

機関番号：82632

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21700667

研究課題名（和文）実際に起きた膝前十字靭帯損傷のビデオ映像から受傷メカニズムの力学法則を解明する

研究課題名（英文）Evaluation of injury mechanism using the filmed actual anterior cruciate ligament injury

研究代表者

小笠原 一生 (OGASAWARA ISSEI)

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部・研究員

研究者番号：70443249

研究成果の概要（和文）：

本研究は実際に起きた膝前十字靭帯（ACL）損傷のビデオ映像から膝に加わったストレスを数理的に定量化し、この怪我のメカニズムを解明することを目的とした。結果として、ジャンプ着地直後に膝には 400 Nm を超えるモーメントが瞬間的に作用しており、これが本外傷のメカニズムになり得ることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

This study aimed to elucidating the mechanism of anterior cruciate ligament (ACL) injury using the video data of actual injury situation. The results suggested that the sudden increase of external knee abduction moment, which exceeds 400 Nm, is a possible mechanism of ACL injury.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：スポーツ医工学

科研費の分科・細目：スポーツ科学

キーワード：前十字靭帯，スポーツ傷害，予防トレーニング，画像処理，関節モーメント，静力学

## 1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯（ACL）損傷は、スポーツ中に生じる重篤な外傷である。この怪我は、ジャンプ着地や、急激な方向変換など、足先に大きな力が瞬間的に作用する動作で生じる。通常、スポーツ復帰には手術療法が適用され、また長期にわたるリハビリテーションが必要となるため、ACL 損傷はスポーツ選手にとって身体的、精神的に負担の大きな外傷であ

る。近年、欧米を中心に、トレーニング介入によって ACL 損傷を未然に予防する取り組みがなされており、一定の効果を上げている。ところがそれらのトレーニング介入では、多様なトレーニングメニューを網羅的に行っているため、効率性の点で改善の余地がある。したがって、トレーニングメニューの重点化を図り、この問題を解決するためには、ACL 損傷の発生メカニズムを深く理解する必要

がある。

ACL 損傷のビデオ映像は、この怪我のメカニズムを探る上で、非常に有益な情報を含むものである。これまでも、ACL 損傷のビデオ映像を用いて怪我の発生メカニズムを検討する試みがなされてきた。初期の研究では、Ireland (1990) や Olsen et al. (2004) があるが、これらはビデオ映像を目視観察して受傷時の関節角度を同定したものであり、客観性には乏しい。一方 Krosshung et al. (2006) は、複数のビデオ映像に基づいてコンピュータ内で合成し、受傷者の動作を 3 次元的に再構築することで、受傷時の関節肢位をより客観的に、かつ経時的に定量化した。しかしながら、これらの研究で定量化したのは、受傷時の膝関節の変位（どれほど脱臼方向に曲がったか）に止まっており、すなわちどれほどの“力”が作用して、その変位が生じたかについては、言及できていない。変位は“力”が作用した結果であるため、ACL 損傷のメカニズムを理解するためには、変位に加えて“力”を評価することが重要と考えられる。倫理的問題から実験室内でヒト被験者を対象に ACL 損傷を引き起こす“力”を評価することは困難であるし、また、屍体膝を用いた破壊実験は、実際の ACL 損傷の動作とは乖離がある。よって、ビデオ映像から得られる情報に基づき、受傷時の膝ストレスを定量化するフレームワークを構築することで、ACL 損傷のメカニズム解明に近づくことが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、実際に起きた ACL 損傷ビデオ映像を解析し、膝に作用した曲げストレス（外モーメント）を推定して、この怪我の発生メカニズムを明らかにすることである。その過程では、膝モーメント推定に関わるモデルを構築し、実験を通じてそのモデルの妥当性を検討した上で、ACL 損傷の危険性が高まる機序を理論的に考察する。次に、複数のビデオ映像から得た二次元情報を三次元情報に再構築する手法を検討する。最後に、三次元化した画像から得たデータにモデルを適用し、受傷時に膝に作用したモーメントを推定することで、当該症例での外傷発生要因を検討する。

## 3. 研究の方法

①膝モーメント算出のためのモデルと、精度検証実験  
関節モーメントの算出には一般にニュートン・オイラーの運動方程式

$$I\ddot{q} + \dot{q} \dot{I}q = t + J^T F \quad \text{式 1}$$

が用いられる。方程式は動的項（慣性項  $I\ddot{q}$ 、

ジャイロ項  $\dot{q} \dot{I}q$ ）と静的項（外力項  $J^T F$ ）で構成され、それらの和により関節モーメント  $t$  が定まる。ここで、ACL 損傷のような地面に足が衝突した瞬間を想定すると、方程式中の静的項の割合が床反力の影響で飛躍的に大きくなり、逆に動的項が無視できるほど小さくなると予想される。そこで、本研究では、動的項を無視して静的項のみで関節モーメントを近似する静力学モデル

$$\hat{t} = -J^T F \quad \text{式 2}$$

を定義し、画像解析に適用することを試みた。図 1 は静力学モデルを視覚的に表したものである。

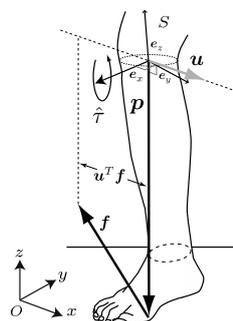


図 1：静力学モデルの概念図

式 2 を書き換えると

$$\hat{t}_i = e_i^T (p \cdot F) \quad i = x, y, z \quad \text{式 3}$$

となる。 $p$  は膝中心から床反力作用点にむけた位置ベクトルであり、モーメントアームに相当する。 $F$  は床反力ベクトルである。

$e_i$  ( $i = x, y, z$ ) は 3 軸の膝モーメントの作用軸を表す単位ベクトルである。静力学モデル（式 3）の近似精度を検証するため、静力学モデルで算出した膝モーメントとニュートン・オイラー法で算出したモーメントを比較する実験を行った。対象は下肢に既往の無い成人男女 7 名であった。所属施設の倫理委員会が承認した実験方法のもと、全ての被験者から参加承諾を得た。被験者は 30cm の台から前方へ設置された床反力計の上に片脚で着地するよう求められた。被験者一人あたり 56 試行を行った。接地後の膝関節モーメントを静力学モデルおよびニュートン・オイラー法で算出し、比較を行った。図 2 に膝モーメントの時刻歴を示す。

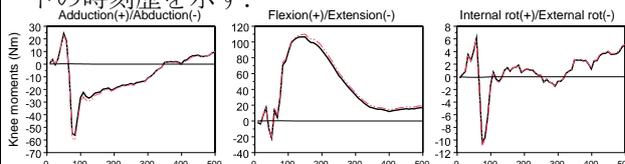


図 2：静力学モデルとニュートン・オイラー法の比較  
実線（黒）がニュートン・オイラー法を表し、

破線（赤）が静力学モデルである。両者はほぼ一致した力波形を示したことから、静力学モデルの近似精度が極めて高いことが明らかとなった。同時に、着地直後の膝モーメントは外力項（床反力の影響）が支配的であるという物理的考察が得られた。

静力学モデルの利点は、角加速度や角速度を含む動的項を計算する必要が無い点であり、このことから微分計算による数値ノイズの蓄積を避けることができる。本研究のようにビデオ映像から位置情報を得る過程ではノイズ混入は不可避であることから、静力学モデルのこの特徴は、モーメントの近似精度向上が期待できる。

### ②複数のビデオ映像に基づく受傷者の三次元運動解析

対象としたビデオ映像は2008年3月28日にルーマニアにて行われた女子ハンドボール競技の北京五輪最終予選で発生したACL損傷を3つの異なるアングルから撮影したものであった（図3）。



図3：ACL損傷のビデオ映像

画像のサンプリングレートは全て30Hzであった。受傷者は28歳の女性エリートハンドボール選手であり、左利きであった。コート後方から右足でジャンプしてシュートを打った後、右足で片脚着地をした際にACL、内側々副韧带（MCL）、外側半月板を損傷した。ジャンプ前後を通じて他者からの接触は無く、接地した足の滑りも観察されなかった。映像の利用にあたっては、受傷者本人と日本ハンドボール協会の承諾を得た。画像の背景に映り込んだコートラインの交点や、ゴールの塗装の境界など、既知の寸法情報をもとにDirect linear transformation method (DLT法)を用いて各画像、全フレームにおいてカメラパラメータを得た。次に受傷者の関節中心をマニュアルデジタイズして2次元座標を得て、先に取得したカメラパラメータを用いて2次元座標を3次元座標に変換した。受傷者の関節中心の3次元座標をもとに、全身14リンクの運動学モデルを構築した。各体節の質量分布と質量中心位置はChandler (1975)のモデルから推定し、これをもとに身体重心の軌跡を得た。

### ③床反力の推定と膝モーメント算出

床反力の推定は宮地ら (1988) の mass-spring-damper model を参照した。画像より受傷者が床と衝突した瞬間の重心速

度は前後方向  $1.017\text{ms}^{-1}$ 、左右方向  $0.91\text{ms}^{-1}$ 、鉛直方向  $-3.17\text{ms}^{-1}$  であり、これをモデルに代入して衝撃力を求めた。②の解析で構築した運動学モデルおよび③で求めた床反力をもとに、式3を用いてACL損傷の瞬間の膝モーメントを算出した。

### 4. 研究成果

図4に膝関節モーメントの時刻歴を示す。

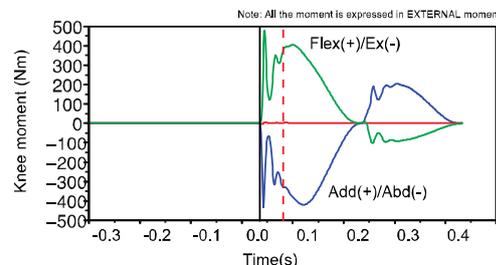


図4：膝関節モーメントの時刻歴

0sは足部が床に衝突した時刻である。グラフより接地直後（約30ms）に、膝屈曲モーメントおよび膝外反モーメントが急峻に高まっていた。膝回旋モーメントには顕著な変化は見られなかった。ここで、屈曲方向に膝を強制する膝屈曲モーメントは、膝の正常な可動域内で緩衝されることが推察される。しかしながら膝外反モーメントの急峻な増加は、膝関節の内側に位置する安定化機構（MCLやACL）に過大な伸張ストレスを与えたと考えられる。また、画像から、本症例では膝が外側へ脱臼しており、推定した膝外反モーメントの方向と脱臼の方向が一致していた（図3）。これらの結果より、本症例におけるACL損傷は、接地後の急峻な膝外反モーメントの増加によって引き起こされたと考えられる。

我々が次に注目したのは、膝外反モーメントが急峻に増加した時刻であった。グラフから膝外反モーメントの最初のピークは接地後約30msであった。また、図5はビデオ画像を接地の瞬間から2フレームを抜き出したものであるが、2フレーム目の画像では膝が脱臼していることが分かる。すなわち本症例のACL損傷は、足先に床反力が作用し始めてから30ms～60msという非常に短い時間帯に生じたと考えられる。

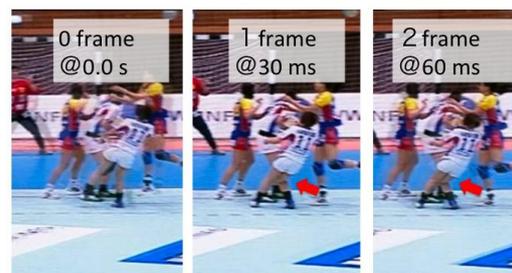


図5：0～2フレーム目までの様子

この短い時間帯では、たとえ反射様の筋活動であっても外力に拮抗するために十分な筋緊張を得ることは困難と考えられる。このことから、ACL 損傷を予防するためには単に膝周囲の筋力を向上させるといった単純なものではなく、外力が足先に作用する前から、自身の運動状態に基づいて外力の大きさと方向を予測し、着地脚の適切な肢位と予備緊張を促すトレーニングが必要となる。

本研究を通じて画像解析による膝モーメント推定のフレームワークが構築された。これにより、実験室研究では得られない、実際の怪我を対象としたメカニズム研究の進展が期待される。今後の検討課題は、

- 1) 多症例の解析
- 2) 画像解析の高精度化と短時間化
- 3) 床反力推定モデルの実験的検証が挙げられる。

#### 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 3 件)

- ① 小笠原一生, 朴時英, 宮川俊平. 片脚着地動作における着地姿勢が膝外反モーメントに与える効果の静力学的検討. 体力科学, 査読有, 59, 2010, 485-494.
- ② 小笠原一生. 膝前十字靭帯損傷のメカニズム解明とその予防に向けた工学的試み. 日本機械学会誌, 査読有, 113, 2010, 39-42.
- ③ 小笠原一生, 太田憲. 静力学を用いた膝前十字靭帯損傷のリスク判定. 日本機械学会スポーツ工学ジョイントシンポジウム論文集, 査読有, -, 2010, 247-252.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Issei Ogasawara, Shumpei Miyakawa. The relationship between the knee joint moment and the control of the center of mass. 56th American College of Sports Medicine Annual Meeting. 2009, Seattle, US.
- ② 小笠原一生他. 膝外反モーメントを高める着地姿勢の同定. 第 64 回日本体力医学会大会, 2009, 新潟.
- ③ 小笠原一生, 太田憲. 静力学を用いた膝前十字靭帯損傷のリスク判定. 日本機械学会スポーツ工学ジョイントシンポジウム, 2009, 福岡.
- ④ 小笠原一生. 静力学による膝前十字靭帯損傷のリスク評価. 第 3 回川崎スポーツリハビリテーションフォーラム, 2009, 神奈川.
- ⑤ Issei Ogasawara et al. Kinematics Based Knee Moment Prediction for

Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injury. 57th American College of Sports Medicine Annual Meeting. 2010, Baltimore, US.

- ⑥ 小笠原一生, 福林徹, 中前敦雄, 奥脇透, 笹木正悟, 宮川俊平. 映像解析による膝前十字靭帯損傷時の膝モーメントの推定と予防への示唆. 第 21 回日本臨床スポーツ医学会学術集会, 2010, 茨城.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小笠原 一生 (OGASAWARA ISSEI)  
武庫川女子大学・健康・スポーツ科学部・講師  
研究者番号: 70443249