

片脚着地動作における 初期接地時の前額面骨盤傾斜と膝関節最大外反 モーメントの関連

The relationship between frontal plane pelvic tilt at ground contact and peak knee valgus moment during single-leg landing

生田亮平*1, 石田知也*2, 山中正紀*3, 谷口翔平*2
上野 亮*2, 寒川美奈*2, 遠山晴一*2

キー・ワード : anterior cruciate ligament injury, single leg landing, pelvic tilt
膝前十字靭帯損傷, 片脚着地, 骨盤傾斜

〔要旨〕 本研究の目的は女性の片脚着地動作における前額面上の骨盤傾斜が膝関節外反モーメントおよび膝関節外反角度変化量に与える影響を調査することである。健康女子大学生 15 名を対象に、30cm 台からの片脚着地動作を行わせ、三次元動作解析装置により測定を行った。非支持脚側の骨盤挙上角度、膝関節外反角度および外的膝関節外反モーメントを算出した。結果、初期接地時の非支持脚側の骨盤挙上角度は膝関節最大外反モーメントおよび初期接地後 40ms 間膝関節外反角度変化量との間にそれぞれ有意な正の相関を認めた。本研究結果は、片脚着地動作において非支持側の骨盤を挙上して接地する特徴を有する者は接地後の大きな膝関節最大外反モーメントおよび初期接地後 40ms 間における大きな膝関節外反角度変化量を示すことを明らかとした。片脚着地動作における骨盤帯の肢位と膝関節外反の関連について床反力の変化や股関節キネマティクスも含めた、さらなる検討が必要である。

はじめに

膝前十字靭帯（以下、ACL）損傷は最も重篤なスポーツ外傷の一つであるとされている。ACL 損傷の約 70% が非接触型損傷であり、他者との明らかな接触がない片脚着地動作やカッティング動作で生じる¹⁾。女性の非接触型 ACL 損傷発生率は男性に比べて 2~6 倍高く²⁾、女性に対する非接触型 ACL 損傷予防プログラムの発展が望まれる。ACL 損傷場面のビデオ解析を行った先行研究から、多くの例が膝関節外反位で受傷していることが報告されている^{3~5)}。また、Koga ら⁵⁾ は、ACL 損傷場面において着地動作時の着地後 40ms 間に

急激な膝関節外反角度変化が生じていたことを報告し、着地直後の生体力学的特徴が ACL 損傷メカニズムに関連していることを示唆している。前向きコホート研究⁶⁾から、着地動作における膝関節最大外反モーメントが ACL 損傷リスクであることが報告されており、これまで着地動作時の膝関節最大外反モーメントの増加に関連する因子の検討が広く行われてきた⁷⁾。

Takacs ら⁸⁾は、片脚立位時の前額面上の骨盤傾斜角度が膝関節内反・外反モーメントに影響を与えることを報告した。著者らは、前額面上の骨盤傾斜により身体質量中心 (Center of Mass : CoM) の位置が変化し、前額面上の膝関節モーメントのレバーアームが増加したことにより膝関節内反・外反モーメントに影響を与えたと考察している⁸⁾。片脚着地動作においても同様に、前額面上の骨盤傾斜角度の増加が膝関節外反モーメントの増加に

*1 八王子スポーツ整形外科リハビリテーションセンター

*2 北海道大学大学院保健科学研究所

*3 北海道千歳リハビリテーション大学

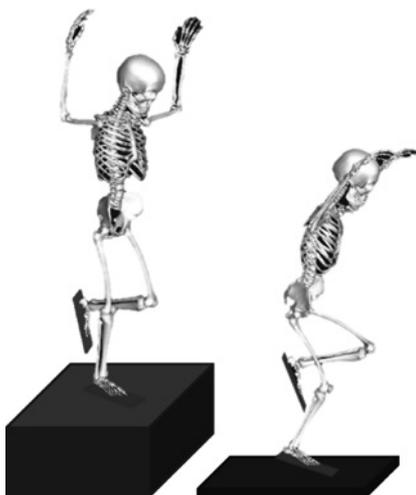


図1 片脚着地動作
30cm 台上で利き脚にて片脚立位となり、その後、台から落下し利き脚にて着地した。



図2 マーカー貼付位置
反射マーカーは骨盤および下肢の骨指標、右下肢の大腿、下腿などに合計40個貼付した。

影響を与える可能性が考えられる。骨盤傾斜が膝関節外反モーメントに影響を与えることが明らかになれば、臨床的に片脚着地動作における膝関節外反モーメントを推定することや、外反モーメントの減少を試みる介入の際に有用な情報となるだろう。本研究の目的は、健常女子大学生を対象とし、片脚着地動作における前額面上の骨盤傾斜が膝関節外反モーメントおよび膝関節外反角度変化量に与える影響を調査することとした。仮説は、非支持脚側の骨盤挙上の増加は着地時の膝関節外反モーメントおよび外反角度変化量の増加と関連するとした。

対象および方法

1. 対象

健常女子大学生 15 名（年齢 21.5 ± 0.8 歳，身長 160.8 ± 6.7 cm，体重 53.8 ± 6.8 kg）を対象とした。先行研究⁸⁾に基づき、利き脚を対象として動作課題を行った。利き脚はボールを蹴る脚と定義し全例右下肢であった。除外基準は下肢の骨折および ACL 損傷の既往を有する者、過去 6 カ月以内に下肢および体幹の整形外科的な既往を有する者とした。尚、ヘルシンキ宣言に則り、対象には事前に研究の背景や目的、考えられる危険性を説明し、書面による同意を得た。また、本研究は北海道大学大学院保健科学研究所の倫理委員会の承認を事前に得てから実施した。

2. データ計測

動作課題は 30cm 台からの片脚着地動作とした（図 1）。対象は初めに、30cm 台上で利き脚にて片脚立位となり、その後、台から落下し利き脚にて片脚着地を行った⁹⁾。上前腸骨棘および腸骨稜に貼付したマーカーが上肢で隠れてしまうことを避けるため、着地動作時の上肢位置を両肩関節 90° 外転外旋位、肘関節 90° 屈曲位となるよう指示した。また、着地動作中に上肢でバランスを取らないことや上肢の反動を用いてジャンプしないことを指示した。片脚着地後に片脚立位を 3 秒以上保持できなかった場合、着地後に足部または上肢位置がずれた場合を失敗試技と定義して成功 3 試行を計測した。着地動作の計測には、カメラ 6 台（Hawk camera, Motion analysis, Santa Rosa, CA, USA；200Hz）、床反力計 1 枚（Type9286, Kistler, Winterthur, Switzerland；1000 Hz）を同期させ EvaRT4.4（Motion analysis）にて記録した。反射マーカーは骨盤および下肢の骨指標、右下肢の大腿、下腿などに合計 40 個貼付した⁷⁾（図 2）。片脚着地動作は成功 3 試行を記録した。



図3 骨盤傾斜角度

左右の上前腸骨棘に貼付したマーカーを結ぶ直線と水平線が前額面上でなす角度とした。静的立位姿勢時を 0° とし、非支持脚側の骨盤挙上を正の角度として定義した。

3. データ解析

三次元動作解析装置より得られたマーカー座標は4次の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：12Hz）を用いて平滑化した。膝関節外反角度および外的膝関節外反モーメントの算出にはSIMM6.0.2 (MusculoGraphics, Santa Rosa, CA, USA)を用いた。膝関節角度の算出にはGroodとSantay¹⁰⁾の方法に準じた関節座標系法を用い、静止立位時の膝関節角度を 0° とした。外的膝関節外反モーメントは逆動力学解析により算出し、各セグメントの質量等の身体計測学的特性および慣性特性はde Leva¹¹⁾の報告に基づいた。初期接地(以下、IC)を床反力の垂直成分が10Nを超えた時点として定義し、ICから膝関節最大屈曲時までにおける膝関節最大外反モーメントを算出した。また、IC後40ms時の膝関節外反角度とIC時の膝関節外反角度の差をIC後40ms間膝関節外反角度変化量として算出した。膝関節外反モーメントは各被験者の身長および体重で標準化し、外反方向を正と定義した。

前額面上の骨盤傾斜角度は、左右の上前腸骨棘

に貼付したマーカーを前額面上に投影し、それらを結んだ直線と水平線が前額面上でなす角度として算出した。静止立位姿勢時の骨盤傾斜角度を 0° とし、非支持脚側の骨盤挙上を正の角度として定義した(図3)。非支持脚側の骨盤挙上を正の角度として定義した。IC時の前額面上骨盤傾斜角度を算出し、統計学的解析に用いた。

4. 統計学的解析

統計学的解析には、Pearsonの積率相関係数を用いて、IC時の前額面上の骨盤傾斜角度と膝関節最大外反モーメントおよびIC後40ms間の膝関節外反角度変化量との関係をそれぞれ検討した。解析にはIBM SPSS Statistics 22 (IBM, Chicago, IL, USA)を用い、有意水準は5%とした。各被験者のデータは成功3試行の平均値を用いた。

結果

IC時の前額面上の骨盤傾斜角度は $12.9 \pm 2.7^{\circ}$ であり、全例が非支持脚側の骨盤挙上を呈していた。また、IC後40msの膝関節外反角度変化量は $2.1 \pm 2.1^{\circ}$ であり、膝関節最大外反角度はIC後 $47.2 \pm 15.9\text{ms}$ に生じていた。膝関節最大外反モーメントは $0.04 \pm 0.08\text{Nm/m/kg}$ であり、IC後 $39.7 \pm 27.8\text{ms}$ に生じていた。

IC時の非支持脚側の骨盤挙上角度は膝関節最大外反モーメント ($r = 0.59, P = 0.02$) およびIC後40ms間の膝関節外反角度変化量 ($r = 0.54, P = 0.04$) との間にそれぞれ有意な正の相関を認められた(図4)。

考察

本研究の目的は、健常女子大学生の片脚着地動作における前額面上の骨盤傾斜角度と膝関節外反モーメントおよび膝関節外反角度変化量との関係を調査することであった。本研究結果は、IC時の非支持脚側の骨盤挙上の増加は膝関節最大外反モーメントおよびIC後40ms間の膝関節外反角度変化量の増加と関連することを示し、仮説は支持された。

Takacsら⁸⁾は、片脚立位において非支持脚側の骨盤が下制することにより膝関節内反モーメントが増加したことを明らかにした。この結果は、骨盤肢位の変化により前額面上のCoM位置が変化し、膝関節中心とCoMの距離が離れることで膝関節内反モーメントを増加させたと考察されてい

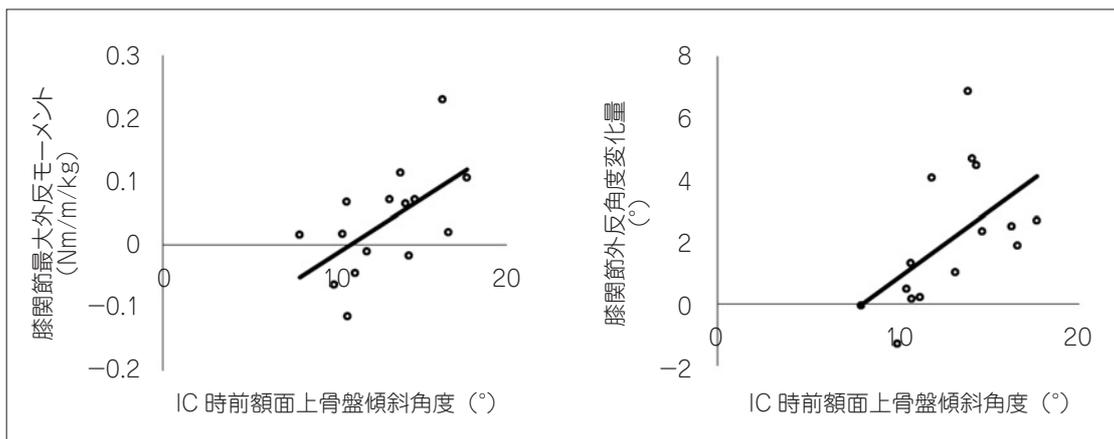


図4 IC 時前額面上骨盤傾斜角度と膝関節最大外反モーメント (左) および膝関節外反角度変化量 (右) の散布図
 IC 時の非支持脚側の骨盤挙上角度は膝関節最大外反モーメント ($r=0.59$, $P=0.02$) および IC 後 40ms 間の膝関節外反角度変化量 ($r=0.54$, $P=0.04$) との間にそれぞれ有意な正の相関を認めた。

る。本研究結果より片脚着地動作においても、前額面上の骨盤傾斜による CoM 位置の変化が生じ、膝関節中心に対して CoM が支持脚よりも外側へ偏位することで膝関節外反モーメントを増加させたことが考えられる。しかし、本研究では CoM の測定を行っていないため、今後の研究において骨盤肢位と CoM 位置の関連または CoM と膝関節外反との関連について検討が必要である。Powers らは¹²⁾、非支持脚側の骨盤挙上の増加は床反力ベクトルを股関節中心に近づけ、股関節外転筋への要求を減じる股関節外転筋弱化的代償であると述べている。近年、前向き研究により股関節外転筋筋力の低下は ACL 損傷リスクと関連したことが報告された¹³⁾。股関節外転筋機能の低下は片脚着地時の非支持脚側の骨盤挙上に影響を与えると考えられるため、今後、股関節外転筋機能と片脚着地動作時の骨盤肢位または膝関節外反へ与える影響を調査する必要がある。

屍体膝を用いた着地動作のシミュレーション研究により、膝関節外反モーメントが ACL 損傷に関連する要素の一つであることが報告された¹⁴⁾。Kiapour¹⁵⁾ らは Levin¹⁴⁾ らの報告と同様な着地シミュレーションにより膝関節最大外反角度は接地後約 52ms に生じたことを示した。また Koga ら⁵⁾ はビデオ解析により、ACL 損傷場面において IC 後 40ms 間に急激な膝関節外反角度変化が生じていたことを明らかとした。さらに、Hewett ら¹⁶⁾ は ACL 損傷場面における骨盤・体幹肢位に着目し、女性の ACL 損傷場面の特徴として IC 時から骨

盤・体幹が支持脚側へ傾斜していたこと報告した。以上の報告より、着地後に生じる膝関節外反モーメントおよび膝関節外反角度変化は IC 後早期に生じ、骨盤・体幹肢位に影響を受ける可能性が考えられる。IC 後早期に生じる膝関節最大外反モーメントの制御は外乱が加わってから筋活動が生じるまでの時間や筋活動が生じてから筋収縮が生じる間の時間 (electromechanical delay) を考慮すると IC 後の神経筋制御では間に合わないため、IC 前の神経筋制御や IC 時における身体肢位が関連すると考えられる。本研究結果より片脚着地動作において IC 時の非支持脚側の骨盤挙上が膝関節最大外反モーメントや IC 後 40ms 間の膝関節外反角度変化量と関連することを示した。今後は骨盤肢位のみではなく、片脚着地動作における IC 時の体幹および下肢の肢位による膝関節最大外反モーメントへの影響を調査する必要がある。

ACL 損傷予防を目的とした片脚着地動作に対する介入では、膝関節を中間位にすることや床反力を減じることに関する動作指導が報告されてきた^{17,18)}。これらの研究では、膝関節屈曲角度や垂直床反力の変化に焦点が当てられ、片脚着地動作における動作指導が膝関節外反モーメントおよび膝関節外反角度の変化に与える影響を調査した研究は乏しい。本研究より片脚着地動作時の IC 時の骨盤挙上を減じることは、膝関節最大外反モーメントの減少と関連する可能性が示唆された。今後は、片脚着地動作における IC 時の非支持

脚側の骨盤挙上に影響を与える身体機能の特徴を明らかにすることにより、ACL 損傷予防を目的とする予防介入の発展に寄与することが考えられる。

結 論

本研究は健常女子大学生を対象として片脚着地動作の三次元動作解析を行い、IC 時の非支持脚側の骨盤挙上と膝関節最大外反モーメントおよび IC 後 40ms 間の膝関節外反角度変化量との間に有意な正の相関関係があることを明らかにした。片脚着地動作における IC 時の骨盤傾斜角度を増加させる身体機能の特徴を明らかにすることにより、着地後の膝関節最大外反モーメントや接地後 40ms での膝外反角度変化量を減じる介入を進展させる可能性が示唆された。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- 1) Boden, BP, Dean, GS, Feagin, JA Jr, Garrett, WE Jr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics*. 2000; 23(6): 573-578.
- 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) Olsen, OE, Myklebust, G, Engebretsen, L, Bahr, R. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med*. 2004; 32(4): 1002-1012.
- 4) Krosshaug, T, Nakamae, A, Boden, BP, Engebretsen, L, Smith, G, Slauterbeck, JR, Hewett, TE, Bahr, R. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med*. 2007; 35(3): 359-367.
- 5) Koga, H, Nakamae, A, Shima, Y, Iwasa, J, Myklebust, G, Engebretsen, L, Bahr, R, Krosshaug, T. 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(11): 2218-2225.
- 6) Hewett, TE, Myer, GD, Ford, KR, Heidt, RS Jr, Colosimo, AJ, McLean, SG, van den Bogert, AJ, Paterno, MV, Succop, P. 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.
- 7) Ishida, T, Yamanaka, M, Takeda, N, Homan, K, Koshino, Y, Kobayashi, T, Matsumoto, H, Aoki, Y. The effect of changing toe direction on knee kinematics during drop vertical jump: a possible risk factor for anterior cruciate ligament injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2015; 23(4): 1004-1009.
- 8) Takacs, J, Hunt, MA. The effect of contralateral pelvic drop and trunk lean on frontal plane knee biomechanics during single limb standing. *J Biomech*. 2012; 15; 45(16): 2791-2796.
- 9) Nagano, Y, Ida, H, Akai, M, Fukubayashi, T. Gender differences in knee kinematics and muscle activity during single limb drop landing. *Knee*. 2007; 14(3): 218-223.
- 10) Grood, ES, Suntay, WJ. A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee. *J Biomech Eng*. 1983; 105(2): 136-144.
- 11) de Leva, P. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *J Biomech*. 1996; 29(9): 1223-1230.
- 12) Powers, CM. The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2010; 40(2): 42-51.
- 13) Khayambashi, K, Ghoddosi, N, Straub, RK, Powers, CM. Hip Muscle Strength Predicts Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injury in Male and Female Athletes: A Prospective Study. *Am J Sports Med*. 2016; 44(2): 355-361.
- 14) Levine, JW, Kiapour, AM, Quatman, CE, Wordeman, SC, Goel, VK, Hewett, TE, Demetropoulos, CK. Clinically relevant injury patterns after an anterior cruciate ligament injury provide insight into injury mechanisms. *Am J Sports Med*. 2013; 41(2): 385-395.
- 15) Kiapour, AM, Quatman, CE, Goel, VK, Wordeman, SC, Hewett, TE, Demetropoulos, CK. Timing sequence of multi-planar knee kinematics revealed by physiologic cadaveric simulation of landing: im-

- plications for ACL injury mechanism. Clin Biomech. 2014; 29(1): 75-82.
- 16) Hewett, TE, Torg, JS, Boden, BP. Video analysis of trunk and knee motion during non-contact anterior cruciate ligament injury in female athletes: lateral trunk and knee abduction motion are combined components of the injury mechanism. Br J Sports Med. 2009; 43(6): 417-422.
- 17) Cowling, EJ, Steele, JR, McNair, PJ. Effect of verbal instructions on muscle activity and risk of injury to the anterior cruciate ligament during landing. Br J Sports Med. 2003; 37(2): 126-130.
- 18) McNair, PJ, Prapavessis, H, Callender, K. Decreasing landing forces: effect of instruction. Br J Sports Med. 2000; 34(4): 293-296.
-
- (受付 : 2017 年 8 月 10 日, 受理 : 2018 年 6 月 7 日)

The relationship between frontal plane pelvic tilt at ground contact and peak knee valgus moment during single-leg landing

Ikuta, R.^{*1}, Ishida, T.^{*2}, Yamanaka, M.^{*3}, Taniguchi, S.^{*2}
Ueno, R.^{*2}, Samukawa, M.^{*2}, Tohyama, H.^{*2}

^{*1} Rehabilitation Center, Hachioji Sports Orthopaedic Clinic

^{*2} Faculty of Health Sciences, Hokkaido University

^{*3} Hokkaido Chitose College of Rehabilitation

Key words: anterior cruciate ligament injury, single leg landing, pelvic tilt

[Abstract] The purpose of the present study was to investigate the relationship between frontal plane pelvic tilt and knee valgus moment/motion during a single-leg landing task. Fifteen healthy female college students participated in this study. Frontal plane pelvic tilt angle and knee valgus angle/moment during a single leg landing task were analyzed with a three-dimensional motion analysis system. The results showed that pelvic tilt angle at initial ground contact was significantly correlated with peak knee valgus moment and the excursion of the knee valgus angle from initial ground contact to the following 40 milliseconds. The findings of the present study showed that greater pelvic tilt to the contralateral side of stance-limb during a single leg landing may increase peak knee valgus moment and the excursion of the knee valgus angle from initial ground contact to the following 40 milliseconds. Further study is needed to investigate the effects of ground reaction force and hip kinematics on pelvic alignment and knee kinematics during a single leg landing task.