

## 片脚着地動作における膝関節外反運動と衝撃吸収能力の関連

千葉 諭<sup>[1]</sup>

[1] 植草学園大学保健医療学部

要旨：膝関節外反は、膝関節前十字靭帯損傷のリスクを高める肢位として知られている。また、着地動作においては、下肢による衝撃緩衝能力が重要である。そこで本研究では、片脚着地動作時に生じる膝関節外反運動と下肢の衝撃吸収能力の関連について明らかにすることを目的とした。対象は健常男子大学生16名とし、課題動作は45cm台からの片脚着地とした。着地時の床反力データより衝撃緩衝係数を算出し、下肢の角度変化量との関連性について検討した。結果、衝撃緩衝係数と膝関節外反 ( $r_s = 0.54$ ,  $p < 0.01$ , 95% CI: 0.30 ~ 0.71), 膝関節屈曲 ( $r_s = -0.62$ ,  $p < 0.01$ , 95% CI: -0.77 ~ -0.41), 骨盤前傾 ( $r_s = 0.32$ ,  $p < 0.05$ , 95% CI: 0.04 ~ 0.55) との間にそれぞれ相関がみられた。さらに、膝関節外反と骨盤前傾 ( $r_s = 0.32$ ,  $p < 0.05$ , 95% CI: 0.04 ~ 0.55), 膝関節屈曲 ( $r_s = -0.30$ ,  $p < 0.05$ , 95% CI: -0.55 ~ -0.04) との間にそれぞれ相関がみられた。このことから、着地直前における大腿直筋の過剰な筋活動が下肢のスティフネスを高め、膝関節外反運動を引き起こしていた可能性が考えられた。そのため、衝撃吸収を意識した着地動作を習得することで膝関節外反運動を予防できる可能性が示唆された。

キーワード：着地動作, 膝関節外反, 衝撃緩衝, 外傷予防

### 1. はじめに

スポーツにおける損傷部位は、上肢や体幹と比較し、下肢の損傷が占める割合が大きい<sup>1-3)</sup>。その中でも特に、膝関節における損傷が多いと報告されている<sup>2,3)</sup>。膝関節におけるスポーツ損傷は、前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament; 以下 ACL) 損傷, 内側側副靭帯 (Medial Collateral Ligament; 以下 MCL) 損傷, 半月板損傷の順に多くみられる<sup>2,3)</sup>。中でも、ACL 損傷は、受傷から競技復帰までに6～10ヶ月程度を要し<sup>4,5)</sup>、競技から長期間の離脱を余儀なくされるため、スポーツ選手にとって重大な損傷であると言える。

ACL 損傷の多くは、ジャンプ着地や切り返しなど、急激な減速を伴う動作で発生するとされる<sup>6-10)</sup>。そのうち約70%が他者との接触なく生じる非接触型の損傷である<sup>7,11,12)</sup> ことより、下肢のマルアライメントとの関連が深い。特に、膝関節軽度屈曲位において膝関節外反を呈した、Knee-In & Toe-Out と

呼ばれるアライメントは ACL 損傷のリスクとして知られている<sup>13-18)</sup>。川野<sup>19)</sup> は、マルアライメントを回避するための動作を獲得することが、ACL 損傷の予防に重要であると指摘している。

着地動作は、体重よりも大きな床反力を受ける動作であるため、下肢での衝撃緩衝能力が重要とされる。床反力データから見た ACL 損傷リスクとして、床反力鉛直方向成分の緩衝能力低下が ACL 損傷リスクであるとの報告<sup>13,20)</sup> や、床反力の鉛直方向成分が十分に緩衝されない場合は、ACL 損傷を生じるほどにまで関節間力 (軸圧) を高め得るという報告<sup>21-23)</sup> がある。しかし、衝撃緩衝能力と、動作中に呈する膝関節のダイナミックアライメント不良との関連については未だ十分な知見が得られているとは言い難い。

そこで本研究では、片脚着地動作時に生じる膝関節外反運動と下肢の衝撃吸収能力の関連について明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1 対象

U 大学に在籍する、体幹および下肢に運動器疾患がない健常成人男性 16 名を対象とした。平均年齢は  $21.3 \pm 0.7$  歳 (平均  $\pm$  標準偏差), 平均身長および平均体重はそれぞれ  $171.6 \pm 6.3$ cm,  $60.7 \pm 5.8$ kg であった。

### 2.2 倫理的配慮

本研究は、植草学園大学研究倫理委員会の承認(第 15-04 号)を得て実施した。対象者全員に対し、事前に本研究の目的および研究方法を口頭と書面にて説明し、本人の意思により本研究に参加する旨の同意書を得た。

### 2.3 課題動作

Shimokochi らの先行研究<sup>24)</sup>に基づき、課題動作は高さ 45cm の台上から 30cm 前方へ、利き足である右下肢で着地することとした。片脚着地の動作は、Blackburn らの方法<sup>25,26)</sup>に基づいたものとした。対象者は左下肢の足先を台の前縁に合わせて立ち、測定肢である右下肢は膝関節伸展位にて台上から外し、前方に保持した。次に、上方へ跳び上がらないよう、前下方に位置する床反力計上に着地した。

上肢によるバランス保持の影響を少なくするため、また骨盤上の皮膚に貼付した赤外線反射マーカーが上肢により見えなくなることを防ぐため、両上肢は胸の前で交差させた。また、脊柱による影響を少なくするため、着地動作中の脊柱は、床面に対してなるべく垂直に保持するよう指示した。

事前に数回練習を行ったのち、計測を行った。着地後に 3 秒間、安定した姿勢を保持できた試技を成功とし、成功試技を 3 回行った時点で測定終了とした。

### 2.4 床反力の計測および解析

床反力の計測には床反力計 (BP400600 Force Plate ; AMTI 社製) を使用し、サンプリング周波数は 100Hz とした。

床反力の鉛直方向成分 ( $F_z$ ) が 10N を超えた時点に着地とした<sup>25,26)</sup>。また、 $F_z$  の最大値を  $F_{z_{max}}$  とし、接地から  $F_{z_{max}}$  が生じるまでの所要時間を  $t_z$  とした。

小笠原ら<sup>27)</sup>の提案する指標に基づき、 $F_{z_{max}}$  と  $t_z$  より、 $F_z$  の平均増加率  $F_{z_{max}}/t_z$  を求めた。さらに、体重で正規化し、衝撃緩衝係数 [N/s/kg] とした。

### 2.5 関節角度の計測および解析

片脚着地動作中の関節角度計測には、三次元動作解析装置 (VICON NEXUS; Vicon Motion system 社製) および赤外線カメラ (VICON MX 13 および VICON MX T10 ; Vicon Motion system 社製) 11 台を使用し、サンプリング周波数は 100Hz で計測を行った。なお、三次元動作解析装置は床反力計と同期させた。

直径 12mm の赤外線反射マーカーを、Vicon Motion system 社が提唱する Plug-In-Gait 下肢モデルに準じ、両側の上前腸骨棘 (Anterior Superior Iliac Spine ; 以下 ASIS), 上後腸骨棘 (Posterior Superior Iliac Spine ; 以下 PSIS), 大腿外側中央部, 膝関節外側関節裂隙, 下腿外側中央部, 外果, 踵骨背側面中央, 第 2 中足骨頭の 16 点に貼付した。また、マーカー貼付による測定誤差を最小限にするため、赤外線反射マーカーの貼付は全ての対象者に対して同一の検査者が行った。

赤外線反射マーカーの軌跡より、6Hz のカットオフ周波数で low-pass Butterworth デジタルフィルターを通してフィルター処理を行った後、空間における三次元座標値を算出した。算出した三次元座標値より、骨盤・大腿・下腿のセグメントを算出し、それぞれがなす角より骨盤・股関節・膝関節の角度を求めた。骨盤は前傾方向, 左傾斜方向, 左回旋方向をそれぞれ + と表記した。股関節は屈曲方向, 外転方向, 外旋方向をそれぞれ + と表記した。膝関節は屈曲方向, 外反方向, 外旋方向をそれぞれ + と表記した。

接地時点と  $t_z$  時点での関節角度を算出し、接地から  $t_z$  までの角度変化量を求めた。

### 2.6 統計処理

基本統計量は平均値  $\pm$  標準偏差で示した。統計処理には SPSS Statistics 20 (IBM 社製) を用い、いずれの検定も有意水準は危険率 5% 未満とした。衝撃緩衝係数と各関節の角度変化との相関分析に先立ち、Shapiro-Wilk 検定にて各変数の正規性を確認したところ、一部の変数において有意な正規分布が確認されなかった。よって、相関分析には Spearman の順位相関係数を用いた。

### 3. 結果

$t_z$ の平均は  $62.3 \pm 13.1$ ms (40～90ms)であった。衝撃緩衝係数  $Fz_{\max}/t_z$ の平均は  $5494.8 \pm 2021.4$  N/s/kgであった。衝撃緩衝係数  $Fz_{\max}/t_z$ と膝関節外反角度変化量との間に正の相関 ( $r_s = 0.54$ ,  $p < 0.01$ , 95% CI : 0.30～0.71)がみられた(図1)。また、衝撃緩衝係数  $Fz_{\max}/t_z$ と膝関節屈曲角度変化量との間に負の相関 ( $r_s = -0.62$ ,  $p < 0.01$ , 95% CI :

$-0.77 \sim -0.41$ )がみられ(図2)、衝撃緩衝係数  $Fz_{\max}/t_z$ と骨盤前傾角度変化量との間に正の相関 ( $r_s = 0.32$ ,  $p < 0.05$ , 95% CI : 0.04～0.55)がみられた(図3)。さらに、膝関節外反角度変化量と骨盤前傾角度変化量との間に正の相関 ( $r_s = 0.32$ ,  $p < 0.05$ , 95% CI : 0.04～0.55)がみられ(図4)、膝関節外反角度変化量と膝関節屈曲角度変化量との間に負の相関 ( $r_s = -0.30$ ,  $p < 0.05$ , 95% CI :  $-0.55 \sim -0.04$ )がみられた(図5)。

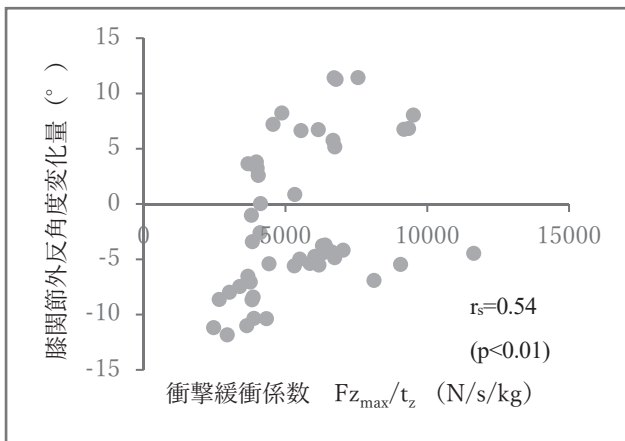


図1 衝撃緩衝係数と膝関節外反角度変化量の関係

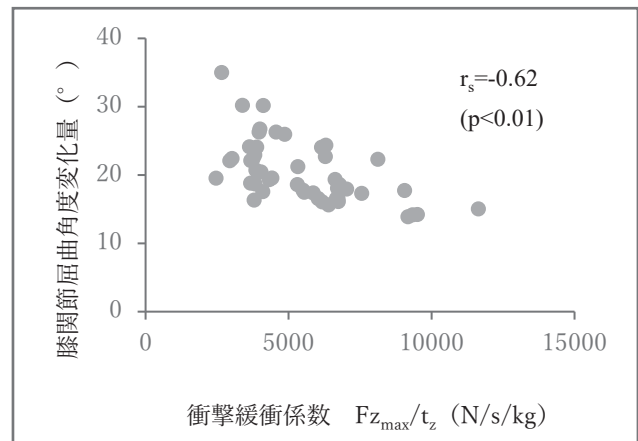


図2 衝撃緩衝係数と膝関節屈曲角度変化量の関係

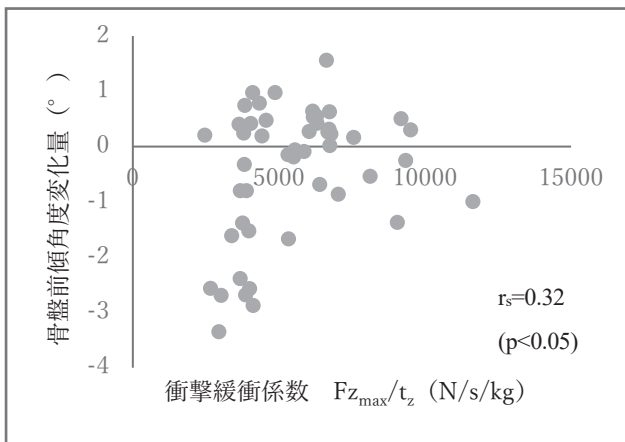


図3 衝撃緩衝係数と骨盤前傾角度変化量の関係

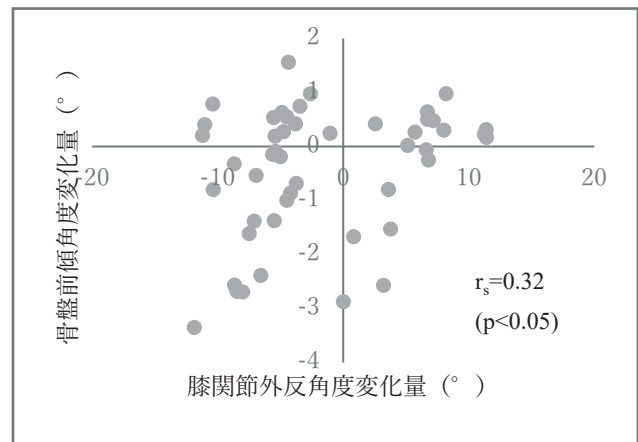


図4 膝関節外反角度変化量と骨盤前傾角度変化量の関係

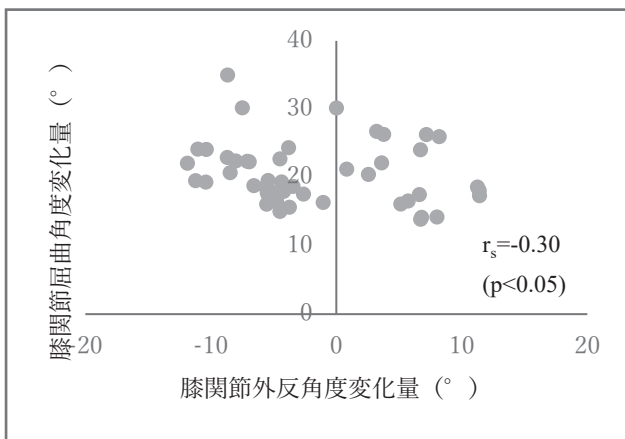


図5 膝関節外反角度変化量と膝関節屈曲角度変化量の関係

#### 4. 考察

本研究の結果では、衝撃緩衝係数と膝関節外反角度変化量及び骨盤前傾角度変化量との間に正の相関がみられ、膝関節屈曲角度変化量との間に負の相関がみられた。衝撃緩衝係数は、床反力の鉛直方向成分の最大値  $F_{zmax}$  をその出現時間  $t_z$  で除し、単位時間当たりの変化率を求めたもの<sup>27)</sup> であるため、値が小さいほど衝撃吸収性が良く、値が大きいほど強い衝撃が加わったとされる<sup>28)</sup>。すなわち、本研究の結果は、衝撃が強い着地動作において、膝関節外反角度変化量と骨盤前傾角度変化量が大きくなり、膝関節屈曲角度変化量が小さくなるということを示している。

また、 $F_{zmax}$  は接地後 40 ~ 80ms 後に生じていた。接地後 100ms 以内ではヒトの知覚と運動系のフィードバックによる制御では間に合わず、着地前からのフィードフォワードによる制御が要求される<sup>18)</sup> ため、着地に際し必要な下肢スティフネスを過大予測することで衝撃緩衝係数が高い着地動作になると報告されている<sup>29)</sup>。本研究の対象者において、衝撃緩衝係数が高く、衝撃の大きい着地をした対象者の膝関節屈曲角度変化量が小さかったことより、着地直前に膝関節伸展作用を持つ大腿四頭筋が下肢スティフネスを高めることで膝関節位屈曲運動が阻害され、着地時の衝撃が大きくなった可能性が考えられる。併せて骨盤の前傾運動が生じていることより、大腿四頭筋の中でも大腿直筋の関与が考えられる。大腿直筋はその走行により、脛骨の内旋と膝関節の外反を生じるとされ<sup>30)</sup>、本研究においても着地動作時に膝関節屈曲運動が少ない対象者ほど膝関節外反運動が大きくなるという結果が得られた。これらのことより、着地後に大腿直筋がスティフネスを高めたことで膝関節屈曲運動が阻害され、さらに大腿直筋のリバースアクションにより骨盤前傾運動が誘発されることで下肢の下行性運動連鎖により膝関節外反運動が生じた可能性が考えられる。

我々は、着地動作において骨盤前傾運動と膝関節外反運動が関連しており、大殿筋を含む骨盤後傾筋群の筋活動により骨盤前傾運動が制動され、膝関節外反運動を制動できる可能性を指摘した<sup>31)</sup>。本研究においても、衝撃緩衝係数と骨盤前傾角度変化量

及び膝関節外反角度変化量との間にそれぞれ相関がみられ、さらに膝関節外反運動と骨盤前傾運動との間に相関がみられたことより、それらを支持する結果が得られた。

筋活動と膝関節外反との関連について、大殿筋は股関節の内旋を制動し<sup>32)</sup>、膝関節外反モーメントに抵抗する<sup>33)</sup> とされる。また、内側ハムストリングスは大腿四頭筋との同時収縮により、膝関節内側面にかかる圧力を増加させ、膝関節外反を制動するとされる<sup>15)</sup>。そのため、着地動作においては大殿筋やハムストリングスの筋張力を確保し、大腿直筋の筋張力を抑制することが重要である<sup>34)</sup> とされる。下肢の関節可動域は前額面上よりも矢状面上に大きいことから、着地動作時の衝撃緩衝は矢状面上の運動にて行われるべきであり、さらに、着地動作時に発生する衝撃は非常に大きいことから、膝関節のみならず、股関節や足関節といった下肢全体で衝撃緩衝が行われるべきであると考えられる。矢状面での衝撃緩衝作用が不十分な場合に前額面上での運動が生じている可能性があり、本研究の結果からも、着地動作において、大殿筋を含む骨盤後傾筋群による衝撃吸収を意識させることで、下肢全体の矢状面上での衝撃緩衝が作用しやすくなり、前額面上の運動である膝関節外反運動を抑制できる可能性が示唆された。

ただし、本研究の結果は以下のいくつかの観点を踏まえて解釈されるべきであると考えられる。第1に、本研究は相関関係について検討しており、因果関係については明らかとなっていないことが挙げられる。第2に、筋電図による記録を行っていないため、筋活動についての言及はあくまでも推測の域を出ないことである。第3に、脊柱による影響を少なくするため、脊柱を床面に対しなるべく垂直に保持するよう指示したが、それにより対象者の自然な着地動作が阻害された可能性がある点である。第4に、今回の対象者が若年男性のみであり、性差や年齢層による差については検討していない点が挙げられる。今後は介入を行うことで、因果関係についても解明すべきであると考えられる。

今回の研究より、衝撃緩衝係数が高い着地動作と膝関節外反運動の間に関連があることが明らかとなった。このことより、衝撃吸収を意識した着地動作を習得させるよう介入することで、膝関節外反運



動を制動できる可能性が示唆された。上記の課題についてさらなる検討を行う必要があるが、今回の研究手法および結果から一定の結論を導くことは、膝関節における損傷予防の一助になると考える。

## 謝辞

本研究の対象者として協力していただいた皆様から心から御礼申し上げます。

## 文献

- 1) Astrid J, Gijis L, Andrew P et al. Injuries in team sport tournaments during the 2004 olympic games. *Am J Sports Med.* 2006; 34: 565-576.
- 2) 岩増弘志, 内山英司, 平沼憲治他. スポーツ整形外科外来における外傷・障害の変遷—20年間の動向—. *臨床スポーツ医学.* 2005; 13: 402-408.
- 3) 高橋佐江子, 鈴木仁人, 河村真史他 (2010). スポーツ医科学センターリハビリテーション科におけるスポーツ損傷の疫学的研究—第1報—スポーツ損傷の全般的統計. *臨床スポーツ医学.* 2010; 18: 518-525.
- 4) 黒澤尚. *スポーツ外傷学IV下肢.* 東京: 医歯薬出版株式会社; 2001.
- 5) 鈴木仁人, 永野康治, 玉置龍也他. 中学生バスケットボール選手の着地動作における性差と下肢外傷予防プログラムの効果. *体力科学.* 2012; 61: 119-124.
- 6) Bere T, Florenes T W, Krosshaug T et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in world cup alpine skiing. *Am J Sports Med.* 2011; 39: 1421-1429.
- 7) Boden B P, Dean G S, Feagin, Jr J A et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics.* 2000; 23: 573-578.
- 8) Boden B P, Sheehan F T, Torg J S et al. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: mechanisms and risk factors. *J Am Acad Orthop Surg.* 2010; 18: 520-527.
- 9) 金子雅志, 大見頼一, 尹成祚他. 大腿骨前捻角が片脚着地時の膝外反角度に与える影響—二次元動作解析法を用いて—. *臨床スポーツ医学.* 2015; 23: 50-57.
- 10) Renstrom P, Ljungqvist A, Arendt E et al. Non-contact ACL injuries in female athletes: an International Olympic Committee current concepts statement. *Br J Sports Med.* 2008; 42: 394-412.
- 11) Agel J, Arendt E A, Bershadsky B. Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review. *Am J Sports Med.* 2005; 33: 524-530.
- 12) Griffin L Y, Agel J, Albohm M J et al. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: riskfactors and prevention strategies. *J Am Acad Orthop Surg.* 2000; 8: 141-150.
- 13) Boden B P, Torg J S, Knowles S B et al. Video analysis of anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2009; 37: 252-259.
- 14) Hewett T E, Myer G D, Ford K R et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes. *Am J Sports Med.* 2005; 33: 492-501.
- 15) 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. *Clin J Sport Med.* 2011; 21: 271-274.
- 16) Meyer E G, Haut R C. Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibiofemoral compression. *Journal of Biomechanics.* 2008; 41: 3377-3383.
- 17) 三木英之, 石毛勇介, 吉久武志他. 非接触型前十字靭帯損傷受傷場面の三次元動作解析. *臨床スポーツ医学.* 2002; 19: 1001-1006.
- 18) 小笠原一生, 古賀英之, 中前敦雄他. ビデオ解析による非接触型前十字靭帯および内側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. *臨床スポーツ医学.* 2013; 21: 131-142.
- 19) 川野哲英. *ファンクショナル・エクササイズ.* 東京: ブックハウス・エイチディ; 2004.
- 20) Podraza J T, White S C. 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: 291-295.
- 21) Malinzak R A, Colby S M, Kirkendall D T et al. A comparison of knee joint motion patterns between men

片脚着地動作における膝関節外反運動と衝撃吸収能力の関連

- and women in selected athletic tasks. *Clin Biomech.* 2001; 16: 438-445.
- 22) Chappell J D, Yu B, Kirkendall D T et al. a comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *Am J Sports Med.* 2002; 30: 261-267.
- 23) Madigan M L, Pidcoe P E. Changes in landing biomechanics during a fatiguing landing activity. *J Electromyogr Kinesiol.* 2003; 13: 491-498.
- 24) Shimokochi Y, Ambegaonkar J P, Meyer E G et al. Changing sagittal plane body position during single-leg landings influences the risk of non-contact anterior cruciate ligament injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013; 21: 888-897.
- 25) Blackburn J T, Padua D A. Influence of trunk flexion on hip and knee joint kinematics during a controlled drop landing. *Clin Biomech.* 2008; 23: 313-319.
- 26) Blackburn J T, Padua D A. Sagittal-plane trunk position, landing forces, and quadriceps electromyographic activity. *J Athl Train.* 2009; 44: 174-179.
- 27) 小笠原一生, 木村佳記, 佐藤睦美他. 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.
- 28) 阿江通良, 藤井範久. *スポーツバイオメカニクス 20 講.* 東京: 朝倉書店; 2008.
- 29) 小笠原一生, 小柳好生, 木村佳記他. 片脚着地時の姿勢戦略に基づく非接触性前十字靭帯損傷の潜在的リスク同定. *臨床スポーツ医学.* 2017 ; 25 : 346-353.
- 30) DeMorat G, Weinhold P, Blackburn T et al. Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2004; 32: 477-483.
- 31) 千葉諭, 櫻庭景植, 三浦達浩他. 片脚着地動作における膝関節内外反角度と骨盤運動の関連について. *日本整形外科スポーツ医学会雑誌.* 2017 ; 37 : 610. (会)
- 32) Ireland M L, Willson J D, Ballantyne B T et al. Hip strength in females with and without patellofemoral pain. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2003; 33: 671-676.
- 33) Leetun D T, Ireland M L, Willson J D et al. Core stability measures as risk factors for lower extremity injury in athletes. *Med Sci Sports Exer.* 2004; 36: 926-934.
- 34) 井野拓実, 石田知也, 山中正紀. 運動連鎖からみた前十字靭帯損傷と理学療法. *理学療法.* 2014 ; 31 : 829-839.

## Abstract

### Association between knee valgus and impact attenuation during single-leg landing

Satoshi Chiba<sup>[1]</sup>

[1] Faculty of Health Sciences, Uekusa Gakuen University

Dynamic knee valgus during landing is a critical risk factor of non-contact anterior ligament injury. On the other hand, the impact during landing must be attenuated in the lower extremities. The purpose of this study was to clarify the relationship between knee valgus and impact attenuation during single-leg landing. Single-leg landing from a height of 0.45m was performed by 16 healthy male college students. The impact attenuation index was calculated from the maximum reaction force of vertical direction against the ground. The change of the angles in lower extremity joints was calculated and the correlations examined. As a result, significant correlations were observed between the impact attenuation index and knee valgus ( $r_s=0.54$ ,  $p<0.01$ , 95%CI: 0.30 ~ 0.71), knee flexion ( $r_s=-0.62$ ,  $p<0.01$ , 95%CI: -0.77 ~ -0.41), and pelvic anterior tilt ( $r_s=0.32$ ,  $p<0.05$ , 95%CI: 0.04 ~ 0.55). Furthermore, significant correlations were observed between knee valgus and pelvic anterior tilt ( $r_s=0.32$ ,  $p<0.05$ , 95%CI: 0.04 ~ 0.55), and also knee flexion ( $r_s=-0.30$ ,  $p<0.05$ , 95%CI: -0.55 ~ -0.04). These results indicated that increase in knee valgus and leg stiffness during landing was caused by excessive contraction of rectus femoris prior to landing. Therefore, the results suggested that awareness of impact attenuation could control knee valgus movement.

**Keywords:** landing, knee valgus, impact attenuation, prevention