科学研究費助成事業

平成 27年 6月 3日現在

研究成果報告書



機関番号: 35413				
研究種目: 若手研究(B)				
研究期間: 2012 ~ 2014				
課題番号: 24700683				
研究課題名(和文)3次元可視化モデルによる膝前十字靱帯損傷メカニズムの解明と予防				
研究課題名(英文)A Three-dimensional finite element analysis predicts anterior cruciate ligament injuries injury mechanism and prevention				
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:2 0 3 6 8 7 1 5				
交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,400,000円				

研究成果の概要(和文): 本研究は、膝関節内の骨形状および靱帯を3次元モデルに構築し、それを動的にシミュレ ーションすることで前十字靭帯(ACL)損傷時の関節内状況を可視化することを目的とした。脛骨内旋-外反-脛骨前方 移動(前上方向)の動きにおいて大腿骨顆間窩とACLは接触した。ACL損傷グループは、少ない移動量で接触する傾向が あった。脛骨の前上方向への移動は、大腿四頭筋による牽引およびジャンプ着地等のスポーツ動作時の体重(重力)を 想定しており、これらと脛骨の回旋および外反が組み合わさるとACLに高負荷が加わる可能性が示唆され、その関節内 の状況を可視化することができた。

研究成果の概要(英文): The purpose of this study was to evaluate stress distribution within the anterior cruciate ligament (ACL) and impingement against the femoral intercondylar notch, using finite element analysis. Three-dimensional knee models were simulated rotation of the tibia, valgus, and anterior tibial translation. High stress distribution and impingement of the ACL on the femoral intercondylar notch were found the knee joint position under inner rotation of the tibia, valgus, and anterior tibial translation. An anterior - superior force induces the tibial translation. Quadriceps contraction during jump landing and the resulting anterior tibial shear force were simulated with few parameters. This finite element analysis showed that strong stress occurred at ACL when the knee under internal rotation, valgus, and anterior tibial translation.

研究分野:スポーツ科学

キーワード:前十字靭帯 膝関節 MRI 有限要素法

1.研究開始当初の背景

非接触型膝前十字靭帯損傷 (Noncontact anterior cruciate ligament injury: ノンコン タクト ACL 損傷)は、バレーボール、サッ カー、バスケットボールなどスポーツ活動に おいて多く発生し、女性の発生率は男性に比 べておよそ2倍1)である。特にバスケットボ ール競技では女性が損傷しやすいことが報 告されている²⁾。このノンコンタクト ACL 損傷のリスクファクターとして環境要因、解 剖学的要因、ホルモン要因、神経筋要因など の因子がある 3。先行研究において性差によ る
顆間
窩幅の
有意
差 4-9
や、
ACL 損
傷群の
顆 間窩幅狭小¹⁰⁻¹³⁾が報告されており、その損傷 メカニズムは、膝関節外反位での脛骨回旋時 に大腿骨顆部と ACL が接触を起こし損傷に 至ると考えられている14。しかしながら、受 傷する瞬間時の膝関節内を検証することは 難しい。そこで本研究では磁気共鳴画像 (Magnetic resonance imaging: MRI)デー タを基に有限要素モデルを構築し、回旋や外 内反等のシミュレーションを行い、ACL と大 腿骨顆間窩の接触状況および応力を検討し た。

2.研究の目的

本研究では、下記の6項目について分析す ることを目的とした。

(1)大腿骨顆間窩と前十字靭帯の形状および 体積の比較。

(2)大腿骨顆間窩と前十字靱帯は、どのよう な動きで接触するのか。

(3)大腿骨顆間窩と前十字靱帯が接触したときのストレスの大きさはどの程度か。

(4)高いストレスが生じている部位は、脛骨 付着部か、靱帯中心部か、大腿骨付着部か。 (5)大腿骨と脛骨は、どのような動きで接触 するのか。

(6)骨挫傷 (Bone-bruise)との関連性。 以下(1)~(6)の方法と結果を記す。

3.研究の方法

(1) (目的1の方法)

対象は、ACL 損傷女性群:片側 ACL 再建 女性12名の反対側健常膝関節12膝(平均年 齢 21.1±2.0 歳、身長 160.4±6.0cm、体重 54.6±5.5kg、BM I21.2±1.5)と、女性コント ロール群:健常女性14名の右14 版(20.5±0.9 歳、162.6±5.3cm、57.9±6.6kg、BMI 21.9±2.5)とした。この2群間の年齢、身長、 体重、BMI に統計学的有意差はなかった。画 像はオープン MRI 装置 (Inspire,日立) にて 膝関節プロトン密度水平断像を撮影した。撮 影条件は Fujimoto ら¹⁵⁾の方法に準じて、冠 状面および矢状面にて ACL に対し垂直にな るように位置決めを行い、2mm 間隔スライ ス面の画像データを DICOM 形式で書き出し た。画像解析にはオープンソース画像解析ソ フト OsiriX (v.4.1.2) を用いた。等間隔ごと の水平断像から大腿骨顆間窩と ACL の断面

を抽出し、OsiriX を用いて体積計算を行った。 これら体積計算に加えて、ACL 体積比率(顆 間窩容積に占める ACL 体積の割合)も求め た。また、顆間窩容積と ACL 体積の相関に ついても検討した。

(2)-(6) (目的 2~6 の方法)

各個人の有限要素モデルをコンピュータ 上に構築する対象は、ACL 損傷女性群:片側 ACL 再建女性 10 名の反対側健常膝関節 10 膝(平均年齢 20.7±1.4 歳、身長 160.8±6.1cm、 体重 54.8±5.5kg、BMI 21.2±1.6)と、女性 コントロール群:健常女性 10 名の右 10 膝 (20.2±0.9 歳、163.1±6.1cm、58.8±5.4kg、 BMI 22.1±2.4)、男性コントロール群:健常 男性 10 名の右 10 膝 (22.4±2.4 歳、 169.4±6.9cm, 59.7±7.1kg, BMI 20.7±1.4) とした。 画像解析ソフト ZedView (v.9.3. LEXI)にて大腿骨、ACL、脛骨の輪郭を STL データで抽出し、3D-CAD ソフト(IDEAS) を介して、コンピュータ上に大腿骨-ACL-脛 骨複合体を構築した。有限要素法を用いたコ ンピュータシミュレーションは非線形構造 解析プログラム MSC.Marc Mentat 2014 (MSC.)を介して行った。有限要素モデル は大腿骨-ACL-脛骨複合体とし、1 要素 4 節 点四面体を用いた(図1)。脛骨下端部の節点 の制約条件を固定とし、大腿骨を移動させる ことによって ACL と大腿骨顆間窩の接触状 況および靭帯に加わる応力を算出した。骨お よび 靭 帯 の 物 性 値 は Fung¹⁶⁾ および Hirokawa ら¹⁷⁾より、骨; 1×10⁴ MPa、靭帯; 250MPa を採用した。シミュレーション条件 は脛骨回旋および膝関節外反、脛骨前方移動 を組み合わせ3方向へ同時に移動させた。ま た、脛骨前方移動を「水平方向」と「前上方 向」の

2 種類に

設定した。



図 1. 有限要素モデル 代表例

4.研究成果

(1)(目的1の研究成果)

大腿骨顆間窩の容積(mm³)およびACL体

積(mm³) ACL 体積比率(顆間窩容積に占 める ACL 体積の割合)の結果を表1に示し た。ACL 損傷女性群の大腿骨顆間窩の容積は、 女性コントロール群に比べ有意に低値であ った(p<0.05)。一方、ACL 体積および ACL 体積比率は差を認めなかった。

表 1. 顆間窩容積および ACL 体積と比率

ACL-injured female (N=12)		Controls (N=14)	<i>p</i> value
Notch volume (mm ³)	4899±688	5609±993	0.04 *
ACL volume (mm ³)	1223±286	1367±319	0.23
比率 (ACL volume / Notch volume)	0.25 ± 0.04	0.24±0.04	0.79

* *p*<0.05

顆間窩容積と ACL 体積の相関は有意であった(図2、r=0.64、p<0.01)。



図 2. 顆間窩容積と ACL 体積の散布図

ACL 損傷女性群の顆間窩容積は女性コン トロールに比べ有意に小さかった。この結果 は、ACL損傷女性の顆間窩容積は健常女性に 比べ小さく、大腿骨の顆間窩幅の狭小が損傷 リスクを高めているという先行研究 18)を支 持したと考える。ACL 体積については Chaudhari ら¹⁹が、女性損傷群の ACL 体積 は女性コントロールに比べ有意に小さいと している。しかしながら、本研究においては 女性損傷群の ACL 体積は小さいに傾向にあ ったものの、群間に差は認められなかった (1223mm³ vs 1367mm³、p=0.23)。ACL体 積比率 (顆間窩容積に占める ACL 体積の割 合)については、Fayadら²⁰⁾が女性の比率は 0.23 だったと報告している。また、Simon ら²¹⁾が顆間窩容積とACL体積の相関 (r=0.58)を報告している。本研究において も ACL 体積比率および相関関係は、先行研 究とほぼ同様の結果であった。つまり、ACL 損傷群とコントロール群の ACL 体積比率 (0.25~0.24)には差がなく、顆間窩容積と ACL 体積の相関は有意であった (r=0.64)。 これら先行研究および本研究結果から考え うることは、顆間窩狭小の膝関節においては ACL 自体も細いことが推察される。したがっ て、大腿骨顆間窩幅の狭小が靱帯との衝突に よる損傷リスクを高めているという可能性 に加えて、靱帯自体の体積が小さく細いこと がノンコンタクト損傷のリスクになりえる のではないかと考えられた。

(2)-(4) (目的 2~4の研究成果)

有限要素モデルを構築し、脛骨回旋および 膝関節外反、脛骨前方移動を組み合わせた 3 方向へ同時に移動させるシミュレーション を行った結果、大腿骨顆間窩と ACL の接触 は、脛骨内旋-外反-脛骨前方移動(前上方向) の動きにおいてみられた(図3,図4)。 大腿骨 顆間窩の内側(内側顆の内側面)と靭帯下 1/3 部(下 1/3 から脛骨付着部)で接触しており、 このときの平均移動量は、ACL 損傷女性群で は内旋8.0度・外反8.0度・脛骨前方移動前上 方向)8.0mm だった。女性コントロール群で は内旋 8.4 度-外反 8.4 度-脛骨前方移動 前上 方向)8.4mm で接触がみられた。男性コント ロール群では 7.9 度且つ 7.9mm だった。今 回、脛骨移動方向を前上方に設定した。脛骨 の前上方向への移動は、大腿四頭筋による牽 引およびジャンプ着地等のスポーツ動作時 の体重(重力)を想定しており、これらと脛 骨の回旋および外反が組み合わさると大腿 骨顆間窩と ACL の接触が生じる可能性が示 唆された。接触するまでの移動量が女性コン トロール群に比べ ACL 再建女性群がわずか に少ない傾向にあった点は、ACL 再建女性群 の大腿骨の顆間窩容積が他群に比べ小さい ことが関係していると思われた。



図3. 大腿骨顆間窩とACLの接触 代表例



先行研究において、Fung ら²³⁾は3次元幾 何学モデルを構築し、女性膝(3/5 例)にお いて脛骨外旋5度・外反8度に達したとき、 ACL 中央部分と大腿骨顆間窩の外側壁が接 触したことを報告している。また、近年では、 Park ら²⁴⁾は有限要素モデルを用いて大腿骨 顆間窩と ACL の接触を分析している。膝関 節屈曲 45 度・外旋 29 度・外反 10 度にて大腿 骨顆間窩(外側壁)と ACL が接触すること を報告している。そこでこの報告された肢位 を再現するために脛骨回旋3度且つ外反1度 の割合で角度が増加するシミュレーション 条件を設定し、脛骨外旋 30 度且つ外反 10 度 の状態でのACLを本研究モデルで検証した。 解析の結果は、脛骨外旋方向においての ACL の接触はみられなかった。この時、ACLにか かる負荷量は平均 20MPa だった。先行研究 とのシミュレーション条件の違いとして、膝 屈曲角度が20度であったことが挙げられた。

ノンコンタクト ACL 損傷については、先 行研究により競技中のビデオ画像分析 ^{25,26)} によって損傷肢位が明らかになりつつある。 Olsen ら ²⁵⁾の報告では、女性ハンドボール選 手の受傷肢位は、膝関節軽度屈曲、脛骨回旋 (内外旋)およそ10度且つ外反およそ15度 だった。また、Koga ら²⁶⁾は、女性ハンドボ ール選手とバスケットボール選手の受傷場 面から、床接地後、膝関節外反(12 度増加) 且つ脛骨内旋方向へ(8度)動き、ACL損傷 が起きていると報告している。そこで本研究 では、これら先行研究の損傷肢位を再現し ACL に生じる負荷を検討した。回旋1度且つ 外反 1.5 度の割合で角度が増加するシミュレ ーション条件を設定し、脛骨内旋 10 度且つ 外反 15 度の状態を作り出した。シミュレ-ションの結果、脛骨内旋10度且つ外反15度 にて、ACL にかかる負荷量は平均 20MPa だ った。この値は膝蓋腱の破断強度の約3分の 1 程度だった。この結果は、脛骨前方移動を シミュレーション条件に含めなかったこと が比較的低負荷の値につながったと思われ た。そこで本研究では、さらに脛骨前方移動 をシミュレーション条件に加えて解析を行 った。その結果、平均内旋 5.2 度・外反 7.8 度 -脛骨前方移動(前上方向)5.2mm で ACL に は 50~60MPa の応力が生じた。ACL に生じ る負荷は、脛骨回旋と外反の2方向のシミュ レーションより脛骨前方移動(前上方向)を 加えた3方向の動きにおいて高かった。その 値は膝蓋腱の引張強度に近い値であった。

(5)-(6) (目的 5~6の研究成果)

大腿骨と脛骨の接触は、脛骨内旋および外 旋のどちらの方向でも生じた。ACL 再建女性 群では平均内旋5.2度-外反5.2度-脛骨前方移 動(前上方向)5.2mm、外旋7.4度-外反7.4 度-脛骨前方移動(前上方向)7.4mm だった。 その時点で骨表面には170MPa以上の応力 が加わっていた。接触部位は大腿骨外側顆荷 重面と脛骨外側顆後方面だった(図5,図6)。 女性コントロール群では内旋 5.4 度・外反 5.4 度・脛骨前方移動(前上方向)5.4mm、外旋 8.5 度・外反 8.5 度・脛骨前方移動(前上方向) 8.5mm だった。女性コントロール群のほうが やや移動量が大きかったが、群間に有意差は みられなかった。先行研究において、大腿骨 の最大圧縮強度は170MPaと報告¹⁶⁾がある。 本研究のシミュレーション結果はこの値以 上の応力値を示しており、接触部位に骨挫傷 (Bone-bruise)が生じる可能性を示唆した。







図 6. 大腿骨と脛骨の接触 (後面)

5.総括

・3 次元有限要素モデルにて ACL に加わる負荷を可視化した。

・大腿骨顆間窩とACLの接触は、脛骨内旋-外反-脛骨前方移動(前上方向)の動きにおい てみられた。

・大腿骨顆間窩の内側(内側顆の内側面)と 靭帯下 1/3 部(下 1/3 から脛骨付着部)で接 触した。

・大腿骨と脛骨の接触は脛骨内旋および外旋 のどちらの方向でも生じ、接触部位は大腿骨 外側顆荷重面と脛骨外側顆後方面だった。 ・予防するためには、脛骨回旋や外反の動き への配慮に加え、脛骨前方移動(前上方)を 制御する必要があり、これを制御することに よって ACL への負荷が軽減される可能性が 示唆された。

< 引用文献 >

- 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: 1806-1812, 2014.
- 2) Ito E, Iwamoto J, Azuma K, et al : Sex-specific differences in injury types among basketball players. Open Access J Sports Med. 6: 1-6, 2014.
- 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: 1512-1532, 2006.
- 4) Shelbourne KD, Facibene WA, Hunt JJ: Radiographic and intraoperative intercondylar notch width measurements in men and women with unilateral and bilateral anterior cruciate ligament tears. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 5: 229-233, 1997.
- 5) Shelbourne KD, Davis TJ, Klootwyk TE : The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears. A prospective study. Am J Sports Med. 26: 402-408, 1998.
- 6) Davis TJ, Shelbourne KD, Klootwyk TE : Correlation of the intercondylar notch width of the femur to the width of the anterior and posterior cruciate ligaments. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 7: 209-214, 1999.
- 7) Anderson AF, Dome DC, Gautam S, et al : Correlation of anthropometric measurements, strength, anterior cruciate ligament size, and intercondylar notch characteristics to sex differences in anterior cruciate ligament tear rates. Am J Sports Med. 29: 58-66, 2001.
- 8) Charlton WP, St John TA, Ciccotti MG, et al : Differences in femoral notch anatomy between men and women: a magnetic resonance imaging study. Am J Sports Med. 30: 329-333, 2002.

- 9) Chandrashekar N, Slauterbeck J, Hashemi J : Sex-based differences in the anthropometric characteristics of the anterior cruciate ligament and its relation to intercondylar notch geometry: a cadaveric study. Am J Sports Med. 33: 1492-1498, 2005.
- 10) Souryal TO, Moore HA, Evans JP: Bilaterality in anterior cruciate ligament injuries: associated intercondylar notch stenosis. Am J Sports Med. 16: 449-454, 1988.
- Souryal TO, Freeman TR : Intercondylar notch size and anterior cruciate ligament injuries in athletes. A prospective study. Am J Sports Med. 21: 535-539, 1993.
- 12) Lund-Hanssen H, Gannon J, Engebretsen L, et al : Intercondylar notch width and the risk for anterior cruciate ligament rupture. A case-control study in 46 female handball players. Acta Orthop Scand. 65: 529-532, 1994.
- 13) Uhorchak JM, Scoville CR, Williams GN, et al: Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: a prospective four-year evaluation of 859 West Point cadets. Am J Sports Med. 31: 831-842, 2003.
- Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al : Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. Am J Sports Med. 32: 1002-1012, 2004.
- 15) 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: 1125-1129, 2004.
- 16) Fung YC. Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues, Second Edition. Springer-Verlag, New York. 1993.
- 17) HirokawaS,TsurunoR.Three-dimensio nal deformation and stress distribution in an analytical: computational model of the anterior cruciate ligament. J Biomech. 33: 1069-1077, 2000.
- 18) Sturnick DR, Vacek PM, DeSarno MJ, etal:Combined anatomic factors predi cting risk of anterior cruciate ligament injury for males and females. Am J Sports Med. 43: 839-847, 2015.
- 19) Chaudhari AM, Zelman EA, Flanigan

DC, et al : Anterior cruciate ligament-injured subjects have smaller anterior cruciate ligaments than matched controls: a magnetic resonance imaging study. Am J Sports Med. 37: 1282-1287, 2009.

- 20) Fayad LM, Rosenthal EH, Morrison WB, et al : Anterior cruciate ligament volume: analysis of gender differences. J Magn Reson Imaging. 27: 218-223, 2008.
- 21) Simon RA, Everhart JS, Nagaraja HN, et al : A case-control study of anterior cruciate ligament volume, tibial plateau slopes and intercondylar notch dimensions in ACL-injured knees. J Biomech. 43: 1702-1707, 2010.
- 22) Noyes FR, Butler DL, Grood ES, et al. Biomechanical analysis of human ligament grafts usedin knee-ligament repairs and reconstructions. J Bone Joint Surg Am. 66: 344-352, 1984.
- 23) Fung DT, Hendrix RW, Koh JL, et al. ACL impingement prediction based on MRI scans of individual knees. Clin Orthop Relat Res. 460: 210-208. 2007.
- 24) Park HS, Ahn C, Fung DT, et al : A knee-specific finite element analysis of the human anterior cruciate ligament impingement against the femoral intercondylar notch. J Biomech. 43: 2039-2042, 2010.
- 25) Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al : Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. Am J Sports Med. 32: 1002-1012, 2004.
- 26) 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: 2218-2225, 2010.

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2件)
 <u>加藤茂幸</u>,浦辺幸夫,白川泰山,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と前十字靱帯の体積について,日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会雑誌,査読無,40巻,2015,164-165
 加藤茂幸,浦辺幸夫,河村顕治,金澤

浩,白川 泰山,大腿骨顆間窩と前十字 靱帯の体積の性差について -磁気共鳴 画像(MRI)による検討-,日本臨床スポ ーツ医学会誌,査読有,21 巻,2013,409-414

〔学会発表〕(計3件)

加藤 茂幸 他, 有限要素モデルを用い た膝前十字靱帯への応力分布,第69回 日本体力医学会大会(2014,09,20),長 崎大学文教キャンパス(長崎市文教町) 加藤 茂幸 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と 前十字靱帯の体積について,第6回日 本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会 (2014,07,25),広島国際会議場(広島 市中区中島町) 加藤 茂幸 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と 前十字靱帯の体積について -OsiriX を 用いた検討-,第49回日本理学療法学術 大会(2014,05,30),パシフィコ横浜会 議センター(横浜市西区みなとみらい)

[その他]

ホームページ等 Kato ACL Laboratory http://sigekatoacl.wix.com/katoacllabo

6 . 研究組織

(1)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

(2)研究協力者

永山則之(NAGAYAMA, Noriyuki)岡山県工業技術センター