



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	着地動作時の膝関節外反角度およびモーメントに影響する要因の検討：膝前十字靱帯損傷予防の観点から
Author(s)	石田, 知也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(保健科学)
Dissertation Number	甲第11865号
Issue Date	2015-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11865
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58650
Type	doctoral thesis
File Information	Tomoya_Ishida.pdf



学 位 論 文

着地動作時の膝関節外反角度およびモーメントに
影響する要因の検討

—膝前十字靱帯損傷予防の観点から—

石 田 知 也

北海道大学大学院保健科学院
保健科学専攻保健科学コース

2014 年度

目 次

要約	1
1. 諸言	3
1. 1. 膝関節の構造と膝関節靱帯	3
1. 1. 1. 膝関節の構造	3
1. 1. 2. 膝前十字靱帯機能	3
1. 2. 膝前十字靱帯損傷の疫学, 病態, 社会的問題	4
1. 2. 1. 疫学	4
1. 2. 2. 膝前十字靱帯損傷の病態	4
1. 2. 3. 膝前十字靱帯損傷による社会的損失, 経済的損失	5
1. 3. 膝前十字靱帯損傷メカニズム	6
1. 3. 1. 膝前十字靱帯損傷場面ビデオ解析からの損傷メカニズムの推察	6
1. 3. 2. 骨挫傷発生部位からの膝前十字靱帯損傷メカニズムの推察	6
1. 3. 3. 屍体膝を用いたバイオメカニクス研究や モデルシミュレーションからの ACL 損傷メカニズムの推察	7
1. 4. 膝前十字靱帯損傷危険因子	8
1. 4. 1. 環境因子	8
1. 4. 2. 解剖学的因子	8
1. 4. 3. ホルモン因子	10
1. 4. 4. 神経筋および生体力学的因子	10
1. 5. 論文目的	12
2. 着地動作時の足部方向の変化が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響	13
2. 1. 諸言	13
2. 2. 方法	14
2. 2. 1. 対象	14
2. 2. 2. 実験手順およびデータ収集	14
2. 2. 3. データ解析	16
2. 2. 4. 統計学的解析	17
2. 3. 結果	18
2. 4. 考察	22
2. 5. 結論	23

3. 着地後に続くジャンプ動作が	
着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に与える影響	24
3. 1. 諸言	24
3. 2. 方法	25
3. 2. 1. 対象	25
3. 2. 2. 実験手順およびデータ収集	25
3. 2. 3. データ解析	26
3. 2. 4. 統計学的解析	27
3. 3. 結果	28
3. 4. 考察	32
3. 5. 結論	34
4. 着地動作における股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動の関係	35
4. 1. 諸言	35
4. 2. 方法	36
4. 2. 1. 対象	36
4. 2. 2. 実験手順およびデータ収集	36
4. 2. 3. データ解析	36
4. 2. 4. 統計学的解析	37
4. 3. 結果	38
4. 4. 考察	42
4. 5. 結論	45
5. 総括論議	46
6. 結論	48
7. 謝辞	49
8. 引用文献	50
9. 業績一覧	72

要約

1. 諸言

膝前十字靱帯 (Anterior cruciate ligament: ACL) 損傷は膝関節のスポーツ外傷の中で最も重篤で、発生頻度が高い外傷である。ACL 損傷後には、膝関節不安定性による膝崩れが生じ、スポーツ活動中だけではなく日常生活レベルでも機能制限が生じるとされ、関節不安定性の回復のために ACL 再建術が広く行われている。しかし、高い治療コスト、治療に際して半年から 1 年間の競技活動からの離脱、再建術の有無に関わらずスポーツ復帰後の競技レベルが低下することや変形性関節症リスクが増加することなど、ACL 損傷に関連する経済的、社会的問題は大きい。また、ACL 損傷の特徴として、多くが他者との明確な接触がない着地動作やカッティング動作などで生じる非接触型損傷であること、発生頻度が男性に比べて女性で有意に高いことが知られている。以上の様な背景より、ACL 損傷予防、特に女性の ACL 損傷予防はスポーツ医学領域において国際的な重要課題の一つであると考えられている。

ACL 損傷予防を考える上で、ACL 損傷メカニズムの理解は重要である。ACL 損傷メカニズムはまだ完全には解明されていないが、受傷場面のビデオ解析や、ACL 損傷後に観察される骨挫傷の位置、基礎バイオメカニクス研究やモデルシミュレーション研究など多くの観点から膝関節外反が重要な損傷メカニズムの一つとして提唱されている。また、女性アスリートを対象とした前向き調査では、三次元動作解析により算出した着地動作時の膝関節外反角度および外反モーメントが ACL 損傷の予測因子であったことが報告されている。この様に、着地動作時の膝関節外反角度や外反モーメントの増加は ACL 損傷のリスクの一つとして考えられているが、着地動作時の膝関節外反角度や外反モーメントに影響する要因については十分に明らかとなっていない。したがって、本論文の目的は着地動作時の膝関節外反角度や外反モーメントに影響する要因を以下の 3 つの観点で検討することとした: 1) 着地動作時の足部方向の変化による影響, 2) 着地動作に続くジャンプ動作の影響, 3) 股関節回旋運動との関連。

2. 着地動作時の足部方向の変化が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響

健康女性 14 名を対象とした。三次元動作解析装置と床反力計を用いて、以下の 3 条件の着地動作を記録した: 1) 足部方向に関する指示を与えない **natural landing**, 2) 着地動作時に足部方向を内側へ向けるよう指示した **toe-in landing**, 3) 着地動作時に足部方向を外側へ向けるよう指示した **toe-out landing**. 各条件における膝関節外反角度および外反モーメントを一元配置反復測定分散分析にて比較した。**Toe-in landing** では、他の 2 条件に比して有意に大きな最大膝関節外反角度および外反モーメントを呈した。一方で、**toe-out landing** における最大膝関節外反角度および外反モーメントは他の 2 条件に比して有意に低値であった。

3. 着地後に続くジャンプ動作が着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に与える影響

健康女性 21 名, 男性 21 名を対象とした. 三次元動作解析装置と床反力計を用いて, 以下の 3 つの動作課題を無作為の順序にて記録した: 1) 30cm 台から着地後, 直ちに最大垂直跳びを行う drop vertical jump (DVJ), 2) 30cm 台からの単純な着地動作である drop landing (DL), 3) 静止立位より最大垂直跳びを行うジャンプ踏み切り動作. 3 つの動作課題における膝関節外反角度および外反モーメントを二元配置分散分析にて比較した. 女性では, 着地後 50ms における膝関節外反角度, 着地動作における最大膝関節外反角度が, DL に比し DVJ で有意に高値であった. 一方で, 男性は課題間に膝関節外反角度の差を認めなかった. また, 2 つの着地動作課題だけではなく, 外力が加わらないジャンプ踏み切り動作においても女性は男性と比較して有意に大きな膝関節外反角度を示した. 膝関節外反モーメントに課題間の差および性差は認めなかった.

4. 着地動作における股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動の関係

健康女性 52 名を対象とした. 三次元動作解析装置と床反力計を用いて, 着地動作を記録した. 以下の 2 つの区間における股関節内旋角度変化量と膝関節外反角度変化量の関係を Pearson の積率相関係数を用いて検討した: 1) 初期接地後 50ms 間, 2) 初期接地時から膝関節最大屈曲時までの間. また, 膝関節最大屈曲時の股関節内旋角度を基準に対象を 3 群に分け, 上位群と下位群の膝関節外反角度を *t*-test を用いて比較した. 初期接地後 50ms 間および初期接地時から膝関節最大屈曲時までの股関節内旋角度変化量と膝関節外反角度変化量の間には有意な負の相関関係を認めた. また, 相対的股関節内旋群は相対的股関節外旋群に比して, 膝関節最大屈曲時の膝関節外反角度が有意に低値であった.

5. 考察および結論

着地動作時の足部方向は着地動作時の膝関節外反角度および外反モーメントに有意に影響を与え, toe-in landing では膝関節外反角度および外反モーメントが有意に増加した. この結果より, ACL 損傷予防において, toe-in landing は避けるべきであると考えられた. 着地後に続くジャンプ動作は, 女性の膝関節外反角度を有意に増加させた. また, 女性は外力が加わらないジャンプ踏み切り動作においても男性と比較して有意に大きな膝関節外反角度を呈していた. これらの結果は女性の ACL 損傷リスクが高いことの一部を説明するかもしれない. ACL 損傷予防においては, 単純な着地動作だけではなく, 連続ジャンプなど着地後にジャンプ動作が続く課題への介入が重要であると考えられる. 着地動作時の股関節内旋角度変化量は, 膝関節外反角度変化量と有意な負の相関関係にあり, 股関節内旋角度の増加と膝関節外反角度の減少という関連が認められた. 今後は股関節外旋筋の遠心性機能や, 股関節回旋可動域との関連も明らかにすることによって, ACL 損傷予防の発展に繋がるだろう.

本論文で得られた所見は, ACL 損傷予防において, 着地動作時の膝関節外反角度および外反モーメントの減少を目的とした介入を考える上で重要な所見である. 今後も, 着地動作時やカッティング動作時の膝関節外反角度および外反モーメントに影響する要因について検討を重ねていくことが ACL 損傷予防の発展に繋がるだろう.

1. 諸言

1. 1. 膝関節の構造と膝関節靱帯

1. 1. 1. 膝関節の構造

膝関節は大腿骨と脛骨からなる脛骨大腿関節と、膝蓋骨と大腿骨からなる膝蓋大腿関節の二つの関節から構成され、狭義には膝関節とは脛骨大腿関節を指す。本論文では、脛骨大腿関節の靱帯である前十字靱帯 (Anterior cruciate ligament: ACL) 損傷予防に関して論ずるため、以下では脛骨大腿関節を膝関節として述べていく。

関節の安定性は主に筋腱ユニットからなる動的支持機構と、関節を成す骨の適合性、靱帯や関節包からなる静的支持機構により得られる¹⁸⁰⁾。膝関節は、股関節や足関節（距腿関節）と比較すると、骨形状による安定性は乏しく、靱帯や関節包、半月板からなる静的支持機構がその安定性に重要な役割を果たす¹⁸⁰⁾。膝の靱帯には主に、内側側副靱帯 (Medial collateral ligament: MCL)、外側側副靱帯、ACL、後十字靱帯、後斜靱帯、弓状靱帯膝窩筋腱複合体があり、各々が膝関節の安定性に関して重要な機能を果たしている¹⁸⁰⁾。

膝関節のスポーツ外傷は足関節に次いで2番目に多いとされ^{62, 96)}、3週間以上のスポーツ活動休止や手術を要する重篤なスポーツ外傷の中で膝関節外傷は最も多いとされる^{43, 203)}。ACL損傷は膝のスポーツ外傷の中でも最も重篤で、発生頻度が高い外傷である^{127, 144, 203)}。

1. 1. 2. 膝前十字靱帯機能

ACLは大腿骨顆間窩外側壁より起始し、脛骨前顆間区に停止する^{79, 148, 193, 194)}。ACLは大きく2つの線維束に分けられ、前内側線維束 (Anteromedial bundle: AMB)、後外側線維束 (Posterolateral bundle: PLB) の2つの線維が捻じれて走行している^{148, 193, 194)}。ACLの最も重要な機能として、大腿骨に対する脛骨の前方並進運動の制御が知られており、ACLは大腿骨に対する脛骨の前方剪断力に抗する力の内85%を担っているとされている³⁰⁾。ACLの2つの線維束は力学的機能分担があることが報告されている^{13, 68, 111, 184)}。AMBは伸展位で最も伸長され、膝関節の屈曲とともに短縮するが、屈曲90°以降で再び伸長される^{13, 111)}。一方で、PLBは伸展位で最も伸長され、膝関節の屈曲とともに短縮することが報告されている^{13, 111)}。また、ACLの脛骨前方並進移動制御機能に関して、AMBとPLBは機能分担をしていることが報告されており、相対的にAMBは膝関節屈曲位で、PLBは膝関節伸展位で脛骨の前方並進移動を制御するとされている^{68, 184)}。屍体膝を用いた基礎生体力学研究では、ACLは脛骨前方並進移動だけではなく、膝関節外反や脛骨内旋によっても張力が高まることが示されており、これらの運動に対する制御にも関与していると考えられている^{131, 132, 136, 145)}。

1. 2. 膝前十字靱帯損傷の疫学, 病態, 社会的問題

1. 2. 1. 疫学

ACL 損傷は米国では, 一般人口において約 3,000 人に 1 件発生し¹⁴⁴⁾, 年間では 12 万件以上発生すると推定されている¹⁰⁶⁾. ACL 損傷は主にスポーツ活動中に発生するとされ^{169, 171)}, 国内, 国外ともにサッカーやバスケットボール等のコートスポーツやスキーでの受傷が多いと報告されている^{92, 107, 226)}. また, ACL 損傷は 10 代より発生し, 10 代後半から 30 代での損傷者, ACL 再建術施行患者数が最も多いとされる^{71, 127, 144, 187)}.

スポーツ活動中の ACL 損傷は, 大きく接触型損傷と非接触型損傷に分類される. 接触型損傷とは膝への直接外力 (他者からのタックル等) による損傷であり, 非接触型損傷とは他者との明らかな接触がない着地動作やカッティング動作などで生じる損傷である. ACL 損傷は格闘技やラグビー, アメリカンフットボールの様なコンタクトスポーツを除き, 大多数が非接触型損傷であるとされている^{2, 12, 26, 29, 39, 58, 59, 107, 110, 158, 159, 226)}. 非接触型損傷が多いという事実は, ACL 損傷に予防の余地があることを示している. また, ACL 損傷の特徴として, 単位スポーツ時間 (例, 1,000 athlete-hours) もしくは単位スポーツ暴露数 (例, 1,000 athlete-exposures) あたりの ACL 損傷発生率は, 女性が男性と比較して高いことが報告されており^{2, 12, 25, 140, 142, 158)}, ACL 損傷発生率の性差は思春期を通して明らかになってくることが示唆されている¹⁸⁷⁾. 特に, 女性では非接触型 ACL 損傷率が高いことが知られており^{2, 12)}, 女性スポーツ選手の ACL 損傷予防は重要であると考えられている^{88, 181)}.

1. 2. 2. 膝前十字靱帯損傷の病態

ACL 損傷の症状として, 一般的に疼痛, 腫脹, 膝関節不安定性による膝崩れ (giving way) が挙げられ, スポーツ活動中だけではなく日常生活レベルでも機能的制限が生じるとされている^{28, 155)}. 保存療法によるスポーツ復帰を検討した報告では, ローアクティビティーなスポーツ (ジョギングやゴルフ) の復帰率は高い一方で, ハイアクティビティーなスポーツ (バスケットボールやサッカー) への復帰率は低いことが報告されている^{28, 73)}. また, ACL 損傷後には半月板損傷や軟骨損傷, 変形性関節症変化のリスクが増加することが報告されている^{4, 201, 205, 223)}. ACL 損傷者は歩行中に健常者とは異なる異常な膝 kinematics が観察されており^{9, 38, 66, 186)}, この異常な膝 kinematics は軟骨損傷や変形性関節症変化を惹起すると考えられている³⁶⁾. そのため, ACL 損傷によって生じた関節不安定性の回復を目的として, ACL 再建術が広く行われている^{71, 72, 128, 133)}. 術式により術後成績に差異があることは報告されているが, ACL 再建術後には膝関節安定性や膝関節機能スコアに関して良好な結果が得られている^{121, 182)}. しかし, ACL 再建術施行患者と保存療法実施患者の治療成績を比較した systematic review では, 保存療法群で半月板処置や, 後に ACL 再建術が必要となる場合が多いこと, 変形性関節症変化のリスクが高いものの, 両群間にスポーツ復帰率や膝機能スコアに有意な差を認められなかったとも報告されている^{32, 200)}. また, ACL 再建術後も健常者とは異なった膝 kinematics が観察されることや^{69, 213)}, ACL

再建術を施行しても変形性関節症変化のリスクが高いことが報告されており⁴⁾, ACL 損傷予防の重要性が国際的に認識されている⁷²⁾.

1. 2. 3. 膝前十字靱帯損傷による社会的損失, 経済的損失

ACL 損傷により仕事, 学業, スポーツ活動等からの離脱を余儀なくされ, 社会的損失が生じる. 大学生を対象とした報告では, ACL 損傷者は授業やテストの欠席, 成績の低下などを認めたとしている⁶⁵⁾. また, アメリカ海兵学校では ACL 損傷者は再建術を受けない限り, 入学は認められていない⁷⁵⁾. スポーツに関しては, ACL 再建術の有無に関わらず復帰後の競技レベルの低下を多くの例で認め^{11, 32, 73, 200)}, 再建術を施行した場合には競技復帰まで半年から 1 年間のリハビリテーションが必要となる¹⁵⁾. スポーツ競技から半年以上離脱することは, プロ選手にとってはもちろん, 競技活動期間の限られる学生選手にとっても決して短い期間とはいえない.

ACL 損傷では治療に関わる経済的損失も生じる. Cumps ら⁴²⁾は疫学的調査から ACL 損傷が最も医療コストの高いスポーツ外傷であると報告している. また, 治療に関わる直接的成本だけではなく, 失職や仕事からの離脱による経済的な損失 (間接的成本) や, ACL 損傷後に生じる変形性関節症変化の治療に関わるコストも含めた長期的な医療コストの増加も問題視されている¹³⁴⁾. Swart ら²⁰²⁾は費用対効果の観点からも ACL 損傷予防プログラムの実施を推奨している²⁰²⁾.

1. 3. 膝前十字靱帯損傷メカニズム

1. 3. 1. 膝前十字靱帯損傷場面ビデオ解析からの損傷メカニズムの推察

ACL 損傷メカニズムの推定のため、実際に着地動作やカッティング動作中に ACL 損傷を生じた場面のビデオ解析が行われており、受傷時の膝関節肢位が推測されている^{27, 39, 90, 108, 110, 159}。矢状面上の膝関節肢位に関して、ACL 損傷場面では床面接地時の膝関節屈曲角度が 30° 以下であることが多くの研究より報告されており、浅い膝関節屈曲角度での接地は ACL 損傷の危険性を高めると推測されている^{27, 39, 90, 108, 110, 159}。しかし、Boden ら²⁷は ACL 損傷場面とそれに類似した非損傷場面を比較し、ACL 損傷場面で膝関節屈曲角度が小さい傾向にはあるが両場面の間に有意な差は検出されなかったと報告している。非損傷場面との比較は多くないため結論付けることは出来ないが、浅い膝関節屈曲角度での接地は ACL 損傷にとって必要条件ではあるが、十分条件ではない可能性が考えられる。

前額面に関する検討では、多くの研究が ACL 損傷場面において膝関節の外反が生じていたと報告している^{27, 39, 90, 108, 110, 159}。Boden ら²⁷は ACL 損傷場面と非損傷場面の比較において、床面接地時には膝関節外反角度の差がないものの、ACL 損傷場面では膝関節外反角度が徐々に増加し、床面接地後約 67ms 以降に有意な差を認めたと報告している。Hewett ら⁹⁰は ACL 損傷場面における膝関節外反角度の増加は女性の損傷場面に特徴的であったことを報告した。Koga ら¹⁰⁸はビデオ画像に骨モデルを当てはめる model-based image matching (MBIM) 法を用いて、より詳細な膝関節肢位の推測を試みている。MBIM 法にて ACL 損傷場面 10 例を解析した結果、全例が床面接地後 40ms までに急激な膝関節外反を生じ、9 例が脛骨の内旋を生じていたと報告している¹⁰⁸。ビデオ解析には計測誤差が含まれることや¹⁰⁹、対照となる非損傷場面の欠如、多くの研究^{27, 90, 108, 110, 159}がアメリカの National Basketball Association (NBA) やノルウェーのプロハンドボールリーグの同一ビデオデータを用いている可能性があることなどの限界が考えられるが、唯一実際の損傷場面を対象とした解析であり、これらの研究の多くに共通して報告されている接地時の浅い膝関節屈曲角度や接地後の膝関節外反角度の増加は ACL 損傷メカニズムに関与している可能性が考えられる。

1. 3. 2. 骨挫傷発生部位からの膝前十字靱帯損傷メカニズムの推察

ACL 損傷には多くの例で骨挫傷が合併することが知られており、近年の systematic review では ACL 損傷に伴う骨挫傷は大腿骨外顆と外側脛骨高原から構成される膝関節外側コンパートメントに多く発生するとされている¹⁷⁰。骨挫傷は関節軟骨の衝突による衝撃が軟骨下骨に伝わり生じるとされることから、ACL 損傷時には外側コンパートメントの圧縮負荷、すなわち膝関節外反が生じていたことが推察される¹⁷⁰。近年の研究では、大腿骨内顆と外顆、内側および外側脛骨高原を、それぞれ前方、中央、後方の 3 部位に分け、ACL 損傷後の骨挫傷発生部位が詳細に検討されている^{209, 219}。これら 2 つの研究^{209, 219}の結果はおおむね一致しており、大腿骨では大腿骨外顆の中央から前方に多く認め、脛骨では外側脛骨高原後方が最も多く、次いで内側脛骨高原後方が多かったことを報告してい

る。Quatman ら¹⁷⁷⁾は有限要素法を用いて、骨挫傷が生じるメカニズムを検討し、膝関節外反と脛骨前方並進により大腿骨外顆中央と外側脛骨高原後方に、膝関節外反と脛骨内旋により大腿骨外顆中央と内側および外側脛骨高原後方に関節軟骨接触圧が増加することを明らかにした。これらの先行研究より^{177, 209, 219)}、ACL 損傷後に認める骨挫傷の部位からは、膝関節外反負荷と脛骨前方並進、脛骨内旋が ACL 損傷時に生じていたことが推察される。

1. 3. 3. 屍体膝を用いたバイオメカニクス研究やモデルシミュレーションからの ACL 損傷メカニズムの推察

スポーツ動作における生体内での ACL の生体力学的解析には限界があるため、屍体膝を用いた基礎バイオメカニクス研究や、着地動作のモデルシミュレーションなどを用いて ACL 損傷メカニズムが推察されている。Withrow ら²¹⁴⁾は屍体膝を用いた着地シミュレーションにおいて、大腿四頭筋の収縮力が ACL の strain と有意に関係することを報告している。大腿四頭筋の収縮は、大腿骨に対する脛骨への前方剪断力を生じさせるため ACL に対する ant-agonist と考えられており、逆にハムストリングスは後方剪断力を生じるために ACL の agonist と考えられている^{157, 218)}。これらの先行研究より、ハムストリングスに対する、大腿四頭筋の強い収縮は ACL 損傷のリスクを増加させる一つの要因であると考えられる。

ACL 損傷場面のビデオ解析や、骨挫傷の発生部位からの推察により、膝関節外反負荷が ACL 損傷と関連することが示唆されているため、屍体膝を用いた着地シミュレーションにおいて膝関節外反トルクを負荷した実験が行われている^{188, 215)}。それらの研究では、膝関節外反トルクを付加することにより有意に ACL の strain が増加したことを報告しているが、これらの研究では ACL 損傷は再現されなかった^{188, 215)}。基礎バイオメカニクス研究において膝関節外反と脛骨内旋や、膝関節外反と脛骨前方並進の組み合わせにより、それぞれの単独負荷よりも大きな ACL の張力が生じることから¹³²⁾、近年では複合負荷の影響が検討されている。Shin ら¹⁸⁹⁾は着地動作のモデルシミュレーションを用いて膝関節外反トルクと脛骨内旋トルクを組み合わせることで ACL 損傷をさせうる strain が生じたことを報告した。Levine ら¹²⁰⁾は複合負荷を加えた屍体膝の着地シミュレーションにおいて、ACL 損傷を再現し、膝関節外反トルクが ACL 損傷時の最大 strain に寄与すること、また複合負荷により ACL 損傷が生じやすいことを報告した。Kiapour ら¹⁰⁵⁾も同様の実験系を用いて、膝関節 kinematics と ACL strain の時系列的関係性を検討し、膝関節外反と脛骨前方並進、ACL strain がほぼ同時期に最大値となったことから、膝関節外反と脛骨前方並進が ACL 損傷に重要な役割を果たしていると述べている。また、Quatman ら¹⁷⁸⁾は、屍体膝の着地シミュレーションにおいて膝関節外反制動の主たる構造として知られる MCL と ACL の strain を同時に計測し、着地動作における膝関節外反負荷は MCL よりも ACL の strain を有意に高めたことを報告した。これらの先行研究から、ACL 損傷は様々な負荷が複合した結果生じることが考えられ、ハムストリングスに対する大腿四頭筋の強い収縮や、膝関節外反トルクは ACL 損傷メカニズムの重要な要素の一つであることが推察される。

1. 4. 膝前十字靱帯損傷危険因子

1. 4. 1. 環境因子

ACL 損傷の危険因子は大きく外的因子 (extrinsic factors) と内的因子 (intrinsic factors) に大別され、外的因子として環境因子、内的因子として解剖学的因子、ホルモン因子、神経筋および生体力学的因子が挙げられる^{5, 72, 88, 181)}。環境因子では、天候、床面と靴、試合と練習による発生率の違いといった要素が挙げられている^{5, 72, 88, 181)}。

Olsen ら¹⁵⁸⁾はエリートハンドボール選手の疫学調査から、女性選手では木の床面よりも人工的な床面での ACL 損傷発生率が高いことを報告し、床面と靴の摩擦が女性の ACL 損傷に関与している可能性を示唆している。Lambson ら¹¹³⁾は高校生アメリカンフットボール選手を対象とした 3 年間の前向き研究において、シューズの滑り止めの形状と ACL 損傷発生率の関係を調査し、捻転抵抗性が大きい側面に長い滑り止めが特徴的なタイプのシューズにおいて ACL 損傷発生率が高かったことを報告した。アメリカの National Football League (NFL) やオーストラリアンフットボールを対象とした調査では、気温や降水量、芝生の種類 (天然芝、人工芝) や品種といった要因も ACL 損傷のリスクに関連していることが示唆されており、それらの研究においても地面と靴の間の摩擦の違いが影響していると考察されている¹⁶²⁻¹⁶⁵⁾。

ACL 損傷の発生状況について、試合中と練習中の発生率が比較されている^{25, 29, 152, 210)}。Waldén ら²¹⁰⁾はヨーロッパとスウェーデンのプロサッカー選手の疫学調査において、練習に対する試合での暴露時間が 6 分の 1 以下しかないにも関わらず、ACL 損傷が試合において極めて多く発生することを報告した。また、Bjordan ら²⁵⁾も同様にサッカー選手の ACL 損傷発生率は試合中の方が高かったと報告している。ノルウェーのハンドボール選手においても、単位時間当たりの ACL 発生率が練習中と比較して試合中で非常に高いデータが示されている¹⁵²⁾。また、Bradley ら²⁹⁾は NFL での ACL 損傷について、練習中と比較して試合中での発生件数が 2 倍であったことを報告しており、様々なスポーツで練習と比較して試合中での ACL 損傷発生が多いことが報告されている。

1. 4. 2. 解剖学的因子

ACL 損傷に係る解剖学的因子として、大腿骨顆間窩幅、ACL の形態、脛骨高原後傾角度、関節弛緩性や下肢アライメントなどが挙げられている^{5, 72, 88, 181)}。解剖学的リスク因子は、ACL 損傷予防のための介入余地は極めて小さいが、ACL 損傷メカニズムの理解や ACL 損傷リスクが高い選手をスクリーニングする上でこれらの因子を理解することは重要であると考えられている^{5, 181)}。

大腿骨顆間窩幅の狭小化は ACL と大腿骨顆間窩外側壁の impingement を生じる可能性を高めるとして^{67, 116, 168)}、多くの検討がなされている。Zeng ら²²⁴⁾の meta-analysis では、X 線画像や MRI による測定法の違いや研究デザインの違いによる subgroup での検討も行い、大腿骨顆間窩の狭小化が ACL 損傷のリスク因子となると結論付けている。しかし、狭い大腿骨顆間窩幅や顆間窩の断面積が小さな ACL の体積や断面積と関連することも報

告されており^{35, 48, 197)}、大腿骨顆間窩幅の狭小化による ACL 損傷リスクの増加が **impingement mechanism** によるものではなく、ACL の力学的脆弱性のためである可能性も示唆されている。

ACL の形態に関しては主に性差の観点から検討されている。屍体膝を用いた研究や^{33, 150)}、MRI を用いた研究^{8, 48)}で女性の ACL の断面積が男性と比較して小さかったことが報告されている。また、ACL の断面積は体重で標準化した際や、身長によりマッチングさせて比較した際にも同様の性差が認められている^{8, 48)}。ACL の微細構造の性差を検討した報告では、女性の ACL はコラーゲン線維密度が男性と比較して小さく、女性のコラーゲン線維密度は ACL の **stiffness** やヤング率と相関したことが報告されている⁸⁰⁾。女性の ACL は力学試験における破断張力や **stiffness** といった力学的特性が男性と比較して劣ることが報告されており³⁴⁾、ACL の断面積や微細構造、力学的特性の性差が ACL 損傷の性差と関係していると考えられている。また、Chaudhari ら³⁷⁾は ACL 損傷者の非損傷側と、性別、身長、年齢、体重でマッチングさせた対照群の ACL の体積を比較し、ACL 損傷者の ACL の体積が有意に小さかったことを明らかにし、ACL の体積の違いが ACL 損傷に関与している可能性を示した。

脛骨高原の後傾は膝関節圧縮力や外反トルクによって大腿骨に対する脛骨前方並進や脛骨内旋を導くと考えられており^{47, 135, 138, 141)}、脛骨高原の後傾角度も ACL 損傷のリスク因子として着目されている。ACL 損傷者と対照群の脛骨高原後傾角度を比較した研究を対象とした **systematic review** では、内側脛骨高原の後傾角度に関して、X 線画像による検討では 6 つの研究の内 5 つの研究において、MRI による検討では 7 つの研究の内 1 つの研究において、ACL 損傷者の後傾角度が大きかったことを示している²¹⁷⁾。また、外側脛骨高原の後傾角度に関しては、X 線画像による検討は 1 つの研究のみであり、その研究では有意に ACL 損傷者の後傾角度が大きかったことを示しており、MRI を用いた 6 つの研究では、5 つの研究で同様の有意差を認めたと報告している²¹⁷⁾。しかし、**systematic review** の著者らは、研究間の値の差がそれぞれの研究における ACL 損傷者と対照群との差よりも大きいことから、ACL 損傷者の脛骨高原後傾角度と ACL 損傷が関連する可能性があるという結論に止めている²¹⁷⁾。

関節弛緩性に関して、全身関節弛緩性スコアが ACL 損傷者で有意に高かったことや^{179, 208)}、両側 ACL 損傷者が片側 ACL 損傷者に比較して全身関節弛緩性スコアが高かったことが報告されている¹⁴⁹⁾。また、膝関節の前方弛緩性も ACL 損傷と関係することが報告されている^{151, 208)}。Ramesh ら¹⁷⁹⁾は全身関節弛緩性のテスト項目の中でも、特に膝関節過伸展の陽性率が ACL 損傷者で有意に高かったことを報告しており、同様に ACL 損傷者は膝関節過伸展を有する者が多いことが報告されている^{125, 151)}。また、過伸展膝は膝関節の前方弛緩性とも関連することが示唆されている^{122, 191)}。全身関節弛緩性と膝関節の前方弛緩性は、膝関節内外反弛緩性や脛骨回旋弛緩性とも相関すると報告されており、全身関節弛緩性や膝関節前方弛緩性を有する者は膝関節軟部組織の **stiffness** が全体的に低い可能性がある¹⁹⁰⁾。

解剖学的因子として、膝関節だけではなく足部のアライメント、股関節の骨形状なども考えられている^{5, 72, 88)}。足部アライメントに関しては、舟状骨降下量や距骨下関節アライメントが脛骨の回旋運動に関係するとして検討されている^{6, 20, 83, 100, 125, 199, 216)}。多くの研

究が ACL 損傷者は過度な足部回内を有していたと報告しているが^{6, 20, 83, 125, 216}), ACL 損傷者と対照者の間に有意差がないという報告もある^{100, 199}). これらの研究はどれもサンプルサイズが小さく、後ろ向きな検討であるために未だ結論は出ていない. 股関節に関しては, femoro-acetabular impingement による股関節内旋可動域制限が ACL 損傷リスクを高めることが近年示唆されている^{19, 21, 54, 55, 173}).

1. 4. 3. ホルモン因子

前述のように, ACL 損傷発生率には性差が存在することから, ACL 損傷のリスク因子として性ホルモンの影響が検討されてきた. ACL にはエストロゲンやプロゲステロン, リラキシン, テストステロンなどの性ホルモンの受容体があり^{50, 76, 123}), エストロゲンやプロゲステロンの投与は線維芽細胞増殖や type I コラーゲンの生成を抑制することが明らかとなっている^{124, 220-222}). また, 動物モデルではエストロゲンやリラキシンの投与によって, 力学試験における ACL の破断張力, 最大伸長量が有意に低値となったことが報告されている^{51, 198}).

ACL 損傷の発生と月経周期の関係に関して, Hewett ら⁸⁹)は systematic review で 7 つの研究結果をまとめ, 排卵前期での ACL 損傷発生数が多かったことを報告した. それ以降の研究においても, 排卵前期に ACL 損傷が多く発生していたことが報告されている^{1, 118, 183}). また, Adachi ら¹)は対象者の月経前症状や月経期の症状, 月経周期における身体活動レベルを調査し, 月経に関係する症状や主観的活動レベルと ACL 損傷発生時期との関連は認めなかったことから, 性ホルモンが月経周期による ACL 損傷発生頻度の違いに寄与したと考察している. この様に, 女性の ACL 損傷は排卵前期に多く発生することが示されており, 女性ホルモンの関与が示唆されている. しかし, 経口避妊薬の使用と ACL 損傷の発生に関しては, 経口避妊薬は ACL 損傷の予防効果はないとされており^{3, 118, 183}), ホルモン因子に対する予防的介入はまだ確立されていない.

1. 4. 4. 神経筋および生体力学的因子

神経筋および生体力学的因子は ACL 損傷のリスク因子の中で最も大きな介入の余地があるため, ACL 損傷予防を発展させる上で非常に重要なリスク因子である⁸⁷). ACL 損傷の受傷機転としてよく知られる, 着地動作やカッティング動作中の膝関節もしくは下肢全体, 体幹も含めた筋活動や, kinematics, kinetics が, 推察されている ACL 損傷メカニズムや ACL 機能との関連から検討されてきた. 特に, 膝関節 kinematics や kinetics, 膝関節周囲筋の筋活動の性差に関しては多くの研究がなされてきた.

矢状面における解析では, 動作中の膝関節屈曲角度の性差に関する検討が多く行われている. 膝関節屈曲角度では初期接地 (initial contact: IC) 時の角度や動作中の最大値に関する検討が行われてきたが, 着地動作^{44, 46, 52, 70, 102, 103, 153, 167, 185})とカッティング動作^{17, 63, 114, 129, 137, 195})のいずれにおいても, 膝関節屈曲角度には性差を認めなかったという報告が多い. また, 外的膝関節屈曲モーメントに関しても, 着地動作, カッティング動作ともに, 性差を認めないという報告が多い^{46, 102, 103, 114}).

ACL の agonist である大腿四頭筋と ant-agonist であるハムストリングスの筋活動に関しても多くの検討がなされている。着地動作やカッティングにおける接地前および接地後の大腿四頭筋筋活動は女性の方が大きいという報告が多い^{17, 78, 115, 129, 192, 195}。しかしながら、研究によって大腿直筋のみに性差を認める場合や、外側広筋のみに性差を認める場合など必ずしも大腿四頭筋間で一致した見解は得られていない。ハムストリングスの筋活動に関しては、女性の接地前筋活動⁴⁴、接地後筋活動¹⁹²が大きいという報告、女性の接地前筋活動²³、接地後筋活動^{53, 114, 129}が小さいという報告、性差がないという報告^{17, 78, 115, 195}があり、研究間で一致した見解が得られていない。近年では大腿四頭筋に対するハムストリングスの活動比の性差も検討されているが^{23, 53, 78}、一定の見解は得られておらず、女性がハムストリングスに対して大腿四頭筋を優位に活動させているかは十分に明らかになっていない。また、Shultz ら¹⁹²は大腿四頭筋の筋力が弱いほど大腿四頭筋の筋活動が大きくなる傾向を報告しており、単純に筋活動を比較することでは ACL への負荷の大小を明らかにできない可能性が考えられる。この様に矢状面での膝関節 kinematics や kinetics, 大腿四頭筋やハムストリングスの筋活動が ACL 損傷の性差に影響するかは現時点でははっきりと結論付けることは出来ない。

Hewett ら⁸⁷は、205 名の女性アスリートを対象に、台から着地後に直ちに垂直跳びを行う drop vertical jump (DVJ) 課題における着地動作中の kinetics および kinematics をシーズン前に評価し、シーズン中の ACL 損傷の発生との関連を前向きに調査した。追跡期間中に 9 名が受傷し、着地動作における最大膝関節外反モーメントと、IC 時の膝関節外反角度、最大膝関節外反角度が ACL 損傷の有意な予測因子であり、最大膝関節外反モーメントは感度 78%、特異度 73%で ACL 損傷を予測したと報告した⁸⁷。動作中の膝関節外反角度および外反モーメントの性差を検討した報告では、着地動作やカッティング動作において、女性は男性と比較して大きな膝関節外反角度と外反モーメントを示すことが多くの研究で示されている^{17, 52, 70, 102, 103, 129, 137, 167, 195}。また、膝関節外反角度や外反モーメントの性差は思春期を通して明らかになってくることが示唆されている^{64, 86}。これらの結果は ACL 損傷発生率の性差が思春期を通して明らかになってくるという疫学調査や¹⁸⁷、膝関節外反負荷が ACL 損傷メカニズムの重要な要素として提唱されていることから ACL 損傷発生率の性差に影響していると考えられている。

近年では動作中の膝関節外反角度と外反モーメントを減じる目的から、これらと関連する要因について検討されている。Hewett ら⁸⁷は膝関節外反が増加した不良な動的下肢アライメントを dynamic knee valgus と提唱した。Dynamic knee valgus には股関節の内転および内旋、膝関節の外反、足部回内が要素として含まれるとされ⁸⁷、多くの研究ではこれらの要素の関係性について検討している。中でも股関節外転筋や外旋筋の筋力は、これらの筋の筋力低下が着地動作中の膝関節外反モーメントと膝関節外反角度を増加させるという仮説に基づき、多くの検討がなされている^{14, 91, 95, 98, 99, 117, 146, 212}。しかし、これらの研究の結果は一致しておらず、近年の systematic review においても股関節外転筋や外旋筋の筋力低下が膝関節外反角度や外反モーメントを増加させるという結論には至らないとされている³¹。足部の影響についても、足部回内アライメントが着地動作中の膝関節外反角度や外反モーメントと関連するか検討されているが、一致した見解は得られていない^{95, 101, 175}。

1. 5. 論文目的

ACL 損傷は短期的および長期的に大きな社会的損失, 経済的損失が生じることが明らかにされており, 最も重篤なスポーツ外傷の一つである. 近年の ACL 再建術の発展により, スポーツ復帰が可能となっているが, 復帰には半年から 1 年の期間を要し, 復帰後にはスポーツレベルが低下するとの報告もある. これらの事実から, ACL 損傷予防の重要性が認識されており, ACL 損傷予防はスポーツ医学領域において国際的に最も重要な課題の一つであるといえる. ACL 損傷のリスクファクターとして環境因子, 解剖学的因子, ホルモン因子, 神経筋および生体力学的因子が知られているが, 神経筋および生体力学的因子は最も介入の余地が大きく, ACL 損傷予防の観点から最も注目されている.

様々な観点からの検討より, 膝関節外反角度および外反モーメントの増加が ACL 損傷メカニズムの最も重要な要素の一つであることが示唆されている. また, 前向き研究により, 着地動作中の膝関節外反角度および外反モーメントは ACL 損傷の予測因子であることが示されている. この様に, 着地動作やカッティング動作時の膝関節外反角度および外反モーメントの増加は ACL 損傷の重要なリスク因子であると考えられている. 着地動作やカッティング動作における膝関節外反角度および外反モーメントは男性と比較して女性で大きな値を示すことは明らかとなっており, これらの不良な動作は ACL 損傷率の性差と関連していると考えられている. しかし, スポーツ動作中の膝関節外反角度および外反モーメントに影響する要因については十分に明らかとなっておらず, これらの要因について明らかにすることは, ハイリスクなアスリートに対するより効果的な介入方法の発展に繋がると考えられる.

本論文の目的は, 着地動作中の膝関節外反角度および外反モーメントに影響する要因として (1) 着地動作時の足部方向変化の影響, (2) 着地後に続くジャンプ動作の影響, (3) 着地動作における股関節回旋運動との関連を検討することとした.

2. 着地動作時の足部方向の変化が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響

2. 1. 諸言

いくつかの ACL 損傷予防プログラムが ACL 損傷発生率を低下させたことを示しているが^{84, 104, 112, 130, 152, 160, 211)}, これらの予防プログラムの予防効果のメカニズムは明らかとなっていない. ACL 損傷メカニズムやリスクファクターを明らかにすることは ACL 損傷予防の発展において必要不可欠である⁷²⁾. 先行研究では, ACL 損傷場面のビデオ解析¹⁰⁸⁾, ACL 損傷に合併する骨挫傷の部位¹⁷⁰⁾, バイオメカニクス研究^{105, 120, 189)}などにより, 膝関節外反角度や外反モーメントの増加, 脛骨内旋角度の増加が ACL 損傷メカニズムの重要な要素であることが示されている. また, 女性においてよく観察される着地動作時の大きな膝関節外反角度および外反モーメントや脛骨内旋角度は ACL 損傷の生体力学的リスク因子として考えられている^{52, 64, 70, 87, 102, 103, 153, 167, 196)}. 着地動作やカッティング動作における膝関節外反角度および外反モーメントや脛骨内旋角度を減じる適切な着地動作パターンや効果的な動作指導を明らかにすることは ACL 損傷予防を確立する上で重要である.

着地動作中の足部方向は臨床的な着地姿勢の評価項目の一つとして用いられており, 着地動作時に足部を過度に内側に向けた toe-in landing や, 過度に外側に向けた toe-out landing は不良な着地動作であると考えられている¹⁶⁶⁾. また, 着地動作の指導において足部方向を前方に関する指示が散見される^{156, 172)}. Ishida ら⁹⁷⁾は準静的なランジ肢位において, 足部方向が膝関節 kinematics に影響を与えたことを報告している. しかしながら, 着地動作の様な動的な状況下において, 足部方向が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響は不明である. 着地動作中の足部方向の変化が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響を明らかにすることは ACL 損傷予防の基礎を確立するために重要である. そこで本研究の目的は着地動作時の足部方向の変化が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響を明らかにすることとした. 仮説は着地動作中の足部方向の変化は, 膝関節外反角度および外反モーメント, 脛骨内旋角度に影響を与えるであった.

2. 2. 方法

2. 2. 1. 対象

健康若年女性 14 名の利き脚を対象とした（平均±標準偏差：年齢 21.0±1.6 歳；身長 157.0±5.4 cm；体重 48.4±4.7 kg）。利き脚の定義はボールを蹴る脚とし、全例右下肢が利き脚であった。なお、予備実験で 7 名の被験者から得られた結果から、各足部条件間の最大膝関節外反角度および外反モーメントの差には大きな効果量を認めた。1 元配置反復測定分散分析モデルにおいて、 α level を 0.05、パワー（1- β ）を 0.80、効果量を 0.40 と設定した結果、本研究では 12 名の被験者が必要であるとの結果が得られたため、データの欠陥も想定し、本研究では 14 名の被験者を採用した。また、本研究では、女性の ACL 損傷リスクが高いことや^{2, 12, 25, 140, 142, 158}、女性の ACL 損傷リスクファクターを検証することが重要であると考えられていることを踏まえ^{88, 181}、女性のみを対象とした。全ての被験者は競技活動の経験を有していた（バスケットボール、ハンドボール、ラクロス等）。本研究の対象選定における除外基準は、1) 過去半年以内の筋骨格系傷害（足関節捻挫や腰痛等）、2) 全ての膝関節傷害および手術歴、3) 下肢および体幹の骨折歴、4) ACL 損傷予防プログラムもしくはスポーツ傷害予防を目的としたジャンプ着地トレーニングへの参加歴とした。本研究への参加に先立ち、全ての被験者に本研究の主旨および実験内容について口頭および書面にて説明し、各被験者から書面にてインフォームドコンセントを得た。また、本研究は北海道大学大学院保健科学研究院の倫理委員会の承認を得て実施した。

2. 2. 2. 実験手順およびデータ収集

全 40 個の反射マーカ―を、被験者の仙骨、右の腸骨稜、両側の肩峰、上前腸骨棘、大転子、股関節、大腿骨外側上顆・内側上顆、足関節内果・外果、踵骨隆起、第 2・第 5 中足骨頭、右の大腿と下腿に両面テープを用いて貼付した⁹⁷（図 2. 1.）。また、実験は全被験者、裸足にて実施した。全てのデータは EvaRT 4.3.57（Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA）を用いて、6 台の高速度デジタルカメラ（Hawk cameras; Motion Analysis Corporation）と 2 台の床反力計（Type 9286; Kistler AG, Winterthur, Switzerland）を同期させ収集した。サンプリング周波数はカメラデータを 200Hz、床反力データを 1,000Hz に設定した。



図 2. 1. 反射マーカ配置（文献 97 より引用）

初めに，各被験者の静止立位時のデータを記録した．静止立位姿勢は，両手を胸の前で組み，足部の向きは真っ直ぐとし，両足の幅は腰幅とするよう指示し，被験者間で統一させた．静止立位時のデータを収集後，左の大腿骨内側上顆のマーカは除去した．次に，3つの条件下で着地動作を実施させ，着地動作のデータを記録した．着地動作課題には DVJ を用いた（図 2. 2.）．DVJ では被験者は 30cm 台上に肩幅で立ち，台から落下しそれぞれの足で 2 枚の床反力計上に着地後，直ちに最大垂直跳びを行った．また，課題を通して，被験者には両手を耳の高さに保持し，視線は前に向けるよう求めた．最初の台からの着地動作を解析に用いた．



図 2. 2. Drop vertical jump

着地動作時の足部方向の変化が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響を明らかにするために、DVJ を以下の 3 条件で実施した (図 2. 3.) : (1) **natural landing**: 足部方向に関して特別な指示を与えない条件 (図 2. 3a.) ; (2) **toe-in landing**: 台からの着地時に無理のない範囲で、足部を最大限内側に向けるよう指示した条件 (図 2. 3b.) ; (3) **toe-out landing**: 台からの着地時に無理のない範囲で、足部を最大限外側に向けるよう指示した条件 (図 2. 3c.) . **Natural landing** 時に足部方向に対する bias がかかるのを避けるため、**natural landing** を始めに計測し、**toe-in landing** と **toe-out landing** はその後無作為の順序で計測した。被験者には各条件に慣れるまで練習を実施することを許可し、各条件 3 回の成功試行を記録した。

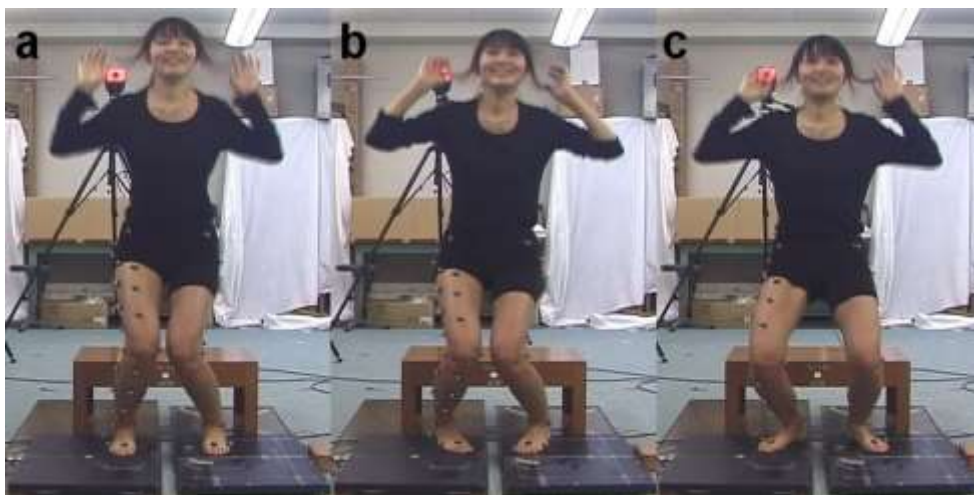


図 2. 3. DVJ における 3 つの足部方向条件. (a) natural landing, (b) toe-in landing, (c) toe-out landing

2. 2. 3. データ解析

膝関節 kinematics および kinetics の算出には SIMM4.0 (MusculoGraphics, Santa Rosa, CA, USA) を用いた。膝関節角度の算出には、関節座標系法を用い、Grood と Santay⁷⁴⁾ の座標に一部拘束を加えた。膝関節角度は全て大腿骨に対する脛骨の運動とし、静止立位時の関節角度を 0° と設定した。また、膝関節角度の算出に際し、皮膚運動による誤差を減じるため、global optimization technique を適用した¹²⁶⁾。外的膝関節モーメントは逆動力学解析により算出し、各セグメントの慣性モーメントは de Leva⁴⁵⁾ の報告に基づいた。予備実験における膝関節 kinematics および kinetics の検者間級内相関係数 ($ICC_{3,3}$) と検者間の差および 95% 信頼区間は以下の通りであり、ICC の値は good から excellent の範囲であった⁶¹⁾：最大膝関節屈曲角度 ($ICC_{3,3} = 0.99, 3.4 \pm 1.4^{\circ}$)，最大膝関節外反角度 ($ICC_{3,3} = 0.72, 0.6 \pm 3.6^{\circ}$)，最大脛骨内旋角度 ($ICC_{3,3} = 0.94, 3.8 \pm 2.1^{\circ}$)，最大膝関節

外反モーメント ($ICC_{3,3} = 0.90, 0.02 \pm 0.11 \text{ Nm/kg}$).

IC を垂直床反力が 10N 以上となった時点として定義し、IC 時から膝関節最大屈曲時までを解析区間とした。膝関節角度は IC 時の値と解析区間における最大値を、膝関節モーメントおよび垂直床反力は解析区間における最大値を算出した。なお、最大膝関節モーメントおよび最大垂直床反力は各被験者の体重により除して標準化した (それぞれ Nm/kg , N/kg)。また、IC 後 50ms 間における平均の膝関節外反角速度および脛骨内旋角速度を算出した。3 つの足部条件が適切に実施されていたかを確認するために、足部方向角度を算出した。両上前腸骨棘マーカーを結んだ線に対する垂線を進行方向とし、進行方向に対して第 2 中足骨頭と踵骨隆起のマーカーを結んだ線が水平面上でなす角度を足部方向角度として定義した。なお、統計学的解析には各足部方向条件の成功 3 試行の平均値を各被験者の代表値として用いた。

2. 2. 4. 統計学的解析

1 元配置反復測定分散分析と post-hoc Bonferroni test を用いて、着地動作中の kinematics および kinetics を各条件間で比較した。全ての統計学的解析の有意水準は $P < 0.05$ とし、IBM SPSS Statistics 19 (IBM, Chicago, IL, USA) を用いて解析した。また、post-hoc test に関して、効果量 r を算出した⁶⁰⁾。効果量の大きさは、 $r > 0.5$ を効果量大、 $0.50 > r > 0.3$ を効果量中、 $0.3 > r > 0.1$ を効果量小、 $0.1 > r$ を効果量無しとした⁴⁰⁾。

2. 3. 結果

表 2. 1. に各足部方向条件における足部方向角度を示す. 足部方向角度に対して, IC 時, 膝関節最大屈曲時ともに有意な足部方向の主効果を認めた (IC 時, $F=117.075$, $P<0.001$; 膝関節最大屈曲時, $F=108.225$, $P<0.001$). 足部方向角度は各条件間で有意に異なり, 大きな効果量を認めた (全ての組み合わせにおいて $P<0.001$, $r>0.900$).

表 2. 1. 足部方向角度の比較

	Natural	Toe-in	Toe-out
足部方向角度 (°)			
初期接地時	-8.9 ± 6.4	$12.3 \pm 7.1^*$	$-23.8 \pm 8.3^{*\dagger}$
膝関節最大屈曲時	-11.0 ± 5.6	$7.0 \pm 6.4^*$	$-24.3 \pm 7.3^{*\dagger}$

値は平均値±標準偏差を表す.

正の値は足部が内側に, 負の値は外側に向いていることを示す.

* $P<0.05$ (vs natural landing)

† $P<0.05$ (vs toe-in landing)

表 2. 2. に足部方向条件間の膝関節 kinematics の比較を示す. また, 図 2. 4. に膝関節角度の時系列変化を示す. 膝関節外反角度に対して, IC 時, 最大値ともに有意な足部方向の主効果を認めた (IC 時, $F=80.695$, $P<0.001$; 最大値, $F=65.970$, $P<0.001$). また, 脛骨内旋角度に対しても, IC 時, 最大値ともに有意な足部方向の主効果を認めた (IC 時, $F=116.434$, $P<0.001$; 最大値, $F=28.744$, $P<0.001$). Toe-in landing における膝関節外反角度は natural landing (IC 時, $P<0.001$, $r=0.915$; 最大値, $P<0.001$, $r=0.915$) および toe-out landing (IC 時, $P<0.001$, $r=0.936$; 最大値, $P<0.001$, $r=0.921$) と比較して有意に高値であり, 効果量は大きかった. また, toe-in landing における脛骨内旋角度も同様に natural landing (IC 時, $P<0.001$, $r=0.940$; 最大値, $P<0.001$, $r=0.888$) および toe-out landing (IC 時, $P<0.001$, $r=0.957$; 最大値, $P<0.001$, $r=0.843$) と比較して有意に高値を認め, 効果量は大きかった. 一方で, toe-out landing では natural landing と比較して有意に小さな膝関節外反角度を認め (IC 時, $P<0.001$, $r=0.911$; 最大値, $P<0.001$, $r=0.881$), その効果量は大きかった. Toe-out landing における脛骨内旋角度は IC 時に natural landing に対して有意に小さな値を認めたが ($P<0.001$, $r=0.920$), 最大値は 2 条件の間に有意な差を認めなかった ($P=0.088$, $r=0.562$). 膝関節屈曲角度に関しては, IC 時の角度に対し足部方向の有意な効果は認めなかったが ($F=1.718$, $P=0.199$), 最大値に対して有意な足部方向の主効果を認めた ($F=6.574$, $P=0.005$). しかし, natural landing と toe-in landing (IC 時, $P=1.000$, $r=0.070$; 最大値, $P=1.000$, $r=0.176$) および toe-out landing (IC 時, $P=0.224$, $r=0.473$; 最大値, $P=0.056$, $r=0.598$) の間に有意な差は認めなかった.

表 2. 2. 足部方向条件間の膝関節 kinematics の比較

	Natural	Toe-in	Toe-out
膝関節屈曲角度 (°)			
初期接地時	21.9 ± 6.4	21.6 ± 7.0	20.1 ± 6.3
最大値	88.2 ± 12.5	87.0 ± 10.9	92.6 ± 11.1 [†]
膝関節外反角度 (°)			
初期接地時	-2.5 ± 3.6	3.1 ± 3.4*	-7.5 ± 3.6* [†]
最大値	6.4 ± 7.5	13.2 ± 7.5*	0.9 ± 8.1* [†]
脛骨内旋角度 (°)			
初期接地時	0.6 ± 4.8	11.0 ± 4.0*	-8.1 ± 5.5* [†]
最大値	5.9 ± 6.4	12.5 ± 5.1*	3.3 ± 8.1 [†]

値は平均値±標準偏差を表す.

正の値は膝関節屈曲, 膝関節外反, 脛骨内旋角度を示す.

* $P < 0.05$ (vs natural landing)

[†] $P < 0.05$ (vs toe-in landing)

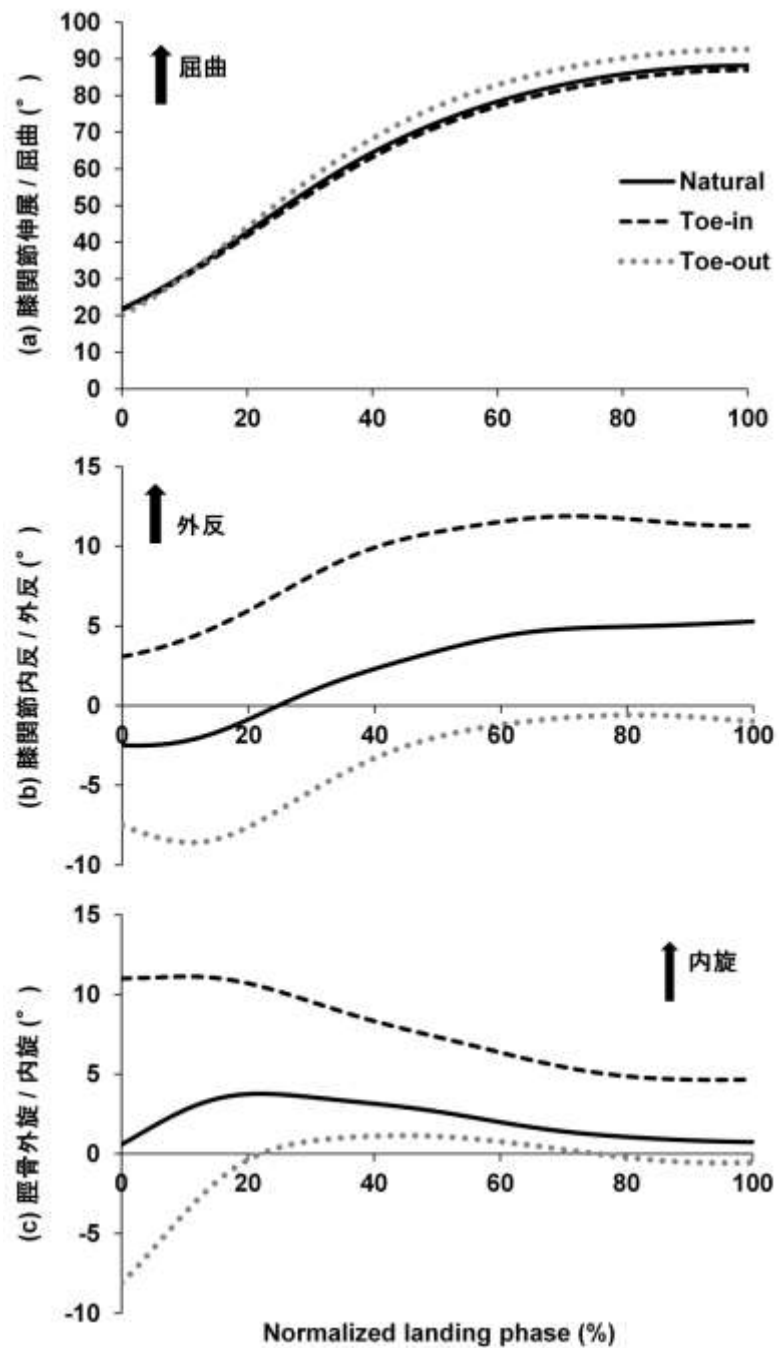


図 2. 4. 各足部条件における膝関節角度の時系列変化：(a) 膝関節屈伸角度，(b) 膝関節内外反角度，(c) 脛骨内外旋角度．横軸は初期接地時から膝関節最大屈曲時までを 0 から 100%に標準化した時間を示す．

表 2. 3. に足部方向条件間の kinetics の比較を示す. 最大膝関節外反モーメントに対して有意な足部方向の主効果を認めた ($F=23.695$, $P<0.001$). また, IC 後 50ms における膝関節外反角速度 ($F=23.476$, $P<0.001$) および脛骨内旋角速度 ($F=61.719$, $P<0.001$) に対しても有意な足部方向の主効果を認めた. Toe-in landing における最大膝関節外反モーメントは natural landing ($P=0.003$, $r=0.763$) および toe-out landing ($P<0.001$, $r=0.846$) と比較して有意に大きな値を示し, その効果量は大きかった. また, toe-in landing における接地後 50ms 間の膝関節外反角速度は natural landing ($P=0.013$, $r=0.690$) および toe-out landing ($P<0.001$, $r=0.849$) と比較して有意に大きな値を示し, その効果量は大きかった. 一方で, toe-out landing における最大膝関節外反モーメントは natural landing と比較して有意に小さな値を示し, その効果量は大きかった ($P=0.022$, $r=0.660$). また, toe-out landing における接地後 50ms 間の脛骨内旋角速度は natural landing ($P=0.003$, $r=0.900$) および toe-in landing ($P<0.001$, $r=0.926$) と比較して有意に高値であり, 効果量は大きかった. 最大垂直床反力に対しては足部方向の効果を認めなかった ($F=0.783$, $P=0.468$).

表 2. 3. 足部方向条件間の kinetics の比較

	Natural	Toe-in	Toe-out
最大垂直床反力 ^a (N/kg)	22.1 ± 3.5	22.0 ± 3.1	20.9 ± 4.1
膝関節角速度 ^b (°/sec)			
外反	57.8 ± 56.5	90.3 ± 62.2*	21.7 ± 68.7*†
脛骨内旋	-17.8 ± 66.4	57.3 ± 88.4*	172.9 ± 88.4*†
最大膝関節モーメント ^a (Nm/kg)			
外反	0.8 ± 0.2	1.1 ± 0.3*	0.6 ± 0.2*†

値は平均値±標準偏差を表す.

^a 初期接地時から膝関節最大屈曲時までにおける最大値.

^b 初期接地時から 50ms 間の平均角速度. 正の値は膝関節外反, 脛骨内旋角速度を示す.

* $P<0.05$ (vs natural landing)

† $P<0.05$ (vs toe-in landing)

2. 4. 考察

本研究結果は、着地動作時の足部方向変化が着地動作における膝関節外反角度および外反モーメント、脛骨内旋角度に有意な影響を与えることを明らかにした。これらの結果は本研究仮説を支持する結果であった。また、最大垂直床反力には課題間に有意な差を認めなかったことから、各条件間での衝撃力は同等であったと考えられ、本研究結果が足部方向の変化に起因するものであると考えられた。

屍体膝を用いた基礎バイオメカニクス研究では、膝関節外反トルクと脛骨内旋トルクを加えることにより、それぞれの単独負荷よりも大きな ACL 張力が生じたことが示されている¹³²⁾。同様に、屍体膝を用いた着地動作のシミュレーションを行った研究においても膝関節外反トルクと脛骨内旋トルクを組み合わせることにより、それぞれの単独負荷よりも大きな ACL strain が生じたと報告されている¹⁸⁹⁾。近年の ACL 損傷場面ビデオ解析では、床面接地直後の急激な膝関節外反角度の増加とそれに伴う脛骨内旋角度の増加が ACL 損傷メカニズムとして提唱されている¹⁰⁸⁾。また、ACL 損傷後によく観察される骨挫傷の位置は損傷時に膝関節外反と脛骨内旋、脛骨前方変位が生じていたことを示す位置であると考えられている^{209, 219)}。これらの先行研究から、本研究における toe-in landing で観察された膝関節外反角度および外反モーメントの増加、IC 後 50ms の膝関節外反角速度、脛骨内旋角度の増加は ACL 損傷リスクを高めると考えられる。したがって、ACL 損傷予防において toe-in landing は避けられるべきであると考えられた。

Toe-out landing では膝関節外反角度および外反モーメント、IC 時の脛骨内旋角度が減少したが、接地直後の急激な脛骨内旋角度の増加が特徴として観察された。ACL は脛骨内旋により張力が増加することが過去に報告されており^{131, 132, 145)}、脛骨内旋角速度の増加は ACL の strain rate を高めていた可能性が考えられる。Strain rate は ACL の機械的特性に有意に影響を与えることが過去に報告されており¹⁷⁴⁾、toe-out landing で観察された脛骨内旋角速度の増加は、ACL 損傷予防において注意すべきであるかもしれない。

本研究の結果は、着地動作時の足部方向変化が有意に着地動作中の膝関節外反角度および外反モーメント、脛骨回旋角度を増加させることを明らかにした。これらの所見は、着地動作時の足部方向変化が ACL 損傷のリスクを高める可能性を示唆しており、臨床において着地動作の評価や着地動作指導を行う際に足部方向に注目する必要や、過度な足部方向の変化を避けるよう指導すべきであることを示唆している。

本研究にはいくつかの限界が考えられる。本研究では、着地動作中の足部方向変化が有意に膝関節 kinematics および kinetics を変化させることを明らかにしたが、これらの変化が ACL strain や張力を有意に増加させたかは不明である。また、本研究結果が、片脚着地動作やカッティング動作においても同様の結果を示すかは不明であり、今後は異なる動作において、足部方向が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響を検討する必要があると考えられる。

2. 5. 結論

本研究は着地動作時の足部方向が有意に着地動作中の膝関節 kinematics および kinetics に影響することを明らかにした. 着地動作時に足部を内側へ向ける toe-in landing では, 膝関節外反角度および外反モーメントの増加, 脛骨内旋角度の増加を認めた. また, toe-out landing では, 膝関節外反角度および外反モーメントの減少, 初期接地時の脛骨内旋角度の減少を認めたが, 接地直後の急激な脛骨内旋が特徴として観察された.

3. 着地後に続くジャンプ動作が着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に与える影響

3. 1. 諸言

DVJ 課題は着地動作時の kinematics および kinetics の評価として最も多く使用される動作課題の一つである^{14, 18, 52, 64, 87, 91, 146, 192)}. Hewett ら⁸⁷⁾は女性アスリートを対象とした前向き調査において、DVJ における膝関節外反角度および外反モーメントが ACL 損傷を予測したと報告し、ACL 損傷のリスクスクリーニングテストとして DVJ の有用性を示した. DVJ は台からの着地後に直ちに最大垂直跳びを行うという課題であり、主に台からの着地 (first landing) が解析の対象となっている^{14, 18, 52, 64, 87, 91, 146, 192)}. この first landing には、台からの着地による衝撃の吸収と、後に続くジャンプ動作の準備が課題として含まれている. 先行研究では、DVJ における first landing と、最大垂直跳び後の second landing に有意な kinematics と kinetics の差があることが示されており、first landing における最大膝関節外反角度および外反モーメントは second landing に比して有意に高値であったとされる¹⁶⁾. また、Ambegaonkar ら⁷⁾は DVJ と単純な着地動作である drop landing (DL) における膝関節周囲筋の筋活動が有意に異なったことを報告した. Leukel ら¹¹⁹⁾も着地後に続くジャンプ動作が、ヒラメ筋の筋活動に影響したことを示している. これらの所見は、着地動作後に続くジャンプ動作が着地動作中の kinematics と kinetics に影響を与えている可能性を示唆している.

Cruz ら⁴¹⁾は前方へ跳び、着地後に直ちに最大垂直跳びを行うという課題と DVJ, DL の3つの課題における kinematics, kinetics を比較した. しかしながら、Cruz ら⁴¹⁾の報告では、女性のみを対象としており、kinematics や kinetics も最大脛骨前方剪断力が生じた時間のみで検討している. したがって、着地後に続くジャンプ動作が着地動作中の膝関節 kinematics, kinetics に与える影響やその性差はまだ十分に明らかとなっていない. また、ジャンプの踏み切り動作における膝関節 kinematics の解析は限られており、膝蓋腱炎既往歴の有無での比較しか見当たらない²⁴⁾. ジャンプ踏み切り動作における膝関節 kinematics を検討することは、着地後に続くジャンプ動作の影響を考える上で重要であると考えられる.

本研究の目的は、DVJ, DL, ジャンプ踏み切り動作における膝関節 kinematics および kinetics を解析することにより、膝関節 kinematics および kinetics に対する課題の影響とその性差を明らかにすることである. 本研究の仮説は、DVJ の first landing における膝関節外反角度および外反モーメントは DL およびジャンプ踏み切り動作と比較して高値であり、踏み切り動作を含む全ての課題において女性は男性と比較して有意に大きな膝関節外反角度および外反モーメントを示すとした.

3. 2. 方法

3. 2. 1. 対象

健康若年女性 21 名（平均±標準偏差：年齢 21.3±1.2 歳；身長 161.5±6.6 cm；体重 54.5±7.8 kg）と男性 21 名（平均±標準偏差：年齢 21.4±1.7 歳；身長 173.4±5.2 cm；体重 63.2±8.1 kg）が本研究に参加した。対象は被験者の右下肢とした。男女各 8 名の予備実験から得られた結果より、最も重要なパラメータである最大膝関節外反角度の性差は全ての課題で大きな効果量を認めたため、 α level を 0.05、パワー ($1-\beta$) を 0.80、効果量を 0.80 と設定し、本研究に必要なサンプルサイズを算出した。本研究に必要なサンプルサイズは男女各 21 名であったため、本研究では男女各 21 名の被験者を採用した。全ての被験者は過去に競技活動歴を有していた（バスケットボール、ハンドボール、サッカー等）。対象選定における除外基準は、過去半年以内の筋骨格系傷害（足関節捻挫や腰痛等）、いかなる膝関節傷害および手術歴、下肢および体幹の骨折歴、ACL 損傷予防プログラムもしくはスポーツ傷害予防を目的としたジャンプ着地トレーニングへの参加歴とした。本研究への参加に先立ち、全ての被験者に本研究の主旨および実験内容について口頭および書面にて説明し、各被験者から書面にてインフォームドコンセントを得た。また、本研究は北海道大学大学院保健科学研究院の倫理委員会の承認を得て実施した。

3. 2. 2. 実験手順とデータ収集

全 40 個の反射マーカーを、下肢と骨盤の骨指標と対象である右下肢の大腿と下腿に両面テープを用いて貼付した⁹⁾（図 2. 1.）。また、全被験者、裸足にて実験を実施した。全てのデータは EvaRT 4. 4（Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA）を用いて、6 台の高速度デジタルカメラ（Hawk cameras; Motion Analysis Corporation）と 2 台の床反力計（Type 9286; Kistler AG, Winterthur, Switzerland）を同期させ収集した。サンプリング周波数はカメラデータを 200Hz、床反力データを 1,000Hz に設定した。

初めに、各被験者の静止立位時のデータを記録した。静止立位姿勢は、両手を胸の前で組み、足部の向きは真っ直ぐとし、両足の幅は腰幅とするよう指示し、被験者間で統一させた。静止立位時のデータを記録後、左の大腿骨内側上顆のマーカーを除去した。次に、DVJ、DL、ジャンプ踏み切り動作の 3 つの動作課題中のデータを記録した（図 3. 1.）。DVJ では、被験者は 30cm 台上に肩幅で立ち、台から落下し左右それぞれの足を 2 枚の床反力計上に着地後、直ちに最大垂直跳びを行なうよう指示した。DL では、被験者は 30cm 台上に肩幅で立ち、台から落下しそれぞれの足を 2 枚の床反力計上に着地するよう指示した。ジャンプ踏み切り動作では、被験者は 2 枚の床反力計上に立ち、その状態から最大垂直跳びを行うように指示した。また、課題を通して、被験者には両手を耳の高さに保持し、視線は前に向けるよう求めた。被験者には各動作課題に慣れるまで練習を実施することを許可し、各課題 3 回の成功試行を無作為の順序で記録した。

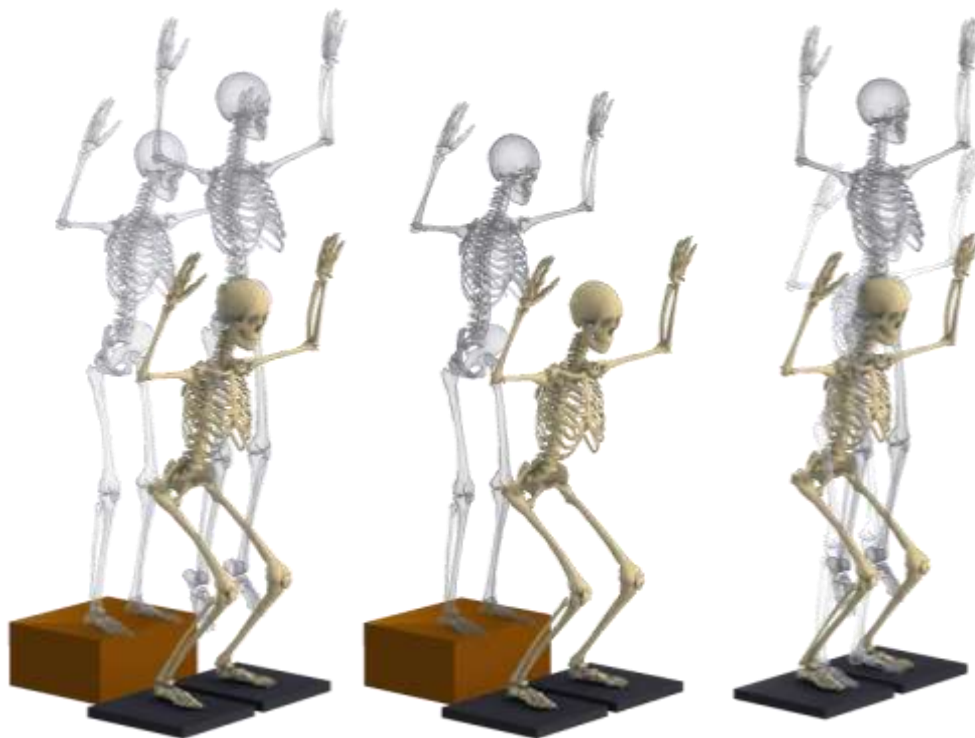


図 3.1. 動作課題. 左から drop vertical jump (DVJ), drop landing (DL), ジャンプ踏み切り動作.

3. 2. 3. データ解析

膝関節 kinematics および kinetics の算出には SIMM 6.0. 2 (MusculoGraphics, Santa Rosa, CA, USA) を用いた. 膝関節角度の算出には, 関節座標系法を用い, Grood と Santay⁷⁴⁾の座標に一部拘束を加えた. 膝関節角度は全て大腿骨に対する脛骨の運動とし, 静止立位時の関節角度を 0° と設定した. また, 膝関節角度の算出に際し, 皮膚運動による誤差を減じるため, global optimization technique を適用した¹²⁶⁾. 外的膝関節モーメントを逆動力学解析により算出し, 各セグメントの慣性モーメントは de Leva⁴⁵⁾の報告に基づいた. また, 外的膝関節モーメントは各被験者の体重と身長により除し, 標準化した ($\text{Nm}/(\text{kg}\cdot\text{m})$).

DVJ と DL の二つの着地動作では, 台からの着地における IC 時から膝関節最大屈曲時までの区間を解析の対象とした. ジャンプ踏み切り動作では, 静止立位の状態から膝関節最大屈曲時までの区間を解析対象とした. 各課題の最大膝関節屈曲角度, 外反角度を算出した. また, 二つの着地動作課題では最大膝関節屈曲モーメントおよび外反モーメント, 最大垂直床反力, IC 時および接地後 50ms 時の膝関節角度および膝関節モーメントを算出した. 統計学的解析には, 各課題それぞれの成功 3 試行の平均値を各被験者の代表値として用いた.

3. 2. 4. 統計学的解析

2 元配置反復測定分散分析（課題および性）と post-hoc Bonferroni test を用いて、各課題の膝関節 kinematics および kinetics を比較した．最大膝関節角度に関しては，DVJ，DL，ジャンプ踏み切り動作の 3 課題で比較し，それ以外の変数においては DVJ と DL の着地課題でのみ比較した．全ての統計学的解析の危険率は $P < 0.05$ とし，IBM SPSS Statistics 22（IBM, Chicago, IL, USA）を用いて解析した．また，post-hoc test に関して，効果量 r を算出した⁶⁰⁾．効果量の大きさは， $r > 0.5$ を効果量大， $0.50 > r > 0.3$ を効果量中， $0.3 > r > 0.1$ を効果量小， $0.1 > r$ を効果量無しとした⁴⁰⁾．

3. 3. 結果

各課題における膝関節 kinematics を表 3. 1. に示す. また, 図 3. 2. に膝関節角度の時系列変化を示す. DVJ と DL における IC 時の膝関節外反角度に対して, いずれの主効果および交互作用を認めなかった (課題の主効果, $F = 2.366$, $P = 0.132$; 性の主効果, $F = 0.919$, $P = 0.344$; 交互作用, $F = 1.594$, $P = 0.214$). DVJ と DL における IC 後 50ms 時の膝関節外反角度に対しては, 性の主効果 ($F = 0.872$, $P = 0.214$) および交互作用 ($F = 1.495$, $P = 0.229$) を認めなかったが, 課題の効果には統計学的な傾向を認めた ($F = 4.066$, $P = 0.050$). 事後検定では, 女性は IC 後 50ms 時の膝関節外反角度が, DL に比して DVJ で有意に大きな値を示し, 効果量は大きかったが ($P = 0.027$, $r = 0.513$), 男性では両課題間に有意な差は認めなかった ($P = 0.578$, $r = 0.111$). 最大膝関節外反角度に対して, 有意な課題の主効果 ($F = 7.482$, $P = 0.001$) および性の主効果 ($F = 8.281$, $P = 0.006$) を認めたが, 交互作用は認めなかった ($F = 0.477$, $P = 0.623$). 事後検定では, いずれの課題においても女性は男性と比較して有意に大きな最大膝関節外反角度を示し, 中等度の効果量を認めた (DVJ, $P = 0.007$, $r = 0.408$; DL, $P = 0.006$, $r = 0.417$; ジャンプ踏み切り動作, $P = 0.020$, $r = 0.358$). また, 女性は最大膝関節外反角度が, DL に比して DVJ で有意に大きな値を示し, 大きな効果量を認めたが ($P = 0.024$, $r = 0.629$), DVJ とジャンプ踏み切り動作 ($P = 0.508$, $r = 0.405$), DL とジャンプ踏み切り動作 ($P = 0.414$, $r = 0.326$) の間に有意な差は認めなかった. 男性ではいかなる課題間においても最大膝関節外反角度の有意な差は認めなかった (DVJ vs DL, $P = 0.077$, $r = 0.401$; DVJ vs ジャンプ踏み切り動作, $P = 1.000$, $r = 0.005$; DL vs ジャンプ踏み切り動作, $P = 0.066$, $r = 0.463$).

IC 時の膝関節屈曲角度に対して, 有意な課題の主効果 ($F = 57.302$, $P < 0.001$), 交互作用 ($F = 5.454$, $P = 0.025$) を認めたが, 性の主効果は認めなかった ($F = 0.003$, $P = 0.958$). 男女ともに DVJ における IC 時膝関節屈曲角度は DL に比して有意に大きな値であり, 大きな効果量を認めた (女性, $P = 0.001$, $r = 0.811$; 男性, $P < 0.001$, $r = 0.774$). IC 後 50ms での膝関節屈曲角度に対して, 有意な課題の主効果 ($F = 72.065$, $P < 0.001$), 交互作用 ($F = 6.176$, $P = 0.017$) を認めたが, 性の主効果は認めなかった ($F = 0.121$, $P = 0.729$). 男女ともに, IC 後 50ms での膝関節屈曲角度は, DVJ が DL に比して有意に大きな値であり, 大きな効果量を認めた (女性, $P < 0.001$, $r = 0.818$; 男性, $P < 0.001$, $r = 0.812$). 最大膝関節屈曲角度に対して, 有意な課題の主効果 ($F = 21.903$, $P < 0.001$) および交互作用 ($F = 3.319$, $P = 0.041$) を認めたが, 性の主効果は認めなかった ($F = 0.021$, $P = 0.886$). 課題間の比較においては, 女性ではジャンプ踏み切り動作が DL に比し, 有意に大きな最大膝関節屈曲角度を示し ($P = 0.037$, $r = 0.473$), 男性ではジャンプ踏み切り動作, DVJ, DL の順に有意に大きな値であった (全て $P < 0.05$, $r > 0.500$). 脛骨内旋角度に対しては, いかなる主効果, 交互作用も認めなかった.

表 3. 1. 各課題における膝関節 kinematics の比較

膝関節角度	女性			男性		
	DVJ	DL	踏み切り	DVJ	DL	踏み切り
屈曲角度 (°)						
初期接地時	26.0 ± 7.2	21.0 ± 6.9 ^a		21.0 ± 6.9	18.9 ± 9.3 ^a	
初期接地後 50ms	53.9 ± 5.7	48.3 ± 5.5 ^a		55.5 ± 8.6	45.2 ± 9.7 ^a	
最大値	84.9 ± 8.8	82.6 ± 11.2	91.6 ± 13.0 ^b	86.1 ± 16.8	77.1 ± 21.8 ^a	97.6 ± 17.1 ^{ab}
外反角度 (°)						
初期接地時	-1.7 ± 2.6	-1.6 ± 2.6		-2.9 ± 3.8	-2.2 ± 2.7	
初期接地後 50ms	2.3 ± 4.8	1.2 ± 4.4 ^a		0.4 ± 5.9	0.1 ± 5.4	
最大値	11.3 ± 5.8	9.1 ± 4.8 ^a	10.3 ± 6.6	5.8 ± 6.8*	4.0 ± 6.5*	5.8 ± 5.3*
脛骨内旋角度 (°)						
初期接地時	2.8 ± 4.1	2.3 ± 4.3		1.1 ± 6.0	0.1 ± 4.8	
初期接地後 50ms	5.5 ± 4.7	5.6 ± 3.7		3.5 ± 5.3	3.5 ± 4.5	
最大値	6.7 ± 4.4	7.0 ± 3.6	6.8 ± 4.1	5.4 ± 5.1	5.1 ± 4.2	6.5 ± 4.2

DVJ: drop vertical jump, DL: drop landing, 踏み切り: ジャンプ踏み切り動作

全ての値は平均値±標準偏差を表す.

正の値は膝関節屈曲, 外反, 脛骨内旋角度を示す.

^a $P < 0.05$ (vs DVJ)

^b $P < 0.05$ (vs DL)

* $P < 0.05$ (vs 女性)

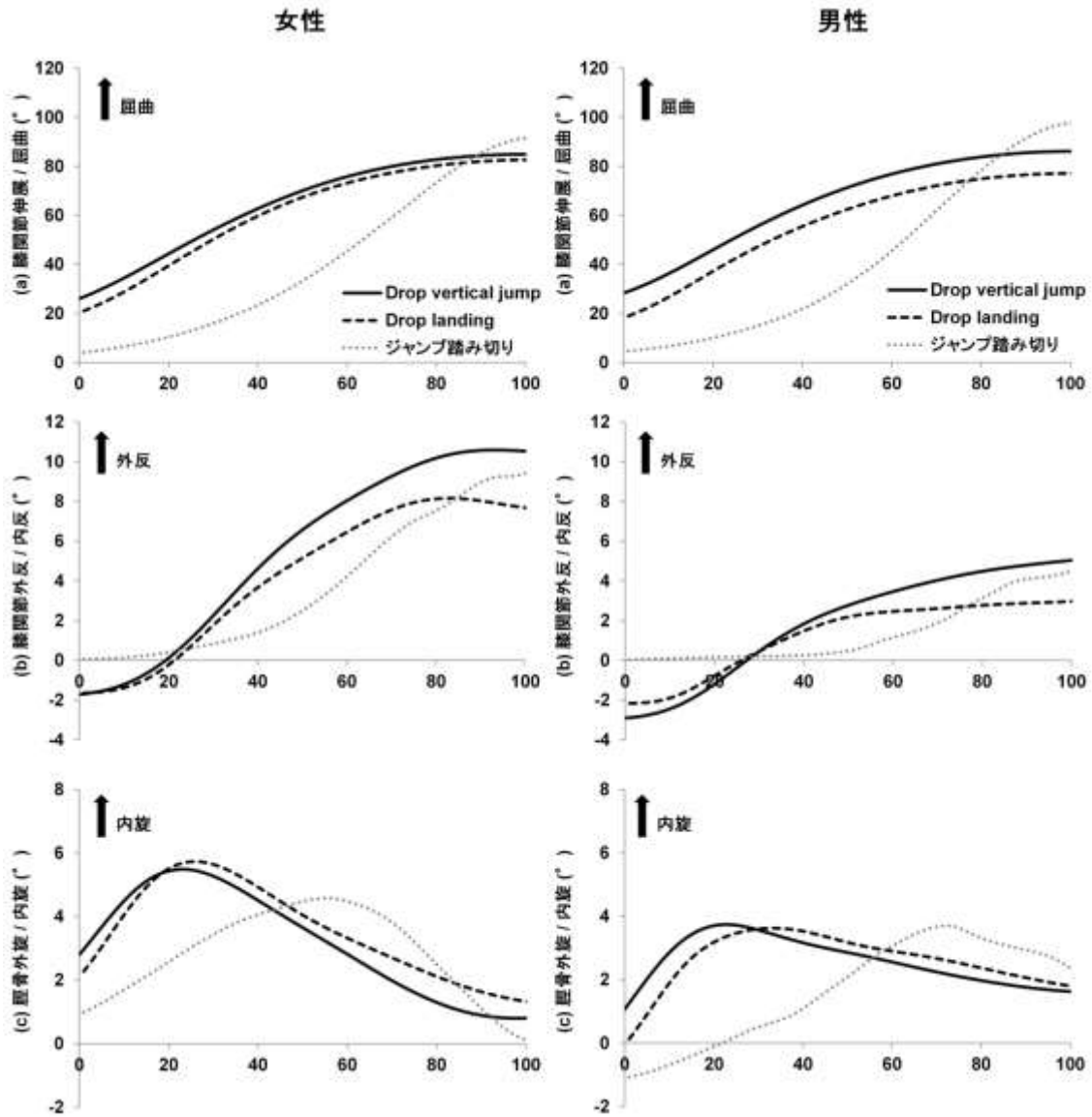


図 3. 2. 各課題における膝関節角度の時系列変化（左が女性，右が男性）：(a) 膝関節屈伸角度，(b) 膝関節内外反角度，(c) 脛骨内外旋角度．Drop vertical jump および drop landing の横軸は初期接地時から膝関節最大屈曲時までを 0 から 100% に標準化した時間を表す．ジャンプ踏み切りの横軸は動作開始時から膝関節最大屈曲時までを 0 から 100% に標準化した時間を表す．

DVJ と DL における kinetics の比較を表 3. 2. に示す。最大垂直床反力に関して、いずれの主効果および交互作用も認めなかった（課題の主効果, $F=3.301$, $P=0.077$; 性の主効果, $F=1.605$, $P=0.213$; 交互作用, $F=0.119$, $P=0.732$ ）。IC 後 50ms での膝関節屈曲モーメントに対して、有意な課題の主効果（ $F=10.003$, $P=0.003$ ）を認めたが、性の主効果（ $F=0.026$, $P=0.874$ ）および交互作用（ $F=3.302$, $P=0.077$ ）は認めなかった。事後検定では、男性の IC 後 50ms での膝関節屈曲モーメントは DVJ が DL に比して有意に大きな値を認め、効果量は大きかったが（ $P=0.001$, $r=0.535$ ）、女性は DVJ と DL の間に有意な差を認めなかった（ $P=0.347$, $r=0.302$ ）。最大膝関節屈曲モーメントに対しては、有意な課題の主効果（ $F=38.903$, $P<0.001$ ）および交互作用（ $F=12.768$, $P=0.001$ ）を認めたが、性の主効果は認めなかった（ $F=4.019$, $P=0.052$ ）。男性は DVJ における最大膝関節屈曲モーメントが DL に比して有意に高値であり、大きな効果量を認めたのに対し（ $P<0.001$, $r=0.811$ ）、女性では両課題間に有意な差は認めなかった（ $P=0.067$, $r=0.438$ ）。また、DVJ における最大膝関節屈曲モーメントは、男性が女性に比して有意に高値であった（ $P=0.005$, $r=0.428$ ）。IC 後 50ms での膝関節外反モーメントに対しては、いずれの主効果および交互作用も認めなかった（課題の主効果, $F=0.042$, $P=0.839$; 性の主効果, $F=0.036$, $P=0.850$; 交互作用, $F=0.971$, $P=0.330$ ）。最大膝関節外反モーメントに関しては、課題の主効果を認めたが（ $F=5.157$, $P=0.029$ ）、性の主効果（ $F=0.168$, $P=0.684$ ）および交互作用（ $F=0.113$, $P=0.738$ ）は認めなかった、しかし、事後検定ではいずれの有意差も認めなかった。

表 3. 2. Drop vertical jump と drop landing における kinetics の比較

	女性		男性	
	DVJ	DL	DVJ	DL
最大垂直床反力 (N/kg)	21.2 ± 4.3	20.0 ± 3.4	23.6 ± 8.3	21.8 ± 7.0
膝関節モーメント (Nm/(kg*m)) ^a				
屈曲モーメント				
初期接地後 50ms	0.87 ± 0.20	0.82 ± 0.13	0.93 ± 0.35	0.73 ± 0.20 ^b
最大値	1.30 ± 0.25	1.20 ± 0.14	1.53 ± 0.26*	1.18 ± 0.18 ^b
外反モーメント				
初期接地後 50ms	0.09 ± 0.16	0.11 ± 0.15	0.10 ± 0.19	0.07 ± 0.17
最大値	0.18 ± 0.17	0.14 ± 0.13	0.20 ± 0.10	0.15 ± 0.10

DVJ: drop vertical jump, DL: drop landing, 踏み切り: ジャンプ踏み切り動作

全ての値は平均値±標準偏差を表す。

^a 正の値は膝関節屈曲、外反モーメントを示す。

^b $P<0.05$ (vs DVJ)

* $P<0.05$ (vs 女性)

3. 4. 考察

本研究結果は、着地動作後に続くジャンプ動作が、着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に有意に影響することを明らかにした。本研究の重要な所見は、女性において DVJ における膝関節外反角度が DL に比し有意に高値であったのに対して、男性においては DVJ と DL の間に膝関節外反角度の有意な差を認めなかった点、DVJ と DL だけではなく、外力の加わらないジャンプ踏み切り動作においても女性は男性に比べて膝関節外反角度が有意に高値であった点である。これらの所見は本研究の仮説を部分的に支持する。

本研究において、女性の着地動作中の最大膝関節外反角度は DVJ が DL に比し有意に高値であったのに対し、男性では両着地動作間に有意な膝関節外反角度の差は認めなかった。また、女性は DVJ と DL の着地動作課題だけではなく、ジャンプ踏み切り動作においても男性と比べて有意に大きな膝関節外反角度を呈していた。これらの結果は、女性は着地動作後に続くジャンプ動作によって、着地動作中の膝関節外反角度が増加することを示唆している。若年女性アスリートを対象とした先行研究では、DVJ における first landing での最大膝関節外反角度が second landing での最大膝関節外反角度に比し有意に高値であったことが報告されている¹⁴⁾。また、単純な片脚着地動作と plant and cutting を比較した研究では、plant and cutting における膝関節外反角度変化量が有意に高値であったことが報告されている¹⁵⁴⁾。これらの先行研究は本研究と異なる課題比較ではあるが、女性は着地後に続く動作によって着地動作中の膝関節外反角度が大きくなることを示唆している。しかしながら、Cruz ら⁴¹⁾は本研究と同様に DVJ と DL を比較したが、両課題間に膝関節外反角度の有意差は検出されなかったと報告した。本研究結果と Cruz ら⁴¹⁾の結果の不一致は、先行研究が最大脛骨前方剪断力の生じた時点での膝関節 kinematics を比較していたことが原因の一つとして考えられる。今後も着地後に続く動作が、着地動作時の膝関節 kinematics や kinetics に与える影響を調査していく必要があるだろう。

ACL 損傷場面のビデオ解析より、ACL 損傷は着地後 50ms 以内に生じると推定されており^{108, 110)}、この短い時間は接地後のフィードバックメカニズムにより ACL 損傷が予防出来ないことを示唆している^{77, 225)}。本研究では、接地後 50ms の時点においても、女性の膝関節外反角度は DVJ が DL に比して高値であった。しかし、最大垂直床反力や膝関節外反モーメントに両課題間の差は認めなかった。また先行研究では、DVJ と DL の接地前下肢筋活動が異なることが報告されている^{7, 119)}。これらの所見は、女性がフィードフォワードメカニズムによって膝関節外反角度を増加させた可能性を示唆するものと考えられる。膝関節外反角度の増加は ACL 損傷メカニズムの最も重要な要素の一つであると考えられており^{105, 108, 120, 170, 178)}、着地動作に続くジャンプ動作によって接地直後から女性の膝関節外反角度が増加したことは、ACL 損傷発生率の性差を一部説明するかもしれない。

本研究では、男女ともに IC 時、IC 後 50ms 時の膝関節屈曲角度が、DL と比較して DVJ で高値であった。DVJ と DL を比較した先行研究においても、着地後にジャンプ動作が続くことによって膝関節屈曲角度が増加することが報告されており、本研究結果と同様の傾向が示されている⁴¹⁾。DVJ では、着地後に続くジャンプ踏み切り動作において膝関節伸展筋でより大きなエネルギー産生をするために、膝関節屈曲角度が増加した可能性が考えられる⁴¹⁾。また、DVJ における膝関節屈曲角度には性差を認めなかったが、膝関節屈曲

モーメントは女性と比べて男性の方が有意に大きかった。これらの結果は男性が DVJ において膝関節の *stiffness* をより高めていた可能性を示している。先行研究では、DVJ において足関節および膝関節 *stiffness* を高めることは、筋の *stretch-shortening cycle* を使用することによって着地後のジャンプ高を高くすることが示されている^{10, 93, 94}。男性は着地後のジャンプ踏み切り動作に備えて、膝関節の *stiffness* を高めることが出来ていたかもしれない。

女性は外力が加わらないジャンプ踏み切り動作においても、男性と比較してより大きな膝関節外反角度を呈した。Hewett ら⁸⁵⁾は、着地動作などにおいて筋による制御よりも靱帯などの静的制御による制御を優位に使う *ligament dominance* という運動戦略の概念を提唱し、特に女性に見られるとしたが、ジャンプ踏み切り動作においても女性はその様な戦略を用いている可能性が考えられる。今後は、エネルギー吸収やエネルギー産生の観点から、着地後に続くジャンプ踏み切り動作の影響を検討する必要があると考えられる。

Hewett ら⁸⁷⁾は女性アスリートを対象として、DVJ における膝関節外反角度が ACL 損傷の予測因子の一つであることを前向き調査によって明らかにした。着地動作の *kinematics* および *kinetics* の評価には DVJ や DL、片脚着地動作など様々な動作が用いられているが、本研究結果より DVJ と DL は着地動作時の膝関節 *kinematics* や *kinetics* が異なることが示された。また、先行研究では DVJ と片脚着地動作における膝関節 *kinematics* の差が報告されている⁵²⁾。したがって、同じ着地動作の評価であっても研究間で動作課題が異なる際には結果の比較には注意をする必要があると考えられる。

本研究の結果は、着地後に続くジャンプ踏み切り動作が、女性の膝関節外反角度を増加させること、女性は DVJ と DL の二つの異なる着地課題だけではなく、外力が加わらないジャンプ踏み切り動作においても男性と比較して膝関節外反角度が高値であったことを示した。これらの所見は、ACL 損傷の予防トレーニングにおいて、単純な着地動作だけでは動作訓練として不十分な可能性を示唆している。先行研究では、*stretch-shortening cycle* を含んだプライオメトリックエクササイズの前段階として、本研究で用いたようなジャンプ踏み切り動作が有用であるかもしれない。踏み切り動作に着目した報告は限られているが今後は踏み切り動作にも着目することで、男女の神経筋制御の違いをより説明することが出来るかもしれない。

本研究にはいくつかの限界が存在する。本研究で認めた課題間の膝関節外反角度の差には、大きな効果量を認めたが、実際の角度の差は小さかった。膝関節外反角度の増加は ACL *strain* や *in-situ force* を高めることが知られているが^{131, 132)}、これらの差がどれほど ACL *strain* や *in-situ force* に影響したかは不明である。しかし、3つの動作課題における神経筋制御の性差を明らかにした本研究結果は ACL 損傷予防にとって重要な所見であると考えられる。二点目は本研究では下肢の筋活動やエネルギー吸収量、*stiffness* などの力学パラメータを検討していないことである。これらを検討することで、着地後に続くジャンプ動作が着地動作中の膝関節 *kinematics* および *kinetics* に与える影響をより明らかにすることが出来ると考えられる。

3. 5. 結論

本研究は着地動作の後に続くジャンプ踏み切り動作が，着地動作中の膝関節 kinematics および kinetics に影響すること，またその影響は男女で異なることを明らかにした．女性は接地後 50ms 時の膝関節外反角度および着地動作における最大膝関節外反角度が DL に比して DVJ で有意に高値を示したが，男性では両課題間に膝関節外反角度の有意な差は検出されなかった．また，DVJ と DL の 2 つの着地動作課題だけではなく，外力が加わらないジャンプ踏み切り動作においても，女性は男性と比較して有意に膝関節外反角度が大きかった．矢状面上では，男女ともに初期接地時および接地後 50ms での膝関節屈曲角度が DL に比して DVJ で有意に高値を示したが，最大膝関節屈曲角度および屈曲モーメントは男性においてのみ DVJ が DL に比して有意に高値を示した．

4. 着地動作における股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動の関係

4. 1. 諸言

着地動作時の不良な動的下肢アライメントの一つとして **dynamic knee valgus** が挙げられており、**dynamic knee valgus** は膝関節外反だけではなく、股関節内転および内旋、脛骨回旋、足部回内といった要素も含む下肢関節の 3 次元的な肢位を表すとされる⁸⁷⁾。近年では動作中の膝関節外反角度を増加させる要因について、股関節の影響が着目されるようになってきた。

股関節外旋筋の筋力低下は、動作中の股関節内旋角度を増加させ、膝関節外反角度を増加させる可能性があるとして、いくつかの研究で検討されてきた^{14, 91, 95, 117)}。**Howard** ら⁹⁵⁾は股関節開排筋力が着地動作中の膝関節外反角度と相関することを示しており、股関節外旋筋の筋力低下が着地動作中の膝関節外反角度を増加させるという仮説を支持している。しかしながら、股関節外転筋力や外旋筋力の大小によって対象を群分けした際に着地動作時の膝関節外反角度の群間差を認めなかったという報告も存在する^{91, 117)}。**Bandholm** ら¹⁴⁾は **DVJ** における左右の膝関節間距離と股関節外旋筋力の間に有意な相関関係を認めたが、仮説とは逆に股関節外旋筋力が強いほど左右の膝関節間距離が近づくという関係性であったことを報告している。また、**Thomas** ら²⁰⁷⁾は股関節内外旋筋の疲労プロトコル前後で、片脚着地動作時の膝関節外反角度を比較したが、膝関節外反角度は変化しなかったと報告している。この様に、股関節外旋筋の筋力や筋疲労と、着地動作時の膝関節外反角度の間に明らかな関係性は認められていない。

ACL 損傷者を対象とした近年の **case control study** やコホート研究では、股関節回旋可動域と **ACL** 損傷との関連が検討されている^{21, 54, 56, 204)}。**Ellera Gomes** ら⁵⁴⁾は **ACL** 損傷の既往があるサッカー選手と既往がない選手を比較し、**ACL** 損傷既往者で股関節内旋可動域が減少していたと報告している。また、**Tainaka** ら²⁰⁴⁾は **ACL** 損傷者と対照群の股関節可動域を調査し、**ACL** 損傷者では股関節内旋可動域と外旋可動域が有意に低下していたと報告した。**Bedi** ら²¹⁾も同様に、股関節内旋可動域の減少がアメリカンフットボール選手の **ACL** 損傷リスクと成り得ると報告している。

動作解析研究においては股関節内旋角度の増加が膝関節外反角度の増加の一因であると仮説が立てられているが^{14, 91, 95, 117, 207)}、**case control study** やコホート研究では股関節内旋可動域の減少が **ACL** 損傷リスクと成り得ることが示唆されている^{21, 54, 56, 204)}。股関節外旋筋の筋力と着地動作中の膝関節外反角度の関係性について、いくつかの研究がなされてきたにも関わらず、実際に着地動作において生じる股関節回旋運動と膝関節外反運動の関係性は明らかにされていない。また、股関節回旋運動は同じ水平面上の運動である脛骨回旋運動に影響する可能性も考えられるが、股関節回旋運動と脛骨回旋運動の関係も明らかになっていない。着地動作中の股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動との間の関係性を明らかにすることは、**ACL** 損傷の予防介入の焦点を明らかにすることが出来るかもしれない。したがって本研究の目的は、**DVJ** の着地動作における股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動との間の関係性を明らかにすることである。

4. 2. 方法

4. 2. 1. 対象

健康若年女性 52 名 (平均±標準偏差: 年齢 21.2 ± 1.2 歳; 身長 160.4 ± 6.5 cm; 体重 52.6 ± 7.1 kg) を対象とした。対象は被験者の右下肢とした。全ての被験者は過去に競技活動歴を有していた (バスケットボール, ハンドボール, サッカー等)。対象選定における除外基準は, 過去半年以内の筋骨格系傷害 (捻挫や腰痛等), いかなる膝関節傷害および手術歴, 下肢および体幹の骨折歴, ACL 損傷予防プログラムもしくはスポーツ傷害予防を目的としたジャンプ着地トレーニングへの参加歴とした。本研究への参加に先立ち, 全ての被験者に本研究の主旨および実験内容について口頭および書面にて説明し, 各被験者から書面にてインフォームドコンセントを得た。また, 本研究は北海道大学大学院保健科学研究院の倫理委員会の承認を得て実施した。

4. 2. 2. 実験手順とデータ収集

全 40 個の反射マーカ―を, 下肢と骨盤の骨指標と対象である右下肢の大腿と下腿に両面テープを用いて貼付した⁹⁷⁾ (図 2. 1.)。また, 実験は全被験者, 裸足にて実施した。全てのデータは EvaRT 4. 4 (Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA) を用いて, 6 台の高速度デジタルカメラ (Hawk cameras; Motion Analysis Corporation) と 2 台の床反力計 (Type 9286; Kistler AG, Winterthur, Switzerland) を同期させ収集した。サンプリング周波数はカメラデータを 200Hz, 床反力データを 1,000Hz に設定した。

初めに, 各被験者の静止立位時のデータを記録した。静止立位姿勢は, 両手を胸の前で組み, 足部の向きは真っ直ぐとし, 両足の幅は腰幅とするよう指示し, 被験者間で統一させた。静止立位時のデータを記録後, 左の大腿骨内側上顆のマーカ―は除去した。次に, DVJ 課題を記録した (図 2. 2.)。DVJ では, 被験者は 30cm 台上に肩幅で立ち, 台から落下し左右それぞれの足を 2 枚の床反力計上に着地後, 直ちに最大垂直跳びを行なうよう指示した。また, 課題を通して, 被験者には両手を耳の高さに保持し, 視線は前に向けるよう求めた。被験者には動作課題に慣れるまで練習を実施することを許可し, 3 回の成功試行を記録した。

4. 2. 3. データ解析

下肢関節 kinematics および膝関節 kinetics の算出には SIMM 6.0. 2 (MusculoGraphics, Santa Rosa, CA, USA) を用いた。股関節回旋角度および膝関節角度の算出には関節座標系法を用い, 関節座標系の定義は過去の報告に準じた^{74, 22)}。なお, 膝関節座標系には一部拘束を加えた。SIMM 6. 0. 2. における下肢関節角度の算出に際し, 皮膚運動による誤差を減じるため, global optimization technique を適用した¹²⁶⁾。また, dynamic knee valgus の指標の一つである, 前額面上に投影した膝関節外反角度を算出した⁸²⁾。前額面上投影膝関節外反角度は, 上前腸骨棘と膝関節中心を結んだ線と, 膝関節中心と足関節中心を結ん

だ線が前額面上でなす角とした⁸²⁾。これらの三次元下肢関節角度および前額面上投影膝関節外反角度は、全て静止立位時の角度を 0° とした。DVJにおける台からの着地動作のIC時から膝関節最大屈曲時までを解析対象区間とした。ICは垂直床反力が10N以上となった時点と定義した。股関節回旋角度および三次元膝関節角度、前額面上投影膝関節外反角度に関して、IC後50ms間での角度変化量、ICから膝関節最大屈曲時までの角度変化量、膝関節最大屈曲時の角度を算出した。

4. 2. 4. 統計学的解析

IC後50ms間での股関節内旋角度変化量と膝関節外反角度変化量および脛骨回旋角度変化量、ICから膝関節最大屈曲時までの股関節回旋角度変化量と膝関節外反角度変化量および脛骨回旋角度変化量の関係をPearsonの積率相関係数 (R) を用いて検討した。また、膝関節最大屈曲時の股関節内旋角度、ICから膝関節最大屈曲時までの股関節内旋角度変化量を基準に52名の対象を3群に分けた(上位群17名、中位群18名、下位群17名)。各群分けにおける上位群と下位群の三次元膝関節角度および前額面上投影膝関節外反角度をindependent t -testを用いて比較した。全ての統計学的解析の危険率は $P < 0.05$ とし、IBM SPSS Statistics 19 (IBM, Chicago, IL, USA)を用いて解析した。相関分析において検出力 ($1 - \beta$) を算出した。また、群間の差に関して、効果量 r を算出した⁶⁰⁾。効果量の大きさは、 $r > 0.5$ を効果量大、 $0.50 > r > 0.3$ を効果量中、 $0.3 > r > 0.1$ を効果量小、 $0.1 > r$ を効果量無しとした⁴⁰⁾。

4. 3. 結果

IC 後 50ms 間における股関節回旋角度変化量と膝関節外反角度変化量 ($R = -0.381$, $P = 0.005$, $1 - \beta = 0.830$) および脛骨回旋角度変化量 ($R = -0.424$, $P = 0.002$, $1 - \beta = 0.912$) の間に有意な負の相関関係を認めた (図 4. 1.). IC 時から膝関節最大屈曲時までの股関節回旋角度変化量と膝関節外反角度変化量の間に有意な負の相関関係を認めたが ($R = -0.570$, $P < 0.001$, $1 - \beta = 0.998$), 膝関節回旋角度変化量との間には有意な相関関係を認めなかった ($R = -0.172$, $P = 0.222$, $1 - \beta = 0.235$) (図 4. 2.). また, IC 時から膝関節最大屈曲時までの全被験者の平均股関節回旋角度と, 平均膝関節外反角度および平均膝関節回旋角度の関係を図 4. 3. に示す. 股関節回旋運動と膝関節外反運動は IC 時から直線的関係にあるのに対し, 股関節回旋運動と膝関節回旋運動では直線的な関係性は認められなかった.

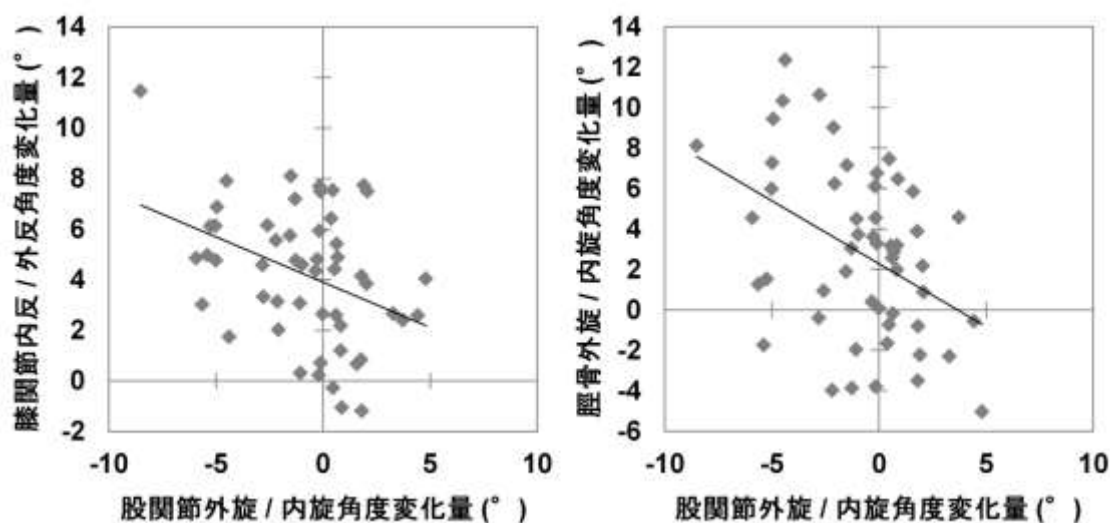


図 4. 1. 初期接地後 50ms 間における股関節回旋変化量と (左) 膝関節外反角度変化量および (右) 脛骨回旋角度変化量. 正の値は膝関節外反, 脛骨内旋, 股関節内旋角度を示す.

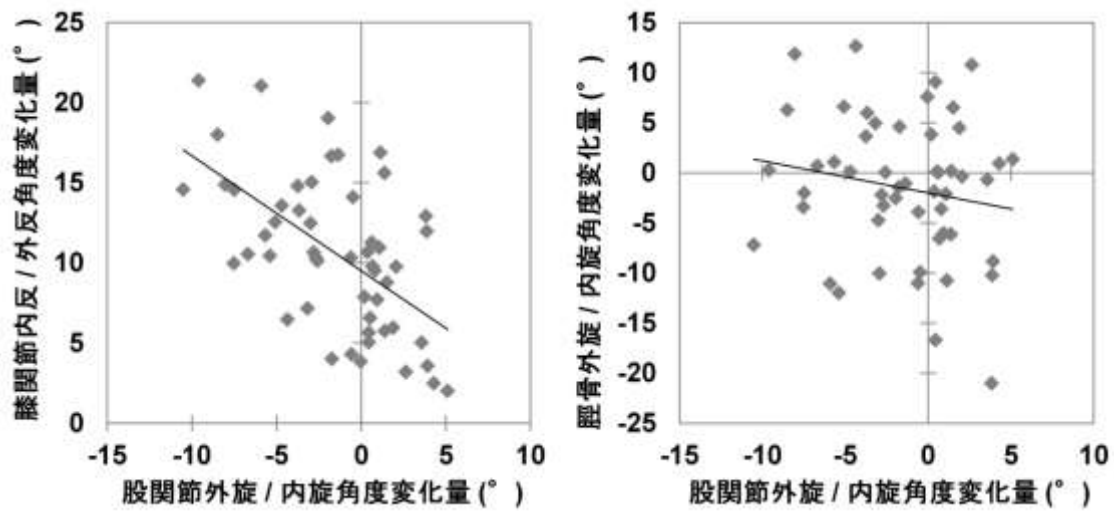


図 4. 2. 初期接地時から膝関節最大屈曲時までの股関節回旋角度変化量と（左）膝関節外反角度変化量および（右）脛骨回旋角度変化量. 正の値は膝関節外反，脛骨内旋，股関節内旋角度を示す.

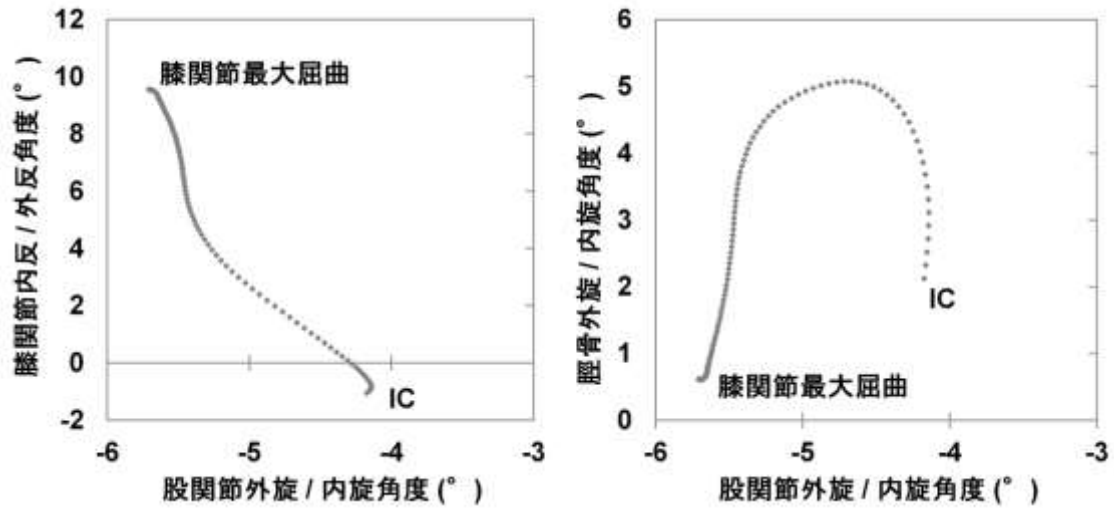


図 4. 3. 初期接地時（IC）から膝関節最大屈曲時までの股関節回旋角度と（左）膝関節外反角度および（右）脛骨回旋角度の関係. 正の値は膝関節外反，脛骨内旋，股関節内旋角度を示す.

膝関節最大屈曲時における股関節回旋角度によって分けた 2 群間の kinematics の比較を表 4. 1. に示す. 両群間に膝関節外反角度の有意差を認め, 相対的股関節内旋群は有意に膝関節外反角度が高値であり, 中等度の効果量を認めた ($P=0.008$, $r=0.445$). しかし, 前額面上投影膝関節外反角度を始め ($P=0.781$, $r=0.050$), 膝関節屈曲角度 ($P=0.231$, $r=0.211$), 脛骨回旋角度 ($P=0.876$, $r=0.028$) には両群間に有意な差は認めなかった. IC 時から膝関節最大屈曲時までの股関節回旋角度量によって分けた 2 群間の比較を表 4. 2. に示す. 両群間に膝関節外反角度変化量の有意差を認め, 相対的股関節内旋群は有意に膝関節外反角度変化量が高値であり, 大きな効果量を認めた ($P=0.002$, $r=0.517$). しかし, 前額面上投影膝関節外反角度変化量を始め ($P=0.361$, $r=0.162$), 膝関節屈曲角度変化量 ($P=0.133$, $r=0.263$), 脛骨回旋角度変化量 ($P=0.132$, $r=0.264$) には両群間に有意な差は認めなかった.

表 4. 1. 膝関節最大屈曲時の股関節回旋角度によって分けた 2 群間の膝関節最大屈曲時の膝関節角度の比較

関節角度 ^a	相対的股関節内旋群 (n = 17)	相対的股関節外旋群 (n = 17)	効果量 r	P value
股関節内旋角度	1.5 ± 3.0	-12.7 ± 4.4	0.888	< 0.001
膝関節屈曲角度	87.1 ± 13.6	82.2 ± 9.1	0.211	0.231
膝関節外反角度	6.9 ± 6.2	12.7 ± 5.8	0.445	0.008
脛骨内旋角度	0.2 ± 10.7	0.7 ± 7.7	0.028	0.876
前額面上投影 膝関節外反角度	8.9 ± 7.3	9.6 ± 6.8	0.050	0.781

値は平均値±標準偏差を表す.

正の値は股関節内旋, 膝関節屈曲, 膝関節外反, 脛骨内旋角度を示す.

^a 膝関節最大屈曲時における関節角度

表 4. 2. 初期接地時から膝関節最大屈曲時までの股関節回旋角度変化量によって分けた 2 群間の膝関節角度変化量の比較

関節角度変化量 ^a	相対的股関節内旋群 (n = 17)	相対的股関節外旋群 (n = 17)	効果量 <i>r</i>	<i>P</i> value
股関節内旋角度	2.4 ± 1.4	-6.1 ± 2.3	0.916	< 0.001
膝関節屈曲角度	62.6 ± 11.7	56.7 ± 10.8	0.263	0.133
膝関節外反角度	8.3 ± 4.5	13.4 ± 4.1	0.517	0.002
脛骨内旋角度	-3.1 ± 7.5	0.8 ± 7.1	0.264	0.132
前額面上投影 膝関節外反角度	9.6 ± 4.9	7.8 ± 6.3	0.162	0.361

値は平均値±標準偏差を表す.

正の値は股関節内旋, 膝関節屈曲, 膝関節外反, 脛骨内旋角度変化量を示す.

^a 初期接地時から膝関節最大屈曲時までの関節角度変化量

4. 4. 考察

本研究結果は、着地動作における股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動が有意に関連することを明らかにした。接地後 50ms 間における股関節外旋角度の増加は、膝関節外反角度および脛骨内旋角度の増加と関連し、膝関節最大屈曲時までの股関節外旋角度の増加は、膝関節外反運動の増加と関連した。

屍体膝やコンピュータモデルを用いた着地動作のシミュレーションにおいて、股関節内旋可動域制限を加えたモデルでは、制限を加えなかったモデルと比較して ACL の strain が増加したことが報告されている^{19, 21)}。これらのシミュレーションモデルでは股関節内旋制限により、脛骨内旋ストレスが増加したために ACL strain が増加したと考察されている。本研究は、in-vivo において、接地後 50ms 間に股関節外旋角度の増加と脛骨内旋角度の増加が関連することを明らかにし、上記の先行研究^{19, 21)}と同様の傾向が生じていることを明らかにした。さらに、本研究では股関節外旋角度の増加が膝関節外反角度の増加と関連することを明らかにした。膝関節外反角度の増加は ACL 損傷メカニズムの最も重要な要素の一つであると考えられており^{105, 108, 120, 170, 178)}、膝関節外反トルクと脛骨内旋トルクの組み合わせは、より大きな ACL strain や張力を生じると報告されている^{132, 189)}。これらの報告から、接地直後の大きな膝関節外反運動や脛骨内旋運動は ACL 損傷のリスクを高めることが考えられる。着地動作における股関節回旋運動は、膝関節外反運動や脛骨回旋運動と関連することから、股関節回旋運動は ACL 損傷予防において介入の焦点と成り得ると考えられる。

股関節回旋運動と膝関節外反運動の関連は、IC 後 50ms 間だけではなく IC から膝関節最大屈曲時までの間においても観察された。一方で、股関節回旋運動と膝関節回旋運動の関連は、IC 後 50ms 間のみに認め、angle-angle plot から着地動作の後半では異なる傾向を示していた (図 4. 3.)。膝関節外反角度と膝関節回旋角度で異なる傾向を認めた理由の一つとして、膝関節屈曲角度の影響が考えられる。本研究における IC 時の平均膝関節屈曲角度は $23.7 \pm 6.8^\circ$ であり、IC 後 50ms では平均 $51.9 \pm 6.0^\circ$ に達していた。また、膝関節最大屈曲角度は $83.1 \pm 11.0^\circ$ であった。股関節回旋運動は膝関節伸展位では脛骨回旋軸と平行に近い軸周りで生じる (図 4. 4.)。一方で膝関節屈曲位では、股関節回旋軸は膝関節内外反軸とより平行に近づく (図 4. 4.)。このことが、IC 後 50ms 以内では股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動の関連が見られたが、IC から膝関節最大屈曲時までの変化量では膝関節外反運動との間にのみ関連が見られた原因として考えられた。着地後の股関節内旋運動は、床反力から受ける膝関節外反ストレスや脛骨内旋ストレスを減じる役割を果たしているかもしれない。また、Hewett ら⁸⁷⁾は DVJ における膝関節外反角度は ACL 損傷の予測因子の一つであると報告している。股関節回旋運動は着地動作を通して膝関節外反運動と関連するため、不良な着地動作の修正のために重要であるかもしれない。

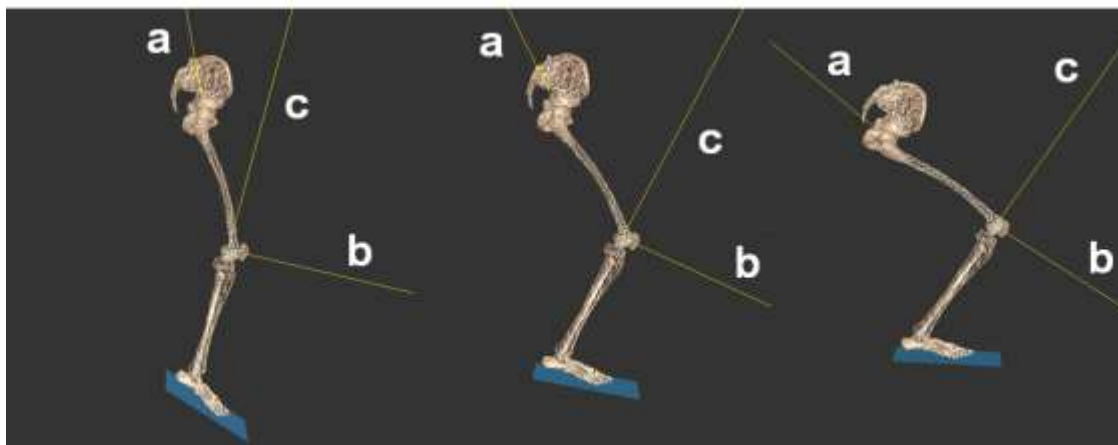


図 4. 4. 股関節回旋軸 (a) と膝関節内外反軸 (b) および脛骨回旋軸 (c) の関係. 左から初期接地時 (膝関節屈曲 23.7°), 初期接地後 50ms 時 (膝関節屈曲 51.9°), 膝関節最大屈曲時 (膝関節屈曲 83.1°). 膝関節屈曲角度は全被験者の平均値の値.

ACL 損傷の危険を高める不良な着地動作パターンとして膝関節が正中線に近づく **dynamic knee valgus** が代表的なものとして挙げられており, その様な動作パターンには股関節内旋と膝関節外反の要素が含まれているとされる⁸⁷⁾. 本研究では臨床的な **dynamic knee valgus** の評価法として前額面上に投影した二次元的な膝関節外反角度を用いた. しかしながら, 膝関節最大屈曲時の股関節回旋角度で群分けした上位群と下位群の間に中程度の効果量をもって膝関節外反角度の群間差を認めたが, 前額面上投影膝関節外反角度には両群間に有意な差を認めず, 効果量も無かった. また, IC 時から膝関節最大屈曲時までの股関節回旋角度変化量で群分けした際も同様に, 上位群と下位群の間に大きな効果量をもって膝関節外反角度変化量の群間差を認めたが, 前額面上投影膝関節外反角度には有意な差は認められず, 効果量も小さかった. これらの結果は, **dynamic knee valgus** には股関節回旋角度と膝関節外反角度が影響していることを示唆している (図 4. 5.). 前述の様に, 股関節回旋軸と膝関節内外反軸は膝関節屈曲位で平行に近づく (図 4. 4.). したがって, 一見同様な動的アライメントであっても, 股関節外旋が大きく生じ, 膝関節外反が大きい例と, 股関節内旋が生じ, 膝関節の外反が比較的小さい例がいることが考えられる. 動作中の股関節内旋角度の増加は, 膝関節外反角度を増加させ, ACL 損傷リスクを高めると考えられてきた^{14, 91, 95, 117, 207)}. しかし, **case control study** では股関節内旋角度の減少が ACL 損傷リスクと成り得ることが近年示されている^{21, 54, 56, 204)}. 本研究結果は, 相対的股関節内旋群において小さな膝関節外反角度を示した一方で, **dynamic knee valgus** の指標とした前額面投影上膝関節外反角度には群間差は検出されなかった. これらの所見は, 先行研究における運動学的仮説と **case control study** の矛盾を部分的に説明するかもしれない. 過去に, 前額面上投影膝関節外反角度は, 三次元膝関節外反角度と相関することは報告されているが¹⁴⁷⁾, リスクスクリーニングとしての有効性はまだ報告されていない. 詳細な解析には, 三次元動作解析を用いる必要があるかもしれない.

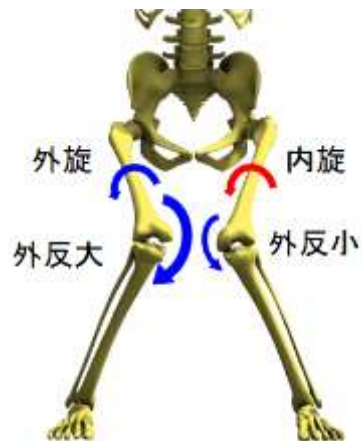


図 4. 5. Dynamic knee valgus アライメントにおける股関節回旋と膝関節外反

本研究には限界がいくつか存在する．一つ目は，本研究で認めた股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動の関連の因果関係は不明である．今後は，股関節外旋筋に対するアプローチが膝関節外反運動や脛骨内旋運動を減じるかを調査するなど，本研究で認めた関連についてさらなる調査が必要である．二つ目は，股関節回旋運動と ACL strain や in-situ force に関連があるかは不明な点である．本研究では膝関節外反角度や脛骨内旋角度の増加が ACL の strain や in-situ force を高めるとする過去のバイオメカニクス研究などから，股関節回旋運動が ACL 損傷と関連する可能性を考察したが，今後はより洗練された方法を用いて，これらの関係性についてもさらに検討する必要があるだろう．

4. 5. 結論

本研究は着地動作時の股関節回旋運動が膝関節外反運動および脛骨回旋運動と関連することを明らかにした。初期接地後 50ms における股関節内旋角度変化量は膝関節外反角度変化量および脛骨回旋角度変化量との間に有意な負の相関関係を示した。初期接地時から膝関節最大屈曲時までの股関節内旋角度変化量は膝関節外反角度変化量と有意な負の相関関係を示した。また、膝関節最大屈曲時の股関節内旋角度による群分けでは、相対的股関節内旋群の膝関節外反角度は相対的股関節外旋群と比較して有意に低値であった。同様に初期接地時から膝関節最大屈曲時までの股関節内旋角度変化量による群分けにおいても、相対的股関節内旋群の膝関節外反角度変化量は相対的股関節外旋群と比較して有意に低値であった。前額面上に投影した二次元膝関節外反角度および角度変化量にはこれら群間の差を認めなかった。

5. 総括論議

本論文では、ACL 損傷予防の観点から、着地動作中の膝関節外反角度および外反モーメントに影響を与える要因として 3 つの研究を通じて検討した。第 2 章では着地動作時の足部方向の変化が有意に膝関節外反モーメントおよび膝関節外反角度に影響することを明らかにした。第 3 章では着地動作後に続くジャンプ動作が、女性の着地動作中の膝関節外反角度を増加させることを明らかにした。また、第 4 章では股関節回旋運動が膝関節外反運動と関連することを明らかにした。本章では、これらの結果が ACL 損傷予防の発展に繋がる可能性や今後の展望について論じる。

先行研究では、多くの ACL 損傷予防プログラムが ACL 損傷発生率を低下させたことを示している^{84, 104, 112, 130, 152, 160, 211}。これらの予防プログラムでは筋力訓練やストレッチ、バランス訓練、プライオメトリックエクササイズ等、様々な要素が取り入れられているが、動作中の膝関節コントロールの指導は共通して取り入れられている。動作指導には“knee over toe”が最も一般的に用いられており、膝関節外反を防ぐために膝関節をつま先の上に保持するような指導がされている。また、ACL 損傷予防を念頭とした動作指導では、足部を前方に向けるという指示が散見されるが^{156, 172}、足部の向きに着目した動作指導は“knee over toe”に比べて取り入れられていることが極めて少ない。本論文第 2 章では着地動作における足部方向の変化が膝関節外反角度および外反モーメント、脛骨回旋角度に有意に影響したことを明らかにした。足部を前方に向けた状態との比較は行っていないが、過度な足部方向角度や足部方向を意図的に変化させることは膝関節運動や膝関節モーメントを変化させる可能性が考えられ、動作指導の対象となるだろう。また、Padua ら¹⁶⁶は臨床的な着地動作スクリーニングツールにおいて過度な足部方向角度を減点項目として挙げている。先行研究の足部方向角度のカットオフ値が妥当であるかに根拠はないが、足部方向角度に着目した着地評価は必要だろう。今後は、カッティング動作や片脚着地動作の様な異なる動作課題においても足部方向角度が膝関節 kinematics および kinetics に与える影響について検討していく必要がある。

ACL 損傷予防を念頭に、着地動作時の膝関節 kinematics や kinetics を即時的に改善させる試みが多数存在する^{18, 49, 57, 81, 139, 143, 146, 161, 176}。多くの研究が口頭指示やフィードバックによる即時的な効果として、着地動作中の床反力の減少^{18, 81, 139, 143, 146, 161, 176}と膝関節屈曲角度の増加^{49, 57, 143, 146, 161}を報告している。また、膝関節外反モーメントに関してもいくつかの研究で減少させることに成功したことを報告している^{18, 81, 146, 206}。しかし、膝関節外反角度に関しては、減少したという報告は少なく¹⁴⁶、多くの研究では膝関節外反角度の即時的な減少を認めていない^{18, 57, 81, 143, 206}。これらの結果から、膝関節外反モーメントの減少は、主に床反力の減少に起因するものであった可能性が考えられる。第 3 章では、女性は着地動作後に続くジャンプ動作によって、着地動作中の膝関節外反角度が接地直後より増加することを明らかにした。また、女性は着地動作だけではなく、外力が加わらないジャンプ踏み切り動作において男性と比較して有意に大きな膝関節外反角度を示した。前述の動作介入研究では、着地動作後に続くジャンプ動作を含む DVJ 課題や stop jump 課題が用いられているが^{18, 57, 81}、これらの課題における口頭指示やフィードバックは着地動作の観点から行われている。今後は踏み切り動作も含めた動作指導やフィードバ

ックの効果を検討する必要があるだろう。また、踏み切り動作も含め、着地動作後に続く動作が着地動作時の膝関節 kinematics や kinetics に影響するかの検討も重ねていく必要があるだろう。

第4章では着地動作時の股関節回旋運動と膝関節外反運動、脛骨回旋運動が関連することを明らかにした。これらの所見は、股関節機能への介入が着地動作時の膝関節 kinematics を変化させうる可能性を示唆している。近年の ACL 損傷予防プログラムでは股関節や体幹筋機能に着目したコアスタビリティトレーニングが取り入れられるようになり、股関節や体幹筋機能の重要性が認識されるようになってきた^{104, 112, 211}。本研究結果は ACL 損傷予防における股関節や体幹筋機能の重要性を支持するものであると考えられる。しかしながら、これらの ACL 損傷予防プログラムは良好な予防効果を報告してきたが^{104, 112, 211}、股関節や体幹筋機能訓練は包括的な内容となっており、具体的に重要な介入方法を明らかにすることは ACL 損傷予防プログラムを発展させることが出来ると考えられる。股関節外旋筋の等尺性筋力と着地動作時の膝関節外反角度の関係性についていくつかの先行研究が報告しているが、その関係性は結論に至っていない^{14, 91, 95, 117}。本研究結果では、接地直後の股関節内旋角度の増加と膝関節外反角度および脛骨内旋角度の減少、膝関節最大屈曲時までの股関節内旋角度の増加と膝関節外反角度の減少という傾向を認めた。これらの所見は着地動作時の股関節外旋筋による遠心性機能の重要性を示唆しているものと考えられる。今後は股関節外旋筋の遠心性筋力と着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics の関係性を検討する必要があるだろう。また、近年では、股関節内旋可動域の減少が ACL 損傷リスクと成り得ると報告されており^{21, 54, 56, 204}、股関節回旋可動域と着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics の関係性も検討する必要がある。これらの関係性を明らかにすることは ACL 損傷予防における臨床評価の意義や重要性を明らかにするだろう。

6. 結論

本論文の目的は、着地動作中の膝関節外反角度および外反モーメントと関連する要因を明らかにすることであった。第二章では、着地動作時の足部方向の変化が、着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に与える影響を検討した。第三章では、着地動作後に続くジャンプ動作が、着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に与える影響を検討した。第四章では、着地動作時の股関節回旋運動と膝関節外反運動および脛骨回旋運動の関連を調査した。3つの研究より、以下の結論を得た。

1. 着地動作時の足部方向の変化は、着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に有意に影響を与えた。着地時に足部を内側へ向けた **toe-in landing** では、着地時の最大膝関節外反角度および外反モーメント、脛骨内旋角度が有意に増加した。また、着地時に足部を外側へ向けた **toe-out landing** では、着地時の最大膝関節外反角度および外反モーメントは低値であったが、接地後 50ms 間における脛骨内旋角速度が有意に高値であった。
2. 着地後に続くジャンプ動作は、着地動作時の膝関節 kinematics および kinetics に有意に影響を与えた。女性では、着地後にジャンプ動作が続くことによって、接地後 50ms の膝関節外反角度および最大膝関節外反角度が有意に増加した。また、女性は着地動作だけではなく、外力が加わらないジャンプ踏み切り動作においても男性と比較して有意に大きな膝関節外反角度を呈した。
3. 着地動作における股関節回旋運動は、膝関節外反運動および脛骨回旋運動と有意に関連した。接地後 50ms 間における股関節内旋角度変化量は、膝関節外反角度変化量および脛骨内旋角度変化量との間に有意な負の相関関係を示した。初期接地時から膝関節最大屈曲時までの股関節内旋角度変化量は、膝関節外反角度変化量との間に有意な負の相関関係を示した。また、膝関節最大屈曲時の股関節内旋角度、初期接地時から膝関節最大屈曲時までの股関節内旋角度変化量で対象を群分けした際に、膝関節最大屈曲時の膝関節外反角度、初期接地時から膝関節最大屈曲時までの膝関節外反角度変化量は、相対的股関節内旋群が相対的股関節外旋群に比して有意に低値を示した。

7. 謝辞

本論文を完成させるにあたり、指導教員の北海道大学大学院保健科学研究院機能回復学分野、山中正紀教授には多大なるご指導やご支援を賜りました。深謝申し上げます。また、山中教授には本論文の指導だけではなく、学部生の時より理学療法士としての考え方、技術、evidence based physical therapy の重要性など多くのことを学ばせていただきました。この場を借りて、深く感謝申し上げます。

副指導教員である北海道大学大学院保健科学研究院機能回復学分野、遠山晴一教授には研究内容から論文執筆にわたり、学術的な視点だけではなく、医師の視点からも貴重なご意見、ご指導を頂きました。深く感謝申し上げます。

北海道大学大学院保健科学研究院機能回復学分野、浅賀忠義教授、寒川美奈准教授には、審査員として親身なご指導、ご指摘を賜りましたこと心より感謝申し上げます。

十勝リハビリテーションセンター院長、武田直樹先生には修士課程の頃より、研究の構想に関していつも貴重なご意見やご指導を賜りましたこと深謝いたします。

北海道大学大学院保健科学研究院機能回復学分野、齊藤展士助教には本論文の解析方法などに関し、ご指導を賜りましたこと、深く感謝いたします。

医療法人社団朋仁会整形外科北新病院、青木喜満医師、井上千春医師、金子知医師、松本尚理学療法士、伊藤雄理学療法士はじめ、同病院に所属する医師、理学療法士の方々には学術的な面のみならず、臨床的な側面から貴重なご意見、ご指導を賜りましたこと深く感謝いたします。また、リハビリテーション科の皆様には、社会人学生としてご理解、ご協力いただきましたこと重ねて深謝申し上げます。

本研究を進めるに当たり、多大なるご協力やご支援を賜り、公私にわたって支えていただいた北海道大学大学院保健科学研究院運動器障害学研究室の関係者皆様には深く感謝いたします。特に、小林巧氏、井野拓実氏、宝満健太郎氏、越野裕太氏、谷口翔平氏、上野亮氏、南茂幸氏、生田亮平氏には有益な助言や多大なるご協力を賜り、心から感謝申し上げます。また、被験者を快諾して頂いた皆様にもこの場を借りて感謝申し上げます。

最後に、長きにわたる学生生活を支えていただいた両親、妻に、この場を借りて心から感謝いたします。

8. 参考文献

1. Adachi N, Nawata K, Maeta M, Kurozawa Y. Relationship of the menstrual cycle phase to anterior cruciate ligament injuries in teenaged female athletes. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2008;128(5):473-478.
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. Agel J, Bershadsky B, Arendt EA. Hormonal therapy: ACL and ankle injury. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(1):7-12.
4. Ajuied A, Wong F, Smith C, et al. Anterior cruciate ligament injury and radiologic progression of knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2014;42(9):2242-2252.
5. Alentorn-Geli E, Myer GD, Silvers HJ, et al. Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part 1: Mechanisms of injury and underlying risk factors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(7):705-729.
6. Allen MK, Glasoe WM. Metrecom measurement of navicular drop in subjects with anterior cruciate ligament injury. *J Athl Train.* 2000;35(4):403-406.
7. Ambegaonkar JP, Shultz SJ, Perrin DH. A subsequent movement alters lower extremity muscle activity and kinetics in drop jumps vs. drop landings. *J Strength Cond Res.* 2011;25(10):2781-2788.
8. Anderson AF, Dome DC, Gautam S, Awh MH, Rennirt GW. Correlation of anthropometric measurements, strength, anterior cruciate ligament size, and intercondylar notch characteristics to sex differences in anterior cruciate ligament tear rates. *Am J Sports Med.* 2001;29(1):58-66.
9. Andriacchi TP, Dyrby CO. Interactions between kinematics and loading during walking for the normal and ACL deficient knee. *J Biomech.* 2005;38(2):293-298.
10. Arampatzis A, Schade F, Walsh M, Brüggemann GP. Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance. *J Electromyogr Kinesiol.* 2001;11(5):355-364.

11. Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *Br J Sports Med*. 2011;45(7):596-606.
12. 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.
13. Bach JM, Hull ML, Patterson HA. Direct measurement of strain in the posterolateral bundle of the anterior cruciate ligament. *J Biomech*. 1997;30(3):281-283.
14. Bandholm T, Thorborg K, Andersson E, et al. Increased external hip-rotation strength relates to reduced dynamic knee control in females: paradox or adaptation? *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21(6):e215-221.
15. Barber-Westin SD, Noyes FR. Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*. 2011;27(12):1697-1705.
16. Bates NA, Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Kinetic and kinematic differences between first and second landings of a drop vertical jump task: implications for injury risk assessments. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2013;28(4):459-466.
17. Beaulieu ML, Lamontagne M, Xu L. Lower limb muscle activity and kinematics of an unanticipated cutting manoeuvre: a gender comparison. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2009;17(8):968-976.
18. Beaulieu ML, Palmieri-Smith RM. Real-time feedback on knee abduction moment does not improve frontal-plane knee mechanics during jump landings. *Scand J Med Sci Sports*. 2014;24(4):692-699.
19. Beaulieu ML, Oh YK, Bedi A, Ashton-Miller JA, Wojtys EM. Does Limited Internal Femoral Rotation Increase Peak Anterior Cruciate Ligament Strain During a Simulated Pivot Landing? *Am J Sports Med*. 2014;42(12):2955-2963.
20. Beckett ME, Massie DL, Bowers KD, Stoll DA. Incidence of Hyperpronation in the ACL Injured Knee: A Clinical Perspective. *J Athl Train*. 1992;27(1):58-62.
21. Bedi A, Warren RF, Wojtys EM, et al. Restriction in hip internal rotation is associated with an increased risk of ACL injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2014 Sep 11. [Epub ahead of print] doi:10.1007/s00167-014-3299-4.

22. Bell AL, Brand RA, Pedersen DR. Prediction of hip joint centre location from external landmarks. *Hum Mov Sci.* 1989;8(1):3-16.
23. Bencke J, Zebis MK. The influence of gender on neuromuscular pre-activity during side-cutting. *J Electromyogr Kinesiol.* 2011;21(2):371-375.
24. Bisseling RW, Hof AL, Bredeweg SW, Zwerver J, Mulder T. Are the take-off and landing phase dynamics of the volleyball spike jump related to patellar tendinopathy? *Br J Sports Med.* 2008;42(6):483-489.
25. Bjordal JM, Arnly F, Hannestad B, Strand T. Epidemiology of anterior cruciate ligament injuries in soccer. *Am J Sports Med.* 1997;25(3):341-345.
26. Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Garrett WE. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics.* 2000;23(6):573-578.
27. Boden BP, Torg JS, Knowles SB, Hewett TE. Video analysis of anterior cruciate ligament injury: abnormalities in hip and ankle kinematics. *Am J Sports Med.* 2009;37(2):252-259.
28. Bonamo JJ, Fay C, Firestone T. The conservative treatment of the anterior cruciate deficient knee. *Am J Sports Med.* 1990;18(6):618-623.
29. Bradley JP, Klimkiewicz JJ, Rytel MJ, Powell JW. Anterior cruciate ligament injuries in the National Football League: epidemiology and current treatment trends among team physicians. *Arthroscopy.* 2002;18(5):502-509.
30. Butler DL, Noyes FR, Grood ES. Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. A biomechanical study. *J Bone Joint Surg Am.* 1980;62(2):259-270.
31. Cashman GE. The effect of weak hip abductors or external rotators on knee valgus kinematics in healthy subjects: a systematic review. *J Sport Rehabil.* 2012;21(3):273-284.
32. Chalmers PN, Mall NA, Moric M, et al. Does ACL reconstruction alter natural history?: A systematic literature review of long-term outcomes. *J Bone Joint Surg Am.* 2014;96(4):292-300.
33. Chandrashekar N, Slauterbeck J, Hashemi J. Sex-based differences in the anthropometric characteristics of the anterior cruciate ligament and its relation to intercondylar notch geometry: a cadaveric study. *Am J Sports Med.* 2005;33(10):1492-1498.

34. Chandrashekar N, Mansouri H, Slauterbeck J, Hashemi J. Sex-based differences in the tensile properties of the human anterior cruciate ligament. *J Biomech.* 2006;39(16):2943-2950.
35. Charlton WPH, St John TA, Ciccotti MG, Harrison N, Schweitzer M. Differences in femoral notch anatomy between men and women: a magnetic resonance imaging study. *Am J Sports Med.* 2002;30(3):329-333.
36. Chaudhari AMW, Briant PL, Bevill SL, Koo S, Andriacchi TP. Knee kinematics, cartilage morphology, and osteoarthritis after ACL injury. *Med Sci Sports Exerc.* 2008;40(2):215-222.
37. Chaudhari AMW, Zelman EA, Flanigan DC, Kaeding CC, Nagaraja HN. Anterior cruciate ligament-injured subjects have smaller anterior cruciate ligaments than matched controls: a magnetic resonance imaging study. *Am J Sports Med.* 2009;37(7):1282-1287.
38. Chen C-H, Li J-S, Hosseini A, Gadikota HR, Gill TJ, Li G. Anteroposterior stability of the knee during the stance phase of gait after anterior cruciate ligament deficiency. *Gait Posture.* 2012;35(3):467-471.
39. Cochrane JL, Lloyd DG, Buttfield A, Seward H, McGivern J. Characteristics of anterior cruciate ligament injuries in Australian football. *J Sci Med Sport.* 2007;10(2):96-104.
40. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* 2nd edition. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.
41. Cruz A, Bell D, McGrath M, Blackburn T, Padua D, Herman D. The Effects of Three Jump Landing Tasks on Kinetic and Kinematic Measures: Implications for ACL Injury Research. *Res Sports Med.* 2013;21(4):330-342.
42. Cumps E, Verhagen E, Annemans L, Meeusen R. Injury rate and socioeconomic costs resulting from sports injuries in Flanders: data derived from sports insurance statistics 2003. *Br J Sports Med.* 2008;42(9):767-772.
43. Darrow CJ, Collins CL, Yard EE, Comstock RD. Epidemiology of severe injuries among United States high school athletes: 2005-2007. *Am J Sports Med.* 2009;37(9):1798-1805.

44. de Britto MA, Carpes FP, Koutras G, Pappas E. Quadriceps and hamstrings prelanding myoelectric activity during landing from different heights among male and female athletes. *J Electromyogr Kinesiol.* 2014;24(4):508-512.
45. de Leva P. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *J Biomech.* 1996;29(9):1223-1230.
46. Decker MJ, Torry MR, Wyland DJ, Sterett WI, Richard Steadman J. Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2003;18(7):662-669.
47. Dejour H, Bonnin M. Tibial translation after anterior cruciate ligament rupture. Two radiological tests compared. *J Bone Joint Surg Br.* 1994;76(5):745-749.
48. Dienst M, Schneider G, Altmeyer K, et al. Correlation of intercondylar notch cross sections to the ACL size: a high resolution MR tomographic in vivo analysis. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2007;127(4):253-260.
49. Dowling AV, Favre J, Andriacchi TP. Inertial sensor-based feedback can reduce key risk metrics for anterior cruciate ligament injury during jump landings. *Am J Sports Med.* 2012;40(5):1075-1083.
50. Dragoo JL, Lee RS, Benhaim P, Finerman GAM, Hame SL. Relaxin receptors in the human female anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med.* 2003;31(4):577-584.
51. Dragoo JL, Padrez K, Workman R, Lindsey DP. The effect of relaxin on the female anterior cruciate ligament: Analysis of mechanical properties in an animal model. *Knee.* 2009;16(1):69-72.
52. Earl JE, Monteiro SK, Snyder KR. Differences in lower extremity kinematics between a bilateral drop-vertical jump and a single-leg step-down. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2007;37(5):245-252.
53. Ebben WP, Fauth ML, Petushek EJ, et al. Gender-based analysis of hamstring and quadriceps muscle activation during jump landings and cutting. *J Strength Cond Res.* 2010;24(2):408-415.
54. Ellera Gomes JL, de Castro JV, Becker R. Decreased hip range of motion and noncontact injuries of the anterior cruciate ligament. *Arthroscopy.* 2008;24(9):1034-1037.

55. Ellera Gomes JL, Palma HM, Becker R. Radiographic findings in restrained hip joints associated with ACL rupture. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2010;18(11):1562-1567.
56. Ellera Gomes JL, Palma HM, Ruthner R. Influence of hip restriction on noncontact ACL rerupture. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2014;22(1):188-191.
57. Etnoyer J, Cortes N, Ringleb SI, Van Lunen BL, Oñate JA. Instruction and jump-landing kinematics in college-aged female athletes over time. *J Athl Train.* 2013;48(2):161-171.
58. Faunø P, Wulff Jakobsen B. Mechanism of anterior cruciate ligament injuries in soccer. *Int J Sports Med.* 2006;27(1):75-79.
59. Ferretti A, Papandrea P, Conteduca F, Mariani PP. Knee ligament injuries in volleyball players. *Am J Sports Med.* 1992;20(2):203-207.
60. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS*, 3rd edition. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications Ltd; 2009.
61. Fleiss JL. *The Design and Analysis of Clinical Experiments*. Hoboken, NJ: Wiley; 1986.
62. Fong DT-P, Hong Y, Chan L-K, Yung PS-H, Chan K-M. A systematic review on ankle injury and ankle sprain in sports. *Sports Med.* 2007;37(1):73-94.
63. Ford KR, Myer GD, Toms HE, Hewett TE. Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(1):124-129.
64. Ford KR, Shapiro R, Myer GD, Van Den Bogert AJ, Hewett TE. Longitudinal sex differences during landing in knee abduction in young athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42(10):1923-1931.
65. Freedman KB, Glasgow MT, Glasgow SG, Bernstein J. Anterior cruciate ligament injury and reconstruction among university students. *Clin Orthop Relat Res.* 1998;(356):208-212.
66. Fuentes A, Hagemeister N, Ranger P, Heron T, de Guise JA. Gait adaptation in chronic anterior cruciate ligament-deficient patients: Pivot-shift avoidance gait. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2011;26(2):181-187.

67. Fung DT, Zhang L-Q. Modeling of ACL impingement against the intercondylar notch. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2003;18(10):933-941.
68. Gabriel MT, Wong EK, Woo SL-Y, Yagi M, Debski RE. Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotatory loads. *J Orthop Res*. 2004;22(1):85-89.
69. Gao B, Zheng NN. Alterations in three-dimensional joint kinematics of anterior cruciate ligament-deficient and -reconstructed knees during walking. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2010;25(3):222-229.
70. Gehring D, Melnyk M, Gollhofer A. Gender and fatigue have influence on knee joint control strategies during landing. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2009;24(1):82-87.
71. Granan L-P, Forssblad M, Lind M, Engebretsen L. The Scandinavian ACL registries 2004-2007: baseline epidemiology. *Acta Orthop*. 2009;80(5):563-567.
72. Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, et al. Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries: a review of the Hunt Valley II meeting, January 2005. *Am J Sports Med*. 2006;34(9):1512-1532.
73. Grindem H, Eitzen I, Moksnes H, Snyder-Mackler L, Risberg MA. A pair-matched comparison of return to pivoting sports at 1 year in anterior cruciate ligament-injured patients after a nonoperative versus an operative treatment course. *Am J Sports Med*. 2012;40(11):2509-2516.
74. 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.
75. Gwinn DE, Wilckens JH, McDevitt ER, Ross G, Kao TC. The relative incidence of anterior cruciate ligament injury in men and women at the United States Naval Academy. *Am J Sports Med*. 2000;28(1):98-102.
76. Hamlet WP, Liu SH, Panossian V, Finerman GA. Primary immunolocalization of androgen target cells in the human anterior cruciate ligament. *J Orthop Res*. 1997;15(5):657-663.
77. Hannah R, Minshull C, Smith SL, Folland JP. Longer electromechanical delay impairs hamstrings explosive force versus quadriceps. *Med Sci Sports Exerc*. 2014;46(5):963-972.

78. Hanson AM, Padua DA, Troy Blackburn J, Prentice WE, Hirth CJ. Muscle activation during side-step cutting maneuvers in male and female soccer athletes. *J Athl Train*. 2008;43(2):133-143.
79. Hara K, Mochizuki T, Sekiya I, Yamaguchi K, Akita K, Muneta T. Anatomy of normal human anterior cruciate ligament attachments evaluated by divided small bundles. *Am J Sports Med*. 2009;37(12):2386-2391.
80. Hashemi J, Chandrashekar N, Mansouri H, Slauterbeck JR, Hardy DM. The human anterior cruciate ligament: sex differences in ultrastructure and correlation with biomechanical properties. *J Orthop Res*. 2008;26(7):945-950.
81. Herman DC, Oñate JA, Weinhold PS, et al. The effects of feedback with and without strength training on lower extremity biomechanics. *Am J Sports Med*. 2009;37(7):1301-1308.
82. Herrington L, Munro A. Drop jump landing knee valgus angle; normative data in a physically active population. *Phys Ther Sport*. 2010;11(2):56-59.
83. Hertel J, Dorfman JH, Braham RA. Lower extremity malalignments and anterior cruciate ligament injury history. *J Sport Sci Med*. 2004;3(4):220-225.
84. Hewett T, Lindenfeld T, Riccobene J, Noyes F. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes - A prospective study. *Am J Sports Med*. 1999;27(6):699-706.
85. Hewett TE, Paterno MV, Myer GD. Strategies for enhancing proprioception and neuromuscular control of the knee. *Clin Orthop Relat Res*. 2002;(402):76-94.
86. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Decrease in neuromuscular control about the knee with maturation in female athletes. *J Bone Joint Surg Am*. 2004;86-A(8):1601-1608.
87. 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.
88. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 1, mechanisms and risk factors. *Am J Sports Med*. 2006;34(2):299-311.

89. Hewett TE, Zazulak BT, Myer GD. Effects of the menstrual cycle on anterior cruciate ligament injury risk: a systematic review. *Am J Sports Med.* 2007;35(4):659-668.
90. 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.
91. Homan KJ, Norcross MF, Goerger BM, Prentice WE, Blackburn JT. The influence of hip strength on gluteal activity and lower extremity kinematics. *J Electromyogr Kinesiol.* 2013;23(2):411-415.
92. Hootman JM, Dick R, Agel J. Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives. *J Athl Train.* 2007;42(2):311-319.
93. Horita T, Komi PV, Nicol C, Kyröläinen H. Stretch shortening cycle fatigue: interactions among joint stiffness, reflex, and muscle mechanical performance in the drop jump [corrected]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;73(5):393-403.
94. Horita T, Komi PV, Nicol C, Kyröläinen H. Effect of exhausting stretch-shortening cycle exercise on the time course of mechanical behaviour in the drop jump: possible role of muscle damage. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1999;79(2):160-167.
95. Howard JS, Fazio MA, Mattacola CG, Uhl TL, Jacobs CA. Structure, sex, and strength and knee and hip kinematics during landing. *J Athl Train.* 2011;46(4):376-385.
96. Ingram JG, Fields SK, Yard EE, Comstock RD. Epidemiology of knee injuries among boys and girls in US high school athletics. *Am J Sports Med.* 2008;36(6):1116-1122.
97. Ishida T, Yamanaka M, Takeda N, Aoki Y. Knee rotation associated with dynamic knee valgus and toe direction. *Knee.* 2014;21(2):563-566.
98. Jacobs C, Mattacola C. Sex differences in eccentric hip-abductor strength and knee-joint kinematics when landing from a jump. *J Sport Rehabil.* 2005;14(4):346-355.

99. Jacobs CA, Uhl TL, Mattacola CG, Shapiro R, Rayens WS. Hip abductor function and lower extremity landing kinematics: sex differences. *J Athl Train.* 2007;42(1):76-83.
100. Jenkins WL, Killian CB, Williams DS, Loudon J, Raedeke SG. Anterior cruciate ligament injury in female and male athletes: the relationship between foot structure and injury. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2007;97(5):371-376.
101. Joseph M, Tiberio D, Baird JL, et al. Knee valgus during drop jumps in National Collegiate Athletic Association Division I female athletes: the effect of a medial post. *Am J Sports Med.* 2008;36(2):285-289.
102. Kernozek TW, Torry MR, VAN Hoof H, Cowley H, Tanner S. Gender differences in frontal and sagittal plane biomechanics during drop landings. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(6):1003-1012.
103. Kernozek TW, Torry MR, Iwasaki M. Gender differences in lower extremity landing mechanics caused by neuromuscular fatigue. *Am J Sports Med.* 2008;36(3):554-565.
104. Kiani A, Hellquist E, Ahlqvist K, Gedeberg R, Michaëlsson K, Byberg L. Prevention of soccer-related knee injuries in teenaged girls. *Arch Intern Med.* 2010;170(1):43-49.
105. 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: implications for ACL injury mechanism. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2014;29(1):75-82.
106. Kim S, Bosque J, Meehan JP, Jamali A, Marder R. Increase in outpatient knee arthroscopy in the United States: a comparison of National Surveys of Ambulatory Surgery, 1996 and 2006. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93(11):994-1000.
107. Kobayashi H, Kanamura T, Koshida S, et al. Mechanisms of the anterior cruciate ligament injury in sports activities: A twenty-year clinical research of 1,700 athletes. *J Sport Sci Med.* 2010;9(4):669-675.
108. Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al. 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.

109. Krosshaug T, Nakamae A, Boden B, et al. Estimating 3D joint kinematics from video sequences of running and cutting maneuvers--assessing the accuracy of simple visual inspection. *Gait Posture*. 2007;26(3):378-385.
110. 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.
111. Kurosawa H, Yamakoshi K, Yasuda K, Sasaki T. Simultaneous measurement of changes in length of the cruciate ligaments during knee motion. *Clin Orthop Relat Res*. 1991;(265):233-240.
112. LaBella CR, Huxford MR, Grissom J, Kim K-Y, Peng J, Christoffel KK. Effect of neuromuscular warm-up on injuries in female soccer and basketball athletes in urban public high schools: cluster randomized controlled trial. *Arch Pediatr Adolesc Med*. 2011;165(11):1033-1040.
113. Lambson RB, Barnhill BS, Higgins RW. Football cleat design and its effect on anterior cruciate ligament injuries. A three-year prospective study. *Am J Sports Med*. 1996;24(2):155-159.
114. Landry SC, McKean KA, Hubley-Kozey CL, Stanish WD, Deluzio KJ. Neuromuscular and lower limb biomechanical differences exist between male and female elite adolescent soccer players during an unanticipated run and crosscut maneuver. *Am J Sports Med*. 2007;35(11):1901-1911.
115. Landry SC, McKean KA, Hubley-Kozey CL, Stanish WD, Deluzio KJ. Gender differences exist in neuromuscular control patterns during the pre-contact and early stance phase of an unanticipated side-cut and cross-cut maneuver in 15-18 years old adolescent soccer players. *J Electromyogr Kinesiol*. 2009;19(5):e370-379.
116. LaPrade RF, Burnett QM. Femoral intercondylar notch stenosis and correlation to anterior cruciate ligament injuries. A prospective study. *Am J Sports Med*. 1994;22(2):198-202.
117. Lawrence RK, Kernozek TW, Miller EJ, Torry MR, Reuteman P. Influences of hip external rotation strength on knee mechanics during single-leg drop landings in females. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2008;23(6):806-813.

118. Lefevre N, Bohu Y, Klouche S, Lecocq J, Herman S. Anterior cruciate ligament tear during the menstrual cycle in female recreational skiers. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2013;99(5):571-575.
119. Leukel C, Taube W, Lorch M, Gollhofer A. Changes in predictive motor control in drop-jumps based on uncertainties in task execution. *Hum Mov Sci.* 2012;31(1):152-160.
120. Levine JW, Kiapour AM, Quatman CE, et al. Clinically relevant injury patterns after an anterior cruciate ligament injury provide insight into injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 2013;41(2):385-395.
121. Li X, Xu C, Song J, Jiang N, Yu B. Single-bundle versus double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: an up-to-date meta-analysis. *Int Orthop.* 2013;37(2):213-226.
122. Lin H-C, Lai W-H, Shih Y-F, Chang C-M, Lo C-Y, Hsu H-C. Physiological anterior laxity in healthy young females: the effect of knee hyperextension and dominance. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(9):1083-1088.
123. Liu SH, al-Shaikh R, Panossian V, et al. Primary immunolocalization of estrogen and progesterone target cells in the human anterior cruciate ligament. *J Orthop Res.* 1996;14(4):526-533.
124. Liu SH, Al-Shaikh RA, Panossian V, Finerman GA, Lane JM. Estrogen affects the cellular metabolism of the anterior cruciate ligament. A potential explanation for female athletic injury. *Am J Sports Med.* 1997;25(5):704-709.
125. Loudon JK, Jenkins W, Loudon KL. The relationship between static posture and ACL injury in female athletes. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1996;24(2):91-97.
126. Lu TW, O'Connor JJ. Bone position estimation from skin marker co-ordinates using global optimisation with joint constraints. *J Biomech.* 1999;32(2):129-134.
127. Majewski M, Susanne H, Klaus S. Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study. *Knee.* 2006;13(3):184-188.
128. Maletis GB, Granan L-P, Inacio MCS, Funahashi TT, Engebretsen L. Comparison of community-based ACL reconstruction registries in the U.S. and Norway. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93 Suppl 3:31-36.

129. Malinzak RA, Colby SM, Kirkendall DT, Yu B, Garrett WE. A comparison of knee joint motion patterns between men and women in selected athletic tasks. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2001;16(5):438-445.
130. Mandelbaum BR, Silvers HJ, Watanabe DS, et al. Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up. *Am J Sports Med*. 2005;33(7):1003-1010.
131. Markolf KL, Gorek JF, Kabo JM, Shapiro MS. Direct measurement of resultant forces in the anterior cruciate ligament. An in vitro study performed with a new experimental technique. *J Bone Joint Surg Am*. 1990;72(4):557-567.
132. Markolf KL, Burchfield DM, Shapiro MM, Shepard MF, Finerman GA, Slauterbeck JL. Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *J Orthop Res*. 1995;13(6):930-935.
133. Marx RG, Jones EC, Angel M, Wickiewicz TL, Warren RF. Beliefs and attitudes of members of the American Academy of Orthopaedic Surgeons regarding the treatment of anterior cruciate ligament injury. *Arthroscopy*. 2003;19(7):762-770.
134. Mather RC, Koenig L, Kocher MS, et al. Societal and economic impact of anterior cruciate ligament tears. *J Bone Joint Surg Am*. 2013;95(19):1751-1759.
135. Matsumoto H. Mechanism of the pivot shift. *J Bone Joint Surg Br*. 1990;72(5):816-821.
136. Matsumoto H, Suda Y, Otani T, Niki Y, Seedhom BB, Fujikawa K. Roles of the anterior cruciate ligament and the medial collateral ligament in preventing valgus instability. *J Orthop Sci*. 2001;6(1):28-32.
137. McLean SG, Lipfert SW, van den Bogert AJ. Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(6):1008-1016.
138. McLean SG, Oh YK, Palmer ML, et al. The relationship between anterior tibial acceleration, tibial slope, and ACL strain during a simulated jump landing task. *J Bone Joint Surg Am*. 2011;93(14):1310-1317.
139. McNair PJ, Prapavessis H, Callender K. Decreasing landing forces: effect of instruction. *Br J Sports Med*. 2000;34(4):293-296.

140. Messina DF, Farney WC, DeLee JC. The incidence of injury in Texas high school basketball. A prospective study among male and female athletes. *Am J Sports Med.* 1999;27(3):294-299.
141. Meyer EG, Haut RC. Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibiofemoral compression. *J Biomech.* 2008;41(16):3377-3383.
142. Mihata LCS, Beutler AI, Boden BP. Comparing the incidence of anterior cruciate ligament injury in collegiate lacrosse, soccer, and basketball players: implications for anterior cruciate ligament mechanism and prevention. *Am J Sports Med.* 2006;34(6):899-904.
143. Milner CE, Fairbrother JT, Srivatsan A, Zhang S. Simple verbal instruction improves knee biomechanics during landing in female athletes. *Knee.* 2012;19(4):399-403.
144. Miyasaka K, Daniel D, Stone M, Hirshman P. The incidence of knee ligament injuries in the general population. *Am J Knee Surg.* 1991;4(1):3-8.
145. Miyasaka T, Matsumoto H, Suda Y, Otani T, Toyama Y. Coordination of the anterior and posterior cruciate ligaments in constraining the varus-valgus and internal-external rotatory instability of the knee. *J Orthop Sci.* 2002;7(3):348-353.
146. Mizner RL, Kawaguchi JK, Chmielewski TL. Muscle strength in the lower extremity does not predict postinstruction improvements in the landing patterns of female athletes. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2008;38(6):353-361.
147. Mizner RL, Chmielewski TL, Toepke JJ, Tofte KB. Comparison of 2-dimensional measurement techniques for predicting knee angle and moment during a drop vertical jump. *Clin J Sport Med.* 2012;22(3):221-227.
148. Mochizuki T, Muneta T, Nagase T, Shirasawa S-I, Akita K-I, Sekiya I. Cadaveric knee observation study for describing anatomic femoral tunnel placement for two-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy.* 2006;22(4):356-361.
149. Motohashi M. Profile of bilateral anterior cruciate ligament injuries: a retrospective follow-up study. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2004;12(2):210-215.

150. Muneta T, Takakuda K, Yamamoto H. Intercondylar notch width and its relation to the configuration and cross-sectional area of the anterior cruciate ligament. A cadaveric knee study. *Am J Sports Med.* 1997;25(1):69-72.
151. Myer GD, Ford KR, Paterno MV, Nick TG, Hewett TE. The effects of generalized joint laxity on risk of anterior cruciate ligament injury in young female athletes. *Am J Sports Med.* 2008;36(6):1073-1080.
152. Myklebust G, Engebretsen L, Braekken IH, Skjølberg A, Olsen OE, Bahr R. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players: a prospective intervention study over three seasons. *Clin J Sport Med.* 2003;13(2):71-78.
153. 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.
154. Nagano Y, Ida H, Akai M, Fukubayashi T. Biomechanical characteristics of the knee joint in female athletes during tasks associated with anterior cruciate ligament injury. *Knee.* 2009;16(2):153-158.
155. Noyes FR, Mooar LA, Moorman CT, McGinniss GH. Partial tears of the anterior cruciate ligament. Progression to complete ligament deficiency. *J Bone Joint Surg Br.* 1989;71(5):825-833.
156. Noyes FR, Barber-Westin SD, Fleckenstein C, Walsh C, West J. The drop-jump screening test: difference in lower limb control by gender and effect of neuromuscular training in female athletes. *Am J Sports Med.* 2005;33(2):197-207.
157. Ohkoshi Y, Yasuda K, Kaneda K, Wada T, Yamanaka M. Biomechanical analysis of rehabilitation in the standing position. *Am J Sports Med.* 1991;19(6):605-611.
158. Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, Holme I, Bahr R. Relationship between floor type and risk of ACL injury in team handball. *Scand J Med Sci Sports.* 2003;13(5):299-304.
159. 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.

160. Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, Holme I, Bahr R. Exercises to prevent lower limb injuries in youth sports: cluster randomised controlled trial. *BMJ*. 2005;330(7489):449-452.
161. Oñate JA, Guskiewicz KM, Marshall SW, Giuliani C, Yu B, Garrett WE. Instruction of jump-landing technique using videotape feedback: altering lower extremity motion patterns. *Am J Sports Med*. 2005;33(6):831-842.
162. Orchard J, Seward H, McGivern J, Hood S. Rainfall, evaporation and the risk of non-contact anterior cruciate ligament injury in the Australian Football League. *Med J Aust*. 1999;170(7):304-306.
163. Orchard J, Seward H, McGivern J, Hood S. Intrinsic and extrinsic risk factors for anterior cruciate ligament injury in Australian footballers. *Am J Sports Med*. 2001;29(2):196-200.
164. Orchard JW, Powell JW. Risk of knee and ankle sprains under various weather conditions in American football. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35(7):1118-1123.
165. Orchard JW, Chivers I, Aldous D, Bennell K, Seward H. Rye grass is associated with fewer non-contact anterior cruciate ligament injuries than bermuda grass. *Br J Sports Med*. 2005;39(10):704-709.
166. Padua DA, Marshall SW, Boling MC, Thigpen CA, Garrett WE Jr, Beutler AI. The Landing Error Scoring System (LESS) Is a valid and reliable clinical assessment tool of jump-landing biomechanics: The JUMP-ACL study. *Am J Sports Med*. 2009;37(10):1996-2002.
167. Pappas E, Hagins M, Sheikhzadeh A, Nordin M, Rose D. Biomechanical differences between unilateral and bilateral landings from a jump: gender differences. *Clin J Sport Med*. 2007;17(4):263-268.
168. Park H-S, Ahn C, Fung DT, Ren Y, Zhang L-Q. A knee-specific finite element analysis of the human anterior cruciate ligament impingement against the femoral intercondylar notch. *J Biomech*. 2010.
169. Parkkari J, Pasanen K, Mattila VM, Kannus P, Rimpelä A. The risk for a cruciate ligament injury of the knee in adolescents and young adults: a population-based cohort study of 46 500 people with a 9 year follow-up. *Br J Sports Med*. 2008;42(6):422-426.

170. Patel SA, Hageman J, Quatman CE, Wordeman SC, Hewett TE. Prevalence and location of bone bruises associated with anterior cruciate ligament injury and implications for mechanism of injury: a systematic review. *Sports Med.* 2014;44(2):281-293.
171. Paul JJ, Spindler KP, Andrish JT, Parker RD, Secic M, Bergfeld JA. Jumping versus nonjumping anterior cruciate ligament injuries: a comparison of pathology. *Clin J Sport Med.* 2003;13(1):1-5.
172. Pfile KR, Hart JM, Herman DC, Hertel J, Kerrigan DC, Ingersoll CD. Different exercise training interventions and drop-landing biomechanics in high school female athletes. *J Athl Train.* 2013;48(4):450-462.
173. Philippon M, Dewing C, Briggs K, Steadman JR. Decreased femoral head-neck offset: a possible risk factor for ACL injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2012;20(12):2585-2589.
174. Pioletti DP, Rakotomanana LR, Leyvraz PF. Strain rate effect on the mechanical behavior of the anterior cruciate ligament-bone complex. *Med Eng Phys.* 1999;21(2):95-100.
175. Powell DW, Hanson NJ, Long B, Williams DSB 3rd. Frontal Plane Landing Mechanics in High-Arched Compared With Low-Arched Female Athletes. *Clin J Sport Med.* 2012;22(5):430-435.
176. Prapavessis H, McNair PJ, Anderson K, Hohepa M. Decreasing landing forces in children: the effect of instructions. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2003;33(4):204-207.
177. Quatman CE, Kiapour A, Myer GD, et al. Cartilage pressure distributions provide a footprint to define female anterior cruciate ligament injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 2011;39(8):1706-1713.
178. Quatman CE, Kiapour AM, Demetropoulos CK, et al. Preferential loading of the ACL compared with the MCL during landing: a novel in sim approach yields the multiplanar mechanism of dynamic valgus during ACL injuries. *Am J Sports Med.* 2014;42(1):177-186.
179. Ramesh R, Von Arx O, Azzopardi T, Schranz PJ. The risk of anterior cruciate ligament rupture with generalised joint laxity. *J Bone Joint Surg Br.* 2005;87(6):800-803.

180. Reinold MM, Berkson EM, Asnis P, Irrgang JJ, Safran MR, Fu FH. KNEE: Ligamentous and Patellar Tendon Injuries. In: Magee DJ, Zachazewski JE, Quillen WS, eds. *Pathology and Intervention in Musculoskeletal Rehabilitation*. St. Louis, MO: Saunders; 2008.
181. 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(6):394-412.
182. Riboh JC, Hasselblad V, Godin JA, Mather RC. Transtibial versus independent drilling techniques for anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review, meta-analysis, and meta-regression. *Am J Sports Med*. 2013;41(11):2693-2702.
183. Ruedl G, Ploner P, Linortner I, et al. Are oral contraceptive use and menstrual cycle phase related to anterior cruciate ligament injury risk in female recreational skiers? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2009;17(9):1065-1069.
184. Sakane M, Fox RJ, Woo SL, Livesay GA, Li G, Fu FH. In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads. *J Orthop Res*. 1997;15(2):285-293.
185. Schmitz RJ, Kulas AS, Perrin DH, Riemann BL, Shultz SJ. Sex differences in lower extremity biomechanics during single leg landings. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2007;22(6):681-688.
186. Shabani B, Bytyqi D, Lustig S, Cheze L, Bytyqi C, Neyret P. Gait changes of the ACL-deficient knee 3D kinematic assessment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2014 Jul 16. [Epub ahead of print] doi:10.1007/s00167-014-3169-0.
187. Shea KG, Pfeiffer R, Wang JH, Curtin M, Apel PJ. Anterior cruciate ligament injury in pediatric and adolescent soccer players: an analysis of insurance data. *J Pediatr Orthop*. 2004;24(6):623-628.
188. Shin CS, Chaudhari AM, Andriacchi TP. The effect of isolated valgus moments on ACL strain during single-leg landing: a simulation study. *J Biomech*. 2009;42(3):280-285.
189. Shin CS, Chaudhari AM, Andriacchi TP. Valgus plus internal rotation moments increase anterior cruciate ligament strain more than either alone. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(8):1484-1491.

190. Shultz SJ, Shimokochi Y, Nguyen A-D, Schmitz RJ, Beynnon BD, Perrin DH. Measurement of varus-valgus and internal-external rotational knee laxities in vivo--Part II: relationship with anterior-posterior and general joint laxity in males and females. *J Orthop Res.* 2007;25(8):989-996.
191. Shultz SJ, Nguyen A-D, Levine BJ. The Relationship Between Lower Extremity Alignment Characteristics and Anterior Knee Joint Laxity. *Sports Health.* 2009;1(1):54-60.
192. Shultz SJ, Nguyen A-D, Leonard MD, Schmitz RJ. Thigh strength and activation as predictors of knee biomechanics during a drop jump task. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(4):857-866.
193. Siebold R, Ellert T, Metz S, Metz J. Tibial insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament: morphometry, arthroscopic landmarks, and orientation model for bone tunnel placement. *Arthroscopy.* 2008;24(2):154-161.
194. Siebold R, Ellert T, Metz S, Metz J. Femoral insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament: morphometry and arthroscopic orientation models for double-bundle bone tunnel placement--a cadaver study. *Arthroscopy.* 2008;24(5):585-592.
195. Sigward SM, Powers CM. The influence of gender on knee kinematics, kinetics and muscle activation patterns during side-step cutting. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2006;21(1):41-48.
196. Sigward SM, Pollard CD, Powers CM. The influence of sex and maturation on landing biomechanics: implications for anterior cruciate ligament injury. *Scand J Med Sci Sports.* 2012;22(4):502-509.
197. Simon RA, Everhart JS, Nagaraja HN, Chaudhari AM. A case-control study of anterior cruciate ligament volume, tibial plateau slopes and intercondylar notch dimensions in ACL-injured knees. *J Biomech.* 2010;43(9):1702-1707.
198. Slauterbeck J, Clevenger C, Lundberg W, Burchfield DM. Estrogen level alters the failure load of the rabbit anterior cruciate ligament. *J Orthop Res.* 1999;17(3):405-408.
199. Smith J, Szczerba JE, Arnold BL, Perrin DH, Martin DE. Role of hyperpronation as a possible risk factor for anterior cruciate ligament injuries. *J Athl Train.* 1997;32(1):25-28.

200. Smith TO, Postle K, Penny F, McNamara I, Mann CJV. Is reconstruction the best management strategy for anterior cruciate ligament rupture? A systematic review and meta-analysis comparing anterior cruciate ligament reconstruction versus non-operative treatment. *Knee*. 2014;21(2):462-470.
201. Sri-Ram K, Salmon LJ, Pinczewski LA, Roe JP. The incidence of secondary pathology after anterior cruciate ligament rupture in 5086 patients requiring ligament reconstruction. *Bone Joint J*. 2013;95-B(1):59-64.
202. Swart E, Redler L, Fabricant PD, Mandelbaum BR, Ahmad CS, Wang YC. Prevention and screening programs for anterior cruciate ligament injuries in young athletes: a cost-effectiveness analysis. *J Bone Joint Surg Am*. 2014;96(9):705-711.
203. Swenson DM, Collins CL, Best TM, Flanigan DC, Fields SK, Comstock RD. Epidemiology of knee injuries among U.S. high school athletes, 2005/2006-2010/2011. *Med Sci Sports Exerc*. 2013;45(3):462-469.
204. Tainaka K, Takizawa T, Kobayashi H, Umimura M. Limited hip rotation and non-contact anterior cruciate ligament injury: a case-control study. *Knee*. 2014;21(1):86-90.
205. Tandogan RN, Taşer O, Kayaalp A, et al. Analysis of meniscal and chondral lesions accompanying anterior cruciate ligament tears: relationship with age, time from injury, and level of sport. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2004;12(4):262-270.
206. Tate JJ, Milner CE, Fairbrother JT, Zhang S. The effects of a home-based instructional program aimed at improving frontal plane knee biomechanics during a jump-landing task. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2013;43(7):486-494.
207. Thomas AC, Palmieri-Smith RM, McLean SG. Isolated hip and ankle fatigue are unlikely risk factors for anterior cruciate ligament injury. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21(3):359-368.
208. Uhorchak JM, Scoville CR, Williams GN, Arciero RA, St Pierre P, Taylor DC. Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: a prospective four-year evaluation of 859 West Point cadets. *Am J Sports Med*. 2003;31(6):831-842.

209. Viskontas DG, Giuffre BM, Duggal N, Graham D, Parker D, Coolican M. Bone bruises associated with ACL rupture: correlation with injury mechanism. *Am J Sports Med.* 2008;36(5):927-933.
210. Waldén M, Hägglund M, Magnusson H, Ekstrand J. Anterior cruciate ligament injury in elite football: a prospective three-cohort study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2011;19(1):11-19.
211. Waldén M, Atroshi I, Magnusson H, Wagner P, Hägglund M. Prevention of acute knee injuries in adolescent female football players: cluster randomised controlled trial. *BMJ.* 2012;344:e3042.
212. Wallace BJ, Kernozek TW, Mikat RP, Wright GA, Simons SZ, Wallace KL. A comparison between back squat exercise and vertical jump kinematics: implications for determining anterior cruciate ligament injury risk. *J Strength Cond Res.* 2008;22(4):1249-1258.
213. Webster KE, Feller JA. Alterations in joint kinematics during walking following hamstring and patellar tendon anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2011;26(2):175-180.
214. Withrow TJ, Huston LJ, Wojtys EM, Ashton-Miller JA. The relationship between quadriceps muscle force, knee flexion, and anterior cruciate ligament strain in an in vitro simulated jump landing. *Am J Sports Med.* 2006;34(2):269-274.
215. Withrow TJ, Huston LJ, Wojtys EM, Ashton-Miller JA. The effect of an impulsive knee valgus moment on in vitro relative ACL strain during a simulated jump landing. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2006;21(9):977-983.
216. Woodford-Rogers B, Cyphert L, Denegar CR. Risk factors for anterior cruciate ligament injury in high school and college athletes. *J Athl Train.* 1994;29(4):343-346.
217. Wordeman SC, Quatman CE, Kaeding CC, Hewett TE. In vivo evidence for tibial plateau slope as a risk factor for anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2012;40(7):1673-1681.
218. Yasuda K, Sasaki T. Exercise after anterior cruciate ligament reconstruction. The force exerted on the tibia by the separate isometric contractions of the quadriceps or the hamstrings. *Clin Orthop Relat Res.* 1987;(220):275-283.

219. Yoon KH, Yoo JH, Kim K-I. Bone contusion and associated meniscal and medial collateral ligament injury in patients with anterior cruciate ligament rupture. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93(16):1510-1518.
220. Yoshida A, Morihara T, Kajikawa Y, et al. In vivo effects of ovarian steroid hormones on the expressions of estrogen receptors and the composition of extracellular matrix in the anterior cruciate ligament in rats. *Connect Tissue Res.* 2009;50(2):121-131.
221. Yu WD, Liu SH, Hatch JD, Panossian V, Finerman GA. Effect of estrogen on cellular metabolism of the human anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res.* 1999;(366):229-238.
222. Yu WD, Panossian V, Hatch JD, Liu SH, Finerman GA. Combined effects of estrogen and progesterone on the anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res.* 2001;(383):268-281.
223. Yüksel HY, Erkan S, Uzun M. The evaluation of intraarticular lesions accompanying ACL ruptures in military personnel who elected not to restrict their daily activities: the effect of age and time from injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2006;14(11):1139-1147.
224. Zeng C, Gao S, Wei J, et al. The influence of the intercondylar notch dimensions on injury of the anterior cruciate ligament: a meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013;21(4):804-815.
225. Zhou S, McKenna MJ, Lawson DL, Morrison WE, Fairweather I. Effects of fatigue and sprint training on electromechanical delay of knee extensor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;72(5-6):410-416.
226. 岩噌弘志. 非接触型膝前十字靱帯損傷の損傷頻度. *臨床スポーツ医学.* 2002;19(9):985-990.

9. 業績一覧

本論文の一部は以下の論文の内容を含む。

1. 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.* 2013 Dec 10. [*Epub ahead of print*] doi:10.1007/s00167-013-2815-2.

本論文の一部は以下の学会にて発表した。

1. Ishida T, Yamanaka M, Taniguchi S, Ueno R, Minami S, Koshino Y, Samukawa M, Saito H, Kobayashi T, Mtsumoto H, Aoki Y, Tohyama H. The Hip Internal Rotation is Negatively Correlated to Valgus Knee Motion and Internal Tibial Rotation in the Early Phase during a Landing Task in Drop Jumping. 61th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2015. Mar 28-31 (MGM Grand Hotel, Las Vegas, NV, USA)
2. Ishida T, Yamanaka M, Taniguchi S, Koshino Y, Homan K, Samukawa M, Saito H, Kobayashi T, Matsumoto H, Aoki Y, Tohyama H. The Effects of the Subsequent jump on Knee Kinematics during the First Landing in Drop Vertical Jump. 60th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2014. Mar 15-18 (Hyatt Regency, New Orleans, LA, USA)
3. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 越野裕太, 寒川美奈, 松本尚, 青木喜満, 遠山晴一. Drop Vertical Jump における着地動作時の股関節内旋が膝関節外反に与える影響. 第25回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 2014年11月8-9日(東京都, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター). 日本臨床スポーツ医学会誌. 22(4):S124
4. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 越野裕太, 寒川美奈, 齊藤展士, 小林巧, 松本尚, 青木喜満, 遠山晴一. 着地後ジャンプ動作の有無が着地時の下肢関節運動に与える効果. 第40回日本整形外科スポーツ医学会学術集会. 2014年9月12-14日(東京都, 虎ノ門ヒルズフォーラム) 日本整形外科スポーツ医学会誌. 34(4):552
5. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 越野裕太, 寒川美奈, 齊藤展士, 小林巧, 松本尚, 青木喜満, 遠山晴一. Drop vertical jump 着地後早期における膝関節外反運動の変化量の検討. 第6回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会 (JOSKAS). 2014年7月24-26日(広島市, 広島国際会議場・広島市文化交流会館) JOSKAS. 39(4):411

6. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 宝満健太郎, 越野裕太, 寒川美奈, 齊藤展士, 小林巧, 青木喜満, 遠山晴一: 着地後早期の膝関節外反, 内旋運動と下肢関節運動の関係. 第49回日本理学療法学会. 2014年5月30日-6月1日(横浜市, パシフィコ横浜). 理学療法学 41(Suppl. 2):0439
7. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 越野裕太, 遠山晴一, 寒川美奈, 齊藤展士, 小林巧, 宝満健太郎, 松本尚, 青木喜満. 膝関節運動に対する動作課題と性の影響 第二報 — Drop Vertical Jump, Drop Landing, 垂直跳びの比較—. 第40回日本臨床バイオメカニクス学会. 2013年11月22-23日(神戸市, 神戸国際会議場). 第40回日本臨床バイオメカニクス学会 プログラム・抄録集: 84
8. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 越野裕太, 遠山晴一, 寒川美奈, 宝満健太郎, 松本尚, 青木喜満. Drop Vertical Jump における膝関節運動の特徴 第三報 — Drop landing, 垂直跳びとの比較—. 第24回日本臨床スポーツ医学会. 2013年10月25-26日(熊本市, 市民会館崇城大学ホール(熊本市民会館)・熊本市国際交流会館・一番館). 日本臨床スポーツ医学会誌. 21(4):S181

その他の業績

1. 学会誌または学術雑誌への論文掲載

I. 論文発表

1. Ishida T, Yamanaka M, Takeda N, Aoki Y. Knee rotation associated with dynamic knee valgus and toe direction. *Knee*. 2014;21(2):563-566.
2. Ishigaki T, Ishida T, Samukawa M, Saitoh H, Hirokawa M, Ezawa Y, Sugawara M, Tohyama H, Yamanaka M. Comparing trapezius muscle activity in the different planes of shoulder elevation. *J Phys Ther Sci (in press)*
3. Ishigaki T, Ishida T, Samukawa M, Saitoh H, Ezawa Y, Hirokawa M, Kato T, Sugawara M, Tohyama H, Yamanaka M. Does the restriction of the glenohumeral horizontal adduction reflect thickening of the posterior capsule in the throwing shoulder? *J Phys Ther Sci (in press)*
4. Koshino Y, Yamanaka M, Ezawa Y, Ishida T, Kobayashi T, Samukawa M, Saito H, Takeda N. Lower limb joint motion during a cross cutting movement differs in individuals with and without chronic ankle instability. *Phys Ther Sport*. 2014;15(4):242-248.
5. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 青木喜満. 片脚着地動作時の足底板使用が膝関節動態に与える影響について. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2014;23(1):33-38

II. 口述発表

1. Ishida T, Yamanaka M, Taniguchi S, Koshino Y, Matsumoto H, Takeda N, Aoki Y. The Characteristics of Lower Limb Kinematics associated with Greater Knee Abduction Moment during a Drop Vertical Jump. 59th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2013. Jan 26-29 (Henry B. Gonzalez Convention Center, San Antonio, TX, USA).
2. Ishida T, Yamanaka M, Homan K, Takeda N, Aoki Y. The Effects of Toe Directions on Knee Kinematics and Kinetics during Drop Vertical Jump. 58th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2012. Feb 4-7 (Moscone West Convention Center, San Francisco, CA, USA)

3. Ito Y, Yamanaka M, Matsumoto H, Ishida T, Aoki Y. The Effects of Foot Orthoses on Sagittal plane Energetics in Lower Extremity during Single-leg Landing. 61th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2015. Mar 28-31 (MGM Grand Hotel, Las Vegas, NV, USA)
4. Koshino Y, Yamanaka M, Ezawa Y, Ishida T, Kobayashi T, Samukawa M, Saito H, Inoue M, Tohyama H. Principal Component Analysis of Kinematics and Myoelectrical Activities of the Lower Limb during Single Leg Landing in Subjects with Chronic Ankle Instability. 60th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2014. Mar 15-18
5. Koshino Y, Yamanaka M, Ezawa Y, Ishida T, Kobayashi T, Takeda N. Altered Lower Limb Kinematics in Subjects with Chronic Ankle Instability During Single Leg Landing and Lateral Shuffle Movement. 59th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2013. Jan 26-29 (Henry B. Gonzalez Convention Center, San Antonio, TX, USA)
6. Koshino Y, Yamanaka M, Ishida T, Kobayashi T, Takeda N. The Effect of Foot Rotation on Ankle Kinematics and Kinetics during Single Leg Drop Landing. 58th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2012. Feb 2-7 (Moscone West Convention Center, San Francisco, CA, USA)
7. Ueno R, Yamanaka M, Ishida T, Taniguchi S, Ikuta R, Tohyama H. Comparisons of Angular Velocities of Knee Abduction and Tibial Internal Rotation between Female and Male Subjects during a Landing Task. 61th Orthopaedic Research Society Annual Meeting. 2015. Mar 28-31 (MGM Grand Hotel, Las Vegas, NV, USA)
8. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 越野裕太, 武田直樹, 松本尚, 青木喜満. 着地動作時に生じる膝関節回旋パターンと膝関節外転運動の関係. 第48回日本理学療法学会大会. 2013年5月24-26日(名古屋市, 名古屋国際会議場)
9. 石田知也, 山中正紀, 谷口翔平, 越野裕太, 武田直樹, 松本尚, 青木喜満. 膝関節運動に対する動作課題と性の影響—Drop Vertical Jump, Drop Landing, スクワット動作の比較—. 第39回日本臨床バイオメカニクス学会. 2012年11月9-10日(千葉市, 幕張メッセ国際会議場)
10. 石田知也, 山中正紀, 越野裕太, 松本尚, 青木喜満. Drop Vertical Jumpにおける膝関節運動の特徴(第2報). 第23回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 2012年11月3-4日(横浜市, 新横浜プリンスホテル)

11. 石田知也, 山中正紀, 越野裕太, 武田直樹, 松本尚, 青木喜満. 片脚着地動作時の膝関節運動の特徴—片脚スクワット動作, 自動膝伸展運動との比較—. 第 38 回日本臨床バイオメカニクス学会. 2011 年 11 月 18-19 日 (神戸市, 神戸ポートピアホテル)
12. 石田知也, 山中正紀, 越野裕太, 遠山晴一, 松本尚, 青木喜満. Drop Vertical Jump における膝関節運動の特徴—スクワット動作, 自動膝伸展運動との比較—. 第 22 回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 2011 年 11 月 5-6 日 (青森市, ホテル青森・青森市文化会館)
13. 生田亮平, 山中正紀, 石田知也, 谷口翔平, 越野裕太, 上野亮, 遠山晴一. Drop vertical jump における膝関節周囲筋の接地前筋活動が膝関節外反に与える影響. 2014 年 11 月 8-9 日 (東京都, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター)
14. 生田亮平, 山中正紀, 石田知也, 谷口翔平, 越野裕太, 遠山晴一. Drop vertical jump における膝関節角度と膝関節周囲筋の着地前筋活動の性差. 第 65 回北海道理学療法士学術大会. 2014 年 10 月 25-26 日 (帯広市, 帯広市民文化ホール)
15. 生田亮平, 山中正紀, 石田知也, 谷口翔平, 越野裕太, 上野亮. 着地動作における膝周囲筋前活動と接地後早期の膝外反角度および膝外反モーメントの関係. 第 49 回日本理学療法学術大会. 2014 年 5 月 30 日・6 月 1 日 (横浜市, パシフィコ横浜)
16. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 青木喜満. 足底板使用が片脚着地時の下肢関節エネルギーに与える影響について. 第 25 回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 2014 年 11 月 8-9 日 (東京都, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター)
17. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 本多大輔, 青木喜満. 足底板使用が片脚着地動作時の下肢関節エネルギーに与える影響について—股・膝・足関節の矢状面上エネルギー吸収変化に関して—. 第 65 回北海道理学療法士学術大会. 2014 年 10 月 25-26 日 (帯広市, 帯広市民文化ホール)
18. 伊藤雄, 山中正紀, 石田知也, 山本敬三, 松本尚, 青木喜満. 過度な足部回内がカッティング動作中の下肢関節動態に与える影響について. 第 6 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会 (JOSKAS). 2014 年 7 月 24-26 日 (広島市, 広島国際会議場・広島市文化交流会館)

19. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 青木喜満. 足底板使用が片脚着地時の下肢関節運動に与える影響—足底板種類による各運動面上における変化の検討—. 第 24 回日本臨床スポーツ医学会. 2013 年 10 月 25-26 日 (熊本市, 市民会館崇城大学ホール (熊本市市民会館)・熊本市国際交流会館・一番館)
20. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 本多大輔, 青木喜満. 足底板使用が片脚着地時の下肢筋活動に与える影響—足部アライメントと足底板種類による筋活動変化の関係—. 第 64 回北海道理学療法士学会. 2013 年 11 月 2-3 日 (札幌市, 札幌コンベンションセンター)
21. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 本多大輔, 青木喜満. 片脚着地時における足底板使用の膝関節動態への影響について—足部アライメントと足底板の種類による効果の違い—. 第 48 回日本理学療法学会. 2013 年 5 月 24-26 日 (名古屋市, 名古屋国際会議場)
22. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 本多大輔, 青木喜満. 足底板使用が片脚着地時の膝関節動態に与える影響. 第 122 回北海道整形災害外科学会. 2012 年 1 月 28-29 日 (札幌市, 札幌医科大学臨床教育研究棟)
23. 伊藤雄, 山中正紀, 松本尚, 石田知也, 本多大輔, 青木喜満. 足底板使用が片脚着地時の膝関節動態に与える影響. 第 46 回日本理学療法学会. 2011 年 5 月 27-29 日 (宮崎市, シーガイアコンベンションセンター)
24. 上野亮, 山中正紀, 石田知也, 谷口翔平, 生田亮平, 遠山晴一. Drop vertical jump における膝外反が膝前十字靱帯の伸長に与える影響. 2014 年 11 月 8-9 日 (東京都, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター)
25. 上野亮, 山中正紀, 石田知也, 谷口翔平, 武田直樹. 着地動作における膝外転, 内旋角速度の特性とその性差. 第 48 回日本理学療法学会. 2013 年 5 月 24-26 日 (名古屋市, 名古屋国際会議場)
26. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 寒川美奈, 井上雅之, 遠山晴一. 慢性足関節不安定性症例における機能的不安定性の重症度が片脚ジャンプ着地時の足関節キネマティクスに与える影響. 第 25 回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 2014 年 11 月 8-9 日 (東京都, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター)
27. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 井上雅之, 遠山晴一. 動的方向転換動作における慢性足関節不安定性症例の下肢筋活動. 第 40 回日本整形外科学会スポーツ医学会学術集会. 2014 年 9 月 12-14 日 (東京都, 虎ノ門ヒルズフォーラム)

28. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 小林巧, 寒川美奈, 齊藤展士, 遠山晴一. 慢性足関節不安定性症例における片脚着地動作時の下肢関節運動パターン—主成分分析を用いた検討—. 第 49 回日本理学療法学術大会. 2014 年 5 月 30 日-6 月 1 日 (横浜市, パシフィコ横浜)
29. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 小林巧, 寒川美奈, 齊藤展士, 井上雅之, 遠山晴一. 慢性足関節不安定性症例における歩行時の下肢関節運動の主成分分析. 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会. 2013 年 11 月 22-23 日 (神戸市, 神戸国際会議場)
30. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 寒川美奈, 井上雅之, 遠山晴一. 慢性足関節不安定性症例の歩行時における下肢筋活動の主成分分析を用いた検討. 第 24 回日本臨床スポーツ医学会. 2013 年 10 月 25-26 日 (熊本市, 市民会館崇城大学ホール (熊本市市民会館)・熊本市国際交流会館・一番館)
31. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 小林巧, 遠山晴一. 慢性足関節不安定性症例における方向転換動作時の足関節キネマティクスの主成分分析. 第 64 回北海道理学療法士学術大会. 2013 年 11 月 2-3 日 (札幌市, 札幌コンベンションセンター)
32. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 武田直樹. 慢性足関節不安定性を有する者における歩行および方向転換動作時の下肢関節動態. 第 48 回日本理学療法学術大会. 2013 年 5 月 24-26 日 (名古屋市, 名古屋国際会議場)
33. 越野裕太, 山中正紀, 江沢侑也, 石田知也, 武田直樹. 慢性足関節不安定性を有する者における片脚着地動作時の下肢キネマティクス. 第 39 回日本臨床バイオメカニクス学会. 2012 年 11 月 9-10 日 (千葉市, 幕張メッセ国際会議場)
34. 越野裕太, 山中正紀, 石田知也, 井上雅之: 慢性足関節不安定症を有する人におけるカッティング動作時の下肢キネマティクスの相違. 第 23 回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 2012 年 3-4 日 (横浜市, 新横浜プリンスホテル)
35. 越野裕太, 山中正紀, 石田知也, 武田直樹: 片脚着地動作における接地前筋活動と足関節運動との関係性. 第 47 回日本理学療法学術大会. 2012 年 5 月 25-27 日 (神戸市, 神戸ポートピアホテル・神戸国際展示場)
36. 越野裕太, 山中正紀, 石田知也, 小林巧, 武田直樹: 静的足部アライメントとカッティング動作における足関節運動・運動力学的特徴との関係性. 第 38 回日本臨床バイオメカニクス学会. 2011 年 11 月 18-19 日 (神戸市, 神戸ポートピアホテル)

37. 越野裕太, 山中正紀, 石田知也, 遠山晴一: 足関節背屈可動域とカッティング動作における足関節運動・運動力学的特徴との関係性. 第 22 回日本臨床スポーツ医学会学術集会. 2011 年 11 月 5-6 日 (青森市, ホテル青森・青森市文化会館)
38. 越野裕太, 山中正紀, 石田知也, 武田直樹. 着地動作時の異なる足部方向が足関節の運動学・運動力学に与える影響—足関節内反捻挫予防の観点から—. 第 46 回日本理学療法学術大会. 2011 年 5 月 27-29 日 (宮崎市, シーガイアコンベンションセンター)
39. 添田有花, 石田知也, 松本尚, 金子知, 青木喜満. 下肢外傷予防プログラムによる着地動作時膝関節角度の経時的変化～二次元動作解析による検討～. 第 65 回北海道理学療法士学術大会. 2014 年 10 月 25-26 日 (帯広市, 帯広市民文化ホール)
40. 谷口翔平, 山中正紀, 石田知也, 生田亮平, 遠山晴一. **Star Excursion Balance Test** 側方リーチ時の下肢関節角度, 内的モーメントとリーチ距離との関係. 第 40 回日本整形外科スポーツ医学会学術集会. 2014 年 9 月 12-14 日 (東京都, 虎ノ門ヒルズフォーラム)
41. 谷口翔平, 山中正紀, 石田知也, 越野裕太, 江沢侑也, 生田亮平, 寒川美奈, 齊藤展士, 小林巧, 遠山晴一. **Star Excursion Balance Test** リーチ時の下肢関節角度, 内的モーメントとリーチ距離との関係 —前方, 後内側, 後外側方向の検討—. 第 49 回日本理学療法学術大会. 2014 年 5 月 30 日-6 月 1 日 (横浜市, パシフィコ横浜)
42. 谷口翔平, 山中正紀, 石田知也, 江沢侑也, 遠山晴一. **Landing Error Scoring System** 各項目と着地動作時の最大膝外反角度, モーメントの関係. 第 24 回日本臨床スポーツ医学会. 2013 年 10 月 25-26 日 (熊本市, 市民会館崇城大学ホール (熊本市市民会館)・熊本市国際交流会館・一番館)
43. 谷口翔平, 山中正紀, 石田知也, 武田直樹. **Drop Vertical Jump** と側方ホップ時における膝外転角度および膝外転モーメントの関係. 第 48 回日本理学療法学術大会. 2013 年 5 月 24-26 日 (名古屋市, 名古屋国際会議場)
44. 谷口翔平, 山中正紀, 石田知也, 武田直樹. 側方ホップ動作における膝関節運動の性差. 第 39 回日本臨床バイオメカニクス学会. 2012 年 11 月 9-10 日 (千葉市, 幕張メッセ国際会議場)
45. 谷口翔平, 山中正紀, 石田知也, 武田直樹. **Star Excursion Balance Test** の側方リーチ距離と側方ホップ時の膝関節外転モーメントの関係. 第 47 回日本理学療法学術大会. 2012 年 5 月 25-27 日 (神戸市, 神戸ポートピアホテル・神戸国際展示場)

46. 藤堂愛, 松本尚, 伊藤雄, 石田知也, 田邊芳恵, 青木喜満. 片脚着地時の体幹前傾が膝および股関節角度に与える影響～二次元動作解析による検討～. 第 65 回北海道理学療法士学会. 2014 年 10 月 25-26 日 (帯広市, 帯広市民文化ホール)
47. 松本尚, 大泉尚美, 末永直樹, 手代木直美, 伊藤雄, 石田知也, 清水翔太, 三上兼太朗, 舟田奈保. 肩腱板修復術後の早期退院は再断裂を増長する?. 第 11 回肩の運動機能研究会. 2014 年 10 月 24-25 日 (佐賀市, 佐賀市文化会館・佐賀県総合体育館)
48. 松本尚, 中田周兵, 青木喜満, 金子知, 齋藤範之, 石田知也, 山中正紀. 小学生バスケットボール選手に対する下肢障害予防プログラムの身体的効果. 第 6 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会 (JOSKAS). 2014 年 7 月 24-26 日 (広島市, 広島国際会議場・広島市文化交流会館)
49. 松本尚, 青木喜満, 金子知, 伊藤雄, 中田周平, 石田知也, 山中正紀. 股関節外転筋力と前十字靱帯損傷発生との関連～前向き調査による検討～. 第 24 回日本臨床スポーツ医学会. 2013 年 10 月 25-26 日 (熊本市, 市民会館崇城大学ホール (熊本市市民会館)・熊本市国際交流会館・一番館)
50. 松本尚, 石田知也, 中田周兵, 青木喜満, 金子知, 山中正紀. 中学バスケットボール選手における下肢筋力および動的下肢アライメントの変化. 第 64 回北海道理学療法士学会. 2013 年 11 月 2-3 日 (札幌市, 札幌コンベンションセンター)
51. 松本尚, 山中正紀, 伊藤雄, 石田知也, 本多大輔, 青木喜満. 足底板使用が片脚スクワット時の膝関節へ与える影響. 第 122 回北海道整形災害外科学会. 2012 年 1 月 28-29 日 (札幌市, 札幌医科大学臨床教育研究棟)
52. 松本尚, 山中正紀, 伊藤雄, 石田知也, 本多大輔, 青木喜満. 足底板使用が片脚スクワット時の膝関節へ与える影響. 第 46 回日本理学療法学会. 2011 年 5 月 27-29 日 (宮崎市, シーガイアコンベンションセンター)
53. 三上兼太朗, 大角侑平, 伊藤雄, 中田周兵, 寒川美奈, 石田知也, 松本尚, 青木喜満. 大学陸上競技選手へのコンディショニングチェックー柔軟性, 垂直跳び高と障害状況の関連一. 第 25 回日本臨床スポーツ医学会学会集会. 2014 年 11 月 8-9 日 (東京都, 国立スポーツ科学センター・味の素ナショナルトレーニングセンター)

2. 総説・解説

1. 青木喜満, 井上千春, 金子知, 松本尚, 伊藤雄, 中田周兵, 石田知也, 島本則道. 膝前十字靱帯再建手術に関する北海道の現状と課題 当院における膝前十字靱帯損傷治療の現状と課題. 北整災誌. 2014;55(2):223-229.
2. 井野拓実, 石田知也, 山中正紀. 運動連鎖からみた前十字靱帯損傷と理学療法. 理学療法. 2014;31(8):829-839.
3. 松本尚, 山中正紀, 中田周兵, 伊藤雄, 石田知也, 青木喜満. 膝半月板損傷の機能解剖学的病態把握と理学療法. 理学療法. 2012;29(2):140-151.

3. その他

1. 平成 25 年度財団法人北海道大学クラーク記念財団博士後期課程在学生研究助成金. 膝前十字靱帯損傷の危険性が高い着地動作を生じさせる因子の検討