側副靭帯 (LCL: Lateral collateral ligament) を含む後外側支持機構 (PLC: Posterolateral corner) などについての「解剖学的再建術」は未だ技術的に極めて困難であり、治療成績も満足すべきものではない。特に PMC や PLC については、膝関節の内外反制動だけでなく、回旋安定性にも極めて重要な役割を担っていると考えられているが、その生体力学的研究のみならず、解剖学的研究も未だ十分ではなく、その詳細な研究が望まれている。

また女性のスポーツ外傷などで多くみられる「膝蓋骨脱臼」は、膝のアライメント異常などの素因を有する場合、容易に「反復性」に移行することが知られている。内側膝蓋大腿靭帯 (MPFL: Medial patello-femoral ligament) は膝蓋骨脱臼の重要な脱臼抑制因子の一つであり、内側支持機構の中で約 60% の抗張力を有している。「反復性膝蓋骨脱臼」に対する手術治療として、MPFL の再建術が広く行われてきており、再建位置が術後の膝蓋大腿関節のキネマティクスに大きく関与することが報告されているが、至適位置については未だ一致した見解が得られていない。

我々は以前から ACL 以外の靭帯でも、本来の解剖学的靭帯付着部に靭帯を再建する「解剖学的再建術」が、より治療成績を向上させ得ると考え、従来の肉眼解剖学的手法と、3D イメージングの手法を用いて、手術時の有用な情報である PCL 脛骨付着部、MPFL 大腿骨付着部、PLC 大腿骨付着部の「位置情報」と「骨性指標」を明らかにしてきた。



\*我々が明らかにしてきた 3D モデルによる靭帯付着部の骨性指標左: PCL 脛骨付着部、中: MPFL 大腿骨付着部、右: PLC 大腿骨付着部

本研究ではそれぞれの解剖学的靭帯付着部に対して、詳細な肉眼解剖の後、CT スキャナーで撮像し、より詳細に可視化可能な 3D イメージを作成する。作成した 3D イメージを用いて、術前プランニングや術中透視、ナビゲーションシステムなどで安全に再建位置の確認が可能な二次元、三次元上の「座標位置情報」と、特に手術時の有用な指標となり得る靭帯付着部の特徴的な骨形態「骨性指標」を解析、検討することで、より正確で再現性のある「解剖学的再建術」の手術術式を開発できるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、膝関節靭帯損傷の治療成績を向上させるため、MCL、POL を含む PMC、LCL を含む PLC、MPFL などの膝関節靭帯付着部の解剖学的な位置情報と骨性指標を 3D イメージ上で明らかにすることである。さらにこの情報を基に有限要素 3D 生体モデルを用いて、再建靭帯の長さ・緊張変化をシミュレートし、より正確で再現性のある「解剖学的再建術」の手術術式を開発する。

### 3. 研究の方法

学生実習用献体を用いて膝関節の詳細な肉眼解剖を行い、MCL、PMC、PLC、MPFL それぞれの

靭帯の走行や付着部の形態を詳細に観察し、その解剖学的特徴を明らかにする。

その後、靭帯付着部をマーキングし、屍体膝をオートプシー・イメージング用の CT スキャナーを用いて撮影する。撮影した DICOM データを CAD データに変換し、専用解析ソフトを用いて 3D モデルを構築する。作成した 3D モデルを用いて各靭帯付着部の特徴的な骨形態を明らかにし、実際の手術時で有用な情報である骨性指標を示す。また 3D モデル上での各靭帯付着部の面積、中心の座標位置などを計測し、二次元、三次元上での付着部位置情報を明らかにする。

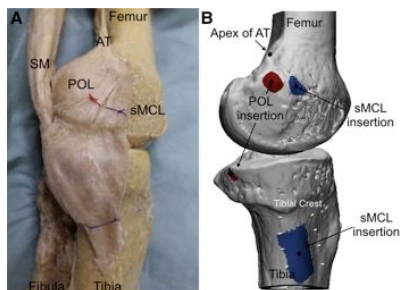
さらにこれらの正確な位置情報と骨性指標をもとに解剖学的再建術を 3D 骨モデル上でシミュレートし、有限要素 3D 生体モデルを用いて、膝各屈曲角度での再建靭帯の長さ・緊張変化を計測する。開発した正確で再現性の高いその複合靭帯再建術、MPFL 再建術症例に術後 3D-CT を撮影し、それらの骨孔作成位置データ、術後臨床成績データなどの蓄積を順次行っていく。

#### 4. 研究成果

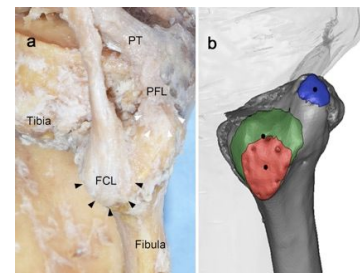
2015 年度は、3D イメージングを用いて、MPFL 膝蓋骨付着部の解剖学的特徴を明らかにした。MPFL の近位側では内側広筋斜走線維(VMO)の深層筋膜の遠位端に強く結合し剥離は困難であった。また、VMO と強く結合した線維は肉眼的に中間広筋(VI)の内側縁に達し、VI の縦走する線維と直行するように付着していた。遠位側では横走する線維が膝蓋骨内側縁に連続して付着していた。3D 画像上でもそれらの付着部の形態は一定であった。MPFL は膝蓋骨側で VMO、VI、膝蓋骨にそれぞれ強固に付着しており、VMO と VI の付着部は膝蓋骨の付着部に比較し、より長く付着していた。以上から MPFL は、VMO と VI と協調することで膝蓋骨の牽引方向を制御し、膝蓋骨の安定性に寄与していることが示唆された。また MPFL 再建術において、膝蓋骨側では膝蓋骨のみにではなく、軟部組織を含めた再建を行うことで、より理想的な MPFL の機能をもたらす可能性があると考えられた。



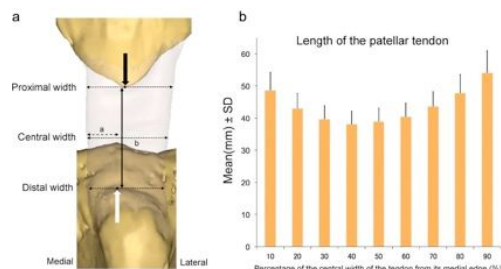
2016 度は MCL、POL を含む PMC の走行と付着部の解剖学的特徴を明らかにした。POL の大腿骨付着部は大内転筋結節の 18.3mm 遠位に位置していた。内側側副靭帯浅層(sMCL)の大腿骨付着部は大内転筋結節の 21.1mm 遠位で、POL 付着部の 9.2mm 前方に位置していた。sMCL 付着部と大腿骨軸のなす角は 18.6°、POL 付着部と大腿骨軸のなす角は 5.1°であった。POL の遠位部は大部分が下腿筋膜と半膜様筋腱に付着しており、一部は脛骨後内側に付着していた。POL の脛骨付着部は、semimembranosus groove 上縁のすぐ近位に位置していた。sMCL の遠位付着部は強固かつ広範囲に脛骨隆起に付着していた。POL の脛骨付着部は関節面から約 5.8 mm 遠位に位置しており、sMCL の脛骨付着部は関節面から約 49.6 mm 遠位に位置していた。大腿骨側では大内転筋結節が sMCL 及び POL 付着部と関連した有用な骨性指標として観察された。脛骨側では脛骨隆起と semimembranosus groove が有用な骨性指標として観察された。本研究結果を用いることで、より解剖学的な sMCL と POL の再建術を行うことが可能であると考えられた。



さらに 2016 年度には LCL、大腿二頭筋腱を含む PLC 腓骨付着部の用いた解剖学的特徴も明らかにした。LCL は腓骨頭の外側面に付着しており、後膝窩腓骨靭帯(PFL)は膝窩筋腱から分岐し腓骨茎状突起に付着していた。また大腿二頭筋は腓骨頭の外側面で FCL の周囲に付着していた。腓骨頭は腓骨頭外側面、腓骨頭後面、近位脛腓骨関節面からなる三角錐のような特徴をしていた。また、そのそれぞれの辺の長さはほとんど等しく、腓骨頭は正三角錐のような形態をしていた。FCL の腓骨付着部は腓骨頭外側面であり、PFL は腓骨茎状突起部、大腿二頭筋は腓骨頭外側面で FCL を囲むように付着しており、その付着部位は一定であった。腓骨頭の特徴的な骨形態そのものが、解剖学的再建術の際の有用な骨性指標になりえると考えられた。



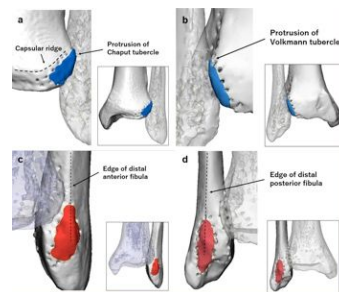
2017 年度は ACL 再建の際、重要な移植腱であり、膝伸展機構の重要な構成要素でもある膝蓋腱およびその付着部の解剖学的特徴を明らかにした。膝蓋腱脛骨付着部は全膝で、近位が逆 U 字で野球帽のつば状の特徴的な形態をしていた。



付着部横径は  $25.0 \pm 5.9\text{mm}$ 、高さは  $20.6 \pm 9.6\text{mm}$ 、表面積は  $409.5 \pm 165.2\text{mm}^2$  であった。脛骨関節面から遠位  $19.6 \pm 4.4\text{mm}$  に存在する脛骨粗面最近位の丘の立ち上がりにつ着し、脛骨粗面遠位の最頂点を囲むように停止していた。膝蓋骨付着側は、膝蓋骨下極へ V 字につ着し付着部横径は  $33.6 \pm 8.4\text{mm}$  で、膝蓋骨骨横径に対しての割合は  $75.3 \pm 15.1\%$  であった。膝蓋腱は脛骨粗面から膝蓋骨下

部 2/3 へ放射状に付着し下部は逆 U 字、上部は V 字という特徴的で恒常的な形態を持つため、移植腱として骨付き膝蓋腱を用いる際、腱長は必ず周辺ほど長くなると考えられた。また本研究で明らかにした膝蓋骨脛骨付着部の詳細な形態と位置情報は、解剖学的な新たな知見であり脛骨粗面移行術を行う際など臨床的にも有用な情報となり得ると考えられた。

2018 年度は足関節の安定に重要な役割を果たしている遠位脛腓関節の前下脛腓靭帯(AITFL)、後下脛腓靭帯(PITFL) 各靭帯付着部の用いた解剖学的特徴を明らかにした。AITFL、PITFL は脛骨側から腓骨側に向かって、下方へ斜走するように付着していた。AITFL の脛骨側付着部は脛骨前方の骨性隆起である capsular ridge の遠位かつ Chaput 結節の外側突出部のやや遠位に存在していた。PITFL の脛骨付着部は脛骨後方の Volkmann 結節の外側突出部のやや遠位に存在していた。AITFL と PITFL の腓骨側付着部は、それぞれ腓骨遠位の前後になす稜線付近に存在し、特に付着部中心点は稜線の延長線上に存在していた。本研究はより解剖学的な遠位脛腓関節の修復術や再建術の有益な情報になると考えられた。



研究期間内には終了しなかったが、上記の研究成果を基にした有限要素 3D 生体モデルを用いた再建靭帯の長さ・緊張変化を計測や、正確で再現性の高い複合靭帯再建術、MPFL 再建術症例の開発、臨床評価などのデータの蓄積、検討は今後も継続して行っていく予定である。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Oikawa R, Tajima G, Yan J, Maruyama M, Sugawara A, Oikawa S, Saigo T, Takahashi H, Doita M. Morphology of the patellar tendon and its insertion sites using three-dimensional computed tomography: A cadaveric study. *Knee*. 2019 Jan 8. (18)30209-6. doi: 10.1016/j.knee.2018.12.002. (査読有)
2. Saigo T, Tajima G, Kikuchi S, Yan J, Maruyama M, Sugawara A, Doita M. Morphology of the Insertions of the Superficial Medial Collateral Ligament and Posterior Oblique Ligament Using 3-Dimensional Computed Tomography: A Cadaveric Study. *Arthroscopy*. 2017 Feb;33(2):400-407. doi: 10.1016/j.arthro.2016.07.030 (査読有)
3. Kikuchi S, Tajima G, Yan J, Kamei Y, Maruyama M, Sugawara A, Fujino K, Takeda S, Doita M. Morphology of insertion sites on patellar side of medial patellofemoral ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017 Aug;25(8):2488-2493. doi: 10.1007/s00167-015-3973-1 (査読有)
4. Takahashi H, Tajima G, Kikuchi S, Yan J, Kamei Y, Maruyama M, Sugawara A, Saigo T, Doita M. Morphology of the fibular insertion of the posterolateral corner and biceps femoris tendon. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017 Jan;25(1):184-191. doi: 10.1007/s00167-016-4304-x (査読有)

### 〔学会発表〕(計 13 件)

1. Kikuchi S, Tajima G, et al., Morphology of the insertion of the distal tibiofibular ligaments using three-dimensional computed tomography, Orthopedics Research Society Annual Meeting. 2019
2. 菊地将, 田島吾郎 他、3D イメージングを用いた遠位脛腓靭帯骨付着部の形態学的検討、第 45 回日本臨床バイオメカニクス学会学術集会、2018
3. 菊地将, 田島吾郎 他、3D イメージングを用いた遠位脛腓靭帯骨付着部の形態学的検討、第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会、2018
4. Tajima G. Anatomical and Biomechanical Properties of Posterior Cruciate Ligament: A Key Ligament in Complex Knee Instability. JOSKAS 日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会学術集会、2018
5. Oikawa R, Tajima G, Yan J, Maruyama M, Sugawara A, Oikawa S, et al., Morphology of the Patellar Tendon and Its Insertion Site Using Three-dimensional Computed Tomography: A Cadaveric Study, Orthopedics Research Society 2017 Annual Meeting, 2018
6. 及川龍之介, 田島吾郎, 丸山盛貴, 菅原敦, 及川伸也, 西郷峻瑛, 高橋裕考, 土井田稔, 3D イメージングを用いた膝蓋腱、及びその骨付着部の形態学的検討、第 32 回日本整形外科学会基礎学術集会、2017
7. 田島吾郎 他、3DCG モデルを用いた、後十字靭帯再建における脛骨骨孔解剖学的至適位置及び posterior intercondylar fossa の形態的特徴についての検討、第 32 回日本整形外科学会基礎学術集会、2017
8. Saigo T, Tajima G, et al., Morphology of the Insertions of the Superficial Medial Collateral Ligament and Posterior Oblique Ligament. The European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy, 2016
9. Takahashi H, Tajima G, et al., Morphology of the fibular insertion of the

- posterolateral corner and biceps femoris tendon. The European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy, 2016
10. Takahashi H, Tajima G, et al., Morphology of the fibular insertion of the posterolateral corner and biceps femoris tendon. Orthopedics Research Society Annual Meeting. 2016
  11. Saigo T, Tajima G, et al., Morphology of the Insertions of the Superficial Medial Collateral Ligament and Posterior Oblique Ligament. Orthopedics Research Society Annual Meeting. 2016
  12. Kikuchi S, Tajima G, et al., Morphology of Insertion Sites of Patella Side of Medial Patellofemoral Ligament. Orthopedics Research Society Annual Meeting. 2016
  13. 西郷峻瑛 田島吾郎 他、内側側副靭帯浅層(sMCL)、後斜走靭帯(POL)付着部の解剖学的検討、第30回日本整形外科学会基礎学術集会、2015

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：亀井 陽一

ローマ字氏名：(Youichi Kamei)

所属研究機関名：岩手医科大学

部局名：医学部

職名：講師

研究者番号(8桁)：80347872

研究分担者氏名：丸山 盛貴

ローマ字氏名：(Moritaka Maruyama)

所属研究機関名：岩手医科大学

部局名：医学部

職名：助教

研究者番号(8桁)：50611018

研究分担者氏名：菅原 敦

ローマ字氏名：(Atushi Sugawara)

所属研究機関名：岩手医科大学

部局名：医学部

職名：助教

研究者番号(8桁)：70740601

研究分担者氏名：燕 軍

ローマ字氏名：(Gun Yen)

所属研究機関名：岩手医科大学

部局名：医学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：20316350

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：土井田 稔

ローマ字氏名：(Minoru Doita)

研究協力者氏名：人見 次郎

ローマ字氏名：(Jiro Hitomi)

研究協力者氏名：菊地 修平  
ローマ字氏名：(Shuhei Kikuchi)

研究協力者氏名：西郷 峻瑛  
ローマ字氏名：(Toshiaki Saigo)

研究協力者氏名：高橋 裕孝  
ローマ字氏名：(Hirotaka Takahashi)

研究協力者氏名：及川 龍之介  
ローマ字氏名：(Ryuunosuke Oikawa)

研究協力者氏名：菊地 将  
ローマ字氏名：(Sho Kikuchi)

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。