

前十字靭帯損傷者における歩行立脚期外部膝関節外反モーメントの検討

池野祐太郎¹, 田中 聡², 福田 航¹, 片岡悠介¹, 濱野由夏¹, 竹内謙太¹, 川上翔平¹,
二宮太志³, 五味徳之³

¹ 社会医療法人財団大樹会総合病院回生病院関節外科センター附属理学療法部

² 県立広島大学保健福祉学部理学療法学科

³ 社会医療法人財団大樹会総合病院回生病院関節外科センター

【要 旨】

【目的】前十字靭帯 (ACL) 損傷が歩行立脚期の外部膝関節外反モーメント (膝外反モーメント) に及ぼす影響を明らかにするため, 三次元動作解析により健側と患側を運動力学的に比較した。【対象】非接触型 ACL 損傷者 18 例とした。【方法】測定にはビデオカメラ 4 台と床反力計 1 台で構成する三次元動作解析装置を用いた。測定課題は自由歩行とし, 健側と患側で各 3 回, 一歩行周期を測定した。歩行立脚期の膝外反モーメントピーク値を算出し, 3 回の歩行データの平均値を解析値とした。統計処理は IBM SPSS Statistics 22.0 を用い, 健側と患側を比較した。【結果】歩行立脚期の膝外反モーメントピーク値は患側が健側と比べ有意に大きかった ($p=0.001$)。【結語】ACL 不全による不安定性が大きいと二次的損傷を避けるために膝外反モーメントピーク値が有意に大きくなっていると考えた。

Key Words : 前十字靭帯損傷, 外部膝関節外反モーメント, 膝関節外反角度, 歩行立脚期, 三次元動作解析

1. はじめに

前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament : 以下, ACL) 損傷はジャンプ着地やカッティング動作等, 直接膝関節に外力が加わらず損傷する非接触型が多い。ACL 損傷により前方剪断力 (anterior shear force) を抑える機能やメカノレセプターの機能を失うため, 荷重時に脛骨前方移動 (Anterior Tibial Translation : 以下, ATT) 制動不全や下腿前外側回旋動揺が生じる^{1,2)}。

ACL 損傷者では歩行立脚期の ATT にかかる負荷は 100N 以上であり³⁾, 膝関節外反により ACL が大腿骨外側顆にひっかかり伸張ストレスを生じる⁴⁾ことが明らかになっている。また, Hewett ら⁵⁾は外部膝関節外反モーメントが ACL の損傷リスクであると報告しており, Withrow ら⁶⁾は屍体膝を用いた研究で, 外部膝関節屈曲モーメントに外部膝関節外反モーメントが加わると ACL への負荷が大きくなる

ことを明らかにした。三次元動作解析を用いた生体力学的研究では, 膝関節にかかる矢状面上の力学的負荷 (anterior shear force) では ACL を損傷しないが, 前額面上の負荷である外部膝関節外反モーメントは ACL 損傷を引き起こす力学的要因といわれている^{7,8)}。以上のことから, ACL 損傷者は歩行においても ACL への負荷が大きく, 過度の外部膝関節外反モーメントの増加は膝関節に強いストレスを与えらる。

ACL 損傷者の歩行立脚期における外部膝関節外反モーメントの健側と患側の違いを明らかにし, ACL 不全が歩行立脚期の外部膝関節外反モーメントに及ぼす影響を把握することは ACL 不全膝における前額面上の力学的負荷の特徴を考慮した理学療法を行う上で重要である。そこで今回, 三次元動作解析装置と床反力計を使用し, ACL 損傷者の歩行立脚期における外部膝関節外反モーメントの健側と患側の違いを検討することを目的とした。

2. 対象および方法

2.1. 対象

対象は膝関節に直接外力が加わらず損傷となる非接触型の ACL 損傷者 18 例（男性 10 例，女性 8 例）の健側患側 36 肢とした。対象者の属性は表 1，測定時の徒手検査結果は表 2 に示す。なお，鏡視所見で

表 1 対象者の属性

	ACL 損傷者 (n=18)
性別 (例)	男 10 女 8
年齢 (歳)	23.5±6.6
身長 (cm)	167.2±9.7
体重 (kg)	64.7±12.8
BMI (kg/m ²)	23.4±3.3
ACL 損傷から測定までの期間 (ヵ月) (最短～最長)	4.8±4.3 (0.6~14.6)
膝関節伸展筋力患健比 (%)	71.6±15.1
膝関節屈曲筋力患健比 (%)	92.8±50.0
全身麻酔下での脛骨前方移動量 健患差 (mm)	6.1±3.1

ACL: anterior cruciate ligament,

BMI: Body Mass Index, mean ± SD.

表 2 徒手検査結果

	陽性	陰性
Lachman-test (例)	17	1
Anterior Drawer Sign (例)	11	7

は全例完全断裂であった。対象者の採択基準は，測定時期に ADL が自立しており，初発の ACL 損傷者とした。除外基準は関節可動域制限や疼痛が測定に影響している者，反対側または受傷側に ACL 再建術の既往がある者，本研究の主旨および測定の説明が理解できない者とした。本研究は、『ヘルシンキ宣言』あるいは『臨床研究に関する倫理指針』に従った。対象者および親権者には本研究の実施計画を文

書及び口頭にて十分に説明し，書面による同意を得た。なお，本研究は当院の倫理審査委員会において承認を得て実施した（承認番号：2011-4）。

2.2. 方法

研究デザインは観察研究である。

2.2.1. 測定方法

測定機器は三脚上に取り付けた 4 台のデジタルビデオカメラ（SONY 社製，DCR-HC7 [サンプリング周波数 60Hz]）と 1 枚の床反力計（AMTI-JAPAN 社製，Accu Gait [サンプリング周波数 60Hz]）で構成された三次元動作解析装置（東総システム社製，ToMoCo）を用いた。床反力計から得られる床反力成分は高い信頼性が確認されているが，三次元動作解析装置から得られる座標データに関しては，マーカー貼付のずれにより誤差を生じる可能性がある。そこで，三次元動作解析装置におけるマーカー貼付の信頼性について，事前に健常者 5 例を対象に歩行中における膝関節角度データから検討した結果，級内相関係数（Intraclass correlation coefficient：ICC）は検者内信頼性（intra-class reliability：1，1）0.78，検者間信頼性（inter-class reliability：2，1）0.80 と信頼性の高いデータであった。なお，膝関節角度は股関節（大転子中央と上前腸骨棘とを結ぶ線上で大転子から 1/3 の位置），膝関節外側（大腿骨遠位部最大左右径の高さで矢状面内の膝蓋骨を除いた幅の中央），足関節（外果中央）の 3 点の成す角度とした。ICC を 0.9 とするために必要な測定回数は検者内信頼性（1，1）2.5 回，検者間信頼性（2，1）2.3 回であることから 3 回の平均値をデータとして使用すれば非常に高い信頼性が保証できる⁹⁾と考え，3 歩行周期を解析した。

デジタルビデオカメラ設置位置は，1 つのカラーマーカーに対して 2 つのデジタルビデオカメラから撮影される必要があること，1 台のカメラで全身が映ることの条件を考慮し，床反力計から 5.7m 離し，水準器付きの三脚でデジタルビデオカメラを水平に固定した（図 1）。対象者は体表面に密着するスパッツを着用し，両面テープを用いて，左右上前腸骨棘，

左右膝関節外側（大腿骨遠位部最大左右径の高さで矢状面内の膝蓋骨を除いた幅の中央），左右足関節（外果中央）に直径 30mm カラーマーカーを触診にて同定し貼付した．なお，マーカー貼付の際，マーカーの振動を防ぐためにマーカーの土台の上からサージカルテープで固定した．測定場所はカラーマーカーの自動認識を良くするため明るい場所とし，マーカーを貼付した状態で，デジタルビデオカメラ 4 台にて撮影した．

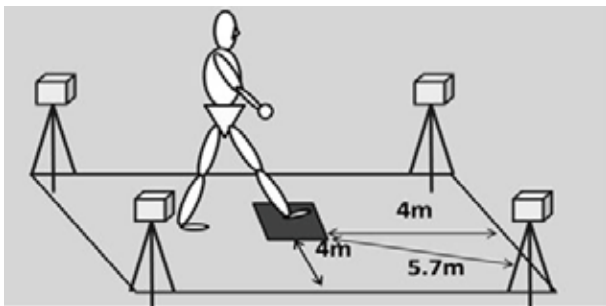


図1 デジタルビデオカメラの設置位置

測定課題は歩行速度や歩幅を規定しない自由歩行とし，スタート位置のみを決めて「前を向いて歩いてください」と指示し，無意識に床反力計を踏むように歩行させた．健側患側で各 3 回確実に踏めたものを使用した．なお，歩行立脚期の同定に関して，初期接地は床反力鉛直成分が 10N 以上，前遊脚期は床反力鉛直成分が 10N 以下となった時点とした¹⁰⁾．撮影した画像は，動画解析ソフトを用いて，サンプリング周波数 60Hz で出力し，4 台のデジタルビデオカメラを同期させるため，開始時に画面内で LED を発光させて，発光開始の各フレームを確認した．デジタイズ処理は，TOMOCO - VM を用いてカラーマーカーを使ったオートデジタイズを実施し，マーカーが隠れた部分はアキマの多項式による近似¹¹⁾を利用した補間計算を実施した．

2.2.2. データ解析方法

データの 3 次元座標系については，原点をキャリブレーション中央の床位置とし，上方向を Z+，対象者の進行方向を Y+，進行方向右手を X+ とした．画像解析ソフト TOMOCO - VM・FP を用いて，右脚

の Xk：膝関節の前額面 x 座標，Xp：足圧中心の前額面 x 座標を抽出した．これらのデータと右脚の Fz：床反力鉛直成分を推定式¹²⁾を参考にした以下の近似式に入力して右脚の外部膝関節外反モーメントを算出した（図 2）．

$$\text{外部膝関節外反モーメント} = -Fz (Xk - Xp)$$

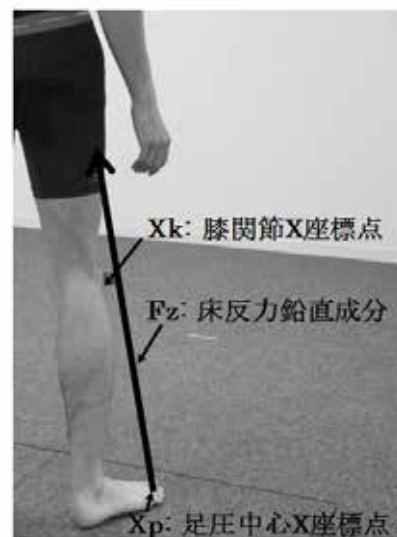


図2 外部膝関節外反モーメントの解析方法
右下肢後面

なお，左脚の外部膝関節外反モーメントについても左脚の座標データ，左脚の床反力データを用いて同様に計算した．ただし，両脚とも外反モーメントが正，内反モーメントが負になるように左脚のモーメントデータについては符号を反転させた．

次に，外部膝関節外反モーメントは各対象者間の体重差の影響を取り除くために，対象者の体重で除した値 (Nm/kg) とし，歩行立脚期の外部膝関節外反モーメントピーク値を抽出した．歩行立脚期の膝関節外反角度は上前腸骨棘，膝関節点，足関節点の 3 点の成す角度とし，立位姿勢からの変位量を求め，最大値を算出した（図 3）．なお，外部膝関節外反モーメントピーク値，膝関節外反角度最大値は健側患側各 3 回の歩行データの平均値を解析値とした．

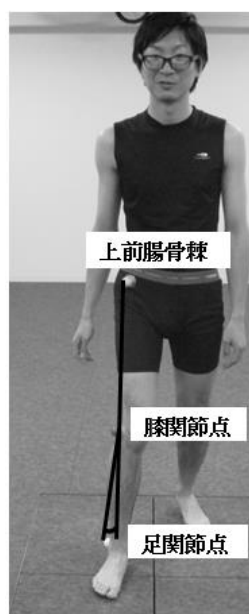


図3 膝関節外反角度の算出方法

2.2.3. 統計的手法

三次元動作解析で得られたデータは、Shapiro-Wilk 検定の結果、歩行立脚期の外部膝関節外反モーメントピーク値の健側、膝関節外反角度最大値の健側と患側は正規分布しており、外部膝関節外反モーメントピーク値の患側は正規分布していなかった。以上より、統計処理は、統計解析ソフトウェア (IBM SPSS Statistics GRAD PACK, version 22.0) を使用し、外部膝関節外反モーメントピーク値の健側と患側の比較には Wilcoxon 符号付順位検定を用い、膝関節外反角度最大値の健側と患側の比較には対応のある t 検定を用いた。なお、すべての検定における有意水準は 5%とした。

3. 結果

歩行立脚期の外部膝関節外反モーメントピーク値と膝関節外反角度最大値の健側と患側の比較を表 3 に示す。歩行立脚期の外部膝関節外反モーメントピーク値 (平均値 ± 標準偏差) は健側 $-0.4 \pm 0.9 \text{ Nm/kg}$ 、患側 $0.7 \pm 0.2 \text{ Nm/kg}$ であり、健側に比べ患側で有意に高値を示した ($p=0.001$)。また、歩行立脚期の膝関節外反角度最大値 (平均値 ± 標準偏

差) は健側 $0.8 \pm 5.4^\circ$ 、患側 $4.7 \pm 4.6^\circ$ であり、健側と患側の間に有意差は認めなかった ($p=0.090$)。

表3 外部膝関節外反モーメントと膝関節外反角度の健側と患側の比較

	健側	患側	P 値
外部膝関節外反モーメント (Nm/kg)	-0.4 ± 0.9	0.7 ± 0.2	0.001
膝関節外反角度 ($^\circ$)	0.8 ± 5.4	4.7 ± 4.6	0.090

mean ± SD

4. 考察

健常者において歩行立脚期は主に外部膝関節内反モーメントが生じており、外部膝関節内反モーメントピーク値は 0.3 Nm/kg/ht である¹³⁾。本研究対象者は立脚中期において外部膝関節外反モーメントが生じ、ACL 損傷側は健側と比べ外部膝関節外反モーメントピーク値が有意に大きいことが示された。

外部膝関節外反モーメントと ACL の力学的負荷の関係について、小笠原ら¹⁴⁾の外部膝関節外反モーメントが大きくなると ACL の力学的負荷も大きくなるという報告や Hewett ら⁵⁾の ACL 損傷発生者の運動力学的特徴としてジャンプ着地時の外部膝関節外反モーメントが増大していたとの報告がある。また、女性に ACL 損傷が多い理由として、膝関節外反角度や外部膝関節外反モーメントが大きいたことが報告されている^{15,16)}。

ACL 損傷後の経過に関して、Eckstein ら¹⁷⁾は運動学・運動力学において健側と患側の非対称性が関節軟骨に過度の摩耗を生じ、変形性膝関節症の誘因となると述べている、また、ACL 不全膝では荷重時に ATT 制動不全または脛骨前外側回旋動揺の増大により、二次的に半月板損傷や関節軟骨損傷、変形性膝関節症を発症することが報告されている^{18,19)}。特に内側半月板は ACL に次いで前方剪断力に対する膝関節の安定性に関与しているため、ACL 損傷後は内側半月板に加わる前方剪断力や回旋ストレスが大きくなり、損傷リスクが高いことが報告されてい

る^{20, 21)}. よって, ACL 不全により不安定性が大きくなると前方剪断力や回旋ストレスが大きくなり内側半月板損傷の発症リスクが高くなることから, 二次的損傷を防ぐために外部膝関節内反モーメントと比べ外部膝関節外反モーメントピーク値が大きくなっていると考えた.

以上のことから, ACL 損傷者は歩行立脚期において, ACL 不全により前方剪断力や回旋ストレスが大きくなり二次的に半月板損傷や変形性膝関節症の発症リスクがあるため, 外部膝関節外反モーメントが大きくなっていると考えた.

本研究の限界として, 対象者が 18 例と少ないこと, 4 台のデジタルビデオカメラで撮影した動画は LED を用いて同期しているが最大で 1/60 秒の誤差が生じる可能性があること, 自由歩行と規定しており歩行速度と歩幅を求められないことである. また, 今後の課題として, 受傷から測定までの時期に各対象者で差があるため受傷からの経過期間で分けて検討すること, ACL 損傷は女性が多いため性差で検討すること, 外部膝関節外反モーメントに影響する運動学・運動力学的特徴を検討することが必要である.

5. 結語

本研究では, ACL 損傷者 18 例を対象として, 歩行立脚期外部膝関節外反モーメントピーク値の健側と患側を検討した. ACL 損傷者は二次的に半月板損傷や軟骨損傷を機転とした変形性膝関節症の発症リスクがある. ACL 不全による不安定性が大きいと二次的損傷を避けるために外部膝関節外反モーメントピーク値が有意に大きくなっていると考えた.

謝辞

本研究に対して貴重なご意見, ご指導を頂きました新潟医療福祉大学医療技術学部義肢装具自立支援学科教授 江原義弘先生, 総合病院回生病院関節外科センター附属理学療法部部长 山田英司先生, 本研究を行うにあたりご協力していただいた総合病院回生病院関節外科センター附属理学療法部およびリ

ハビリテーション部理学療法課スタッフの皆様, 測定にご協力いただいた患者様, 親権者の皆様に深謝申し上げます.

参考文献

- 1) 安本正徳, 菊川和彦 (2008). 膝前十字靭帯断裂に伴った半月板損傷 —受傷時と受傷後治療状況による検討—. 膝, 32(2), 243-246.
- 2) Finsterbush, A. and Frankl, U. (1990). Secondary damage to the knee after isolated injury of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med*, 18(5), 475-479.
- 3) 金井章, 元田英一 (2004). 筋骨格モデルを用いた歩行時の脛骨前方引き出し力の解析. 理学療法科学, 19(3), 255-260.
- 4) 園部俊晴 (2010). 「スポーツ外傷・障害に対する術後のリハビリテーション」, 運動と医学の出版社.
- 5) Hewett, TE. And Myer, GD. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med*, 33(4), 492-501.
- 6) Withrow, TJ. and Huston, LJ. (2006). The effect of an impulsive knee valgus moment on in vitro relative ACL strain during a simulated jump landing. *Clin Biomech*, 21(9), 977-983.
- 7) McLean, SG. and Huang, X. (2004). Sagittal plane biomechanics cannot injure the ACL during sidestep cutting. *Clin Biomech*, 19(8), 828-838.
- 8) McLean, SG. and Lipfert, SW. (2004). Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting. *Med Sci Sports Exerc*, 36(6), 1008-1016.
- 9) 池野祐太郎, 田中聡 (2014). 4 台のデジタルビデオカメラを用いた 3 次元動作解析装置にお

- る身体角度測定信頼性の検討. リハビリテーションエンジニアリング, 29(4), 233-237.
- 10) 越野裕太, 山中正紀 (2012). 足関節背屈可動域と方向転換動作時の足関節背屈・内反, 足部方向角度との関係性. 体力科学, 61(5), 487-493.
- 11) 石原学, 白滝順 (1988). 各種補間法によるスペクトル推定の検討. 幾徳工業大学研究報告 B 理工学編, 12, 141-149.
- 12) 木藤伸宏, 新小田幸一 (2008). 内側型変形性膝関節症の外部膝関節内反モーメントと疼痛身体機能との関係. 理学療法科学, 23(5), 633-640.
- 13) Butler, R.J. and Minick, K.I. (2009). Gait mechanics after ACL reconstruction implications for the early onset of knee osteoarthritis. *Br J Sports Med*, 43(5), 366-370.
- 14) 小笠原一生, 宮川俊平 (2010). 片脚着地動作における着地姿勢が膝関節外反モーメントに与える効果の静力学的検討—膝前十字靭帯損傷のリスクを高める動作の同定—. 体力科学, 59(5), 485-494.
- 15) Malinzak, R.A. And Colby, S.M. (2001). A comparison of knee joint motion patterns between men and women in selected athletic tasks. *Clin Biomech*, 16(5), 438-445.
- 16) Chappell, J.D. And Yu, B. (2002). A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *Am J Sports Med*, 30(2), 261-267.
- 17) Eckstein, F. and Wirth, W. (2008). Patterns of femorotibial cartilage loss in knees with neutral, varus, and valgus alignment. *Arthritis Rheum*, 59(11), 1563-1570.
- 18) 中田研, 前達雄 (2010). ACL 損傷に合併する半月・軟骨損傷と治療. 日本臨床スポーツ医学会誌, 18(2), 191-197.
- 19) Louboutin, H. and Debarge, R. (2009). Osteoarthritis in patients with anterior cruciate ligament rupture: a review of risk factors. *Knee*, 16(4), 239-244.
- 20) Papageorgiou, C.D. and Gil, J.E. (2001). The biomechanical interdependence between the anterior cruciate ligament replacement graft and the medial meniscus. *Am J Sports Med*, 29(2), 226-231.
- 21) Hawkins, R.J. and Misamore, G.W. (1986). Followup of the acute nonoperated isolated anterior cruciate ligament tear. *Am J Sports Med*, 14(3), 205-210.

< 著者連絡先 >

池野祐太郎

社会医療法人財団大樹会総合病院回生病院関節外科
センター附属理学療法部

〒762-0007 香川県坂出市室町 3-5-28

TEL 0877-46-1011

E-mail : yutaro_ikeno1986@yahoo.co.jp

Study on the external knee joint abduction moment during the stance phase of gait in Anterior Cruciate Ligament injury

Yutaro Ikeno¹, Satoshi Tanaka², Wataru Fukuda¹, Yusuke Kataoka¹, Yuka Hamano¹, Kenta Takeuchi¹, Shouhei Kawakami¹, Taishi Ninomiya³, Noriyuki Gomi³

¹Department of Physical Therapy in affiliation with a Center of Orthopaedic Surgery, The Taijyukai foundation (social medical corporation) Kaisei General Hospital

²Prefectural University of Hiroshima, Graduate School of Comprehensive Scientific Research,

³Center of Orthopaedic Surgery, The Taijyukai foundation (social medical corporation) Kaisei General Hospital

Abstract

Purpose: To examine the side to side differences of the external knee abduction moment between the healthy side and injured side in the subjects with anterior cruciate ligament (ACL) injury. **Methods:** The subjects were 18 patients (10 men and 8 women) with non-contact ACL injury. A three-dimensional motion analysis system including four video cameras and a force plate was used to calculate the external knee abduction moment during the stance phase of gait. The gait task was repeated until the healthy side and injured side made complete contact with the middle of the force plate at least three times. The external knee abduction moment was normalized to body weight. We compared the external knee abduction moment of the healthy side and that of the injured side by the paired t-test. The external knee abduction moments were analyzed using IBM SPSS Statistics 22.0. **Results:** The injured side had a significantly higher external knee abduction moment than that of the healthy side during the stance phase ($p=0.001$). **Conclusion:** We thought that the significantly higher external knee abduction moment peak was a movement to ACL injury in order to avoid secondary injury.

Key words: anterior cruciate ligament injury, external knee abduction moment, knee valgus angle, stance phase during gait, A three-dimensional motion analysis system