

# 片脚着地時の姿勢戦略に基づく 非接触型前十字靭帯損傷の潜在的リスク同定

Identification of potential risk for non-contact anterior cruciate ligament injury based on postural strategy during single-leg landing

小笠原一生\*<sup>1</sup>, 小柳好生\*<sup>2</sup>, 木村佳記\*<sup>3</sup>, 杉山恭二\*<sup>3</sup>  
佐藤睦美\*<sup>4</sup>, 川上由紀子\*<sup>5</sup>, 中田 研\*<sup>1</sup>

キー・ワード : non-contact ACL injury, postural control, risk identification  
非接触型前十字靭帯損傷, 姿勢制御, リスク判別

〔要旨〕 前十字靭帯 (ACL) 損傷選手 6 名から受傷前に測定した片脚着地時の床反力データより, 着地時の下肢スティフネスを定量する衝撃緩衝係数と, 着地後の姿勢動揺の空間的大きさを定量する足圧中心 (COP) 軌跡長を算出し非損傷者と前向きに比較した。ACL 損傷者の衝撃緩衝係数は非損傷者よりも高値と低値の両極に集中し, COP 軌跡長は非損傷者に比べて短かった。このことから, 着地衝撃の見積もりミスに起因する不適切な下肢スティフネスと, 通常有すべき姿勢ゆらぎ範囲を活用しない姿勢安定戦略が ACL 損傷の潜在的リスクとして考えられた。

## はじめに

膝前十字靭帯 (ACL) 損傷は重篤なスポーツ外傷である。ACL 損傷は着地や急な方向変換など, 急減速を伴う動作で多く発生し<sup>1)</sup>, その多くは接触なしに生じる。また, 特に女子選手に高頻度に起こるという特徴もある<sup>2,3)</sup>。

バイオメカニクスから見た ACL 損傷のリスクとして, 不良な動的下肢キネマティクス (膝外反, 内旋角度の増大<sup>4-6)</sup>, 膝の内方偏位<sup>7)</sup>, 不良な loading pattern (外反モーメント<sup>8,9)</sup>, 前方引き出し力<sup>10)</sup>, 圧縮力や<sup>11)</sup>, それらの複合作用<sup>12)</sup> が知られている。さらに Hewett らは動作解析と ACL 損傷発生の調査を組み合わせることで, Drop vertical jump 時の膝外反角度ピーク値および外膝反モーメントピーク値, および床反力鉛直成分ピーク値は ACL 損傷の predictor であることを前向きに

示した<sup>13)</sup>。ところが近年この見解に否定的な報告がなされ<sup>7)</sup>, 従来研究の限界が指摘されている。このことは, ACL 損傷者に共通する潜在的特徴や, それをスクリーニングするのに適した指標を探索する余地が, まだ多く残されていることを示している。

近年我々は, 床反力データから算出した動的バランス評価指標群を提案し<sup>14)</sup>, 全身的な動的姿勢制御能の定量化を目指してきた。床反力は体重心 (Center of mass; CoM) の加速度に比例した, 全身にわたる質量分布の慣性挙動を集約的に含有する物理量である<sup>15)</sup>。そのため, 興味深いことに, 特定の動的バランス評価指標は, 姿勢特性の個人特性 (subject-specificity) を強く反映することが分かっている<sup>14)</sup>。この性質を利用すると, ACL 損傷者に共通する姿勢制御特性の把握や, それを用いたリスク保有者のスクリーニングへの応用が期待できる。

本研究では, 大学女子ハンドボール選手を対象とした 2 年間の調査期間中に ACL 損傷を負った選手の 1) 着地に際する衝撃緩衝特性, および 2) 着地後の姿勢動揺特性, 以上 2 つの動的バランス

\*1 大阪大学大学院医学系研究科健康スポーツ科学講座

\*2 武庫川女子大学健康・スポーツ科学部

\*3 大阪大学医学部附属病院リハビリテーション部

\*4 大阪保健医療大学保健医療学部

\*5 大阪府立大学総合リハビリテーション学類

表 1 各群の身体特性についての平均値と標準偏差

	人数	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
対照群	16名	20.5±1.3	164.1±7.0	58.8±5.5
ACL 損傷群	6名	20.3±1.2	161.3±6.5	58.3±6.4

※対照群と ACL 損傷群の間に有意差はなし

評価指標に注目し、ACL 損傷をきたさなかった選手との比較を通じて、ACL 損傷の潜在的リスクを考察することを目的とした。

## 方法

### 1. 対象と調査期間

過去 6 ヶ月に下肢に整形外科的外傷の無い女性 22 名を対象とした。対象は練習時間やトレーニング負荷を統制するため同一大学のハンドボール部から選抜した。武庫川女子大学研究倫理委員会が承認した研究計画に基づき、全ての対象者へ対面で説明を行い、文書による同意を得た。データ測定は 2014 年 1 月から 2 月にかけて行われ、2016 年 3 月 31 日まで ACL 損傷の発生を前向きに調査した。調査期間中、非接触型 ACL 損傷を負った 6 名を ACL 損傷群とし、その他を対照群とした (表 1)。ACL 損傷群は鏡視下にて ACL 損傷を確認した。データ測定から受傷までの平均日数は  $360.1 \pm 283$  日であり、最短で 43 日、最長で 470 日であった。受傷側は左が 5 名、右が 1 名であった。受傷機転はシュート後の片脚着地が 3 名、ボールキャッチ後の片脚着地が 1 名、切り返し動作が 2 名であった。

### 2. 実験

対象者の服装は黒のスパッツとタイトシャツとした。シューズは普段の練習で使用しているハンドボールシューズを着用した。実験に先立ち、ストレッチとバイクで 5 分間のウォーミングアップを行った。

動作課題は片脚ドロップ着地テストとした<sup>16)</sup>。対象者には高さ 20 センチの台から片脚で前方にジャンプし、台の前に設置した床反力計の中央部に同脚で着地後、5 秒間の片脚立位を保持させた。また、ジャンプ着地の際、両手を胸の前で腕組みさせた。着地開始の合図は我々が開発した動的バランス評価アプリケーション Ver 1.2.5.1 (テクノロジーサービス社製) の音声ガイダンスによって行った。試行の繰り返し回数は左右脚ともに 20

回とし試行間は 8 秒間のインターバルを確保した。着地時の床反力は床反力センサ (Type 9281B, Kistler, Switzerland) で計測した。床反力センサから出力された電圧信号をアンプ (Type 9865E1Y28, Kistler, Switzerland) で増幅し、A/D 変換器 (NI-USB6218BNC, National Instruments, US) にてサンプリング周波数 1000Hz でデジタル化した。

着地後 5 秒間の片脚立位が保てず床反力センサから降りた試技、立位保持のため着地後に足をずらして支持基底面を移動させた試技、腕組みを外した試技は以降のデータ解析から削除した。なお、削除した試技を補填するための再試行は行わなかった。

### 3. 解析

床反力データは 3 成分ともバターワース型デジタルフィルタ (ゼロタイムシフト、ローパス、遮断周波数 15Hz) でノイズ除去した後、鉛直成分  $> 4$  N を接地瞬間として、以降の 5 秒分を切り出した。同床反力データを用いて足圧中心 (COP) 点を算出した。床反力データからは、過去に我々が提案した動的バランス指標群<sup>14)</sup>の中から接地瞬間の衝撃特性を定量する衝撃緩衝係数 (床反力鉛直成分ピーク値/同出現時間、体重で正規化、 $[N/ms/kg]$ ) を算出した。また、COP データからは、姿勢動揺の大きさを定量する着地後 20 ミリ秒~5 秒区間の COP 軌跡長 (COP 20ms-5s、足長で正規化、 $[%]$ ) を算出した。

### 4. 統計処理

#### a. 衝撃緩衝係数および COP 20ms-5s の平均値の群間差

衝撃緩衝係数は ACL 損傷群内のデータ分布が高値 2 名と低値 4 名に明確に別れた。これは ACL 損傷群内でも異なる衝撃緩衝特性が存在することを示唆し、これらを同一に解析することに疑念が生じた。そのため、高値 2 名、低値 4 名、対照群の 3 グループ間で、衝撃緩衝係数と COP 20ms-5s の平均値の差を検討した (繰り返しのある一元

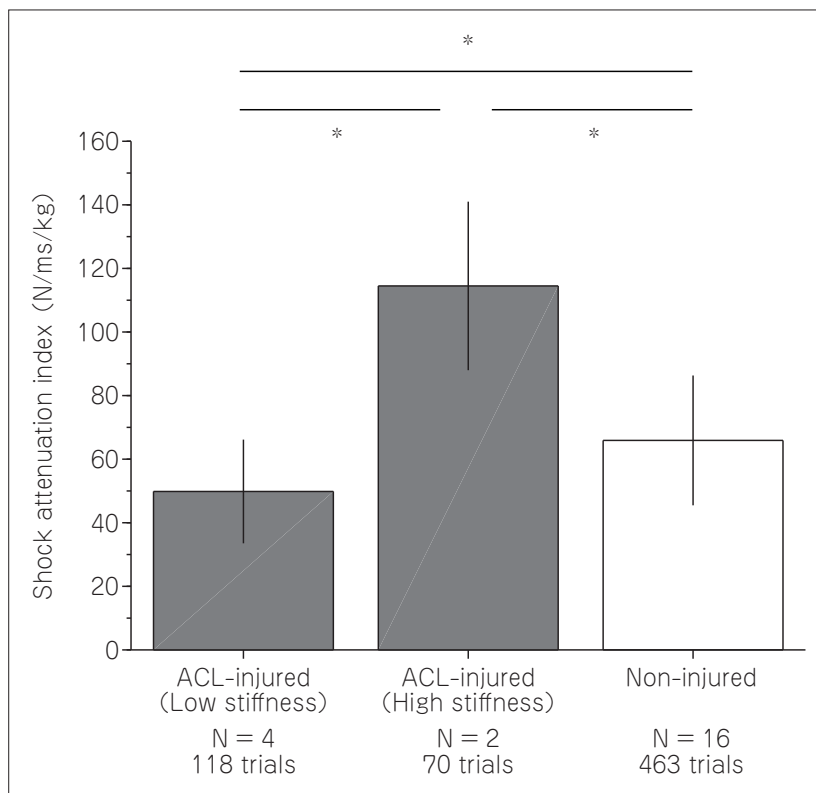


図1 衝撃緩衝係数の平均値の比較

ACL 損傷群の衝撃緩衝係数の高値 2 名は、ACL 損傷群の低値 4 名および対照群に比べて衝撃緩衝係数が有意に高かった ( $p < 0.01$ )。また、ACL 損傷群の衝撃緩衝係数低値 4 名の平均値は対照群に比べても有意に低い結果となった ( $p < 0.01$ )。

配置の分散分析, Tukey HSD 法, 危険率 5% 未満)。

### b. ACL 損傷群と対照群の統計的分離

線形判別分析を用いて ACL 損傷群および対照群の統計的な分離を試みた。今回の線形判別分析は、COP 20ms-5s を縦軸に、衝撃緩衝係数を横軸にとって全試技分を散布し、ACL 損傷群と対照群の間の分散比 (= 群間分散/群内分散) が最大になるよう最適化した判別ラインがどれほど正確に ACL 損傷群と対照群の試技を分離したかを評価するものである<sup>17)</sup>。判別精度は、誤判別率 (= 誤判別試技数/全試技数\*100) で評価した。誤判別率が低いほど判別が高精度であったことを表す。

## 結 果

図 1 には衝撃緩衝係数の 3 群間の平均値 ± 標準偏差を示した。ACL 損傷群の中の衝撃緩衝係数高値 2 名が最も高く、ついで対照群、ACL 損傷群で衝撃緩衝係数が低値 4 名の順であった。いずれの群間にも有意差が存在した ( $p < 0.01$ )。

図 2 は COP 20ms-5s の平均値の群間比較である。衝撃緩衝係数同様にいずれの群間にも有意差が存在した。ACL 損傷群の 2 グループはいずれも、接地後 5 秒までの COP 軌跡長が対照群に比べて有意に短い結果となった ( $p < 0.01$ )。

図 3 は衝撃緩衝係数高値 2 名と対照群の線形判別分析の結果を示す。誤判別率は 9.36% であり、高精度な判別であった。対照群と誤認識された ACL 損傷群のデータは 7 個に対し、ACL 損傷群と誤認識された対照群のデータは 40 個であった。図 4 は衝撃緩衝係数低値 4 名と対照群の線形判別分析の結果である。誤判別率は 25.6% であり、高値 2 名と対照群との判別に比べて若干精度は低かった。対照群と誤認識された ACL 損傷群のデータは 14 個に対し、ACL 損傷群と誤認識された対照群のデータは 126 個であった。なお、ACL 損傷群については個人内のデータのばらつきを示すため COP 20ms-5s および衝撃緩衝係数の平均値と標準偏差を表 2 に示した。

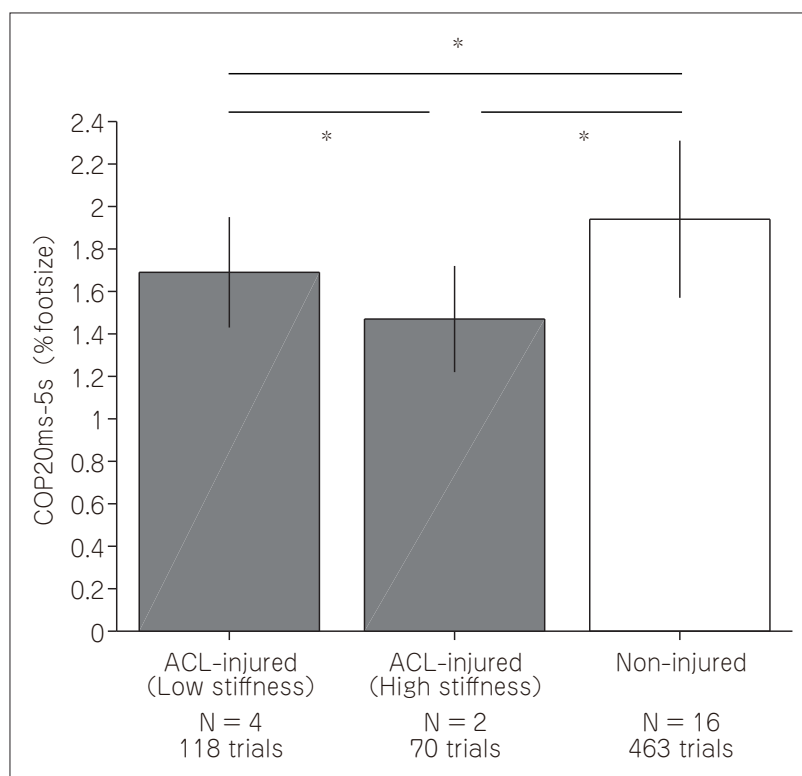


図2 COP20ms-5sの平均値の比較

ACL 損傷群は、衝撃緩衝係数の高値 2 名、低値 4 名とも、対照群に比べて COP20ms-5s が有意に小さかった ( $p < 0.01$ )。また、ACL 損傷群内でも、衝撃緩衝係数が高値 2 名が低値 4 名に比べて COP20ms-5s が有意に短かった ( $p < 0.01$ )。

## 考 察

### 1. ACL 損傷群に見られた衝撃緩衝特性

本研究の目的は、ACL 損傷者に共通する動的バランス特性から、ACL 損傷の潜在的なリスクを検討することであった。衝撃緩衝係数では ACL 損傷群は対照群を挟んで、高値 (2 名) と低値 (4 名) に明確に分かれた。衝撃緩衝係数は鉛直床反力ピーク値をその出現時間で除したもので、スティフ着地であるほど高値を示す。着地衝撃に備えた下肢スティフネスの調整は接地前から予測的になされるが<sup>18)</sup>、今回の結果から、下肢スティフネス制御が適度であったか否かが ACL 損傷群と対照群が分離する要因となったと考えられる。

対照群と明確に分離できた ACL 損傷者 2 名の衝撃緩衝係数が高値であった理由として、1) 着地に際し必要な下肢スティフネスを過大予測したこと、2) 骨や靭帯といった筋よりも硬い組織による構造的な安定に依存したこと、の両方の貢献が考えられる。今回の結果は、床反力鉛直成分の緩衝

能低下が ACL 損傷リスクであるとの指摘<sup>19, 20)</sup>や、床反力鉛直成分が十分に緩衝されない場合は ACL 損傷をきたすほど関節間力 (軸圧) を高め得るという<sup>21-23)</sup> 先行主張を支持するものであり、過度なスティフ着地は ACL 損傷の潜在的リスクであるという従来の考えがより強調されたと考える。

一方、衝撃緩衝係数が低値であった 4 名については、1) 着地に際し必要な下肢スティフネスを過小予測したこと、2) 下肢スティフネスの高まりを着地タイミングに一致できなかったこと、および 3) 十分な筋トルクを生むための基礎筋力に乏しかった可能性が考えられる。しかし今回の対象は日頃から高負荷なトレーニングを継続していたことから、1, 2) に挙げた神経筋制御性の寄与が大きく 3) 筋力不足の貢献は低いと推察される。この 4 名の衝撃緩衝係数は対照群の中央値からかなり低値に偏っており (図 3 下ヒストグラム)、ソフト着地と言うよりも、むしろスティフネス不足な着地であったと考えられる。スティフネス不足が

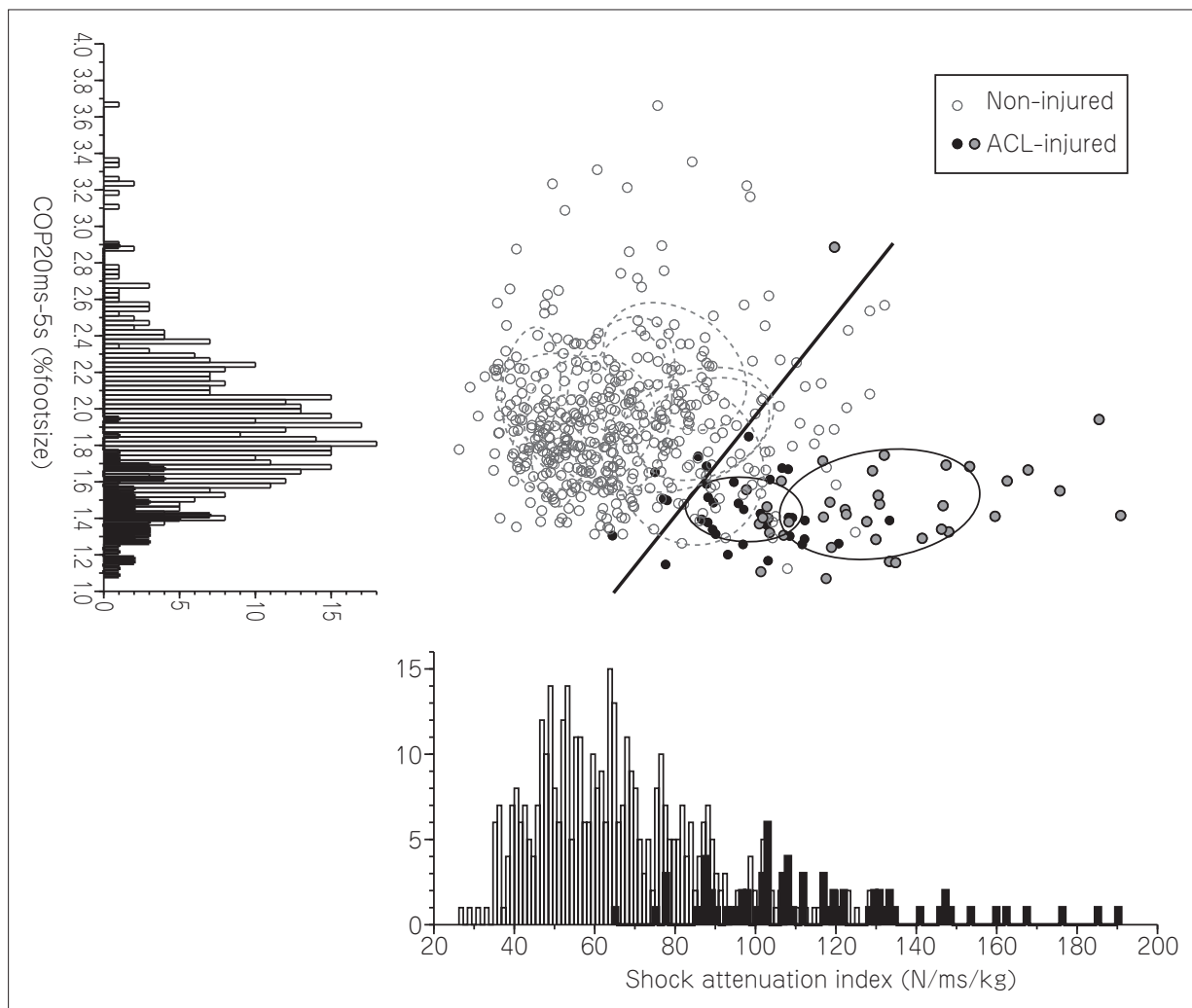


図3 衝撃緩衝係数高値2名と対照群の線形判別分析による試技の判別  
 ACL 損傷群のうち高い衝撃緩衝係数を示した2名と対照群の試技の誤判別率は9.36%と高精度な判別であった。対照群と誤認識されたACL 損傷群のデータは7個に対し、ACL 損傷群と誤認識された対照群のデータは40個であった。

ACL 損傷リスクであると述べた報告はこれまで見当たらないため、そのような特徴を有する ACL 損傷者を対照群と識別できたことは、ACL 損傷のリスク保持者を予測する上での新規な注目点と見なせる。一方で、スティフネスが不十分な着地では筋の動的関節安定作用が機能せず、従来から危険視される膝の内側偏位<sup>13)</sup>や下肢全体の振動的な不良キネマティクスに繋がることは容易に推察される。今後床反力データに含まれる上位関節の振動的振る舞いを反映した成分を評価することで、より精度の高い ACL 損傷群判別が期待される。

2. 着地後の姿勢動揺からの考察

姿勢動揺を定量する COP 20ms-5s は ACL 損傷群が対照群に比べて有意に短かった(図2)。この背景には、対照群は着地に適した下肢スティフネスで安定した姿勢ゆらぎの中で平衡していたのに

対し、ACL 損傷群は関節を剛直にして自由度を下げたり、着地衝撃を過度に緩衝したりして本来許容される姿勢動揺を制限したためと考えられるが、これは現段階で推察の域を出ない。

COP 20ms-5s は群間で有意に異なっていたものの、図3、4で示すとおり、ヒストグラムの裾野は大きく重複しており、線形判別分析での誤判別率増にもつながった。そのため COP 軌跡長は衝撃緩衝係数ほど ACL 損傷リスクの表出には適さない指標であったと考えられる。その理由として、COP 軌跡長は COP 位置の時間変化を無視した空間指標であるため、姿勢協調のダイナミクス(時間発展特性)を反映しにくい。今後、姿勢のダイナミクスを表出するのにより適した指標を探索し、現状よりも高精度な分離ができないかを検討する必要がある。

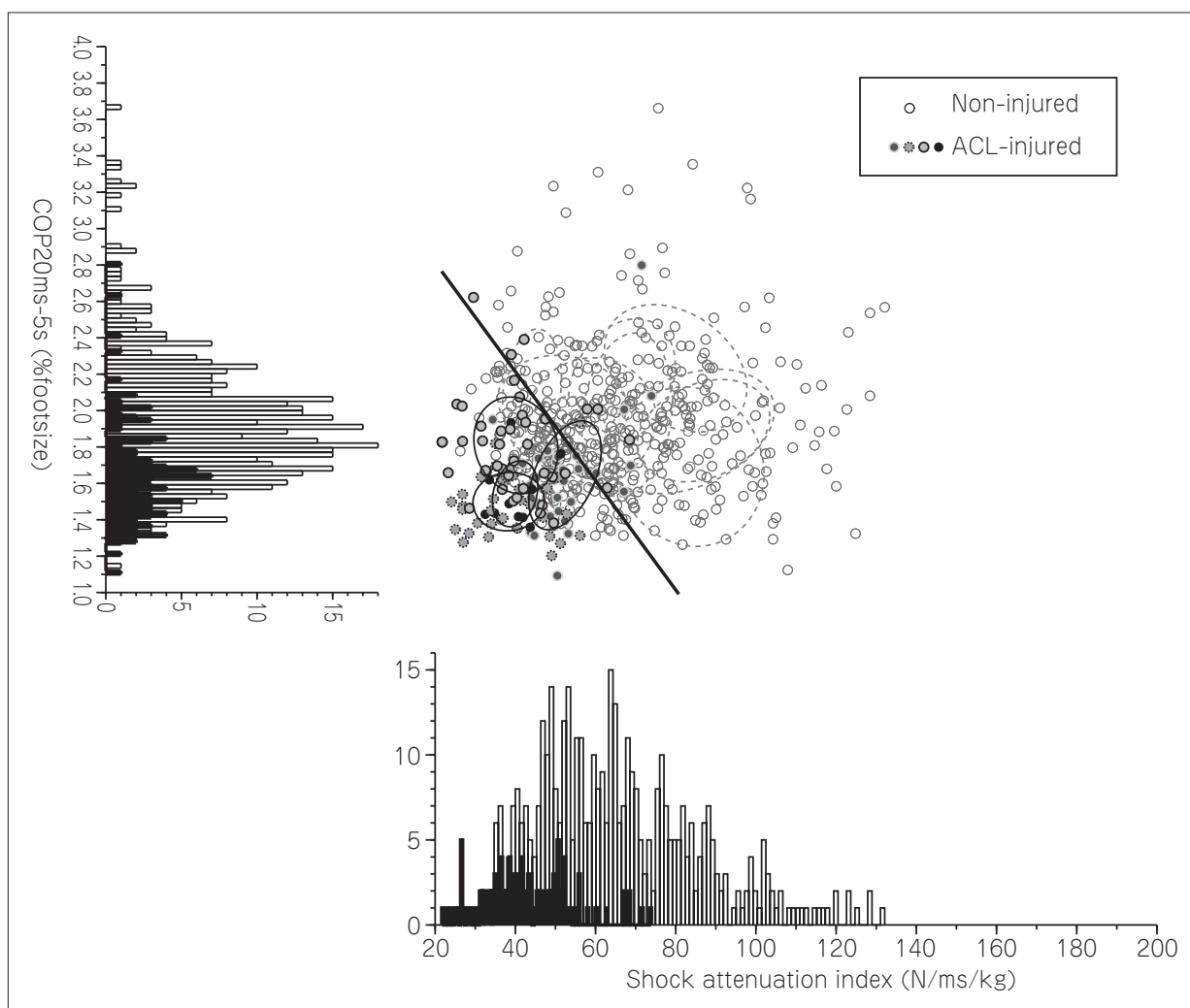


図4 衝撃緩衝係数低値4名と対照群の線形判別分析による試技の判別  
ACL 損傷群のうち低い衝撃緩衝係数を示した4名と対照群の試技の誤判別率は25.6%であった。対照群と誤認識されたACL 損傷群のデータは14個に対し、ACL 損傷群と誤認識された対照群のデータは126個であった。

表2 ACL 損傷群の各対象における指標の平均値と標準偏差

		COP20ms-5s (%)	衝撃緩衝係数 (N/ms/kg)
ハード群	ACL1	1.5±0.2	130.9±14.7
	ACL2	1.5±0.3	97.1±25.1
ソフト群	ACL3	1.8±0.3	40.1±10.6
	ACL4	1.5±0.1	38.3±8.9
	ACL5	1.7±0.3	52.4±9.1
	ACL6	1.5±0.2	39.9±5.7

### 3. 本研究の限界と臨床への示唆

本研究ではトレーニング量や練習時間を統制するため1チームに限定した調査であったため対象数が極めて少なかった。また、今回、性差による影響を排除するため、女性選手に対象を限定した。これら2つの理由から、今回の結果を一般化するには議論の余地が残される。よって、今

後は男性選手を含めたより大サンプルの研究によって知見を蓄積する必要がある。床反力に注目したテストは、モーションキャプチャのような解析に手間取るシステムに比べ現場利便性は高い。床反力でACL 損傷に関連する全身姿勢挙動を把握することで従来モーションキャプチャが定量してきた局所的挙動(膝外反角度や外反モーメント)

とは異なる視点でのリスク表出が期待される。

## 結 論

本研究では ACL 損傷者に共通する動的バランス特性から, ACL 損傷の潜在的なリスクを検討した。片脚トロップ着地時の床反力データから衝撃緩衝係数と COP 20ms-5s を評価したところ, 後に非接触型 ACL 損傷を負った対象は, 着地時の下肢スティフネスが極端に高いか, もしくはスティフネス不足である特徴が見られ, また着地後の姿勢動揺は対照群と比べて有意に小さかった。これら ACL 損傷発生前に観察され, かつ ACL 損傷群と対照群を高精度に判別する指標群を同定することで将来的な非接触型 ACL 損傷の予測精度の向上が期待される。

### 利益相反

小笠原一生, 中田研; 研究費・助成金など (プロテア・ジャパン株式会社)

## 文 献

- 1) Olsen, O-E, Myklebust, G, Engebretsen, L et al. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med.* 2004; 32(4): 1002-1012.
- 2) Agel, J, Arendt, EA, Bershadsky, B. Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review. *Am J Sports Med.* 2005; 33(4): 524-530.
- 3) Arendt, E, Dick, R. Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med.* 1995; 23(6): 694-701.
- 4) 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(3): 359-367.
- 5) Zeller, BL, McCrory, JL, Kibler, WB et al. Differences in kinematics and electromyographic activity between men and women during the single-legged squat. *Am J Sports Med.* 2003; 31(3): 449-456.
- 6) 小笠原一生, 宮永 豊, 白木 仁ほか. 片脚着地時に見られた下肢 kinematics の性差. *体力科学.* 2006; 55(4): 403-411.
- 7) Krosshaug, T, Steffen, K, Kristianslund, E et al.

The vertical drop jump is a poor screening test for ACL injuries in female elite soccer and handball players: A prospective cohort study of 710 athletes. *Am J Sports Med.* 2016; 44(4): 874-883.

- 8) 小笠原一生, 古賀英之, 中前敦雄ほか. ビデオ解析による非接触型前十字靭帯および内側副靭帯損傷時の膝モーメント推定と受傷メカニズムの物理的考察. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2013; 21(1): 131-142.
- 9) Sigward, SM, Powers, CM. Loading characteristics of females exhibiting excessive valgus moments during cutting. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2007; 22(7): 827-833.
- 10) 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(3): 271-274.
- 11) Yeow, CH, Lee, PVS, Goh, JCH. Direct contribution of axial impact compressive load to anterior tibial load during simulated ski landing impact. *J Biomech.* 2010; 43(2): 242-247.
- 12) Markolf, KL, Burchfield, DM, Shapiro, MM et al. Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *J Orthop Res.* 1995; 13(6): 930-935.
- 13) Hewett, TE, Myer, GD, Ford, KR et al. 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.* 2005; 33(4): 492-501.
- 14) 小笠原一生, 木村佳記, 佐藤陸美ほか. 新規な動的バランス評価指標の開発とその個人特異性に関する研究. *日本臨床バイオメカニクス学会誌.* 2016; 37: 311-318.
- 15) Ren, L, Jones, RK, Howard, D. Whole body inverse dynamics over a complete gait cycle based only on measured kinematics. *J Biomech.* 2008; 41(12): 2750-2759.
- 16) 杉山恭二, 木村佳記, 佐藤陸美ほか. 動的バランス評価方法の提案: 片脚 drop jump 着地動作における重心動揺総軌跡長の再現性. *スポーツ傷害.* 2012; 17: 40-42.
- 17) 中村永友. In: 金 明哲(編). 多次元データ解析法初版, 東京: 共立出版; 53-78, 2009.

- 18) Horita, T, Komi, PV, Nicol, C et al. Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: implications to performance. *Eur J Appl Physiol.* 2002; 88(1-2): 76-84.
- 19) 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(2): 252-259.
- 20) Podraza, JT, White, SC. Effect of knee flexion angle on ground reaction forces, knee moments and muscle co-contraction during an impact-like deceleration landing: implications for the non-contact mechanism of ACL injury. *Knee.* 2010; 17(4): 291-295.
- 21) Malinzak, RA, Colby, SM, Kirkendall, DT et al. A comparison of knee joint motion patterns between men and women in selected athletic tasks. *Clin Biomech.* 2001; 16(5): 438-445.
- 22) Chappell, JD, Yu, B, Kirkendall, DT et al. A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *Am J Sports Med.* 2002; 30(2): 261-267.
- 23) Madigan, ML, Pidcoe, PE. Changes in landing biomechanics during a fatiguing landing activity. *J Electromyogr Kinesiol.* 2003; 13(5): 491-498.

---

(受付：2016年12月16日，受理：2017年4月11日)

## Identification of potential risk for non-contact anterior cruciate ligament injury based on postural strategy during single-leg landing

Ogasawara, I.<sup>\*1</sup>, Koyanagi, Y.<sup>\*2</sup>, Kimura, Y.<sup>\*3</sup>, Sugiyama, K.<sup>\*3</sup>  
Sato, M.<sup>\*4</sup>, Kawakami, Y.<sup>\*5</sup>, Nakata, K.<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Health and Sports Sciences, Graduate School of Medicine, Osaka University

<sup>\*2</sup> Department of Health and Sports Sciences, Mukogawa Women's University

<sup>\*3</sup> Department of Rehabilitation, Osaka University Hospital

<sup>\*4</sup> Department of Rehabilitation Science, Osaka Health Science University

<sup>\*5</sup> School of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture University

**Key words:** non-contact ACL injury, postural control, risk identification

**[Abstract]** To identify the potential risk of non-contact anterior cruciate ligament (ACL) injury, we conducted a single-leg landing experiment and compared dynamic balance indices, e.g., 1) shock attenuation index, which quantifies leg stiffness regulation of the landing impact, and 2) center of pressure trajectory length, which represents postural sway amount, between 6 ACL-injured and 16 non-injured female athletes. These indices were all calculated from the ground reaction force (GRF) data measured before sustaining ACL injury, assuming that the postural characteristics of the 6 ACL-injured subjects were innate. Interestingly, the shock attenuation index of ACL-injured athletes was distributed into either high or low values, while the index of non-injured athletes distributed in the middle. Linear discrimination analysis distinguished ACL-injured athletes from non-injured athletes with a 9.36% error rate in the high leg stiffness group and with a 25.6% error rate in the low leg stiffness group, respectively, suggesting that the population with too rigid or too fragile stiffness regulation may be at risk of ACL injury. The amount of postural sway, quantified by the center of pressure trajectory length, was significantly smaller in the ACL-injured athletes than the non-injured athletes. This suggested that restricted postural sway, which may limit flexible postural control, could also be a potential risk for ACL injury.