

令和 元 年 6 月 3 日現在

機関番号：35413

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K01580

研究課題名（和文）3次元膝関節モデルによる外傷発生メカニズムの解明

研究課題名（英文）Analysis of Sports Injuries Mechanism Using a 3-dimensional Finite Element Model

研究代表者

加藤 茂幸（KATO, SHIGEYUKI）

広島国際大学・総合リハビリテーション学部・准教授

研究者番号：20368715

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、膝関節のMRI（磁気共鳴画像）から骨および靱帯、半月板を3次元有限要素モデルへと構築し、スポーツ外傷を受傷する状況をシミュレーションすることで、靱帯損傷や半月板損傷の外傷発生時の膝関節内の状況を明らかにすることを目的とした。3次元有限要素モデルを用いることで、皮膚の上からは見えない受傷時の膝関節内の状況を可視化することができた。膝関節の屈曲および外反、回旋の角度が増えてゆくにつれて、まず、内側側副靱帯への引っ張り応力が高くなった。その次に、外側半月板へ圧縮ストレスが加わった。その後、前十字靱帯へ高い引っ張り応力が生じていた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膝関節のスポーツ外傷である前十字靱帯損傷や内側側副靱帯損傷、半月板損傷の発生メカニズムが明らかにすることで、それに応じた予防策を講じることが可能になる。本研究において、膝関節の屈曲・外反・回旋によって、前十字靱帯、内側側副靱帯および半月板への負荷が加わることを示した。特に膝関節外反の動きに回旋が加わると負荷が高くなることから、予防策を講じるうえで重要な点は、スポーツ動作時の膝関節外反を制御することと共に、膝の回旋を起こさないステップ動作やターン動作を身につけることであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to clarify the condition inside the knee joint at onset of injury, including ligament and meniscus injuries, by constructing a three-dimensional (3D) finite element model of the bones, ligaments, meniscus, and other parts of the knee from a magnetic resonance image (MRI) and simulating the condition when an individual sustains a sports injury. Using a finite element model enabled visualization of the condition inside the knee joint at the time of the injury which ordinarily cannot be seen through the surface of the skin. As the angle of flexion, valgus and rotation of the knee joint increased. The tensile stress on the medial collateral ligament was the first to increase. Compression stress was then added to the lateral meniscus. Following, high tensile stress was generated for the anterior cruciate ligament.

研究分野：スポーツ医学

キーワード：膝関節 有限要素法 スポーツ外傷 受傷機転 前十字靱帯 半月板

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国における膝関節前十字靭帯損傷の発生状況は年間およそ3万件であり、その内、前十字靭帯再建術は1万件以上行われている¹⁾。前十字靭帯再建術後、スポーツ活動復帰までに約9ヶ月間のリハビリテーションを要する。前十字靭帯損傷のなかでも非接触型損傷（ノンコンタクト損傷）は、ジャンプ着地やカッティング動作などにおいて、他の選手と接触することなく受傷する。これは接触型損傷に比べ、予防可能な余地があり対策が求められている。

前十字靭帯のノンコンタクト損傷は男性と比べて女性に多く発生している²⁾。その要因として、スポーツ動作時の筋収縮力、膝関節の角度、体幹および下肢のアライメント、女性ホルモン、関節弛緩性、固有受容性感覚、解剖学的な骨形状、靭帯サイズなどが挙げられている³⁾。さまざま要因のなかで、どの要因の関与が大きいかを検討しなければならない。

さらに、膝関節前十字靭帯損傷では内側側副靭帯や半月板を合併損傷することが多く、この発生メカニズムについて解明が必要である。前十字靭帯損傷および半月板損傷は将来的に変形性膝関節症につながることが報告^{4,5)}されている。若年時に受けた外傷が、高齢になったときにさらなる疾病を引き起こすことがある。

2. 研究の目的

本研究は、膝関節のMRIから骨および靭帯、半月板を3次元有限要素モデルへと構築し、スポーツ外傷を受傷する状況をシミュレーションすることで、靭帯損傷や半月板損傷の外傷発生時の状況を可視化することを目的とした。生理的関節可動域を超えた動きで損傷場面を再現し、骨および靭帯、半月板へのストレス状態を解析で算出し、どのような関節角度で骨および靭帯、半月板に過大なストレスが生じるかを検討した。

3. 研究の方法

片側ノンコンタクト型損傷者の反対側健常膝を対象とした。ノンコンタクト型の前十字靭帯損傷者は、受傷した膝の反対側の膝も受傷する可能性が高いことが報告されている。したがって、損傷者の反対側（つまり健側）の膝は、「将来において損傷する可能性を秘めた膝」といえる。本研究ではこの反対側の膝を対象とした。

まず初めに膝関節のMRI（磁気共鳴画像）を撮影した。撮影条件はFujimotoら⁶⁾に準じた方法とし、冠状面および矢状面にて前十字靭帯に対し垂直になるように位置決めを行い、2mm間隔スライスのプロトン密度水平断像を撮影した。画像解析ソフト（Zed View, レキシー）を用いて、膝関節の骨および靭帯の水平面の輪郭をSTL形式で抽出した。それらデータを3D-CADソフト（NX, Siemens）へ入力し、コンピュータ上に3次元の立体膝モデルを構築した（図1）。本研究の膝関節の3次元有限要素モデルは、大腿骨、脛骨、腓骨、前十字靭帯、後十字靭帯、内側側副靭帯、外側側副靭帯、内側半月板、外側半月板より構成されている（図2）。1要素4節点の四面体を用いた。骨および半月板の物性値は、先行研究^{7,8)}を参考に、密度、ヤング率、ポアソン比を設定した。靭帯は力学特性データベース（RIKEN, Mechanical Property Database）をもとに超弾性材料モデル（Mooney-Rivlin）で近似した（表1）。そして、非線形構造解析プログラム（Marc, MSC）にて有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションを行った。その際、関節の角速度（受傷時の関節の速度）を設定しダイナミック解析を実施した。シミュレーション条件は膝関節屈曲、外反および回旋を組み合わせ、3方向へ同時に動くように設定した。

一方、膝屈曲-外反-大腿骨外旋方向のシミュレーションでは、外反2度の時点で内側側副靱帯への負荷が生じ始め、外反5度の時には内側側副靱帯の中央部全体に高い応力が生じていた。この時の中央部位への引っ張り応力は100MPa以上を示した(図4)。大腿骨内旋方向へのシミュレーションに比べ、大腿骨外旋方向へのシミュレーションでは、早い段階で内側側副靱帯への負荷が高値になった。膝外反と大腿骨外旋が同時に起こると浅い角度でも高い応力が生じている可能性が示唆された。外側半月板への圧縮応力は前節および後節に生じた(図5)。前十字靱帯については、関節角度の増加に伴い、靱帯中央部の内側に引っ張り応力が生じ、屈曲20度-外反15度-回旋10度の時、80MPaの値に達していた。

前十字靱帯損傷では、内側側副靱帯および半月板を合併損傷することが多く、その発生メカニズムを可視化することができたと考える。これらは外傷予防策を立てるうえで有益な情報となる。本研究結果から示唆されることは、特に膝関節外反の動きに回旋が加わると負荷が高くなることから、予防策を講じるうえで重要な点は、スポーツ動作時の膝関節外反を制御することと共に、膝の回旋を起こさないようにステップ動作やターン動作を身につけることであると考えられる。

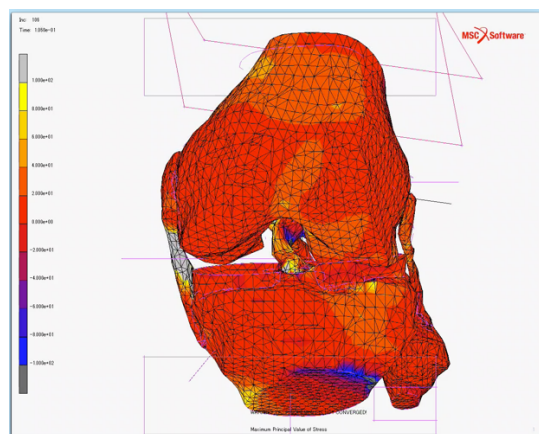


図3. 膝関節解析結果(屈曲20度、外反15度、回旋10度)

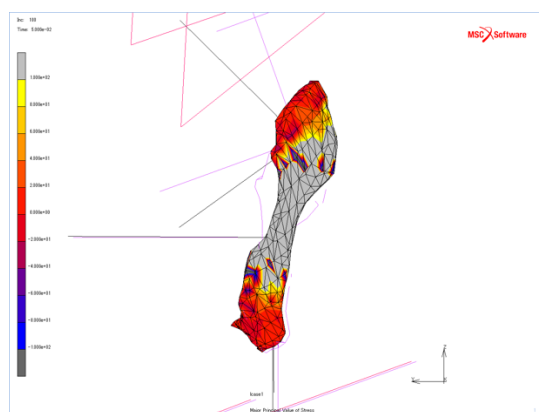
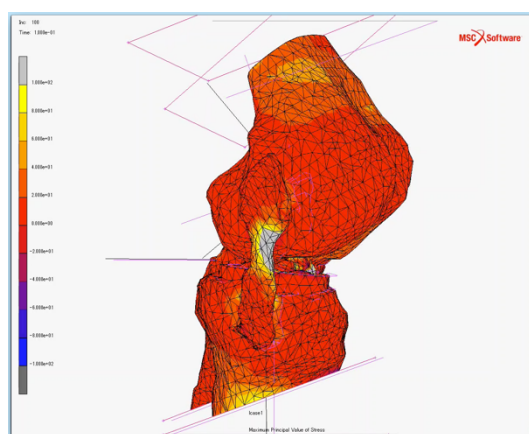


図4. 内側側副靱帯解析結果

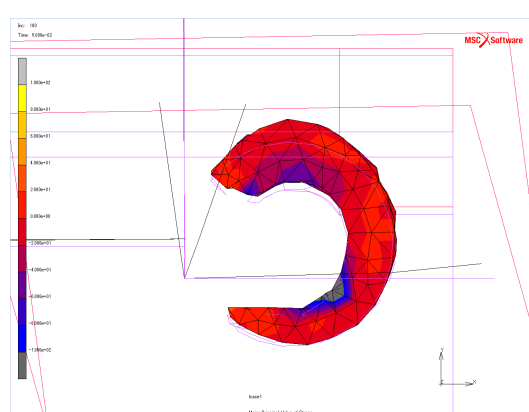


図5. 外側半月板解析結果

Acknowledgment (謝辞) :

この研究を遂行するにあたり多大な協力を頂いた岡山県工業技術センター永山則之先生に心から感謝いたします。本研究はJSPS 科研費 15K01580 の助成を受けた研究である。ここに記して深甚なる謝意を表します。

<引用文献>

- 1) 日本整形外科学会診療ガイドライン委員会, 前十字靱帯 (ACL) 損傷診療ガイドライン策

定委員会編著、前十字靱帯（ACL）損傷診療ガイドライン 2012、日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会監修、南江堂、東京、2012、pp.7-13

- 2) Beynnon BD, Vacek PM, Newell MK, et al : The effects of level of competition, sport, and sex on the incidence of first-time noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med* 42: 2014, 1806-1812.
- 3) Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, et al : Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries: a review of the Hunt Valley II meeting, January 2005. *Am J Sports Med* 34: 2006, 1512-1532.
- 4) Ajuied A, Wong F, Smith C, et al : Anterior cruciate ligament injury and radiologic progression of knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med* 42: 2014, 2242-2252.
- 5) Badlani JT, Borrero C, Golla S, et al : The effects of meniscus injury on the development of knee osteoarthritis: data from the osteoarthritis initiative. *Am J Sports Med* 41: 2013, 1238-1244.
- 6) Fujimoto E, Sumen Y, Deie M, et al : Anterior cruciate ligament graft impingement against the posterior cruciate ligament: diagnosis using MRI plus three-dimensional reconstruction software. *Magn Reson Imaging* 22: 2004, 1125-1129.
- 7) Cowin SC. The mechanical properties of cortical bone tissue. In: Cowin SC, editor. *Bone mechanics*. Boca Raton, FL: CRC Press: 1989. pp.97-127
- 8) Pena E, Calvo B, Martinez M, et al : A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint. *J Biomech* 39: 2006, 1686-1701.
- 9) Krosshaug T, Slauterbeck JR, Engebretsen L, et al :
Biomechanical analysis of anterior cruciate ligament injury mechanisms: three-dimensional motion reconstruction from video sequences. *Scand J Med Sci Sports* 17: 2007, 508-519.
- 10) Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al : Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *Am J Sports Med* 38: 2010, 2218-2225.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① 加藤茂幸、浦辺幸夫、他. アルペンスキー競技における前十字靱帯損傷時の応力可視化 -有限要素モデルを用いたダイナミック解析-、日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会雑誌、査読無、Vol. 43 No. 1、2018、pp134-135.
- ② 河野拓巳、加藤茂幸、他. 非接触型前十字靱帯損傷者における大腿骨顆間窩の形状について -MRI を用いた検討-、*Journal of Athletic Rehabilitation*、査読有、No. 13、2017、pp33-38.
- ③ 加藤茂幸、浦辺幸夫、他. 女子スポーツ選手における前十字靱帯損傷者の大腿骨顆間窩容積と前十字靱帯体積について -OsiriX を用いた検討-、*Journal of Athletic Rehabilitation*、査読有、No. 12、2016、pp51-54.

〔学会発表〕（計 7 件）

- ① 加藤茂幸 他、3 次元有限要素モデルを用いた膝関節スポーツ外傷発生シミュレーション、第 11 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会、2019.
- ② 加藤茂幸 他、大学女子バスケットボール選手における前十字靭帯損傷リスク予測ツールの活用、第 10 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会、2018.
- ③ 加藤茂幸 他、有限要素モデルを用いた前十字靭帯損傷メカニズムの応力可視化の試み -バスケットボール競技の受傷例-、第 28 回日本臨床スポーツ医学会学術集会、2017.
- ④ 加藤茂幸 他、有限要素モデルを用いた前十字靭帯損傷メカニズムの応力可視化の試み -アルペンスキー競技の受傷例-、第 9 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会、2017.
- ⑤ Kato S, Nagayama N, et al. Visualization of Anterior Cruciate Ligament Injury Mechanism with Finite Element Simulation -Tibial Internal Rotation and Dynamic Knee Valgus Position-, 35th SITESSH Congress (International Society for Snowsports Medicine), 2016.
- ⑥ 加藤茂幸 他、ノンコンタクト前十字靭帯損傷の受傷肢位における応力可視化の試み -有限要素モデルを用いた検討-、第 26 回日本臨床スポーツ医学会学術集会、2015.
- ⑦ 加藤茂幸 永山則之 他、膝前十字靭帯損傷メカニズムの解明 -有限要素モデルを用いた検討-、第 22 回おかやま生体信号研究会、2015.

〔その他〕

ホームページ等

Kato ACL Laboratory（加藤研究室ホームページ）

<http://sigekatoacl.wix.com/katoacllabo>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

無し

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：永山 則之（岡山県工業技術センター）

ローマ字氏名：NAGAYAMA, Noriyuki

※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。