

研究報告



片脚着地動作における着地姿勢の違いが 膝関節内旋運動へ与える影響*

彦坂 潤¹⁾・後藤寛司²⁾・鈴木康雄³⁾・中川博文^{1) 4)}・金井 章^{1) 4)}

【要 旨】

【目的】本研究の目的は、片脚着地動作における着地姿勢の違いが膝前十字靭帯損傷に関連があるとされる膝関節内旋運動へ与える影響について検討することである。【方法】健康若年女性 22 名に対し、三次元動作解析装置を用いて片脚着地動作の計測を実施した。着地姿勢は、体幹角度を規定しない自由条件、体幹 45°前傾条件、体幹直立条件の 3 条件とした。膝関節内旋角度最大時における各関節角度について各条件間で比較を行うとともに、膝関節内旋角度変化量と各因子変化量との間の相関関係を検討した。【結果】膝関節屈曲角度および股関節屈曲角度は体幹 45°前傾条件において有意に高値を示した。膝関節屈曲角度変化量および股関節屈曲角度変化量と膝関節内旋角度変化量との間に有意な負の相関関係を認めた。【結論】片脚着地動作において、体幹前傾を増加させる、そして立脚側への骨盤傾斜を減少させることにより、着地側の膝関節内旋運動が減少することが認められた。

キーワード：片脚着地動作，膝関節内旋運動，着地姿勢

はじめに

スポーツ外傷の中でも代表的な膝関節疾患として膝前十字靭帯（以下、ACL）損傷が挙げられる。ACL 損傷はスポーツ動作中に多く発生することが

知られており、その割合は約 70%¹⁾ と言われている。ACL 損傷は特定の動作様式において発生リスクが高まることが知られており、片脚着地動作は ACL 損傷が発生しやすい動作の一つ^{2) 3)} である。

また、体幹、上肢および頭部は身体質量の約 60% を占め⁴⁾、それらは下肢関節と関連があり、着地動作などによって生じる床反力やエネルギー、膝関節への負荷に影響を与える⁵⁾ ことが知られている。片脚着地動作時の体幹および股関節運動の性差を検討した研究において、男性と比較して ACL 損傷リスクが高いとされる女性では、より直立した着地姿勢^{6) 7)} であり、股関節での衝撃吸収が少ない⁶⁾ ことが報告されている。また、体幹姿勢が膝関節キネマティクスへ与える影響として、片脚着地動作時に体幹を前傾させることにより内的な膝関節伸展モーメントの減少、前方剪断力の減少が起こる⁸⁾ と報告されている。このように、ACL 損傷の発生要因として体幹の重心位置や運動が関与しているとされており、ACL 損傷の発生を予防するためには着地動作時の体幹コントロールの獲得が重要であると言われている。

ACL 損傷時の膝関節アライメントとして、膝

* Influence of landing posture on knee internal rotation movement during single-leg landing

- 1) 豊橋創造大学 保健医療学部 理学療学科
(〒440-8511 愛知県豊橋市牛川町松下 20-1)
Jun Hikosaka, PT, MS, Hirofumi Nakagawa, Dr. Eng.,
Akira Kanai, PT, PhD: Department of Physical Therapy,
School of Health Sciences, Toyohashi SOZO University
- 2) 東京家政大学 健康科学部リハビリテーション学科
理学療法専攻
Hiroshi Goto, PT, PhD: Physical Therapy Major,
Department of Rehabilitation, Faculty of Health Sciences,
Tokyo Kasei University
- 3) 日本福祉大学 健康科学部 福祉工学科
Yasuo Suzuki, PhD: Faculty of Health Sciences, Nihon
Fukushi University
- 4) 豊橋創造大学大学院 健康科学研究科
Hirofumi Nakagawa, Dr. Eng., Akira Kanai, PT, PhD:
Graduate School of Health Sciences, Toyohashi SOZO
University

E-mail: j-hikosaka@sozo.ac.jp

関節屈曲、外反、外旋位である「knee-in toe-out」の姿勢が多いとされている。一方、屍体膝を用いた研究⁹⁾によると、膝関節軽度屈曲位での外反、内旋にてACLの張力が最大になるとされている。加えて、櫻井ら¹⁰⁾は膝関節内旋運動により伸張されたACLが、交差した膝後十字靱帯に後外側から強く圧迫されることで剪断力が強くなり、この剪断力がACL損傷に繋がる可能性があるとして報告している。このように、ACL損傷が発生する際の膝関節アライメントについては未だ意見の一致をみておらず、損傷時の膝関節アライメントにはバリエーションがある可能性がある²⁾ものの、膝関節の回旋が増加することによりACL損傷の発生リスクが高まる可能性がある。

膝関節など人体における動作解析では、マーカーを皮膚表面に設置して行う方法が非侵襲性の計測方法として広く用いられている。しかし、これらの解析手法は、皮膚の変形や筋の膨隆などのアーチファクトによってマーカーがランドマークである骨標点上から移動する¹¹⁾可能性がある。膝関節は屈曲・伸展方向への運動が大きい蝶番関節であり、内外反や回旋方向への角度変化は非常に小さい。そのため、内外反や回旋方向における関節運動計測では、アーチファクトによる計測誤差の影響を受けやすく、従来の動作解析手法では屈曲・伸展以外の膝関節運動において大きな誤差を含む可能性がある¹²⁾との欠点が指摘されてきた。そこで、本実験では膝関節の動作計測にPoint Cluster法（以下、PC法）を用いた。PC法は、1998年にAndriacchiら¹³⁾によって報告された動作解析手法である。この手法は、大腿部および下腿部に複数のマーカーを貼付し、各体節の複数マーカーをマーカー群（クラスター）として認識し、慣性主軸を求めることで、これまで問題とされてきた皮膚の動きなどによる誤差の影響を減少させる解析方法である。しかし、これまでPC法のような詳細な膝関節運動の分析を用いて体幹や股関節運動との関連をみた報告は少ない。

そこで本研究では、ACL損傷リスクが高いとされる片脚着地動作における着地姿勢の違いが膝関節内旋運動へ与える影響について検討することを目的とした。

対象および方法

1. 対象

対象は、高校女子バレーボール部員22名（平均年齢 16.0 ± 0.8 歳、平均身長 158.5 ± 5.8 cm、平均体重 55.8 ± 6.5 kg）とした。利き脚は右脚21

名、左脚1名であった。身体、特に膝関節において、日常生活に支障を来すような痛みがある者、関節可動域制限などの運動機能障害がある者は対象から除外した。

対象者には、口頭および書面にて研究内容や注意事項などを説明した上で、対象者全員から実験同意書に署名を得た。また、対象者は全員未成年であったため、併せて保護者から実験同意書に署名と捺印を得て、計測を実施した。なお、本研究は豊橋創造大学生命倫理委員会にて承認（H2014003）されている。

2. 動作課題

対象者は、静止立位および片脚着地動作を行った。静止立位は、足幅は肩幅で、解剖学的肢位を保持させた。片脚着地動作は、高さ30 cmの台上面にて利き脚で片脚立位をとり、前方および上方へ跳び上がることなく落下させ、片脚着地させた。両手は腸骨稜に当てた状態で保持させた。先行研究¹⁴⁾では台から30 cm前方へ着地動作を行っているが、本実験では対象者の体格を考慮し、台から25 cm前方への着地動作とした。

着地は利き脚にて行い、利き脚はボールを蹴る側の脚とした。着地時の足部方向は進行方向と平行となるよう指示し、着地後3秒間、片脚立位にて静止した試行を成功試行とした。

3. 動作条件

上記の片脚着地動作を実施する中で、以下の3つの動作条件を設定し、それぞれ計測を行った。一つ目は（a）体幹の前傾角度を規定しない着地（自由条件）、二つ目は（b）体幹前傾位（前傾45°）にて着地（前傾条件）、三つ目は（c）体幹直立位（前傾0°）にて着地（直立条件）である。

計測手順は、条件設定による自由条件への影響を考慮し、（a）を実施後に（b）および（c）を実施した。（b）と（c）の順番は、各対象者においてランダム化して実施した。各条件において動作に慣れるように数回練習を行った後、3回成功するまで計測を実施した。

4. データ計測

動作計測には、三次元動作解析装置（VICON MOTION SYSTEMS 社、VICON MX）を用いた。赤外線カメラ8台を使用し、サンプリング周波数120 Hzで反射マーカーの三次元位置座標を計測した。動作計測のために対象者の全身に反射マーカーを計54個貼付した（図1）。着地脚の膝関節の計測に



図 1. 反射マーカ貼付位置

は PC 法を用いた。PC 法は静止立位を基準肢位とし、計 23 個（腸骨稜、大転子、大腿骨内側上顆、大腿骨外側上顆、脛骨内側上顆、脛骨外側上顆、内果、外果、大腿マーカー 9 個、下腿マーカー 6 個）のマーカーを用いて、先行研究^{13) 15)}に準じて膝関節角度を算出した。体幹および着地脚の股関節の計測には Plug-in Gait モデルを用いた。体幹および骨盤角度については絶対座標系に対する角度を算出し、股関節角度については骨盤軸に対する大腿部の相対的な角度を算出した。

5. 解析方法

着地直後の膝関節外旋角度について、全被検者の平均値の推移（図 2）を見ると、全条件において着地直後から膝関節内旋方向への運動を認めた。したがって、本研究では膝関節内旋運動に着目して検討することとした。また、解析範囲は着地から膝関節内旋角度最大時までとし、体幹および下肢の各関節角度を算出した。成功試行 3 回の平均値を各被験者の代表値とし、膝関節内旋角度最大時における各関節角度について、各条件間に対応のある一元配置分散分析および多重比較検定（Bonferroni 法）を行った。また、膝関節内旋角度変化量と各関節角度変化量との相関関係をピアソンの相関係数を用いて検討した。膝関節内旋角度変化量と各関節角度変化量は、着地時の角度から膝関節内旋角度最大時の角度までの関節角度変化量とした。着地の瞬間を定義するために床反力計（AMTI 社、OR 6-7）を使用し、計測された床反力

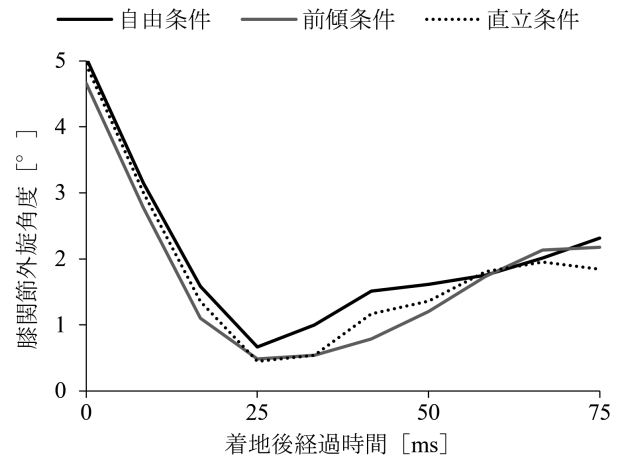


図 2. 着地後の膝関節外旋角度の推移

膝関節約 5° 外旋位で着地し、約 25 ms で膝関節内旋角度がピークを迎え、その後再び外旋方向へ運動した。各条件間の差は 1° 以下で推移している。

が 10N を超えた瞬間を着地の瞬間とした。値は平均 ± 標準偏差で示し、各検定の有意水準は 5% とした。統計学的解析には、統計解析ソフトウェア（SPSS Statistics 18.0, IBM 社）を用いた。

結果

膝関節内旋角度最大時における体幹および骨盤前傾角度、股関節および膝関節屈曲角度の結果を表 1 に示す。体幹前傾角度は前傾条件 ($17 \pm 5.3^\circ$)、自由条件 ($9.2 \pm 5.3^\circ$)、直立条件 ($3.5 \pm 3.8^\circ$) の順で有意 ($p < 0.01$) に高値を示した。骨盤前傾角度は前傾条件 ($13.1 \pm 4.9^\circ$)、自由条件 ($9.7 \pm 5.2^\circ$)、直立条件 ($7.5 \pm 5.5^\circ$) の順で有意 ($p < 0.01$) に高値を示した。股関節屈曲角度は他の 2 条件（自由条件： $23.1 \pm 6^\circ$ 、直立条件： $21.7 \pm 5.9^\circ$ ）と比較して前傾条件 ($29.5 \pm 5.6^\circ$) で有意に高値 ($p < 0.01$) を示した。膝関節屈曲角度は、自由条件 ($46.1 \pm 8.6^\circ$) と比較して前傾条件 ($49.9 \pm 9^\circ$) で有意に高値 ($p < 0.05$) を示した。

膝関節内旋角度変化量と各関節角度変化量との相関関係を表 2 に示す。前傾条件と直立条件において、膝関節屈曲角度変化量と膝関節内旋角度変化量との間に有意な負の相関（前傾条件： $r = -0.52$, $p = 0.01$, 直立条件： $r = -0.49$, $p = 0.02$ ）を認めた。また、全条件において、股関節屈曲角度変化量と膝関節内旋角度変化量との間に有意な負の相関（自由条件： $r = -0.47$, $p = 0.03$, 前傾条件： $r = -0.50$, $p = 0.02$, 直立条件： $r = -0.44$, $p = 0.04$ ）を認めた。さらに、前傾条件において、骨盤立脚

表1. 各条件における体幹および骨盤前傾角度, 股関節および膝関節屈曲角度

	自由条件 (A)	前傾条件 (B)	直立条件 (C)	
胸郭前傾角度 [°]	9.2 ± 5.3	17 ± 5.3	3.5 ± 3.8	*, †,
骨盤前傾角度 [°]	9.7 ± 5.2	13.1 ± 4.9	7.5 ± 5.5	*, †,
股関節屈曲角度 [°]	23.1 ± 6	29.5 ± 5.6	21.7 ± 5.9	*, †
膝関節屈曲角度 [°]	46.1 ± 8.6	49.9 ± 9	46.7 ± 8.8	¶

*: A - B (p < 0.01), ¶: A - B (p < 0.05), †: B - C (p < 0.01), ||: A - C (p < 0.01)

表2. 膝関節内旋角度変化量と膝関節屈曲角度変化量, 股関節屈曲角度変化量, 骨盤立脚側傾斜角度変化量との相関関係

	自由条件	前傾条件	直立条件
膝関節屈曲角度変化量 [°]	-0.39	-0.52 *	-0.49 *
股関節屈曲角度変化量 [°]	-0.47 *	-0.50 *	-0.44 *
骨盤立脚側傾斜角度変化量 [°]	0.33	0.46 *	0.15

*: p < 0.05

側傾斜角度変化量と膝関節内旋角度変化量との間に有意 (r = 0.46, p = 0.03) な正の相関を認めた。

考察

本研究により明らかとなった ACL 損傷リスクの軽減に関連する2つの動作様式に関して、以下に述べる。

1つ目の動作様式として、体幹、骨盤の前傾角度が大きい着地動作は、着地直後の下肢屈曲角度が大きいことが挙げられる。膝関節内旋角度最大時において、前傾条件で体幹および骨盤前傾角度、股関節および膝関節屈曲角度が有意に高値を示した。Blackburn と Padua¹⁶⁾ は、自然な着地動作と体幹を前傾させた着地動作の2つの課題を計測、比較し、最大体幹前傾角度が47%増加したことに伴い、膝関節屈曲角度が22°、股関節屈曲角度が31°増加したことを報告しており、本研究でも同様の結果が認められた。

さらに、膝関節屈曲角度変化量および股関節屈曲角度変化量と膝関節内旋角度変化量との間に有意な負の相関を示した。これらの結果より、各条件内において、片脚着地動作時に体幹前傾が増大するほど膝関節内旋角度が減少することが認められた。膝関節屈曲運動に伴って膝関節内旋運動が起こる現象として、スクリーホームムーブメント (以下, SHM) が知られている。SHMは膝関節最終伸展時の大腿骨に対する脛骨の自動的な外旋運動であり、伸展位からの屈曲時は逆の内旋運動が起こるとされる。多くの報告でSHMは屈曲0-20°の範囲で起こるとされており、Asano ら¹⁷⁾ は、荷重位では膝関節屈曲30°以下においてSHMが顕著であると報告した。今回の結果において、膝関節内旋角度最大時に膝関節屈曲は平均40-50°

であった。加えて、膝関節屈曲角度の増加に伴って膝関節内旋角度も増加する傾向が見られると考えられるが、今回の結果では異なる傾向を示した。したがって、本実験で認められた膝・股関節屈曲運動に伴う膝関節内旋運動は、SHM以外の要素が関与していると考えられた。そこで、この関節運動の要因の一つとして、膝関節における関節圧迫力が挙げられる。脛骨プラトー面は脛骨軸に対して後方へ10-15°傾斜しており、内側面と外側面で傾斜角が異なる。この傾斜角が脛骨前方移動と軸回旋を生み出すと考えられている。Meyer と Haut¹⁸⁾ は屍体膝を屈曲30°にて固定し、前額面および水平面の動きを制限しない状態で関節圧迫力を増加させたところ、関節圧迫力に伴い膝関節内旋角度および脛骨前方変位量が増加したと報告した。Stijak ら¹⁹⁾ は、脛骨プラトー後方傾斜角の内側と外側の差とACL損傷の発生に関連があると報告している。これらは、関節圧迫力が増大することにより、ACL損傷のリスクを増大させる可能性を示唆している。

また、着地動作において膝関節が最も衝撃吸収に貢献する⁶⁾とされており、Schmitz ら²⁰⁾ は片脚着地動作において、女性では股関節と膝関節の屈曲角度変化量が小さいことにより下肢全体における衝撃吸収が減少し、床反力垂直成分が増大することを示した。同様の知見として、Blackburn と Padua²¹⁾ も着地動作における体幹前傾が着地時の床反力を減少させると報告している。したがって、本実験では脛骨プラトー傾斜および関節圧迫力の検討を行っていないものの、体幹前傾に伴い下肢屈曲角度が増加することで、着地動作における下肢での衝撃吸収が効率的に行え、膝関節への圧迫力が低下し、膝関節内旋運動が減少した可能

性が示唆された。

2つ目の動作様式として、体幹、骨盤の立脚側への側方傾斜が着地直後の膝関節内旋方向への運動を増加させることが挙げられる。Hewett ら²²⁾は、ACL 損傷時に撮影していた動画を解析し、ACL 損傷時に体幹が受傷側に側方傾斜していたことを報告している。また、Koga ら²³⁾は ACL 損傷時に急激な膝関節外反、内旋運動が生じていたと報告している。これらは、着地直後における体幹、骨盤の立脚側への側方傾斜に付随して大腿骨が外旋し、この運動に膝関節外反を伴うことで膝関節内旋運動が生じ、ACL 損傷リスクを高める可能性を示唆している(図3)。本研究結果では、前傾条件においてのみ上記の事象を認めた。この理由として、体幹を前傾した着地動作では股関節屈曲角度が増加することで、股関節外転筋群が活動しづらい姿勢となったことが挙げられる。Powers²⁴⁾は、股関節外転筋群が前額面における骨盤の水平を維持するために重要な役割を果たし、動的な課題における立脚側への骨盤側方傾斜が、床反力ベクトルを股関節中心に近付けて股関節外転筋への要求を減らす股関節外転筋力低下に対する代償であると報告している。本研究においても同様に、股関節外転筋群を代償し、股関節の安定性を確保するために立脚側への骨盤側方傾斜が生じたと推察された。

以上より、体幹を前傾させた着地動作において ACL 損傷のリスク要因となる膝関節内旋運動を減少させるためには、片脚着地動作における立脚側への体幹、骨盤の側方傾斜を減少させ、骨盤のより適切なアライメントを得ることが重要である可能性が示唆された。したがって、股関節屈曲位での股関節外転筋群のパフォーマンスを向上させるとともに、矢状面のみでなく、前額面の骨盤アライメントにも着目した着地動作指導を行うことが重要であると考えられた。

本研究の限界として、以下の点が挙げられる。まず、膝関節内旋角度最大時において関節圧迫力を検討していない点である。先述のように、膝関節に加わる大きな関節圧迫力は膝関節内旋運動を誘導する可能性がある。したがって、膝関節内旋角度最大時における膝関節への関節圧迫力を分析することで、より詳細な膝関節内旋運動の検討が可能になると考えられる。

次に、着地動作時の筋活動を検討していない点である。先述のように、股関節外転筋群の活動が片脚着地動作時の股関節安定性の確保に重要な役割を果たす。股関節を中心に筋活動の検討を行うことで、体幹および股関節運動と膝関節運動との

関連をより詳細に解明できると考えられる。

そして、本研究において使用した PC 法の計測精度についてである。鈴木ら²⁵⁾は、三脚を用いて作製した擬似下肢装置を使用し、本実験で用いた PC 法のプログラムの精度検定を行った。その結果、装置で設定した回転角度と PC 法による角度の計測の差は 1° 以下であり、高い精度を有していることが確認された。しかし、図2より、解析範囲(着地から膝関節内旋角度最大時まで)における膝関節内旋角度の変化量は全条件において 5° 以下であり、各条件間の差は 1° 以下で推移している。解析対象としている関節可動範囲を考慮すると、計測誤差が 1° 以下であっても結果の解釈に影響しないとは言いきれない。今後は関節角度のみでなく、運動力学的解析を組み合わせた検討が必要であると考えられる。

最後に、実際に膝関節が危険な肢位となる動作を計測していない点である。片脚着地動作は ACL 損傷リスクの高い動作であるものの、実際の ACL 損傷は膝の生理的な運動範囲を超えた際に発生する。したがって、倫理的に配慮した安全な範囲での膝関節運動を計測した本実験結果は着地時の体幹前傾姿勢の違いが示す傾向であることに留まる。実際の損傷場面により近い動作について計測・解析を行うことが ACL 損傷のリスクを推定するためには有意義であると考えられる。

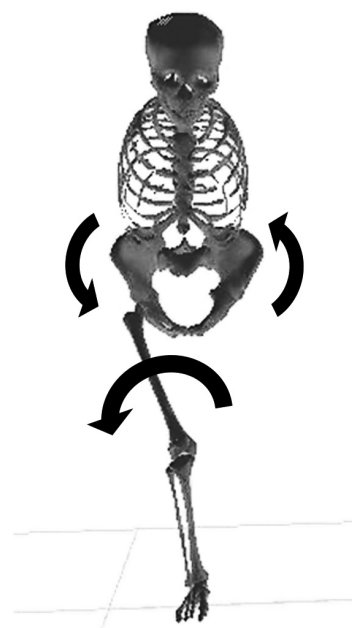


図3. 骨盤立脚側傾斜に伴う大腿骨外旋により生じる膝関節内旋運動

着地直後における体幹・骨盤の立脚側への側方傾斜に付随して大腿骨が外旋し、膝関節外反を伴うことで膝関節内旋運動が生じる。

今回、片脚着地動作をする際、上記の2つの動作様式、体幹を前傾させること、そして立脚側への骨盤の傾斜を減少させることにより、着地側の膝関節内旋運動が減少することが認められた。したがって、片脚着地動作において体幹および骨盤運動を制御することにより、ACL損傷のリスク要因とされる膝関節回旋運動を減少させる可能性が示唆された。

結論

体幹および骨盤の前傾が大きい片脚着地動作は、着地直後の下肢屈曲角度が大きく、下肢での衝撃吸収が効率的に行えることで、膝関節内旋運動が減少することが推察された。また、体幹を前傾させた片脚着地動作において、骨盤の立脚側への側方傾斜を減少させることにより、着地直後の膝関節内旋運動が減少し、ACL損傷リスクを軽減させる可能性が示唆された。

謝辞

本研究を行うにあたり、計測に協力してくださいました22名の被験者の方々に心より感謝の念を表します。

【文 献】

- 1) Daniel DM, Malcom LL, et al.: Instrumented measurement of anterior laxity of the knee. *J Bone Joint Surg Am.* 1985; 67 (5) : 720-726.
- 2) Olsen OE, Myklebust G, 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.
- 3) Boden BP, Dean GS, et al.: Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics.* 2000; 23 (6) : 573-578.
- 4) de Leva P: Joint center longitudinal positions computed from a selected subset of Chandler's data. *J Biomech.* 1996; 29 (9) : 1231-1233.
- 5) Devita P, Skelly WA: Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Med Sci Sports Exerc.* 1992; 24 (1) : 108-115.
- 6) Decker MJ, Torry MR, et al.: Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2003; 18 (7) : 662-669.
- 7) Huston LJ, Vibert B, et al.: Gender differences in knee angle when landing from a drop-jump. *Am J Knee Surg.* 2001; 14 (4) : 215-219.
- 8) Shimokochi Y, Yong Lee S, et al.: The relationships among sagittal-plane lower extremity moments: implications for landing strategy in anterior cruciate ligament injury prevention. *J Athl Train.* 2009; 44 (1) : 33-38.
- 9) Markolf KL, Burchfield DM, et al.: Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *J Orthop Res.* 1995; 13 (6) : 930-935.
- 10) 櫻井好美, 石井慎一郎・他: 両脚着地動作における膝関節角度の男女差と前十字靭帯損傷. *理学療法科学.* 2012; 27 (4) : 461-464.
- 11) 石井慎一郎, 山本澄子: 実験用模型を使用したPoint Cluster法による膝関節運動の計測精度. *理学療法.* 2007; 24 (10) : 1361-1369.
- 12) Reinschmidt C, van den Bogert AJ, et al.: Effect of skin movement on the analysis of skeletal knee joint motion during running. *J Biomech.* 1997; 30 (7) : 729-732.
- 13) Andriacchi TP, Alexander EJ, et al.: A point cluster method for in vivo motion analysis: applied to a study of knee kinematics. *J Biomech Eng.* 1998; 120 (6) : 743-749.
- 14) Nagano Y, Ida H, et al.: Gender differences in knee kinematics and muscle activity during single limb drop landing. *Knee.* 2007; 14 (3) : 218-223.
- 15) 後藤寛司, 金井章・他: フォワードランジ動作におけるステップ幅の違いが膝関節動態に及ぼす影響について～Point Cluster法を用いた解析～. *臨床バイオメカニクス.* 2014; 35: 227-231.
- 16) Blackburn JT, Padua DA: Influence of trunk flexion on hip and knee joint kinematics during a controlled drop landing. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2008; 23 (3) : 313-319.
- 17) Asano T, Akagi M, et al.: In vivo three-dimensional knee kinematics using a biplanar image-matching technique. *Clin Orthop Relat Res.* 2001; 388: 157-166.
- 18) Meyer EG, Haut RC: Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibiofemoral compression. *J Biomech.* 2008; 41 (16) : 3377-3383.
- 19) Stijak L, Herzog RF, et al.: Is there an influence of the tibial slope of the lateral condyle on the ACL lesion? A case-control study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2007; 16 (2) : 112-117.

-
- 20) Schmitz RJ, Kulas AS, et al.: Sex differences in lower extremity biomechanics during single leg landings. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2007; 22 (6) : 681-688.
- 21) Blackburn JT, Padua DA: Sagittal-plane trunk position, landing forces, and quadriceps electromyographic activity. J Athl Train. 2009; 44 (2) : 174-179.
- 22) Hewett TE, Torg JS, et al.: 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.
- 23) Koga H, Nakamae A, et al.: Mechanisms for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries. Am J Sports Med. 2010; 38 (11) : 2218-2225.
- 24) Powers CM: The influenced of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. J Orthop Sports Phys Ther. 2010; 40 (2) : 42-51.
- 25) 鈴木康雄, 彦坂潤・他：ポイントクラスター法を用いた膝関節運動の精度検定. 日本福祉大学健康科学論集. 2015; 18: 19-26.