片脚着地動作時の足部運動と膝関節外反運動の関係

Relationship between Foot and Knee Valgus Movement in the Single-leg Drop-landing

木下 恵美¹⁾ 浦辺 幸夫²⁾ 前田 慶明²⁾ 藤井 絵里²⁾
笹代 純平²⁾ 岩田 昌²⁾ 河原 大陸²⁾ 沼野 崇平¹⁾

MEGUMI KINOSHITA, RPT¹⁾, YUKIO URABE, RPT, PhD, MA²⁾, NORIAKI MAEDA, RPT, PhD²⁾, ERI FUJII, RPT²⁾,
JUNPEI SASADAI, RPT²⁾, SHO IWATA, RPT²⁾, DAIROKU KAWAHARA, RPT²⁾, SHUHEI NUMANO, RPT¹⁾

¹⁾ Institute of Health Sciences, Hiroshima University School of Medicine: 1-2-3 Kasumi, Minami-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima
734-8553, Japan TEL+81 82-257-5405 E-mail: kinomg6677@gmail.com

²⁾ Graduate School of Biomedical and Health Sciences, Hiroshima University

Rigakuryoho Kagaku 31(2): 227-231, 2016. Submitted Sep. 11, 2015. Accepted Nov. 6, 2015.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to clarify the relationship between fore- and hind-foot movement and knee valgus movement in the single-leg drop-landing. [Subjects] Thirteen healthy adult women participated in this study. [Methods] The subjects performed single-leg drop-landing from a 30-cm-high box. Motion analysis was used to obtain the knee valgus angle, forefoot pronation angle, hindfoot valgus angle, and arch height. Then, the correlations between knee valgus angle and each foot angle and arch height were examined. [Results] There was a poor correlation between forefoot pronation movement and knee valgus movement in single-leg drop-landing ($r=-0.25$). On the other hand, a significant positive correlation was observed for the hindfoot valgus angle and knee valgus movement ($r=0.80$). [Conclusion] The results of this study suggest that it is important to decrease the hindfoot valgus movement to prevent knee valgus movement in single-leg drop-landing.

Key words: single-leg drop-landing, knee valgus movement, ACL injury prevention

要旨:〔目的〕本研究の目的は、片脚着地動作時の前・後足部運動と膝関節外反運動の関係を明らかにすることである。〔対象〕対象は健康成人女性13名とした。〔方法〕課題動作は高さ30 cm台からの非利き脚での片脚着地動作とし、台より30 cm前方に着地させ、片脚立位を保持させた。課題動作中の膝関節外反角度、前足部回内角度、後足部外反角度、アーチ高を算出し、膝関節外反角度と各足部角度、アーチ高との相関関係を調べた。〔結果〕片脚着地動作時の前足部回内運動と膝関節外反運動に有意な相関関係は認められなかった。一方、後足部外反運動と膝関節外反運動には有意な正の相関が認められた。〔結語〕片脚着地動作での膝関節外反運動を予防するためには、後足部外反運動を少なくすることが重要であることが示唆された。

キーワード: 片脚着地動作, 膝関節外反運動, ACL 損傷予防

¹⁾ 広島大学 医学部 保健学科: 広島県広島市南区霞1-2-3 (〒734-8553) TEL 082-257-5405

²⁾ 広島大学大学院 医歯薬保健学研究科

I. はじめに

スポーツ外傷のなかでも重大なものとして、膝前十字靱帯（Anterior Cruciate Ligament：ACL）損傷があげられる。その受傷機転のひとつにジャンプ着地動作がある。Olsen¹⁾は ACL 損傷の発生時に、片脚着地動作で膝関節が過度の外反位となることを示し、両脚着地動作より片脚着地動作の方が ACL 損傷発生の危険性が高いとしている。

膝関節の外反運動は、下肢運動連鎖からみると、足部の回内に伴って下腿の内旋と大腿の外旋が生じることで行われる²⁾。Powers³⁾も足部回内の増加が下腿の内旋を増大させることで膝関節外反角度が大きくなると述べており、足部・足関節運動と膝関節外反運動には関係があることが知られている。

足部は解剖学的に、Lisfranc 関節より遠位の前足部、Lisfranc 関節から Chopart 関節の中足部、Chopart 関節より近位の後足部の3つに区分できる。Lisfranc 関節の関節面は全体的に平坦であり、個々の関節の動きが小さいため、中足部の可動性はわずかである。橋本⁴⁾は、中足部は後足部に対して前足部と一体となって機能するとし、このため、前足部と後足部が足部全体の運動を担っているといえる。

足部の回内は、前足部の相対的な回外、足部内側縦アーチ（Medial Longitudinal Arch、以下アーチ）の低下、後足部の外反によって起こると考えられている。金子⁵⁾は片脚着地動作時、荷重位での足部回内と膝関節外反には関係があると述べている。しかし、前・後足部の各々の運動が膝関節外反運動と関係があるのかは明らかではない。そこで本研究は、足部運動を下腿、前足部、後足部に分けて評価することが可能な Oxford foot model⁶⁾を用いて、片脚着地動作時の前・後足部運動と膝関節外反運動の関係の有無を明らかにすることを目的とした。仮説は、片脚着地動作時の前足部回内角度変化量と後足部外反角度変化量は、それぞれ膝関節外反角度変化量と正の相関を示すとした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は下肢に整形外科的疾患がない健康成人女性13名とした。年齢（平均値 ± 標準偏差）は 21.4 ± 0.8 歳、身長は 158.8 ± 5.5 cm、体重は 52.8 ± 7.7 kg、BMI は 20.8 ± 2.1 kg/m² であった。

本研究は広島大学大学院医歯薬保健学研究科心身機能生活制御科学講座倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号 1427）。対象には研究の内容を十分に説明し、書面により同意を得た。

2. 方法

課題動作は高さ 30 cm 台からの非利き脚での片脚着地動作とした。非利き脚はボールを蹴る脚とは反対側の脚とし、すべての対象の非利き脚は左脚であった。上肢によるバランス保持の影響を排除するため、台上での姿勢は上肢を胸部前面で組ませ、台の端に足尖を揃えた立位とした。両脚で踏み切った後、台の先端から 30 cm 前方の線に踵が位置するように着地させ、前方を注視した状態でそのまま片脚立位、上肢は胸の前で組ませた状態を保持させた。体幹を回旋させないように指示し、足部の方向は任意とした。その際、着地後に姿勢を保持できなかった場合や、反対側の脚が非利き脚に接した場合、床についた場合を失敗試技とした。各対象には測定前に十分に練習を行わせた後、課題動作を実施した。片脚着地時に胸の前で手を組み、バランスを崩すことなく3秒間姿勢を保持できた状態を成功試技とし、3回の成功試技を分析した。なお、疲労による影響を排除するために各試行間で対象には十分な休息をとらせた。

片脚着地動作時の足部運動および膝関節運動の解析には、赤外線カメラ16台からなる三次元動作解析装置（Vicon Motor System 社製、UK）と床反力計1基（AMTI 社製、UK）を使用した。

赤外線カメラのサンプリング周波数は 100 Hz、床反力計のサンプリング周波数は 1,000 Hz で赤外線反射マーカーの動きと床反力を記録した。対象の非利き脚には Oxford foot model に従い、膝関節外側、腓骨頭、下腿外側、脛骨粗面、脛骨前面、外果、内果、踵部後端、踵部基部、CPEG マーカー（踵部内外反規定マーカー）、踵部外側、載距突起、第一中足骨頭、第一中足骨基部、第五中足骨頭、第五中足骨基部、第二中足骨頭、母趾基節骨、仙骨部にマーカーを貼付した。

なお、足部の定義も Oxford foot model に従い、前足部は第一中足骨から第五中足骨までとし、後足部は踵骨と距骨とした⁶⁾。後足部に対する前足部の回内運動は Chopart 関節で起こるため⁷⁾、前足部回内を、後足部に対して Chopart 関節で回内する運動とした。下腿に対する後足部の運動は、距腿関節と距骨下関節で起こることから⁵⁾、後足部外反を、下腿に対して距腿関節で背屈、距骨下関節で回内（外返し・外転）する運動とした。アーチ高は第五中足骨基部、第五中足骨頭、第一中足骨頭で作られた平面と第一中足骨基部の距離で算出した⁶⁾。

膝関節角度を算出するために、下肢 Plug-in Gait Model に従い、両側の上前腸骨棘、上後腸骨棘、膝関節外側、大腿外側、下腿外側、外果、第二中足骨頭、踵部後端にマーカーを貼付した。両モデルで計 30 箇所、同一検者が直径 14 mm のマーカーを貼付した。計測した赤外線反射マーカーの位置座標情報のノイズを除去するため、ローパスフィルター（Butterworth filter）を用

表 1 接地時および膝関節最大外反時の各算出項目の値とその変化量

	接地時	膝関節最大外反時	変化量
膝関節外反角度 (°)	-0.0 ± 2.7	10.8 ± 8.2	10.8 ± 6.7
膝関節屈曲角度 (°)	12.6 ± 4.6	50.6 ± 8.4	38.0 ± 8.6
前足部回内角度 (°)	0.2 ± 4.0	6.2 ± 4.3	6.0 ± 3.2
後足部外反角度 (°)	-4.5 ± 8.9	3.2 ± 9.7	7.7 ± 7.9
アーチ高 (mm)	16.7 ± 3.0	17.0 ± 2.8	0.3 ± 1.7

平均 ± 標準偏差。

いた。遮断周波数はマーカーの座標位置を 6 Hz、床反力データを 300 Hz に設定し、Vicon Nexus1.8.3 (Vicon Motor System 社製, UK) を用いて足部運動と膝関節運動を解析した。

解析区間は足部接地から膝関節最大外反時までとし、足部接地は床反力垂直成分が 10 N を超えた時点とした。足部接地時から膝関節最大外反時までの時間を 100% として正規化し、膝関節外反角度、膝関節屈曲角度、前足部回内角度、後足部外反角度の経時の変化を算出した。足部接地時と、膝関節最大外反時の膝関節外反角度、前足部回内角度、後足部外反角度、アーチ高とそれぞれの変化量を算出した。変化量は、膝関節最大外反時 (100%) の値から足部接地時 (0%) の値をそれぞれ減じたものとした。なお、足部に最も荷重がかかった時点を最大垂直分力床反力で示した。各データは 3 試技の平均値を代表値とした。

統計学的解析には、エクセルアドインソフト Statcel 3 (オーエムエス出版社製, JP) を用いた。前足部回内角度変化量、後足部外反角度変化量ならびに、アーチ高変化量と膝関節外反角度変化量との関係を Pearson の積率相関係数で求めた。危険率 5 % 未満を有意とした。

III. 結 果

足部接地時と膝関節最大外反時の膝関節外反角度、膝関節屈曲角度、前足部回内角度、後足部外反角度、アーチ高と変化量を表 1 に示す。足部接地から膝関節最大外反時までの平均時間 ± 標準偏差は 390 ± 169 ms であった。膝関節外反角度、膝関節屈曲角度、前足部回内角度、後足部外反角度の経時変化について、膝関節は足部接地時には 12.6 ± 4.6° 屈曲しており、-0.0 ± 2.7° 外反していた。

最大垂直分力床反力は、接地から 15.5 ± 4.1% で生じていた。膝関節は接地から 56.0 ± 22.2% の時点で最大屈曲位となり、100% の時点で最大外反位となる。したがって、最大垂直分力床反力が生じたあとに膝最大屈曲、最大外反が起こっていた。接地時、前足部は回内位、後足部は内反位であり、膝関節が最大外反位になるまでに、前足部はさらに回内、後足部は外反していた。前足部の

表 2 各足部角度の算出項目の変化量と膝関節外反角度との相関関係

	膝関節外反角度変化量 (°)
前足部回内角度変化量 (°)	-0.25
後足部外反角度変化量 (°)	0.80*
アーチ高変化量 (mm)	-0.08

*: p<0.01

最大回内は接地から 51.8 ± 21.7% で起こり、後足部の最大外反は接地から 53.0 ± 18.5% で起こっていた。最大垂直分力床反力の後に前足部は最大回内、後足部は最大外反していた。

足部接地時と膝関節最大外反時の膝関節外反角度、膝関節屈曲角度、前足部回内角度、後足部外反角度、アーチ高と変化量を表 1 に示す。膝関節外反、屈曲角度の変化量はそれぞれ外反方向に 10.8 ± 6.7°、屈曲方向に 38.0 ± 8.6° であった。前足部回内角度、後足部外反角度はそれぞれ回内方向に 6.0 ± 3.2°、外反方向に 7.7 ± 7.9° であった。アーチ高変化量は 0.3 ± 1.7 mm であった。

各足部角度の算出項目の変化量と膝関節外反角度との相関関係を表 2 に示す。前足部回内角度変化量と膝関節外反角度変化量との間には有意な相関はみられなかった ($r = -0.25$, $p = 0.4$)。一方、後足部外反角度変化量と膝関節外反角度変化量には有意な正の相関が認められた ($r = 0.80$, $p < 0.01$)。アーチ高変化量と膝関節外反角度には有意な相関は認められなかった ($r = -0.08$, $p = 0.8$)。

IV. 考 察

先行研究では膝関節外反運動と単体として捉えた足部回内運動との関係をみていた^{3,7)}。しかし、足部は 28 個の骨とそれらをつなぐ多数の関節で形成されている。よって本研究では足部を前足部と後足部に分け、片脚着地動作時のそれらの運動と膝関節外反運動との関係を明らかにすることを試みた。本研究の課題動作での膝関節は 10.8 ± 6.7° 外反方向に運動しており、前足部は 6.0 ± 3.2° 回内方向に、後足部は 7.7 ± 7.9° 外反方向に運動し、アーチ高は 0.3 ± 1.7 mm 変化していた。その相

関関係をみると、後足部外反角度変化量と膝関節外反角度変化量にのみ、有意な強い正の相関が認められた ($r=0.80$, $p<0.01$)。

前足部は、足部接地から膝関節最大外反時までに $6.0 \pm 3.2^\circ$ 後足部に対して回内していたが、これらの間には有意な相関関係は認められなかった ($r=-0.25$, $p=0.4$)。前足部の回内に関わる Chopart 関節は中足部と後足部間の関節であるため、距腿関節や距骨下関節とは異なり、下腿と直接的に連動する関節ではない。このことから前足部回内運動が膝関節外反運動に直接的な影響を及ぼさなかったのではないかと考えた。加えて、Chopart 関節は距骨下関節などの近隣の関節と連動した運動しかできない⁸⁾。Chopart 関節の運動は距骨下関節の肢位によって変化するため、その関節運動が足部以外の下肢の関節に影響を及ぼす可能性は低いことが示唆された。また、本研究の課題動作は片脚着地動作であり、着地は前足部接地であったと考えられる⁹⁾。前足部の役割は足部の固定であり⁴⁾、接地時の前足部は足部の固定性に関与したとも考えた。

後足部は、接地から膝関節最大外反時までの間に $7.7 \pm 7.9^\circ$ 下腿に対して外反し、膝関節はそれに伴い $10.8 \pm 6.7^\circ$ 外反していた。これらの間には有意な強い正の相関があることが認められた。接地の際、足部には床からの衝撃が加わる。その衝撃の吸収は、距腿関節の底屈位から背屈位への運動と、距骨下関節の回内運動によって行われる^{10,11)}。その距腿関節の背屈運動と距骨下関節の回内運動に伴って、後足部は外反運動を行う。足部外反運動に付随して下腿の内旋運動と大腿の外旋運動が起こり、ほぼ同時に膝関節外反運動が起こる⁷⁾。つまり、後足部と膝関節の外反運動は、距腿関節と距骨下関節を介して、相互に関係しているといえる。これによって本研究で実施した片脚着地動作では、後足部外反角度変化量と膝関節外反角度変化量にのみ有意な正の相関が認められたと考える。加えて、Nakamura ら¹²⁾は後足部の外反運動は、アーチの低下に関与していると述べている。さらに、アーチの低下量が大きいほど膝関節外反角度が大きくなるとされている⁵⁾。よって、本研究でも後足部外反運動と膝関節外反運動は関係しているのではないかと考えた。

しかし、アーチ高は 0.3 ± 1.7 mm とほとんど低下しておらず、アーチ高変化量と膝関節外反角度変化量に有意な相関は認められなかった。秋本ら¹³⁾は片脚スクワット動作でアーチの低下と膝関節外反角度の増加には関係があると示唆している。このときのアーチ高は床面と舟状骨との距離で算出しているが、本研究では第五中足骨基部、第五中足骨頭、第一中足骨頭で作られた平面と、第一中足骨基部の距離でアーチ高を算出している。アーチの低下は、骨の上下移動だけではなく、足部回内運動による低下も含まれる。先行研究では Oxford foot

model を用いてアーチの低下を捉えたものは歩行動作が多く¹⁴⁾、片脚着地動作におけるアーチ低下を検証しているものは、筆者らが調べる限りみられなかった。片脚着地動作などの、ダイナミックな動作時の膝関節肢位や、ACL への負荷を調整するために足部は回内外する⁵⁾。これより片脚着地動作におけるアーチ低下に関しては、骨の上下移動と比較して、足部回内外運動による影響の方がより大きいと考えられる。本研究でのアーチ計測方法は、足部の中に作られた平面と第一中足骨基部との距離での計測であったため、片脚着地動作でのアーチ低下を捉えるためには、注意が必要である。以上のことから、本研究でのアーチ高の低下と膝関節外反運動には関係がないと推測した。

本研究では片脚着地動作で起こる前・後足部運動のうち、後足部の外反運動が、膝関節の外反運動に影響を及ぼしていることが示された。藤井ら¹⁵⁾も、膝屈曲時に生じる後足部外反は膝関節外反と密接な関係を有すると述べており、片脚着地動作で過度な膝関節の外反運動を防止するためには、後足部の外反運動をいかに少なくするかが重要であるといえるだろう。

今後はカッティングやダッシュ、他のスポーツ動作と組み合わせたジャンプ着地動作などで、前・後足部運動と膝関節外反運動の関係をみていく必要がある。これらを研究することは、よりスポーツ現場で起こる ACL 損傷予防の一助になると考える。

引用文献

- 1) Olsen OE, Grethe M, Lars E, et al.: Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injury in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med*, 2004, 32(4): 1002-1012.
- 2) 小林寛和, 宮下浩二, 藤堂庫治: スポーツ動作と安定性—外傷発生に関係するスポーツ動作の特徴から—。関西理学, 2003, 3(1): 49-57.
- 3) Powers CM: The influence of altered lower-extremity kinematics on patellofemoral joint dysfunction: a theoretical perspective. *J Orthop Sports Phys*, 2003, 33(11): 639-646.
- 4) 橋本雅至, 中江徳彦: 足部からみた身体運動の制御。理学療法科学, 2001, 16(3): 123-128.
- 5) 金子雅明, 岡崎倫江, 上條史子・他: 足部・足関節アライメントが片脚着地動作時の動的下肢アライメントと着地直前直後筋活動に及ぼす影響。理学療法科学, 2011, 26(1): 27-31.
- 6) Stebbins J, Harrington M, Thompson N, et al.: Repeatability of a model for measuring multi-segment foot kinematics in children. *Gait Posture*, 2006, 23(1): 401-410.
- 7) Beckett GD, Massie DL, Bowers KD, et al.: Incidence of hyperpronation in the ACL injured knee: a clinical perspective. *J Athl Train*, 1992, 27(1): 58-62.
- 8) Neumann DA: カラー版筋骨格系のキネシオロジー。嶋田智明, 有馬慶美(訳), 医歯薬出版, 東京, 2013, pp644-649.
- 9) 坂巻清司: 脛骨疲労骨折の力学的考察。電子情報通信学

- 会技術研究報告. MBE, MEとバイオサイバネティックス, 1999, 99(178): 81-86.
- 10) 越野裕太, 山中正紀, 武田直樹: 片脚着地動作における着地前筋活動と接地時の足関節肢位との関係. 理学療法科学, 2013, 28(4): 527-532.
- 11) 金村朋直, 小林寛和, 岡戸敦男: メカニカルストレスからみた足部・足関節の外傷と理学療法. 理学療法, 2014, 31(7): 731-739.
- 12) Nakamura H, Kakurai S: Relationship between the medial longitudinal arch movement and the pattern of rearfoot motion during the stance phase of walking. J Phys Ther, 2003, 15(1): 13-18.
- 13) 秋元 剛, 浦辺幸夫, 山中悠紀: 片脚スクワット動作における足部内側縦アーチと膝外反角度の関係. J Athlet Rehabil, 2010, 7(1): 41-45.
- 14) Dombroski CE, Balsdon ME, Froats A: The use of a low cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses. BMC Research Notes, 2014, 7: 443-446.
- 15) 藤井康成, 小倉 雅, 東郷泰久・他: 下肢アライメントの評価における動的Heel-floor angleの有用性. 臨床スポーツ医学, 2004, 21(6): 687-692.