

## 1. ACL 損傷の受傷メカニズム

古賀英之\*

### ●はじめに

近年, 前十字靭帯 (Anterior cruciate ligament ; ACL) 損傷, 特に介入可能である非接触性損傷に対する予防法の確立が望まれており, その上で受傷メカニズムの解明は ACL 損傷の予防を考える上では欠かせない大事なステップである。

受傷メカニズムの研究方法には様々なアプローチがあるが<sup>1)</sup>, その中でも競技中における受傷シーンのビデオ解析は実際の受傷時のバイオメカニカルな情報を得ることができる唯一の方法である。しかしこれまでその方法は単純な視覚的分析 (ビデオをコマ送りしながら受傷シーンの状況の分析や関節角度の推定を行う方法) に限られており, より精度の高いビデオ解析方法の開発が必要とされていた<sup>2)</sup>。

そこで我々はコンピューターグラフィックソフトウェアである Poser<sup>®</sup>を用いて複数の方向のビデオカメラから撮影した人の動きを model-based image-matching (MBIM) の手法で再現する方法を考案し<sup>3)</sup>, 非接触性 ACL 損傷の受傷シーンのビデオを解析することにより ACL 損傷の詳細な受傷メカニズムを明らかにすることを試みた。

### ●非接触性 ACL 損傷におけるバイオメカニクス

MBIM 法を用い, ハンドボール, バスケットボールにおける 2 方向以上から撮影された非接触性 ACL 損傷の受傷シーン 10 例のビデオ解析を行った<sup>4)</sup>。全例が通常のテレビ放映 (アナログ放映) で撮影されていた。症例は全例女性で, ハンドボール 7 例, バスケットボール 3 例。全例がゲーム中

の受傷であり, 7 例がカッティング動作, 3 例がジャンプ後の片足着地であった。また脛骨前方移動に注目して high definition (HD) 放映されたサッカーにおける非接触性 ACL 損傷の受傷シーンの 1 例についても解析を行った<sup>5)</sup> (図 1)。

#### 1) 膝関節のキネマティクス

膝関節のキネマティクスは全例で驚くほど一致していた (図 2A)。接地時屈曲角度は平均 23° と軽度屈曲位であり, 接地後 40ms の間に 24° 増加していた。接地時の膝外反角度は平均 0° とほぼ中間位であったが, 接地後 40ms の間に 12° 増加しており, 全ての症例で急激な膝外反変化が接地後 40ms 以内に生じていた。一方膝回旋角度は接地時には外旋 5° であったが, 接地後 40ms の間に 8° の急激な内旋を認め, その後 200ms の間に逆に 17° の外旋が生じていた。また垂直床反力のピーク (peak vertical ground reaction force, peak vGRF) は接地後平均 40ms で生じていた。

また HD 放映されたサッカーの 1 例においても膝関節のキネマティクスは始めの 10 例と一致していた。すなわち接地後 30ms までに急激な外反 (21°) および内旋 (21°) が生じており, その後外旋に転じていた。また脛骨前方移動は膝屈曲角度が最大伸展位 (26°) となった接地後 20ms から急激に生じ始め, 接地後 30ms までに 9mm に達していた (図 2B)。

#### 2) 非接触性 ACL 損傷の受傷のタイミング

今まで行われてきた受傷シーンのビデオ解析において, 受傷の正確なタイミングは単純な視覚的分析では予測が不可能であると考えられてきた<sup>6)</sup>。しかし MBIM 法による解析では, 以下の criteria を用いることにより受傷のタイミングの推定が可能となった。

(1) 関節角度の変化が正常でなくなる時。

\* 東京医科歯科大学大学院運動器外科学



図1 サッカーにおける ACL 損傷ビデオの MBIM 法を用いた解析.

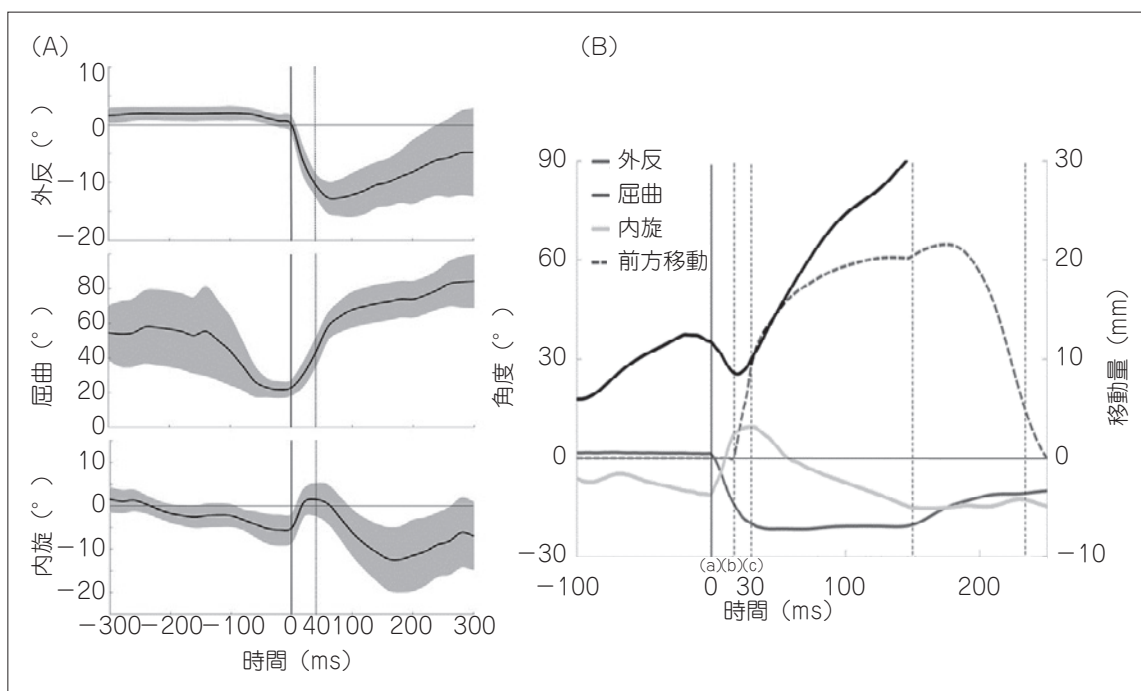


図2 (A) バスケットボール, ハンドボールの ACL 損傷 10 例における膝関節のキネマティクス. Time 0 は接地時を表す. 実線は平均, 灰色の範囲は 95 % 信頼区間を表す. (B) サッカーにおける ACL 損傷の 1 例の膝関節のキネマティクス. (a) 接地時. (b) 接地後 20 ms. (c) 接地後 30 ms.

(2) 急激な関節角度の変化が見られたとき.

(3) 床反力の評価.

我々の研究においては, 急激な膝外反+内旋が接地後 40ms までに生じており, 垂直床反力のピークは接地後 40ms で生じていた. またサッカーの 1 例では急激な脛骨の前方移動が接地後 30ms には健常者の最大前方引出し量とほぼ一致する 9mm に達していた. 以上の結果, およびコン

ピューターシミュレーションモデルにおける片足着地動作では ACL は接地後約 40ms に最大張力を生じるといった過去の報告<sup>7)</sup>とから, ACL 損傷は接地後 40ms 付近で生じていると考えられた.

### 3) 股関節と足関節のキネマティクス

我々は前述の 10 例について, 股関節と足関節のキネマティクスについても解析を行った<sup>8)</sup>. すると膝関節のキネマティクスとは対照的に, 接地時及

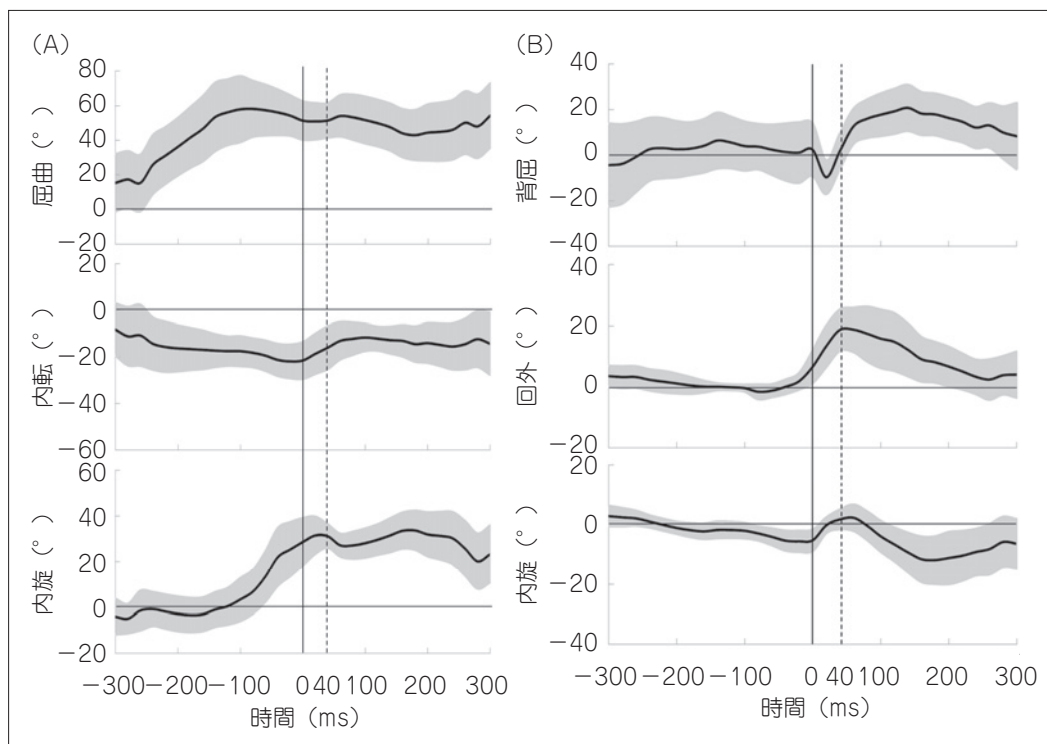


図3 バスケットボール，ハンドボールのACL損傷10例における股関節 (A) および足関節 (B) のキネマティクス。Time 0は接地時を表す。実線は平均，灰色の範囲は95%信頼区間を表す。

び接地後40msの股関節角度は屈曲 $52^{\circ} \rightarrow 53^{\circ}$ ，外転 $21^{\circ} \rightarrow 15^{\circ}$ ，内旋 $27^{\circ} \rightarrow 28^{\circ}$ と，股関節内旋位ではほぼ一定であった(図3A)。一方足関節のキネマティクスを見てみると，全例で接地時は背屈位で踵接地し，20ms後には全足底が床に接地，40ms後には全足底が接地したまま再び背屈位となった。足関節の屈曲角度は平均で接地時は背屈 $2^{\circ}$ ，20ms後は底屈 $10^{\circ}$ ，40ms後は背屈 $2^{\circ}$ であった。足関節回外角度は接地時 $7^{\circ}$ から40ms後は $19^{\circ}$ へと有意に増加した。足関節回旋角度は接地時外旋 $5^{\circ}$ から40ms後は内旋 $8^{\circ}$ へと有意に内旋方向に増加した(図3B)。

### ●非接触性ACL損傷のメカニズム

これまでの単純な視覚的分析によるビデオ解析では，膝外反+外旋位(いわゆるknee in, toe out)はしばしば見られる受傷肢位である。しかしこの肢位は果たしてACL損傷の原因なのか，それとも単なるACL損傷による結果なのかはこれまで議論の分かれるところであった。我々の結果では，急激な外反が接地後40msまでに生じていた一方で，接地後40msは内旋が生じ，その後急激に外旋に転じていた。また脛骨前方移動は膝最大伸展位

になると同時に生じ始め，断裂の瞬間まで急激に増加していた。以上の結果と過去の研究<sup>9-12)</sup>から，我々はACL損傷の瞬間には膝外反による外側コンパートメントへの圧迫力により内旋と前方移動が生じているのではないかと考えた。また膝外反はACL断裂後に生じており，いわゆるknee in, toe outはACL損傷の後に生じた単なる結果に過ぎないと思われた。以上の結果を踏まえた非接触性ACL損傷のメカニズムは以下のとおりである(図4)。

(1) 膝に外反力が加わると，それによってMCLが緊張し外側コンパートメントに圧迫力が生じる。

(2) この圧迫力により，脛骨の骨形態(脛骨外側高原の後傾)によって大腿骨外顆が後方に偏位することにより脛骨前方移動及び内旋が生じ，ACLが断裂する。

(3) ACL断裂により脛骨前方引出し力に対するprimary restraintが消失し，また足部が地面に固定されていることも相まって大腿骨内顆も後方に偏位することにより，ACLの断裂後に脛骨外旋が生じる。

一方でACL損傷における股関節の重要性は以

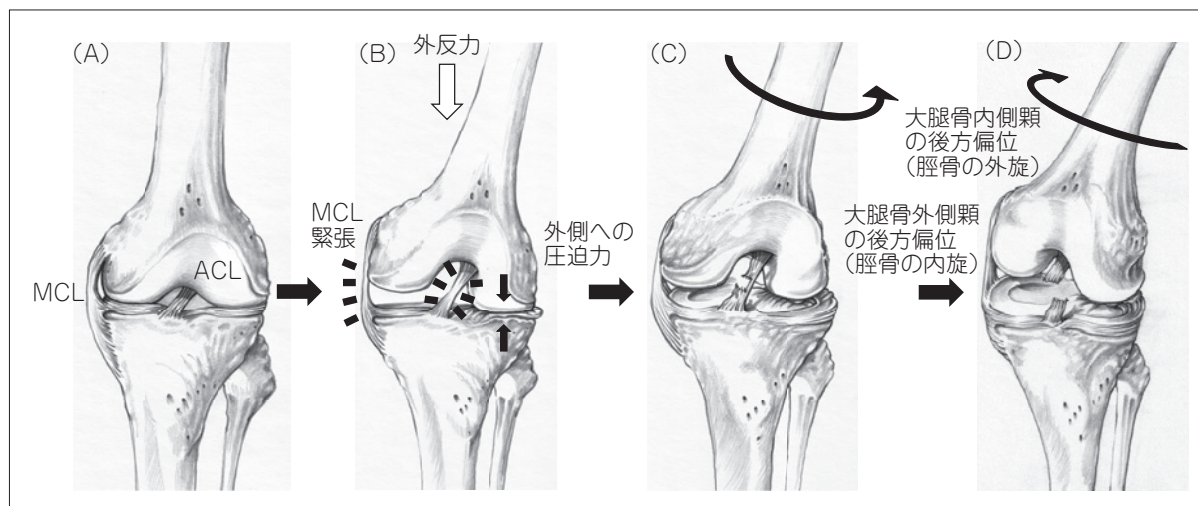


図4 ACL 損傷メカニズム.

- (A, B) 膝に外反力が加わると、MCL が緊張し外側コンパートメントに圧迫力が生じる。
- (C) この圧迫力により大腿骨外側顆が後方に偏位することにより脛骨前方移動及び内旋が生じ、ACL が断裂する。
- (D) ACL 断裂により脛骨前方引出し力に対する primary restraint が消失し、大腿骨内側顆も後方に偏位することにより、ACL の断裂後に脛骨外旋が生じる。

前より指摘されていたが<sup>13,14)</sup>、我々の研究でも股関節角度は接地時から接地後 40ms まで屈曲・外転・内旋位で固定されており、そのことが ACL 損傷の発症に大きな役割を果たしていると考えられた。すなわち正常な状態では着地の際に膝・股関節は協調して動き、股関節でエネルギー吸収することにより膝関節への負荷を軽減させる。しかしアンバランスな着地では膝・股関節の協調した動きがなく、相対的に膝関節への負荷が増大し ACL 損傷のリスクが増す、と考えられた。

一方足関節のキネマティクスについては、過去の報告と同様に<sup>13,15)</sup>、我々の研究でも全例が足関節背屈位で踵接地しており、大きな膝外反モーメントが生じていることが示唆された。また接地後急激に全足底が床に接地した後は足底と地面の間に動きが見られなかったことから、足底と地面の間には高い摩擦力が生じており、足底が地面に固定されることも股関節ほどではないが ACL 損傷に関与していることが示唆された。

これらの理由から、受傷時に股関節および足部によるエネルギー吸収が不十分となることから膝関節により大きな負荷がかかり、そのことが ACL 損傷に寄与していると考えられる。

### ●メカニズムから考える ACL 損傷の予防

以上の受傷メカニズムに対する知見をもとに、ACL 損傷に対する予防法について提唱する。受傷時には膝外反、内旋位をとること、股関節が内旋位で固定されて股関節でのエネルギー吸収ができないことが ACL 損傷の原因と考えられることから、ACL 損傷の予防を考える上では、膝関節のみならず体幹・股関節に対するアプローチを積極的に行っていくことも重要と思われる。すなわち予防プログラムにおいては (1) 膝外反・内旋位を避け、(2) 床反力を股関節で吸収させるために接地時に股関節内旋位を避けて充分屈曲させるようなカッティング及びランディングテクニックを獲得することに焦点を当てるべきである。実際に Omi らは股関節に注目した予防プログラムを女子バスケットボールチームに導入し、ACL 損傷のリスクを有意に減らすことに成功している<sup>16)</sup>。また、ACL 損傷が接地後 40ms 程度で生じていることから、いわゆる“feed-back strategy”，すなわち接地後のキネマティクスを矯正することに重点を置く予防プログラムでは ACL 損傷を予防できないことが示唆される（接地後に危険を感じてから反応するには少なくとも 150-200ms かかる）。このことから、接地前から危険を予知し、ま

た接地前の膝関節や股関節の動きをコントロールするための“feed-forward strategy”，すなわち接地前の筋の pre-activation や神経コントロールなどのトレーニングに予防プログラムの焦点があてられるべきである。

## ●おわりに

MBIM 法は従来視覚的分析に限られていた受傷シーンのビデオの詳細な解析を可能にし、非接触性 ACL 損傷のメカニズムの詳細を明らかにすることができた。すなわち ACL 損傷は接地後 40 ms 付近で生じており、膝外反に伴う外側コンパートメントの圧迫力によって膝内旋及び脛骨前方移動が生じることにより ACL が断裂する。また接地時から ACL 損傷時までの間、股関節は内旋位にてほぼ一定であること、また足部は踵接地後足底が地面に固定されることから、接地時において股関節および足部によるエネルギー吸収が不十分となることから膝関節により大きな負荷がかかり、そのことが ACL 損傷に寄与している。以上より予防プログラムは膝関節と股関節の両方に対するアプローチを行っていくこと、また接地前から危険を予知し、接地前の膝関節や股関節の動きをコントロールするための“feed-forward strategy”に焦点を当てていくことが重要と考えられた。

## 文 献

- 1) Krosshaug T, Andersen TE, Olsen OE, et al. Research approaches to describe the mechanisms of injuries in sport: limitations and possibilities. *Br J Sports Med.* 2005; 39: 330-339.
- 2) Krosshaug T, Nakamae A, Boden B, et al. Estimating 3D joint kinematics from video sequences of running and cutting maneuvers--assessing the accuracy of simple visual inspection. *Gait Posture.* 2007; 26: 378-385.
- 3) Krosshaug T, Bahr R. A model-based image-matching technique for three-dimensional reconstruction of human motion from uncalibrated video sequences. *J Biomech.* 2005; 38: 919-929.
- 4) 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.* 2010; 38: 2218-2225.
- 5) Koga H, Bahr R, Myklebust G, et al. Estimating anterior tibial translation from model-based image-matching of a noncontact anterior cruciate ligament injury in professional football: a case report. *Clin J Sport Med.* 2011; 21: 271-274.
- 6) Krosshaug T, Nakamae A, Boden BP, et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med.* 2007; 35: 359-367.
- 7) Shin CS, Chaudhari AM, Andriacchi TP. The influence of deceleration forces on ACL strain during single-leg landing: a simulation study. *J Biomech.* 2007; 40: 1145-1152.
- 8) Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al. Hip and Ankle Kinematics in Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury Situations: Video Analysis Using Model-Based Image Matching. *Am J Sports Med.* 2018; 46: 333-340.
- 9) Meyer EG, Haut RC. Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibiofemoral compression. *J Biomech.* 2008; 41: 3377-3383.
- 10) Hashemi J, Chandrashekar N, Mansouri H, et al. Shallow medial tibial plateau and steep medial and lateral tibial slopes: new risk factors for anterior cruciate ligament injuries. *Am J Sports Med.* 2010; 38: 54-62.
- 11) Matsumoto H, Suda Y, Otani T, et al. Roles of the anterior cruciate ligament and the medial collateral ligament in preventing valgus instability. *J Orthop Sci.* 2001; 6: 28-32.
- 12) Speer KP, Spritzer CE, Bassett FH 3rd, et al. Osseous injury associated with acute tears of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med.* 1992; 20: 382-389.
- 13) Boden BP, Torg JS, Knowles SB, et al. Video analysis of anterior cruciate ligament injury: abnormalities in hip and ankle kinematics. *Am J Sports Med.* 2009; 37: 252-259.
- 14) Hashemi J, Chandrashekar N, Jang T, et al. An alternative mechanism of non-contact anterior cruciate ligament injury during jump-landing: in-vitro simulation. *Exp Mech.* 2007; 47: 347-354.
- 15) Kristianslund E, Faul O, Bahr R, et al. Sidestep cutting technique and knee abduction loading: implica-

シンポジウム 1 : ACL 損傷・再損傷を予防する

- tions for ACL prevention exercises. *Br J Sports Med.* 2014; 48: 779-783.
- 16) Omi Y, Sugimoto D, Kuriyama S, et al. Effect of Hip-Focused Injury Prevention Training for Anterior Cruciate Ligament Injury Reduction in Female Basketball Players: A 12-Year Prospective Intervention Study. *Am J Sports Med.* 2018 ; 363546517749474.