

学 位 論 文 (博 士)

片脚着地時における下肢関節戦略の検討
—膝前十字靭帯損傷予防の観点から—

菊 元 孝 則

筑波大学
人間総合科学研究科 スポーツ医学専攻
3年制博士課程

平成 29 年度

目 次

要約	1
1. 諸言	4
1. 1. 膝関節の構造と膝関節靭帯	4
1. 1. 1. 膝関節の構造	4
1. 1. 2. 膝前十字靭帯機能	4
1. 2. 膝前十字靭帯損傷の疫学, 病態, 社会的問題	6
1. 2. 1. 疫学	6
1. 2. 2. 膝前十字靭帯損傷の病態	6
1. 2. 3. 膝前十字靭帯損傷による社会的損失, 経済的損失	7
1. 3. 膝前十字靭帯損傷メカニズム	8
1. 3. 1. 膝前十字靭帯損傷場面ビデオ解析からの損傷メカニズムの推察	8
1. 3. 2. 骨挫傷発生部位からの膝前十字靭帯損傷メカニズムの推察	8
1. 4. 膝前十字靭帯損傷危険因子	10
1. 4. 1. 環境因子	10
1. 4. 2. 解剖学的因子	10
1. 4. 3. ホルモン因子	12
1. 4. 4. 神経筋機能因子	13
1. 4. 5. バイオメカニクスの因子	14
1. 5. 論文目的	16
2. 股関節外転筋力が着地時の膝関節アライメントに及ぼす影響	17
2. 1. 諸言	19
2. 2. 方法	19
2. 2. 1. 対象	19
2. 2. 2. 実験手順およびデータ収集	19
2. 2. 3. 統計学的解析	21
2. 3. 結果	22
2. 4. 考察	25
2. 5. 結論	27

3. 片脚着地時における矢状面上の下肢関節戦略	28
3. 1. 諸言	28
3. 2. 方法	30
3. 2. 1. 対象	30
3. 2. 2. 実験手順およびデータ収集	30
3. 2. 3. 解析方法	31
3. 3. 結果	33
3. 4. 考察	35
3. 5. 結論	37
4. 足部接地の違いが身体重心位置と垂直床反力成分に及ぼす影響	38
4. 1. 諸言	38
4. 2. 方法	40
4. 2. 1. 対象	40
4. 2. 2. 使用機器	40
4. 2. 3. 課題動作	41
4. 2. 4. 解析	41
4. 2. 5. 統計処理	41
4. 3. 結果	42
4. 4. 考察	44
4. 5. 結論	46
5. 結論	47
6. 本研究の限界	49
7. 引用文献	50
8. 謝辞	68
9. 業績一覧	69

要約

1. 諸言

膝前十字靭帯 (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あり, 受傷したアスリートの多くは, スポーツ復帰のために再建術が必要となる症例が多い. 本邦において年間 1~3 万件の ACL 再建術が行われ, 競技復帰まで約 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など, ACL 損傷に関連する経済的, 社会的問題は非常に大きい. ACL 損傷の受傷機転の特徴として, 他者との明らかな接触がない着地動作で生じる, 非接触型損傷での受傷が全体の 75%以上であることが明らかとなっている. また, 特に第 2 次成長期の女性アスリートで有意に発生頻度が高いことが知られており, 損傷後の将来設計を変えざるを得ない選手も少なくない. 以上の点より, 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 損傷の受傷メカニズムは, 膝関節外反, いわゆる knee-in が重要な受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垂直床反力成分が ACL 損傷の予測因子であったことも報告されている. この様に, ACL 損傷の危険因子は, 一定の見解を得られているが, 着地動作時の膝関節外反や垂直床反力成分が高値となる要因については, 十分に明らかとなっていない. 従って本論文の目的は, 片脚着地時の膝関節外反や垂直床反力成分に影響する要因を, 1) 股関節外転筋力が着地時の膝関節アライメントに及ぼす影響, 2) 片脚着地時における矢状面上の下肢関節戦略, 3) 足部接地の違いが垂直床反力成分に及ぼす影響, 以下の 3 つの観点で検討することとした.

2. 股関節外転筋力が着地時の膝関節アライメントに及ぼす影響

ACL 損傷は, 股関節外転筋力の低下が下肢のコントロールを低下させ, 片脚着地やピボット動作時の膝外反によって度々引き起こされると考えられている. 女性バスケットボール選手は, 男子選手と比して過度の膝の外反および股関節の内転を示し易く, ACL 損傷を来し易いと考えられている. 本研究の目的は, 股関節外転筋力が片脚着地時の膝のアライメントに及ぼす影響を検証することである. 股関節中間位 (屈曲 0 度) および股関節屈曲 30 度での股関節外転筋力の最大トルクが高値を示すほど, 片脚着地時の膝外反方向への変位が低値を示した. また, 動的 Trendelenburg テストでは, 陽性群が着地時において膝外反を, 陰性群に比して有意に引き起こしていることが示された. これらの結果により, 女性バスケットボ

ール選手は股関節外転筋力を向上させることで、片脚着地時に適切な膝のアライメントを維持できる可能性が示唆された。非接触 ACL 傷害の予防のためには、股関節の制御が重要な課題と考えられる。

3. 片脚着地時における矢状面上の下肢関節戦略

非接触型 ACL 損傷時に生じる唯一の外力である床反力が着地時に大きくなり、ACL に多大な影響を与えているのではないかと考えられる。そこで本研究の目的は、非接触型損傷時の唯一の外力となる床反力を小さくする効率的な片脚着地動作を行うには、どのような下肢関節戦略が必要なのか、検証することである。

非接触型 ACL 損傷が頻回する片脚着地動作時の下肢関節戦略を、垂直床反力成分を指標として検討した。足関節底屈モーメントが高値を示す着地動作では垂直床反力成分が低値を示す、負の相関関係が認められた。また、膝関節伸展モーメントと垂直床反力成分との間には、正の相関関係が認められ、非接触型 ACL 損傷のリスクファクターとして一定の見解を得ている脛骨前方剪断力に、垂直床反力成分が影響を与えていることが示された。これらの結果により、足関節底屈モーメントを発生させ、膝関節伸展モーメントを低値に抑えることが、垂直床反力成分値を低値に抑えることができる可能性が高く、ACL 損傷予防に向けた下肢関節戦略を踏まえた着地動作指導の新たな基礎データとなり得ると考える。

4. 足部接地の違いが垂直床反力成分に及ぼす影響

近年、スポーツ外傷のリハビリテーションでは、危険な姿勢を回避する動作習得が重要視され、外傷予防プログラムについての研究が進められてきている。そこで本研究の目的は、片脚着地における足部接地の違いに着目し、垂直床反力成分と身体重心（Center of Gravity：以下 COG）位置と垂直床反力成分に及ぼす影響について検討することとした。また、膝前十字靭帯（Anterior Cruciate Ligament：以下 ACL）損傷既往者をリスク群とし健常群と比較することで、ACL 損傷予防に関する検討も行うこととした。対象は、バスケットボール競技歴があり ACL 損傷の既往がある 6 名（ACL 群）と、ACL 損傷の既往がない健常者 6 名（健常群）とした。測定機器は、三次元動作解析装置と床反力計を使用し、課題動作は、立ち位置から両脚で踏み切り、床反力上に片脚で着地する動作を撮影した。解析項目は、初期接地（Initial Contact：以下 IC）時の足圧中心（Center of Pressure：以下 COP）から COG までの X 軸座標の距離、垂直床反力成分最大値と出現時間（以下 Peak-Time）、および IC 時の足部接地の種類とした。足底接地群は踵接地群に比べて、垂直床反力最大値では有意に高値を示し、足底接地を行った ACL 群は、健常群に比べ有意に高値を示した。IC 時の COP から COG までの X 軸座標の距離では、足底接地群は踵接地群に比べ有意に高値を示し、足底接地

を行った健常群は、ACL 群に比べ有意に高値を示した。垂直床反力成分 Peak-Time は、足底接地群と踵接地群で有意な差は認められなかった。このことから、後方重心に加え、足底接地となる着地動作を行うことで、片脚着地時における垂直床反力成分が増大することが示唆された。また、足部接地の違いは垂直床反力成分 Peak-Time には影響しない可能性が示唆された。

本論文で得られた所見は、非接触型 ACL 損傷予防において、片脚着地時の膝関節外反および垂直床反力成分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、着地動作時における危険因子の要因について検討を重ねていくことが非接触型 ACL 損傷予防の発展に繋がると考えている。

1. 諸言

1. 1. 膝関節の構造と膝関節靭帯

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2つの関節から構成される。一般的に膝関節とは広義で脛骨大腿関節を指し、本論文では脛骨大腿関節内の靭帯である前十字靭帯 (Anterior cruciate ligament: 以下 ACL) 損傷予防に関して論ずるため、脛骨大腿関節を膝関節として述べていく。

膝関節は、股関節や足関節 (距腿関節) と比して骨形状による安定性が乏しく、靭帯や関節包、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と考えられる¹⁾。膝関節の靭帯は主に、内側側副靭帯 (Medial collateral ligament: MCL)、外側側副靭帯 (Lateral collateral ligament: LCL)、ACL、後十字靭帯、後斜靭帯、弓状靭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¹⁾。関節の安定性は、主に筋腱複合体からなる動的支持機構と関節を成す骨の適合性、靭帯や関節包からなる静的支持機構により得られている¹⁾。

スポーツ外傷において膝関節は足関節に次いで頻発するとされ^{2,3)}、競技復帰まで長期間を要する症例が多く、手術を要する重篤なスポーツ外傷の中では膝関節における外傷が最も多いとされ、その代表例が膝前十字靭帯損傷である^{4,5)}。

1. 1. 2. 膝前十字靭帯機能

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^{6,7,8,9)}。また、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^{7,8,9)}。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と言われており、大腿骨に対する、脛骨の前方剪断力の85%程度を担っているとされている¹⁰⁾。また、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^{11,12,13,14)}。AMB、PLB 共に膝関節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、AMB は、屈曲90°以降で再び伸長されることが報告されている^{11,13)}。また、ACL の脛骨前方並進運動の制御に関して、AMB と PLB は機能分担をしていることが報告されており、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^{12,14)}。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^{15, 16, 17, 18)}.

1. 2. 膝前十字靭帯損傷の疫学, 病態, 社会的問題

1. 2. 1. 疫学

アメリカ合衆国における ACL 損傷は, 一般人口において約 3,000 人に 1 件が発生し¹⁹⁾, 年間では, 12 万件以上が発生すると推定され, また本邦においては年間 1~3 万件の ACL 再建術が行われている²⁰⁾. ACL 損傷は, 主にスポーツ活動中に発生するとされ^{21,22)}, サッカーやバスケットボール, ハンドボール, スキーでの受傷が多いと報告されている^{23,24,25)}. また ACL 損傷は 10 代前半に好発し, ACL 再建術施行患者数が最も多いとされる^{19,26,27,28)}. 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, 接触型損傷とは膝関節への直接外力 (他者からのタックルなどによる接触等) 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く, 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を要するコリジヨンスポーツを除き, 大多数が非接触型損傷であるとされている^{29,30,31,32,33,34,35)}. また, ACL 損傷の特徴として, スポーツ活動時間 (例, 1,000 athlete-hours), もしくはスポーツ暴露数 (例, 1,000 athlete-exposures) あたりの ACL 損傷発生率は, 女性が男性と比して有意に高いことが報告されており^{29,30,36,37,38,39)}, 性差は明らかである.

1. 2. 2. 膝前十字靭帯損傷の病態

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^{40,41)}. 保存療法によるスポーツ復帰を検討した報告では, 活動性が低いスポーツ (ジョギングやゴルフ) の復帰率は高値を示した一方で, 活動性が高いスポーツ (バスケットボールやサッカー) への復帰率は低値を示したことが報告されている^{40,42)}. 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^{43,44,45,46)}. ACL 損傷者は, 歩行中に異常な膝 kinematics が観察されており^{47,48,49,50)}, 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⁵¹⁾. そのため, ACL 損傷によって生じた関節不安定性の改善を目的として, ACL 再建術が広く行われている^{26,52,53,54)}. 術式により術後成績に差異があることが報告されているが, 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^{55,56)}. 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との報告がある⁵⁷⁾. 一方で, 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関節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⁵⁸⁾。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^{59,60)}、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⁴³⁾、ACL 損傷予防の重要性が国際的に認識されている⁵²⁾。

1. 2. 3. 膝前十字靭帯損傷による社会的損失，経済的損失

ACL 損傷が要因となり、仕事や学業、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と考えられる。アメリカ合衆国の大学生を対象とした報告では、ACL 損傷した学期の成績は平均し 0.3 ポイント低下し、ACL 再建術を受けた学生は 10.5 日授業を欠席し、2.2 日の試験を欠席したことが認められた⁶¹⁾。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⁶²⁾。スポーツ活動に関しては 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症例で認め^{42,57,58,63)}、再建術を施行した場合には、競技復帰まで半年から 1 年程度のリハビリテーションが必要となる症例が多い⁶⁴⁾。スポーツ競技から半年以上離脱することは、商業スポーツ選手にとっては契約問題となるのはもちろん、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言えず、その社会的損失は大きい。

ACL 損傷では治療に関わる経済的損失も生じると考えられ、Cummins らは疫学的調査から、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⁶⁵⁾。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⁶⁶⁾。Swart らは、これらの直接的、また間接的な経済的な損失による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⁶⁷⁾。

1. 3. 膝前十字靭帯損傷メカニズム

1. 3. 1. ビデオ解析による膝前十字靭帯損傷メカニズムの推察

ACL 損傷メカニズムの解明を目的とした、競技中の着地動作やカッティング動作中における 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^{33, 68, 69, 70, 71, 72}。矢状面上の膝関節肢位に関しては、ACL 損傷場面において床面接地時の膝関節屈曲角度が、 30° 以下の軽度屈曲位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^{33, 68, 69, 70, 71, 72}。しかし Boden らは、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、両場面間に有意な差は検出されなかったと報告している⁶⁸。非損傷場面との比較報告を行った先行研究は少なく、最終的な結論付けをすることは難しいと言えるが、膝関節屈軽度曲角度での接地は 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。前額面に関する検証では、多くの研究者が ACL 損傷場面において膝関節外反が生じていたと報告している^{33, 68, 69, 70, 71, 72}。Boden らは、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⁶⁸。Hewett らは、ACL 損傷場面における膝関節外反角度の増加は、女性の損傷場面において顕著であったことを報告した⁶⁹。Koga らは、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、より詳細な膝関節肢位の推測し、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⁷⁰。ビデオ解析には計測誤差が含まれることや⁷³、対照となる非損傷場面の欠如、また多くの研究^{68, 69, 70, 71, 72}がアメリカの National Basketball Association (NBA) などの同一ビデオデータを用いている可能性があることがビデオ解析研究の限界として考えられる。しかしながら、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膝関節軽度屈曲角度や、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高いと考えられる。

1. 3. 2. 骨挫傷発生部位による膝前十字靭帯損傷メカニズムの推察

ACL 損傷時に多くの症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⁷⁴。骨挫傷は、関節軟骨の衝突による衝撃が、

軟骨下骨に伝わり発生す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⁷⁴⁾。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^{75,76)}。これら2つの研究の結果は、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られ、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^{75,76)}。Quatman らは、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⁷⁷⁾。これらの先行研究により、ACL 損傷後に認める骨挫傷は、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原因であると推察される。

1. 4. 膝前十字靭帯損傷危険因子

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、外的因子は環境因子、内的因子として解剖学的因子やホルモン因子、神経筋およびバイオメカニクスの因子が挙げられる^{52, 78, 79, 80)}。

外的因子である環境因子は、天候や床面と靴、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^{78, 52, 79, 80)}。Olsen らは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(プラスチックフロア等)での ACL 損傷発生率が高いことを報告³⁹⁾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行い、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⁸¹⁾。アメリカの National Football League (NFL) やオーストラリアンフットボールの屋外競技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 損傷のリスクとして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、地面と靴の間で生じる摩擦の違いが影響していると考察されている⁸²⁻⁸⁵⁾。

ACL 損傷の発生状況については、試合中と練習中の発生率が比較されている^{36, 32, 86, 87)}。Waldén らは、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⁸⁷⁾。また Bjordal らも同様、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³⁶⁾。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⁸⁶⁾。また Bradley らは、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³²⁾、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 損傷に関係する解剖学的因子として、Q アングル、大腿骨顆間窩幅、ACL の形態、脛骨高原後傾角度、全身関節弛緩性や下肢アライメントなどが挙げられている^{78, 52, 79, 80)}。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^{78,80}。大腿骨顆間窩幅の狭小は、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多くの検討がなされている^{88,89,90}。Zeng らの 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が ACL 損傷のリスク因子となると結論付けている⁹¹。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^{92,93,94}、大腿骨顆間窩幅の狭小による 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^{95,96}や、MRI を用いた研究^{93,97}で、女性の ACL の断面積が男性と比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上、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^{93,97}。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⁹⁸。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、男性と比して劣ることが報告されており⁹⁹、ACL の断面積や微細構造、力学的特性の性差が、ACL 損傷の性差と関連していると考えられている。また Chaudhari らは、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での 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¹⁰⁰。

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^{101,102,103,104}、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 つの研究のみにおいて、ACL 損傷者の後傾角度が大きかったことを示している¹⁰⁵。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され、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¹⁰⁵。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留めている¹⁰⁵。

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¹⁰⁶や、両側 ACL 損傷者が、片側 ACL 損傷者に比して全身関節弛緩性スコアが高いと報告されている¹⁰⁷。

また、膝関節の前方弛緩性に関しても、ACL 損傷と関係することが報告されている^{108, 109}。Ramesh らは、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¹⁰⁶、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^{108, 110}。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^{111, 112}。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¹¹³。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^{52, 78, 79}。足部アライメントに関しては、舟状骨降下量、いわゆる Navicular Drop 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^{110, 114, 115, 116, 117, 118, 119}。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^{114, 115, 116, 110, 119}、ACL 損傷者と対象者の間に、有意差がないという報告もある^{117, 118}。これらの研究は、どれもサンプルサイズが小さく、後ろ向き研究であるために未だ有力な結論には至っていない。

1. 4. 3. ホルモン因子

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^{120, 121, 122}、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^{123, 124-126}。また動物モデルによる先行研究では、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^{127, 128}。

ACL 損傷の発生と月経周期の関係に関して、Hewett らは 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¹²⁹。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^{130, 131, 132}。また、Adachi らは、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¹³⁰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ていると考察している。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。しかしながら、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^{131, 132, 133}、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. 神経筋機能因子

非接触型 ACL 損傷は、膝関節の制御を失った状態にて好発すると考えられていることから、膝関節を制御する神経筋機能が ACL 損傷のリスクファクターとして考えられている。神経筋反応、筋活動による運動制御、動作時における筋活動の面から、神経筋機能と ACL 損傷との関連を考察する。

神経筋反応について、その性差を検討した Huston らによると、脛骨の前方引き出し動揺に対する大腿四頭筋およびハムストリングスの活動開始時間に性差は認められなかったと報告した¹³⁴⁾。しかし、女性では大腿四頭筋に依存した筋反応が起こる傾向があり、この筋活動パターンが ACL 損傷に関与していると考察している。Chu らは、持続的な脛骨の前方偏位力をかけた際の筋活動変化を報告している¹³⁵⁾。その結果、女性は男性に比して大きく大腿四頭筋の筋活動が増加していた。こうした報告にみられる筋活動の性差は、動作中の筋活動の性差と共に ACL 損傷のリスクファクターとして考えられる。また筋反応時間と ACL 損傷との関連を検証した Dyhre-Poulsen らの報告によると、ACL への電気刺激後、約 90ms 遅れて半腱様筋の反応が起きたと報告している¹³⁶⁾。しかし、ACL 損傷はスポーツ動作中、接地後 100ms 以内に発生すると考えられており^{71,137)}、筋放電が起きた後、筋収縮が起こるまでにはさらに 40ms の電氣的遅延が必要であり¹³⁶⁾、外乱に対する神経筋の反応は ACL 保護には有効に働かない可能性が高いと考えられる。

筋活動による運動制御について、ここでは大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮による関節安定化機能について考察したい。こうした研究は 1970 年代から認められ、Markolf らは、大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮が、内・外転負荷に対する関節剛性を 2~4 倍増加させたと報告している¹³⁸⁾。Lloyd らは、脛骨の各方向からの負荷に対する筋活動を計測し、内転、外転負荷に対しては大腿四頭筋とハムストリングスの筋活動が増加することにより負荷に抗していたと報告している¹³⁹⁾。また Wojtys らは、脛骨の前後偏位や回旋に対する同時収縮の影響を検討し、同時収縮が前後偏位、回旋ともに減少させたと示している^{140,141)}。ただし、この同時収縮による関節運動の制動力は、男性に比して女性で小さかったことも示されている^{140,141)}。よって大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮は、膝関節運動の各方向に対して関節を安定化させる効果があり、その性差が ACL 損傷のリスクファクターとなり得ると考えられる。

動作時における筋活動は、神経筋機能や ACL の歪みや張力に対する大腿四頭筋やハムストリングスの機能を背景に、ACL 損傷動作に近い動作時の筋活動を計測し ACL 損傷との関連を検討している。Colby らは、サイドカッティング、クロスカッティング、ストップ、着地動作時の筋活動を計測し、これらの動作時に大腿四頭筋の活動が高く、ハムストリングスの活動が低いことから、ACL 損傷との関連性を示唆した¹⁴²⁾。

片脚着地時の筋活動については、Fagenbaumらが性差は認められなかったと報告している¹⁴³⁾。またCowlingらは、接地前のハムストリングス活動開始タイミングが女性で早かったと報告している¹⁴⁴⁾。片脚着地時の筋活動について、明らかな性差は報告されておらず、筋活動のタイミングなどを含め、今後も検討が必要であると考えられる。

性差以外の要因について、筋活動を検討している報告も認められる。Kellisらは、筋を疲労させた際における片脚着地時の筋活動変化を検討し、大腿四頭筋を疲労させた場合、着地時の大腿二頭筋活動が減少したと報告している¹⁴⁵⁾。一方で、Fagenbaumらが疲労の影響を検討した報告によると、着地時筋活動に変化は認められなかったと報告している¹⁴³⁾。また別の知見として、Sigwardらは、運動経験の有無がカッティング動作時の筋活動に与える影響を報告している¹⁴⁶⁾。その結果、運動未経験群では経験群に比較し、大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮が大きく認められ、不慣れな動作における外傷発生リスクを減少させていると考察された。こうした疲労や運動経験が筋活動に及ぼす影響は明らかとなっていないものの、ACL損傷のリスクファクターとして今後検討する必要があると考えられる。

1. 4. 5. バイオメカニクスの因子

先行研究における片脚着地時の膝屈曲角度については、女性において屈曲角度が小さい¹⁴⁷⁾、屈曲角度が大きい¹⁴³⁾、性差はみられない^{144, 149, 150)}、と報告により結果が一致していない。前額面上における膝外転角度については、女性において大きいと報告されている^{149, 150)}。一方で、膝の回旋角度については報告が少ないが、Lephartらが報告しており、下腿の内旋が女性で小さかったと報告している¹⁴⁷⁾。股関節運動については、屈曲角度には差は認められなかったと報告されている^{144, 150, 151)}。股関節内転については性差が認められなかったとの報告^{149, 150)}、また女性において大きかった報告¹⁵¹⁾があり、結果が一致していない。なおHewettらの報告では、股関節内転角度に加え内転モーメントも女性に大きかったという結果が示されている¹⁵⁰⁾。股関節回旋については報告が少なく、Lephartが報告しているが、女性において股関節内旋が大きかったと報告し¹⁴⁷⁾、加えて着地時の垂直床反力成分については、女性において大きかったと報告されている¹⁴⁹⁾。Ogasawaraらは、床反力成分により膝関節の内外反モーメントが決定し、それは初期接地時の衝撃直後に大きく増加すると報告した¹⁴⁸⁾。また、Pappasらは片脚着地について両脚着地と比較し、ACL損傷に対する危険因子を検討した¹⁴⁹⁾。報告によると、片脚着地は両脚着地に比較して膝屈曲角度が小さく、また膝外転角度が大きく、垂直床反力成分が高値を示したという結果であった。股関節外内転は、接地より膝屈曲40度までは両脚着地に比較して外転しているものの、その後急激に内転し、膝最大屈曲時の股関節内転角度には差は認められなかった。一方、Jacobsらは股関節外転筋力と片脚着地時の股関節、膝関節運動との相関を検

討し、女性において、股関節外転筋力が膝外転角度、膝屈曲角度、股関節内転角度と相関していたと報告している¹⁵¹⁾。また、小笠原らは、外反モーメント発生試技では、股関節外転や体幹に対する下腿の外転が観察されることから、体幹が着地脚側に傾倒した姿勢であることを示している¹⁵²⁾

片脚着地におけるリスクファクターは、その性差や両脚着地との比較から膝外転角度の増加が考えられる。膝屈曲角度については報告により結果が異なり、単独で ACL 損傷リスクファクターであるとは言い難いと考えられる。膝関節回旋や股関節回旋については報告が少なく今後の検討が必要である。股関節屈曲については性差がみられず、股関節内転に関しては性差について報告にばらつきがあるものの、両脚着地との比較や、運動連鎖により膝外転を増加させることが考えられるため、膝運動との関連を今後も検討する必要があるといえる。さらに、片脚着地時における垂直床反力が女性で高値を示し、また損傷肢位における値が高値を示していることから、片脚着地時のリスクファクターの可能性が高いと考えられる。

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。近年の医学の進歩による 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 年程度の期間を要し、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、バイオメカニクスの因子、疲労などが知られているが、神経筋および生体力学的因子とバイオメカニクスの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により、膝関節外反角度および垂直床反力成分の増加が 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、片脚着地動作中の膝関節外反角度および垂直床反力成分は、ACL 損傷の予測因子であることが示されている。しかしながら、競技時に多く行われる動作である片脚着地時において、どのような下肢関節の使い方、いわゆる関節戦略を行えば、リスクファクターと考えられている膝関節外反角度、および垂直床反力成分を低値に抑え ACL 損傷予防に繋がるか、十分に明らかとなっていない。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。

そこで本論文の目的は、損傷好発動作である片脚着地動作に着目し、片脚着地動作中の膝関節外反角度および垂直床反力成分に影響する要因として (1) 股関節外転筋力が着地時の膝関節アライメントに及ぼす影響、(2) 片脚着地時における矢状面上の下肢関節戦略、(3) 足部接地の違いが身体重心位置と垂直床反力成分に及ぼす影響、を検討することとした。

2. 股関節外転筋力が着地時の膝関節アライメントに及ぼす影響

2. 1. 諸言

近年、スポーツ医学の分野では傷害予防を目的とした報告が増加している^{153,154)}。なかでも、膝前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament: 以下 ACL) 損傷は、欧米の諸外国を中心に予防の取り組みがなされている¹⁵⁵⁾が、数多くの競技者が ACL 損傷を受傷し、そのスポーツ活動の中断を余儀なくされている¹⁵⁶⁾。また、ACL 損傷は、靭帯再建術などの治療を行った場合、復帰まで1年程度と比較的長期間のリハビリテーションを要することが知られている。それゆえ、本疾患の受傷をきっかけとして、第一線から退かざるを得ない競技者も多く存在するため、スポーツ外傷のなかでも注目が集まりやすい疾患である。加えて、その社会的、経済的損失の大きさから、予防法の確立に大きな期待が寄せられている¹⁵⁷⁾。

ACL 損傷は、米国では約 3,000 人に1件発生し¹⁹⁾、年間では約 12 万件以上が発生すると推定され²⁰⁾、主にスポーツ活動中に発生するとされている^{21,22)}。バスケットボールやスキーでの受傷が多いと報告され、特にバスケットボールのようなカッティングやジャンプ、ストップ動作が主体となるスポーツに多く認められる^{23,23,24)}。

また、ACL 損傷は10代より発生し、10代後半から20代前半で ACL 患者の発生はピークを迎えることが知られている^{26,27)}。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、接触型損傷は膝への直接外力 (他選手からのタックル等) による損傷であり、非接触型損傷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^{29,30,31)}が、この事実は、予防トレーニングなどにより危険因子となる動作を未然に防ぐことで、ACL 損傷を予防できる可能性があることを示している。加えて ACL 損傷の特徴として、女性の ACL 損傷率 (傷害発生件数 / 1000 被爆回数) が約 2~8 倍の損傷率を示した先行研究もあり^{29,30,31,36)}、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いる。この様に、女性は男性と比較しても特に非接触型 ACL 損傷の発生率が高いことから、女性の非接触型 ACL 損傷の予防法を開発することは、女性の ACL 損傷率の減少に寄与すると考えられている^{79,80)}。

近年、女子バスケットボール選手に頻発する非接触型 ACL 損傷では、損傷の発生と下肢アライメントとの関係が注目されている^{158,159)}。競技中の片脚着地動作では、膝屈曲時に膝関節が外反位となる、いわゆる knee-in が発生し ACL 損傷との関連性が報告されている¹⁶⁰⁾。また片脚スクワット時において、股関節周囲筋、特に股関節外転筋力が前額面上での膝関節アライメントに大きな影響を与えるとの報告がなされているが¹⁶¹⁾、非接触型 ACL 損傷の発生機

転の一つである片脚着地動作時の股関節外転筋力と動的な膝関節アライメントの関係に関する報告は少ない。

筆者らは膝関節が外反する際、股関節が外転位に保持され、膝関節内方変位量を抑えることができれば、結果として ACL 損傷の予防につながると考えている。そこで本研究は、女子バスケットボール選手を対象に、股関節外転筋力と片脚着地時の股関節および膝関節の静的および動的アライメントとの関係を検証することを目的とした。

2. 2. 方法

2. 2. 1. 対象

対象者は大学女子バスケットボールチームに所属している選手 30 名（年齢 18.3 ± 3.7 歳、身長 162.7 ± 17.2 cm、体重 56.2 ± 10.9 kg、競技歴 8.9 ± 3.8 年）とした。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。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、本研究は新潟医療福祉大学倫理委員会（承認番号 17779-170210）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

対象者には、立位での股関節外転筋力を股関節中間位（屈曲 0° ）および 30° 屈曲位で測定した。アライメントは静的および動的の 2 種類の測定を行い、最後に 30cm 台から片脚着地し膝関節内方変位量を算出した。

● 股関節外転筋力測定

股関節中間位および 30° 屈曲位で等速性筋力測定器（Biodex System 4；BIODEX 社）を用いて立位で行った。計測肢は利き脚（ボールを蹴る）側とし、角速度は先行研究¹⁶²⁾に準じ $60\text{deg}/\text{sec}$ で 5 回の測定を行い、その最大トルクの平均値を体重で除し、%換算した。また代償動作が確認された場合は再測定し、特に体幹側屈を防ぐため、前方に鏡を置き視覚的にも代償動作を防ぐことに努めた。

● 静的アライメント

立位にて上前腸骨棘から膝蓋骨中央を結んだ線と、膝蓋骨中央から脛骨粗面上縁中央を結んだ線がなす角度（Q-angle）を、また股関節内旋角度を仰臥位にて、東大式ゴニオメーターを用いて計測した。

● 動的アライメント

➤ 動的 Trendelenburg テスト (Fig. 2.1)

動的 Trendelenburg テスト(以下：動的 T テスト)とは、片脚立位で膝関節 30° 屈曲した際、

遊脚側の上前腸骨棘が立脚側と比べ同位，もしくは低い場合を陽性とする評価法である．膝関節の角度は，角度計を用いて測定を行った．通常の Trendelenburg テストに比べ出現率が高く，非接触型 ACL 損傷の発生機転である膝外反との密接な関連性を有する¹⁹⁾．測定の再現性を確保するため，全てのテストを同一験者で行い，また対象に日を変えて 2 度測定を実施した．2 回の測定は 1 週間以上 2 週間以内の間隔で行った．

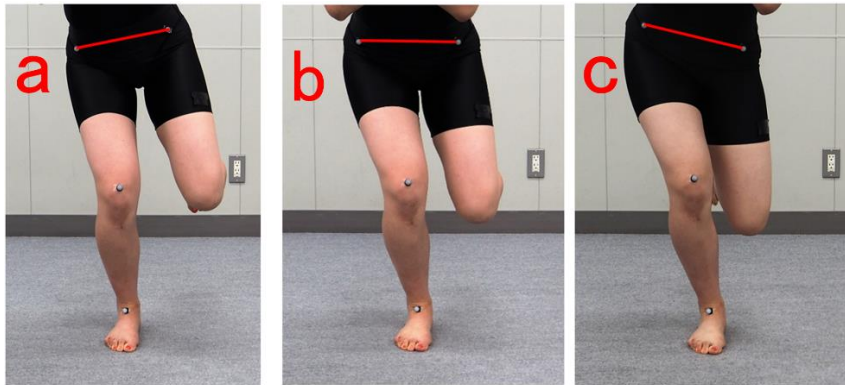


Fig. 2. 1. Dynamic Trendelenburg test criteria

a) Negative example b) Positive example 1 c) Positive Example 2

➤ 片脚着地動作時の膝関節内方変位量(Knee medial displacement) (Fig. 2.2)

計測肢は利き脚（ボールを蹴る）側とし，内果と外果を結ぶ中点を足関節中心，膝蓋骨直上，および左右の上前腸骨棘にマーカーを貼付し，30cm 台からの片脚着地を行った．実施中，反対脚の位置は計測肢よりも後方に位置するように指示した．なお，着地後に姿勢を崩した試技や反対側の脚を着いた試技，および体幹が過度に回旋した試技は失敗とし，5 回の成功試技を計測するまで行った．試技はデジタルビデオカメラ（DCR-TRV1；ソニー社）を用い，撮影速度は毎秒 60 コマとし，解析は ImageJ1.51 を使用した．着地動作時における上前腸骨棘と足関節中心を結ぶ線分からの膝関節中心まで距離の最大値より，初接地時の距離を引いた数値を脛骨長で補正し，5 回の測定で得た数値の平均値を膝関節内方変位量とした．

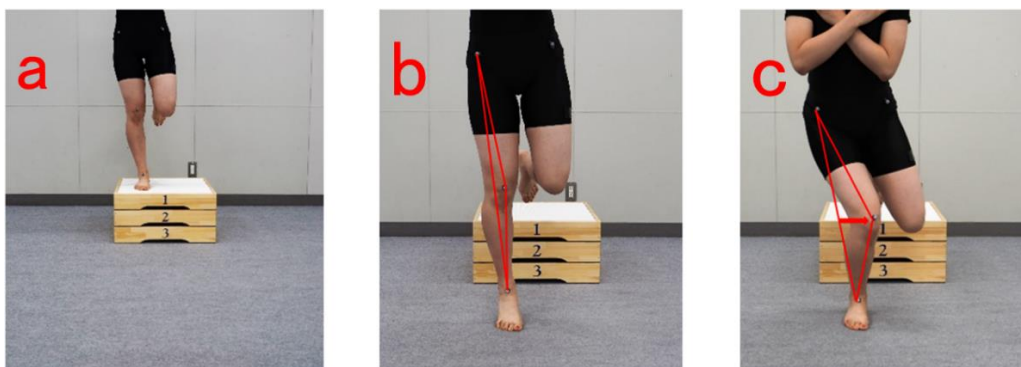


Fig. 2. 2. Knee medial displacement

a) Start position b) Initial contact c) Max value

2. 2. 3. 統計学的解析

統計学的解析に関し、各股関節角度での外転筋力と片脚着地時の膝関節内方変位量との相関、および Q-angle、股関節内旋角度と膝関節内方偏位量との相関には Pearson の相関係数を用いた。また動的 T テスト陽性群と陰性群の股関節外転最大トルクおよび膝内方変位量の比較に関しては対応のない t 検定を用いた。なお、統計解析には SPSS20.0J for Windows を使用し、有意水準は 5%として検定した。

2. 3. 結果

● 股関節外転最大トルク（体重比）と膝関節内方変位量との関係について

➤ 股関節中間位（Fig. 2.3）

股関節中間位での股関節外転最大トルク（体重比）と膝関節内方変位量との間で、有意な強い負の相関が認められた ($r = -0.923$, $P < 0.01$, $n = 30$).

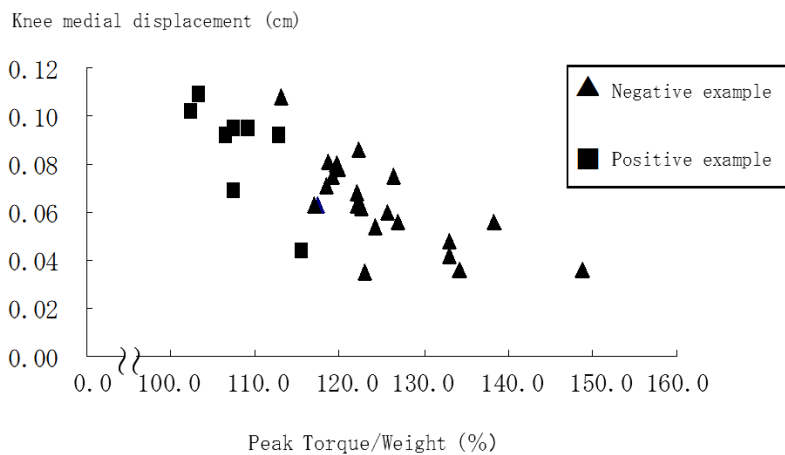


Fig. 2.3. Correlation between hip abductor muscular strength (intermediate position) and knee medial displacement

➤ 股関節 30° 屈曲位（Fig. 2.4）

股関節 30° 屈曲位での股関節外転最大トルク（体重比）と膝関節内方変位量との間で、有意な負の相関が認められた ($r = -0.854$, $P < 0.01$, $n = 30$).

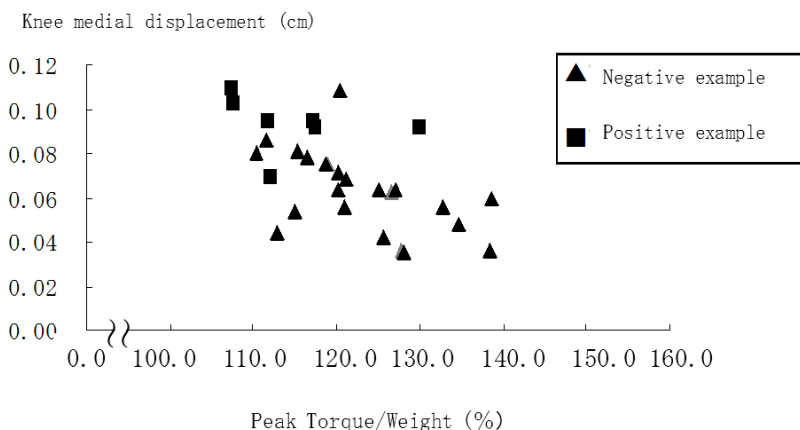


Fig. 2.4. Correlation between hip abductor muscular strength (30° flexion position) and knee medial displacement

- Q-Angle と膝関節内方変位量との関係について (Fig. 2.5)

静的アライメントである Q-angle と膝関節内方変位量との間に、相関関係は認められなかった ($r = -0.213$, $P < 0.058$, $n = 30$).

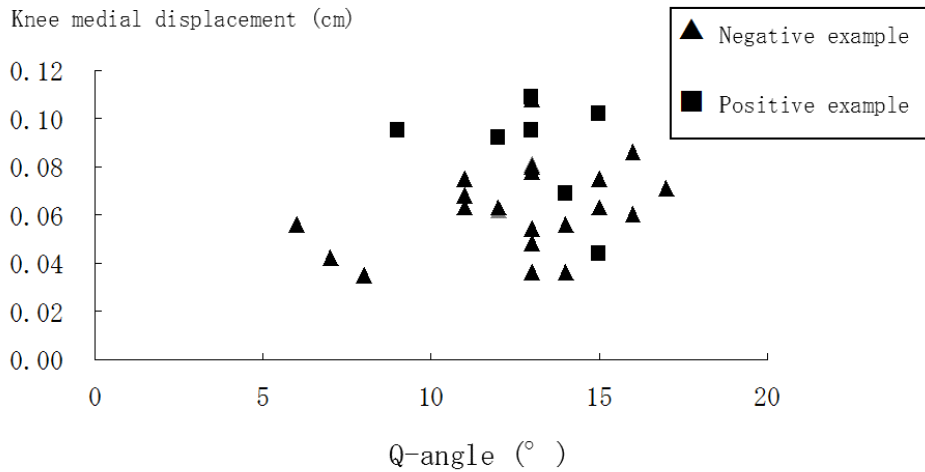


Fig. 2.5. Correlation between static alignment (Q-angle) and knee medial displacement

- 股関節内旋角度と膝関節内方変位量との関係について (Fig. 2.6)

静的アライメントである股関節内旋角度と膝関節内方変位量との間に、相関関係は認められなかった ($r = 0.242$, $P < 0.036$, $n = 30$).

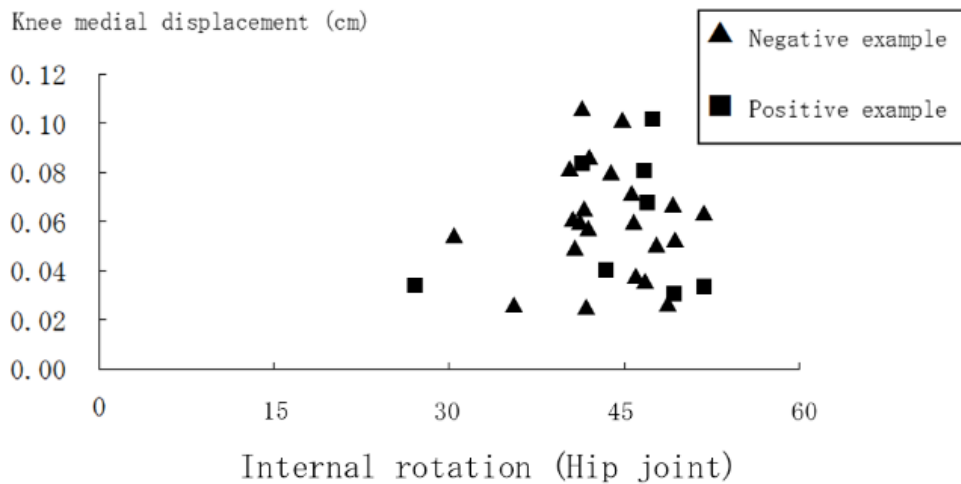


Fig. 2.6. Correlation between static alignment (Internal rotation of hip joint) and knee medial displacement

● 動的 T テスト陽性群と陰性群の比較 (Table 2.1)

測定肢 30 例のうち 8 例が動的 T テスト陽性 (図中■で記載) であり, 22 例が陰性 (図中▲で記載) となった. 測定日を変えた 2 回の測定で, 異なる結果となる例は認められなかった. 陽性例は陰性例に比して, 片脚着地時の膝関節内方変位量が股関節中間位および 30° 屈曲位ともに有意に増し ($P < 0.05$), また股関節最大トルクに関しても, 股関節中間位および 30° 屈曲位ともに有意に低下した ($P < 0.05$).

		Positive examples (n = 8)	Negative examples (n = 22)	P Value
Hip abduction	Intermediate	125.9±14.1	148.5±15.9	0.039
muscle strength (%)	30° flexion	139.8±10.9	154.1±23.5	0.028
Knee medial displacement (cm)		0.09±0.03	0.06±0.05	0.048

Table 2.1. Comparison between positive and negative examples of Dynamic Trendelenburg (mean ± SD)

2. 4. 考察

非接触型 ACL 損傷の外因性要因として片脚着地動作や急激な踏み込みやカッティング動作、膝関節伸展位での急停止などが考えられるが、Huston ら¹⁶⁷⁾は片脚着地動作による受傷が39%と最も多いと報告した。さらに、三木ら^{164,165)}はビデオテープ解析によって得られた、ACL 損傷時の膝外反・下腿外旋位による着地動作を実験的に再現し、膝関節に働く膝関節伸展・外反・下腿外旋トルクを三次元動作解析により算出し、膝外反・下腿外旋位での ACL 損傷の危険性を報告した。また Huston ら^{134,160)}は、片脚スクワット時に股関節周囲筋群の筋力が低下していれば、膝関節屈曲時に膝外反に作用し、ACL 損傷の危険性が増すと述べている。

そこで本研究では、女子バスケットボール選手の非接触型 ACL 損傷において、最も多い受傷機転とされる片脚着地動作に着目し、股関節外転筋力と膝関節内方変位量との関係を分析した。その結果、股関節外転筋力と片脚着地動作時の膝関節内方変位量との間に有意な強い負の相関が認められた。つまり片脚着地動作に、股関節中間位および股関節 30° 屈曲位での股関節外転筋力が低値を示すと膝関節内方変位量が高値となり、股関節外転筋力が膝関節アライメントに影響を与える可能性がある。これにより股関節外転筋力は、knee-in 姿勢の回避に重要な因子であることが示唆された。また、動的 T テスト陽性群は陰性群に比べ有意に股関節外転最大トルクが低値を示し、片脚着地動作時の膝関節内方変位量が高値を示していた。股関節周囲の筋力低下は、膝関節を安定化させ、不意な外力から保護するという面から、大きなマイナス要因となる。Claiborne ら¹⁶¹⁾は片脚スクワット時に、股関節周囲筋、特に股関節外転筋力が前額面上での膝関節アライメントに大きな影響を与えると報告した。Zeller ら^{166,167)}は、片脚スクワット時に股関節を内転方向へ誘導しないために、股関節周囲筋群、特に中殿筋を中心とした股関節外転筋力の強化が必要であり、膝関節アライメントの保持にも重要であると報告している。片脚着地動作での前額面上のアライメントには股関節外転筋力が関与し、最大トルクが小さいと片脚着地動作時の膝外反を高値へと導く可能性が考えられる。つまり股関節外転最大トルクが低値を示す場合、非接触型 ACL 損傷時の発生機序と考えられる膝関節内方変位量が高値となり、またその危険因子発見の指標として、簡便でスポーツ現場での有用性の高い動的 T テストとの相関も高い可能性が示唆された。

動的アライメント評価法である動的 T テストに比べ、静的アライメントである Q-angle および股関節内旋角度と、膝関節内方変位量との有意な相関は認められなかった。Q-angle の増大は、大腿四頭筋の収縮による膝蓋骨の外側への牽引力増加をもたらし、ACL 損傷の危険肢位である膝関節外反位を増大させると考えられている^{167,168)}。しかしながら、Pantano ら¹⁶⁹⁾の報告では ACL 損傷患者と非損傷患者間での Q-angle に有意差は認められなかった。また、Hewett¹⁷⁰⁾は、ACL 損傷者の着地時膝平均外反角度に着目した研究の中で、静的アライメント

である股関節内旋角度と外傷の相関は認められないと報告している。加えて三木ら¹⁶⁵⁾は、アライメントコントロールが身体局所のストレス軽減とスポーツ障害の治療・予防に有用であると報告しているが、本研究でも、2種類の静的アライメントと股関節外転筋力との相関は認められなかった。つまり、静的アライメントでは動的な片脚着地動作時の膝内方変位量を予測することは難しく、ACL 損傷の予防を目的としたスポーツ動作の評価を行う際には、股関節周囲筋力に加え、動的な股関節アライメントにも着目する必要があると考える。

本研究ではスポーツの現場での適用を考慮し、デジタルビデオカメラを用いた画像解析を行ったため、前額面上での2次元動作解析のみを行った。従って、膝内方変位は純粋な膝外反を反映するものではない。外反時に発生する股関節回旋運動や体幹の回旋動作など、より精度の高い動作解析が必須の課題と思われる。しかし小笠原ら¹⁷¹⁾は、健常女性を対象に、前額面膝関節偏位指標 (FKD) を用い、31cm 台からの片脚着地動作を二次元画像で算出し三次元動作解析と比較した結果、膝関節外反や股関節内転に関する妥当性を明らかにしている。本研究の結果から、股関節外転筋力が片脚着地動作時の膝関節アライメントに及ぼす影響について実証できたことの意味は大きい。スポーツの現場において、膝外反の強い選手に股関節外転筋力トレーニングを行うことにより、非接触型 ACL 損傷の予防へと繋がる可能性があり、外傷予防の見地からも本研究の結果は今後有用になると考える。

今後さらに、股関節周囲筋力と膝内方変位量との相関を検討していくにあたり、本結果が今後の ACL 損傷予防研究の基礎データになり得ると考えている。そして、これら効果判定の積み重ねが、更なる非接触型 ACL 損傷の減少へと繋がると思う。

2. 5. 結論

本研究の目的は、股関節外転筋力が片脚着地時の膝のアライメントに及ぼす影響を検証することである。股関節中間位（屈曲 0 度）および股関節屈曲 30 度での股関節外転筋力の最大トルクが高値を示すほど、片脚着地時の膝外反方向への変位が低値を示した。また動的トレンドレムブルグテストでは、陽性群が着地時において膝外反を、陰性群に比して有意に引き起こしていることが示された。これらの結果により、女性バスケットボール選手は股関節外転筋力を向上させることで、片脚着地時に適切な膝のアライメントを維持できる可能性が示唆された。非接触 ACL 傷害の予防のためには、股関節の制御が重要な課題と考えられる。

3. 片脚着地時における矢状面上の下肢関節戦略

3. 1. 諸言

膝前十字靭帯（以下：ACL）損傷は、着地動作などの急激な減速や方向転換動作などで頻回に発生し^{29, 43, 130, 133}、受傷したアスリートの多くはスポーツ復帰のために再建術が必要となる。スポーツ復帰までには半年から1年と長期離脱を強いられるため⁷⁸、近年ではその予防の重要性が唱えられ、ACL損傷の受傷メカニズムに関する研究が多く行われてきている^{97, 114, 172}。

ACL損傷は接触型損傷、非接触型損傷の2つのタイプに分類することができる。接触型損傷は、ラグビーやアメリカンフットボールのようなコンタクトスポーツにおける接触により、直接または間接的に靭帯にストレスが加わることにより損傷が引き起こされる。非接触型損傷はバスケットボールやサッカーの競技中の着地動作時に発生する急激な減速動作などの競技動作中の慣性力や筋力により損傷が引き起こされる。非接触型損傷と接触型損傷の発生比率は7対3であることが本邦および諸外国にて報告^{29, 43, 133}されており、ACL損傷の予防には、非接触型損傷に焦点を当てることが重要だと考えられる。非接触型損傷の受傷機転としては、着地動作での受傷は約25%もの大きな割合を占めることが報告されている^{29, 43, 133}。身体を制動する動作はスポーツ動作において必須のものであり、特に着地動作はバスケットボールやバレーボールにおいて頻繁に行われている動作である。

着地動作時の非接触型ACL損傷のリスクファクターとして片脚着地が考えられ、片脚着地時の床反力については、女性において有意に男性より大きかったと報告されている^{150, 173}。Sheehanらは、非接触型ACL損傷発生時のビデオ解析を行い、矢状面での着地姿勢を検証した結果、身体重心と仮定されたポイントが、接地足よりも後方にある時に非接触型ACL損傷が発生すると結論付けている¹⁷⁴。着地時に自身の姿勢を十分に制御された状態で着地した場合、重心が足部中心付近上に乗る、非接触型ACL損傷は発生しにくいと考える。Sheehanらは以上の点から、ACL損傷時には床反力の吸収が効率的に行われず、脛骨大腿骨間力の鉛直成分は大きくなったと述べている。またMeyerらは屍体を用い、脛骨長軸に対して平行な圧縮力をACLが断裂するまで加えるという実験を行った。その結果、圧縮力が上昇していくと、脛骨が大腿骨に対して前方へ移動して行く、いわゆる脛骨前方剪断力が大きくなり、また、脛骨は大腿骨に対して内旋方向へ移動し、さらに圧縮力を加えACLが断裂した瞬間から、脛骨は外旋方向へ移動すると述べている¹⁷⁵。Cerulliらは、実際に人間のACLに歪計を取り付け、前方へジャンプ着地をした際の床反力を計測した研究を行った。着地時の垂直床反力成分が最大値になったのとはほぼ同時に、ACLの歪度合も最大となったと報告している¹³⁸。この

報告からも、非接触型 ACL 損傷時に生じる唯一の外力である床反力が着地時に大きくなり、ACL に多大な影響を与えているのではないかと考えられる。着地時の床反力が関節内の負荷に大きな要因となり、非接触型 ACL 損傷の一因となっていることが明確である。

これらのことから、矢状面の身体位置は非接触型 ACL 損傷のメカニズムに密接に関わっていると考えられる。そこで本研究の目的は、非接触型損傷時の唯一の外力となる垂直床反力成分を、低値に抑える効率的な片脚着地動作を行うには、どのような下肢関節モーメントの発生が必要なのか、三次元動作解析装置を用いて検証することである。

3. 2. 方法

3. 2. 1. 対象

対象者は大学女子バスケットボールチームに所属している選手 30 名（年齢 19.5 ± 3.3 歳、身長 165.7 ± 13.2 cm、体重 56.8 ± 8.9 kg、競技歴 8.3 ± 4.3 年）とした。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。対象者は全員、過去に日本バスケットボール協会が主催する全国大会に出場歴を有する選手であり、一定の競技レベルを有している。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、本研究は新潟医療福祉大学倫理委員会（審査番号 17798-170412）の承認を得て実施した。

3. 2. 2. 実験手順およびデータ収集

対象には高密着タイツを装着させ、着用シューズの特性を排除するため、全対象者に同メーカー・同デザインのバスケットボールシューズを履かせた。14mm 径の反射マーカを全身の 40 点に貼付し (Fig. 3.1), さらに動作を詳細に分析する次の部位にはマーカを多く貼付することによって剛体としての安定性を高める工夫を図った：骨盤 5 点（上前腸骨棘と上後腸骨棘, 仙骨）；大腿部 5 点（大転子と大腿骨内外側上顆, 大腿中央部）；下腿部 5 点（脛骨粗面と脛骨内外果, 脛骨中央部）；足部 3 点（第 3・第 5 中足骨, 踵骨）。なお、マーカの貼付は特定の検者 1 名によって行われた。

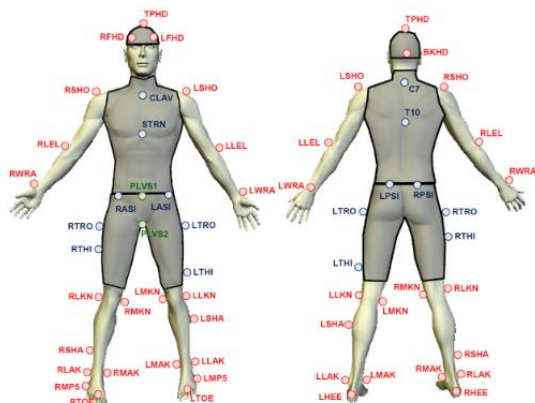


Fig. 3.1. Reflective marker attachment position

分析する試技は、片脚着地での立ち幅跳びとした。跳躍距離の設定として、文部科学省が推奨する新体力テストの方法¹⁹⁴⁾に習い、踏み切り線に両脚のつま先を合わせ、両手の動きは制限せずに最大努力で前方への立ち幅跳びを試行した。2回の試行を行い、最大距離80%を算出し、片脚立ち幅跳びの跳躍距離とした。その距離を床反力計の中心位置から測定し、課題動作の開始位置とした。開始位置から両脚で踏み切り、床反力計上に片脚着地を行った。Salmonらは、非接触型ACL損傷は左膝に多いと報告し¹⁷⁶⁾、またCerulliらは上肢との関連動作で、利き手と反対側の下肢が有意に損傷すると報告している¹³⁷⁾ことから、非接触型ACL損傷の受傷率が高い可能性がある左側を測定肢位とし、10回の片脚着地を試行した(Fig. 3.2)。

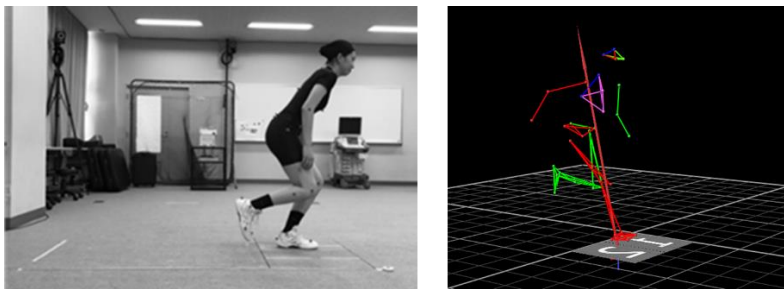


Fig. 3.2. Standing long jump in Single-leg landing

動作の3次元測定にはモーション・キャプチャー・システム VICON (Oxford metrics 社製: サンプル周期 120Hz)、床反力の計測にはフォースプレート (OR6-6-200, AMTI 社製: サンプル周期 1000Hz) を使用した。モーション・キャプチャー・システムによる反射マーカークの3次元位置の検出残差は0.4mm以内であった。得られた反射マーカークの3次元位置データは、カットオフ周波数20Hzの4次バターワースフィルタによって平滑化した。解析ソフトはBody builder (VICON Motion system 社製) を用い、床反力と矢状面上の下肢関節モーメントを算出した。

3.2.3. 解析方法

動力学的分析項目として、下肢関節モーメントは逆動力学的手法^{177~180)}を用いて推定した。推定過程で必須要素である慣性モーメントは、阿江の方法¹⁸¹⁾の女性アスリートの係数を用いた。推定した関節モーメントは、対象の体重と身長で除して標準化した(単位はHTBW)。なお、本書で述べる関節モーメントは、外力によって関節を回転させるモーメントに対抗しようとして関節内部で反対方向に釣り合うモーメントと定義した。従って、関節モーメントの向きは、今回定義した関節角度の方向と逆転して表現される。各関節では、股関節伸展モー

ント (+) 屈曲モーメント (-), 膝関節伸展モーメント (+) 屈曲モーメント (-), 足関節底屈モーメント (+) 背屈モーメント (-) で表した (Fig. 3.3). フォースプレートから得られた床反力は, 3方向の合成で表した. 各成分は, 前後成分: 前方 (+) 後方 (-), 側方: 着地脚から見て外側 (+) 内側 (-), 垂直: 床面上方 (+) 下方 (-) とした. 床反力値は, 対象の体重で除して標準化した (単位は N/kg). 分析区間は, 初期接地 (Initial Contact : IC) から 0.1 秒間とし, 解析項目は垂直床反力成分最大値, および垂直床反力成分最大値の発生時における矢状面上の下肢関節モーメントを, 10 回の測定試技の平均値を代表値として算出した.

統計学的解析に関し, 各下肢関節モーメントと床反力最大値との相関には Pearson の相関係数を用いた. なお, 統計学的分析には SPSS for Windows Ver. 20 (IBM Corp, Armonk, NY, USA) を使用し, 有意水準はいずれも 5% とし検定した.

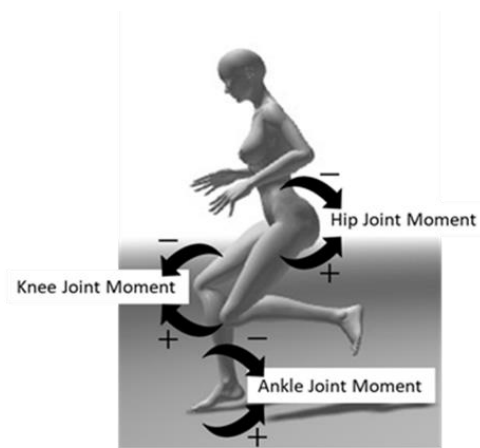


Fig. 3.3. Measurement moment of each joint

3. 3. 結果

- 股関節モーメントと床反力最大値との相関関係 (Fig. 3. 4)

矢状面上の股関節モーメントと床反力最大値との間で、弱い相関関係が認められた。

($r = 0.242$, $P=0.036$, $n = 30$)

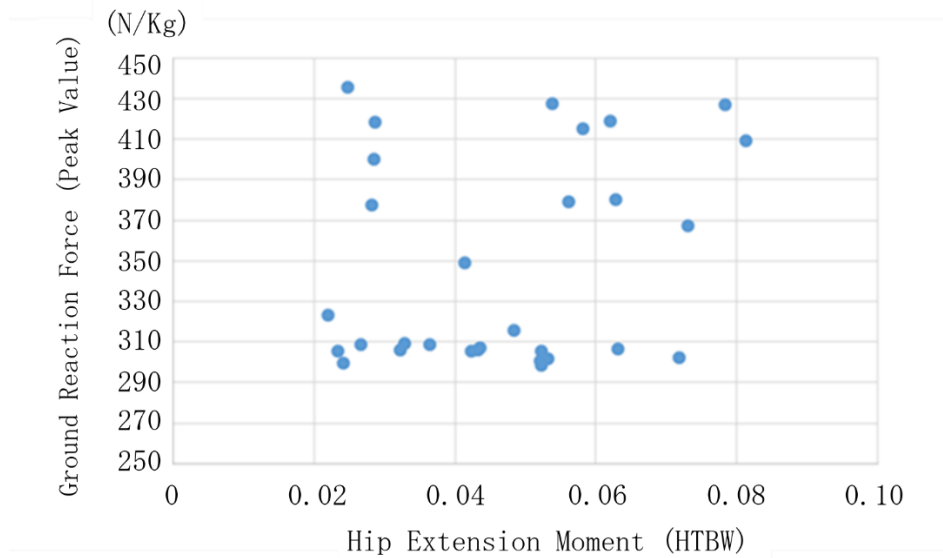


Fig. 3. 4. Correlation between the hip moment and the peak ground reaction force

- 膝関節モーメントと床反力最大値との相関関係 (Fig. 3. 5)

矢状面上の膝関節モーメントと床反力最大値との間で、中程度の相関関係が認められた。

($r = 0.528$, $P=0.017$, $n = 30$)

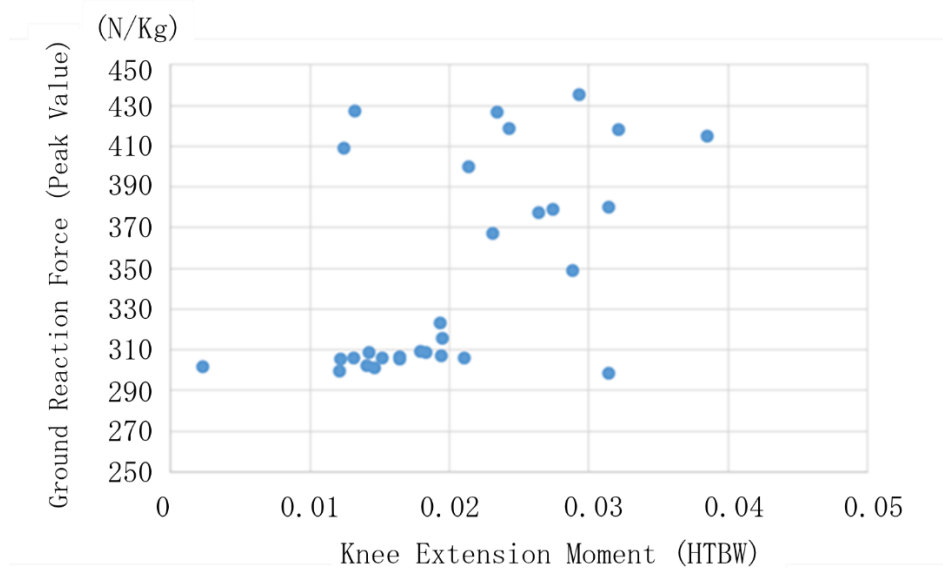


Fig. 3. 5. Correlation between the knee moment and the peak ground reaction force

● 足関節モーメントと床反力最大値との相関関係 (Fig. 3.6)

矢状面上の足関節モーメントと床反力最大値との間で、強い負の相関関係が認められた。

($r = -0.863$, $P < 0.001$, $n = 30$)

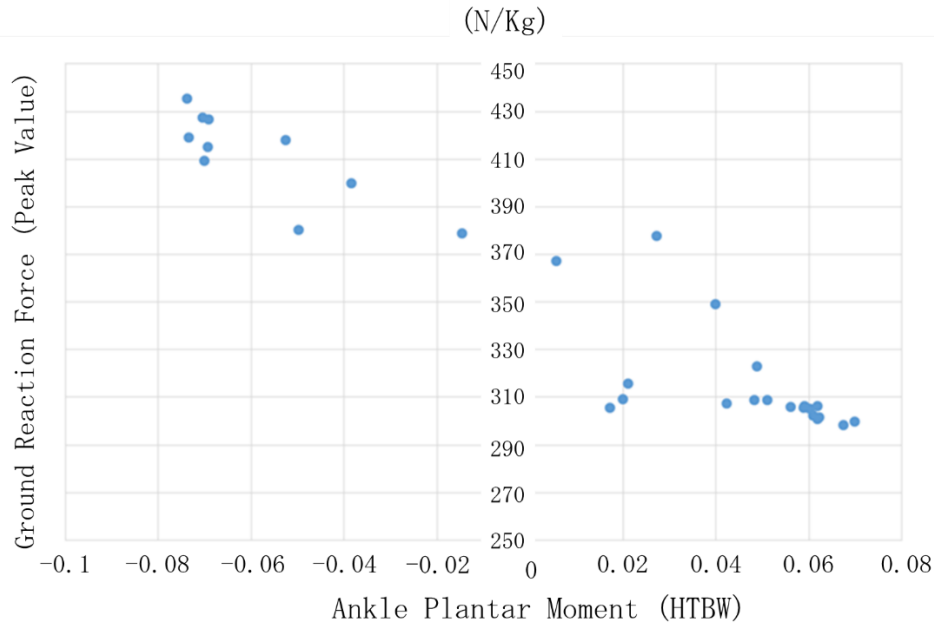


Fig. 3.6. Correlation between the ankle moment and the peak ground reaction force

● 各測定値の平均 (Table 3.1)

Ground Reaction Force (Peak Value)	347.19 ± 49.71 (N/Kg)
Reach Time of Peak Ground Reaction Force	0.48 ± 0.18 (Sec)
Hip Extension Moment	0.026 ± 0.009 (HTBW)
Knee Extension Moment	0.049 ± 0.015 (HTBW)
Ankle Plantar-flexion Moment	0.012 ± 0.053 (HTBW)
Knee Valgus Moment	0.015 ± 0.003 (HTBW)

Table 3.1. Means of each measured value

3. 4. 考察

Sheehan らは、非接触型 ACL 損傷発生時、身体重心と仮定されたポイントが地面に接地した足部より後方に位置し、その結果、床反力値は高値を示し、損傷が生じた瞬間と思われるタイミングで最大床反力値が生じると推察している¹⁷⁴⁾。また Hewett らの ACL 損傷を前向き調査した研究では、女性アスリート 205 名中 9 名に ACL 損傷が発生し、その運動学的特徴として着地動作のイニシャルコンタクトでの最大床反力が大きいと述べている¹⁸²⁾。本研究では、床反力が非接触型 ACL 損傷のリスクファクターとして一定の見解を得ていることから、矢状面上の関節モーメントが片脚着地時の床反力値に影響を及ぼし、高値を示す試技では大腿脛骨間力も高値となり ACL 損傷を誘発していると予測し、その妥当性を検証した。

課題における体重比における床反力値は全体平均で 347.192%であり、類似した計測環境設定での前方へのドロップジャンプ着地における先行研究の結果とほぼ同様の値であった。また床反力最大値までの時間は全体平均で 48.3msec であり、実際の非接触型 ACL 損傷場面の動画を用いたモデル解析による ACL 損傷のタイミングとほぼ一致している。非接触型 ACL 損傷は床反力最大値が高値を示し、また最大値の発生まで 50msec 以内であることが先行研究からも明らかになっていることから、本研究の結果は先行研究と同様に非接触型 ACL 損傷のリスクファクターとしての下肢関節戦略を評価しうるデータであると言える。

本研究の検証結果における最も重要な所見は、矢状面上の足関節モーメントが、片脚着地時の床反力値と強い相関関係を示していることである。この所見から、足関節の矢状面上の動きを効率的に利用して床反力を吸収することが、着地時の床反力値を低値にするために必要であることが示唆された。また足関節底屈モーメントがマイナスの値を示している試技は床反力が高値を示しており、この原因として着地時の重心位置が後方に移動していることが予想される。これは床反力をリスクファクターと考える本研究の見解と、先行研究で述べられている非接触型 ACL 損傷好発肢位となる³¹⁾見解が一致している。片脚着地動作では、足関節底屈モーメントを効率的に働かせ着地を行うことで床反力を低値に抑えることができ、接触型 ACL 損傷の予防に繋がる可能性が示唆された。

片脚着地時の膝関節は、下腿の前傾に伴い前方に移動することから、膝関節伸展モーメントが高値を示す試技では脛骨前方剪断力が高値になると予測され、ACL 損傷のリスクを高めることが考えられる。また着地時、身体重心が後方へ、足関節背屈モーメントと股関節伸展モーメントが発生している際、膝関節伸展モーメントは高値を示し、同時に脛骨前方移動量も高値を示す。膝関節伸展モーメントと床反力値との間には相関関係も認められることから、足関節底屈モーメントを発生させ、膝関節伸展モーメントを低値に抑えることも、床反力値を低値に抑えることができる可能性が高い。

過去には着地衝撃吸収能の評価として、床反力最大値を減らす、あるいは最大値までの時間を遅延させる着地方法に関する検討がされてきた。しかしながら、そのような着地動作を行う場合、下肢関節を深屈曲させるソフトランディングとなり、競技中に行うことは競技パフォーマンスの低下に繋がる可能性が高く、現実的に不可能であると考えられる。本研究により、足関節底屈モーメントが高値を示す着地動作では床反力が低値を示しており、ACL 損傷予防に向けた着地動作指導の新たな基礎データとなり得る。

本研究の問題点として、床反力パラメーターが ACL の歪みに及ぼす影響は不明であることや、非接触型 ACL 損傷における Notch Width などの解剖学的特徴などのリスクファクターによる影響を考慮していないことが挙げられる。また、床反力最大値や最大値までの時間は着地時の下肢・体幹等の関節角度や筋活動の影響を受けるが、それらを検討していないことが計測上の問題点として挙げられる。加えて、Hewett らは着地時の膝外反モーメントが非接触型 ACL 損傷のリスクファクターであると述べており⁷⁹⁾、矢状面上のみならず前額面上の着地動作の検討も必要であり、今後はさらに、運動学的、運動力学的特徴について検討する必要がある。

3. 5. 結論

非接触型 ACL 損傷が頻回する片脚着地動作時の下肢関節戦略を、床反力を指標として検討した。足関節底屈モーメントが高値を示す着地動作では床反力が低値を示す、負の相関関係が認められた。また膝関節伸展モーメントと床反力との間には、正の相関関係が認められ、非接触型 ACL 損傷のリスクファクターとして一定の見解を得ている脛骨前方剪断力に、床反力が影響を与えていることが示された。これらの結果により、足関節底屈モーメントを発生させ、膝関節伸展モーメントを低値に抑えることが、床反力値を低値に抑えることができる可能性が高く、ACL 損傷予防に向けた下肢関節戦略を踏まえた着地動作指導の新たな基礎データとなり得ると考える。

4. 足部接地の違いが身体重心位置と垂直床反力成分に及ぼす影響

4. 1. 諸言

近年、スポーツ外傷のリハビリテーションでは、危険な姿勢を回避する動作習得が重要視され、外傷予防プログラムについての研究が進められてきている^{183,184}。その中で代表的な外傷として、膝前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament : 以下 ACL) 損傷が挙げられる。ACL 損傷は、他者との接触に伴って受傷する接触型損傷と、接触を伴わずに受傷する非接触型損傷に分けられ、非接触型損傷は ACL 損傷全体の約 70% を占める^{31,185}。また、非接触型 ACL 損傷は、男性に比べ女性が 2~8 倍多い^{29,186~188}と報告されている。一般的に、ACL 損傷後は、競技復帰を目的とした ACL 再建術を行うため、長期間のリハビリテーションが必要となる。再建術後のスポーツ復帰は、術後 6 ヶ月以上を要し、本格復帰には 9 ヶ月以降を推奨されている¹⁸⁹。ACL 損傷は、競技に参加できない時期が生じることや、高額な手術費が必要となり、経済的な損失も生じるため、ACL 損傷予防は重要な課題である。

非接触型 ACL 損傷は、スポーツ活動中に多く受傷⁷²していることが報告されている。また、種目別では、バスケットボールが 41.0% と最多であり¹⁹⁰、これは ACL 損傷の受傷機転である着地動作、方向転換時のカッティング動作、ストップ動作¹⁸³などの急激な減速動作^{34,71,186}を多く行うことが原因として考えられる。さらに、Boden らは、アンケート調査およびビデオ解析を行い、ストップ動作やカッティング動作、両脚着地動作などの中でも、片脚着地動作が受傷機転として多いと報告した³¹。

非接触型損傷時に加わる唯一の外力は、床反力であると報告されており¹⁹¹、垂直・前後・左右の床反力成分のうち、特に垂直床反力成分は、ACL 損傷の危険因子であると考えられている¹⁹¹。Cerulli は、実際に生体の ACL に歪計を取りつけ、前方へジャンプ着地を行わせた研究を行った結果、着地時の垂直床反力成分と ACL の歪度合は、ほぼ同時期に最大となったと報告している¹³⁷。また Yu らが行った前方方向へジャンプストップした研究では、垂直床反力成分の最大値は、膝関節前方剪断力と有意な正の相関を示した¹⁹³。加えて、女性は男性と比較して、着地時の膝関節前方剪断力と垂直床反力成分において有意に高値を示す¹⁹³と報告されている。これらのことから、非接触型 ACL 損傷時に垂直床反力成分が増加し、ACL に影響を与えていることが考えられる。また、非接触型 ACL 損傷受傷時のビデオ解析を行った研究では、矢状面上の姿勢が影響を与えていると報告しており、更にもその際、前足部接地ではなく、足底部で接地していることが多いと報告している¹⁹⁸。また、身体重心 (Center of Gravity : 以下 COG) が接地した足よりも後方にあると報告されている¹⁷⁴。つまり、足底接地で着地し、COG が後方にある時に垂直床反力成分が増加し、非接触型 ACL

損傷に繋がる可能性が高いと考えられる。

そこで本研究の目的は、女性を対象とし、片脚着地動作の足部接地の違いに着目し、COGの位置と垂直床反力成分の違いを検証することとした。また、ACL 損傷者をリスク群とし、健常者と比較することで、ACL 損傷危険因子を検討し、ACL 損傷予防の一助として役立てたい。

4. 2. 方法

4. 2. 1. 対象

対象者は、バスケットボール競技歴がある大学生とし、ACL 損傷の既往があり現在競技復帰している女性（ACL 群）6 名（身長：164.5 ± 7.6 cm，体重：63.2 ± 13.2 kg）と，下肢に外科的手術の既往がない健常女性（健常群）6 名（身長：166.8 ± 5.42 cm，体重：58.9 ± 4.19 kg）とした．全ての対象者に対し，事前に本研究の目的，方法，個人情報の取り扱いに関して，書面と口頭により十分説明し同意を得た．また，本研究は新潟医療福祉大学倫理委員会（審査番号 17798-170412）の承認を得て実施した．

4. 2. 2. 使用機器

使用機器は，三次元動作解析装置（VICON：Oxford metrics 社製：サンプリング周期 120Hz），および床反力計（OR6-6-200，AMTI 社製：サンプリング周期 1000Hz）2 枚を使用して行った．14mm 径の赤外線反射マーカーを，対象者の全身 38 点，頭頂部，後頭隆起，頭頂部より右方・左方，鎖骨切痕，剣状突起，C7，C10，肩峰，上腕骨外側上顆，橈骨，剣状突起，上前腸骨棘，上後腸骨棘，大転子，大腿部，大腿骨外側上顆，大腿骨内側上顆，下腿部，外果，内果，第 2 中足骨頭，第 5 中足骨頭，踵骨に貼付した（Fig. 4.1）．モーション・キャプチャー・システムによる反射マーカーの 3 次元位置の検出残差は 0.4mm 以内であった．得られた反射マーカーの 3 次元位置データは，カットオフ周波数 20Hz の 4 次バターワースフィルタによって平滑化した．解析ソフトは Body builder（VICON Motion system 社製）を用い VICON から得られたデータにより，重心位置と垂直床反力成分，足部のマーカー位置を算出した．また，対象者には着用シューズの特性を排除するため，同メーカー・同デザインのシューズを使用した．



Fig. 4.1. Marker pasting position

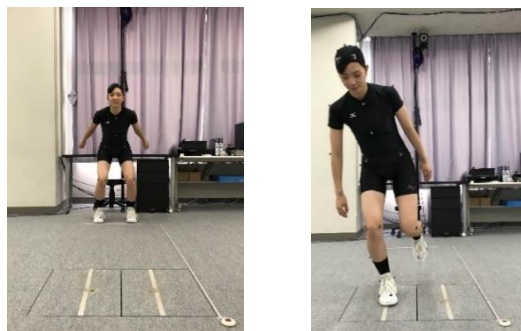


Fig. 4.2. Task action (left: start position, right: landing)

4. 2. 3. 課題動作

試技開始位置から両脚で踏み切り、床反力計上に片脚で着地させる動作を、左右5回ずつ計10回撮影した (Fig. 4.2)。片脚着地動作を行うにあたり、対象者の安全性を考慮するため、片脚着地動前に跳躍距離の設定を行った。文部科学省の新体力テスト実施要項¹⁹⁴⁾に沿い、立ち幅跳びを計測し、その数値の80%の距離を、本実験の跳躍距離とした。

4. 2. 4. 解析

解析区間は、初期接地 (Initial Contact : 以下 IC) から 0.1 秒間とした。解析項目は、解析区間内の床反力垂直成分最大値 (体重で除し正規化) と出現時間 (IC 時から計測した時間 : 以下 Peak-Time) , および IC 時の足部接地の分類を Body Builder を用いて算出した。足部接地の分類の区別を行うため、Allison ら¹⁹⁵⁾の研究に準じて第2中足骨頭・第5中足骨頭・第5中足骨頭と水平な位置の踵骨に、シューズの上から赤外線反射マーカーを貼付した。これらの赤外線反射マーカーを用いて、足部接地時の床面との角度を算出し、足底接地・踵接地の分類を行った。

4. 2. 5. 統計処理

統計処理は、足底接地群と踵接地群の2群間、ACL 群と健常群の2群間のそれぞれに対し、床反力垂直成分最大値および床反力垂直成分の Peak-Time に対し、正規性の検定を行った。正規性がない場合は Mann-Whitney 検定、正規性があり母分散が等しい場合は Student の t 検定、正規性があり母分散が異なる場合は Welch の t 検定を用いた。いずれも有意水準は5%とした。

4. 3. 結果

足底接地は 13 試技，踵接地は 105 試技認められた。

1. 垂直床反力成分最大値

足底接地群は踵接地群に比べて有意に高値を示した (Fig. 4.4) 。また，足底接地群内の比較において，ACL 群は健常群に比べ有意に高値を示した (Fig. 4.5) 。

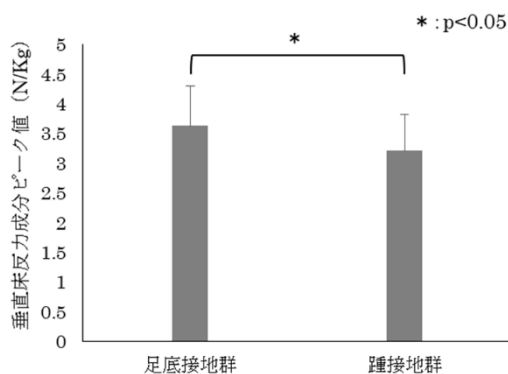


Fig. 4.4. Vertical ground reaction force peak value due to difference in foot contact

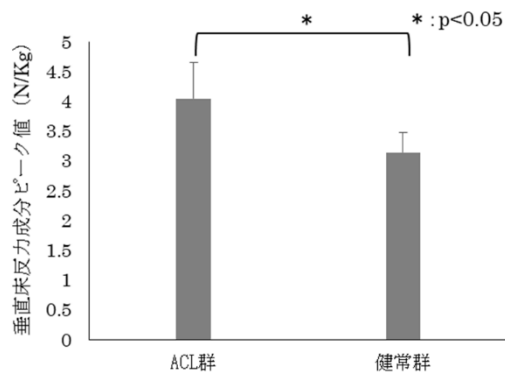


Fig. 4.5. Vertical Ground reaction force peak value in foot contact group

2. COP から COG までの X 軸座標の距離

足底接地群は踵接地群に比べて有意に高値を示した (Fig. 4.6) .

足底接地を行った健常群は ACL 群に比べ有意に高値を示した (Fig. 4.7) .

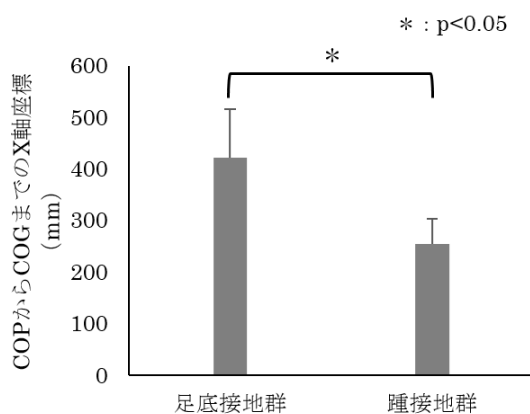


Fig. 4.6. Distance of X axis coordinate from COP to COG due to difference in foot contact

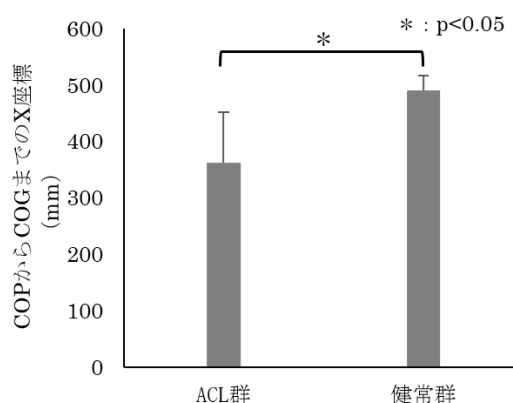


Fig. 4.7. Distance of X axis coordinate from COP to COG due to difference in injury history

3. 垂直床反力成分の Peak-Time

足底接地群と踵接地群で、有意な差は認められなかった (Fig. 4.8) .

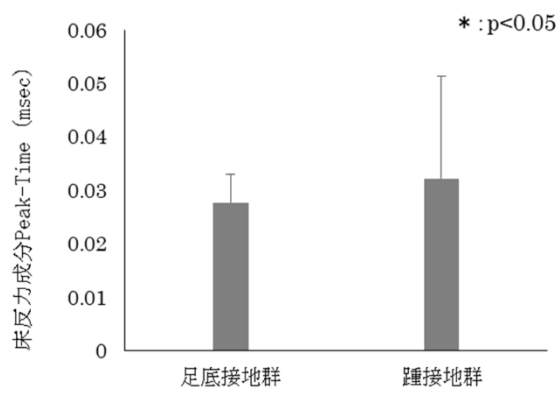


Fig.4.6. Vertical ground reaction force Peak-Time value due to difference in foot contact

4. 4. 考察

非接触型 ACL 損傷は女性に多く^{29, 186~188)}, ジャンプ着地動作や急激な減速動作時に受傷している^{34, 71, 186)}. 非接触型損傷時に唯一加わる外力は床反力¹⁹¹⁾であり, Cerulli らは着地時の垂直床反力成分と ACL の歪度合は, ほぼ同時に最大となった¹⁹²⁾と報告し, Sheehan らは, ACL 損傷受傷時の着地は, 足底部で接地していることが多い¹⁹⁸⁾と報告している. そこで本研究は, 三次元動作解析装置を用いて, 足部接地の違いに着目し, 片脚着地動作時における垂直床反力成分最大値と出現時間, および COP から COG までの X 軸座標距離の違いを検証することを目的とした. また, ACL 損傷既往を有する者をリスク群とし, 下肢に外科的手術歴を有さない健常群と比較することで, ACL 損傷の危険因子を検討することとした.

足底接地群は踵接地群に比して, 垂直床反力成分最大値が有意に高値を示した. 垂直床反力成分と ACL の歪度合が, ほぼ同時に最大となる¹⁹²⁾ことから, 足底接地を行うと ACL 歪度合が増加すると考えられる. また, Yu らは, 垂直床反力成分の最大値は, ACL の歪度合に関わる膝関節前方剪断力と有意な正の相関を示したと報告している¹⁹³⁾ことから, 足底接地を行い垂直床反力成分が増加すると, 膝関節前方剪断力が増加し, ACL に負担をかける着地方法であると考えられる. また, 同じ足底接地を行った対象者でも, ACL 群が健常群より, 垂直床反力成分で高値を示した. 先行研究より, ACL 再損傷率は約 10~24%であると報告されている^{197, 198)}ことから, 足底接地を行う動作特性のある ACL 群は, 垂直床反力成分を増加させ ACL 再損傷を引き起こす可能性が高いのではないかと考えられる.

IC 時の COP から COG までの X 軸座標の距離は, 足底接地群は踵接地群と比較すると, 有意に高値を示し, 足底接地群は, より後方に COG が位置していたと考えられる. 下河内らは, 上体を起こして足底接地を行うと垂直床反力成分は最大になる¹⁹⁸⁾と報告されていることから, COG が後方に位置することにより, 垂直床反力成分ピーク値が増加し, ACL に対する負担が増加すると考えられる.

垂直床反力成分が脛骨前方移動の引き金になっていることは ACL 損傷が非接触下で起こる事実からも明らかである¹⁹⁷⁾. Yu らは, 垂直床反力成分の最大値は, 膝関節前方剪断力と有意な正の相関を示したと報告し¹⁹¹⁾, また福井らは, COG が後方から前方へ移動する際, 脛骨前方移動が増加すると報告した¹⁹⁹⁾. さらに, Schmits らは, 片脚着地動作におけるエネルギー吸収には, 他の関節に比べ足関節が最も寄与する¹⁹⁹⁾述べている. これらのことから, 前方跳躍時に後方重心となり, 加えて足底接地を行うと, IC 時に足関節は底屈位となり, 垂直床反力成分は増加すると考えられる. そして, COG を前方へ移動させる際, 脛骨前方移動量は増加してしまい, ACL 損傷へと繋がってしまう可能性が考えられる. 着地動作で足関節を利用し, 着地時のエネルギー吸収を効率的に行うため踵接地を用いることで, 垂

直床反力成分は低値となり、脛骨前方移動量は減少すると考えられる。ACL 損傷予防プログラムのひとつとして、着地時に股関節・膝関節を深く屈曲すること¹⁸³⁾を指導していることが多いが、本研究の結果より、足関節にも注目をする必要がある可能性が示唆された。

Krosshaug らは、接地後 0.04 秒以内に ACL 損傷が発生している⁷¹⁾と報告している。本研究の結果は、垂直床反力成分 Peak-Time はほぼ 0.04 秒以内に出現しており、非接触型 ACL 損傷の危険因子を検討するに、十分に評価し得るデータであると言える。しかしながら、垂直床反力成分 Peak-Time に関しては、足底接地群と踵接地群の間で、有意な差は認められなかった。このことから、足部接地の違いは垂直床反力成分 Peak-Time に影響しないと考えられる。

以上のことから、片脚着地においては、COG を前方に位置した踵接地を行うことで、垂直床反力成分が低値となり、ACL 歪度合が減少する可能性が示唆された。また、着地時に足関節を利用し、効率的な衝撃吸収を行うことで、膝関節への負担を減少させ、ACL に加わる負担を抑えらる。今後の課題として、下肢の関節モーメントを測定し、各関節の貢献率を検討していく必要がある。

4. 4. 結論

本研究では、片脚着地動作時において足底接地を行うことで、床反力垂直成分ピーク値が高値となる可能性が示唆された。また、片脚着地時に足関節を利用し、効率的な衝撃吸収を行うことで、膝関節への負担を減少させ、ACLに加わる負担を抑えらる。今後の課題として、下肢の関節モーメントを測定し、各関節の寄与率を検討していく必要がある。

5. 結論

本論文の目的は、ACL 損傷予防の観点から、片脚着地時における下肢関節戦略の検討を目的とし、片脚着地動作中の膝関節外反および垂直床反力成分に関連する要因を明らかにするため、スポーツ外傷予防の4段階²⁰⁰⁾に準じて研究を進めた。スポーツ外傷予防の4段階とは、まずその外傷の発生頻度や重症度を調査し問題の認識を行うこと、次に外傷発生のメカニズムやリスクファクターの解明を行うこと、その上でリスクファクターに対して介入を行いその効果を検証すること、そして、最終的に第一段階で行った調査を再び行い、疫学的な効果の検討を行う、というものである。第二章では、股関節動的アライメントが、片脚着地時における膝関節内方変位量に与える影響を検討した。第三章では、片脚着地動作に発生する垂直床反力成分ピーク値に着目し、各下肢関節との相関関係を検討した。第四章では、片脚着地動作時の接地方法による垂直床反力成分ピーク値の違いを調査した。3つの研究より、以下の結論を得た。

1. 股関節中間位（屈曲0度）および股関節屈曲30度での股関節外転筋力の最大トルクが高値を示すほど、片脚着地時の膝外反方向への変位が低値を示した。また、動的Trendelenburgテストでは、陽性群が着地時において膝外反を、陰性群に比して有意に引き起こしていることが示された。これらの結果により、女性バスケットボール選手は股関節外転筋力を向上させることで、片脚着地時に適切な膝のアライメントを維持できる可能性が示唆された。非接触ACL傷害の予防のためには、股関節の制御が重要な課題と考えられる。
2. 非接触型ACL損傷が頻回する片脚着地動作時の下肢関節戦略を、床反力を指標として検討した。足関節底屈モーメントが高値を示す着地動作では床反力が低値を示す、負の相関関係が認められた。また膝関節伸展モーメントと床反力との間には、正の相関関係が認められ、非接触型ACL損傷のリスクファクターとして一定の見解を得ている脛骨前方剪断力に、床反力が影響を与えていることが示された。これらの結果により、足関節底屈モーメントを発生させ、膝関節伸展モーメントを低値に抑えることが、床反力値を低値に抑えることができる可能性が高い。
3. 本研究では、片脚着地における足部接地の違いに着目し、垂直床反力成分と身体重心（Center of Gravity：以下COG）位置と垂直床反力成分に及ぼす影響について検討することとした。また、ACL損傷既往者をリスク群とし健常群と比較することで、ACL損傷予防に関する検討も行うこととした。片脚着地動作時において足底接地を行うことで、垂直床反力成分最大値が高値となる可能性が示唆された。また、片脚着地時に足関節を利用し、効

率的な衝撃吸収を行うことで、膝関節への負担を減少させ、ACLに加わる負担を抑えると考えられる。

以上の点から、非接触型 ACL 損傷予防の危険因子と考えられている着地時の床反力を低値に抑えるため、後方重心を伴う着地は避ける必要があると考えられる。そのためにも矢状面上の関節モーメント、特に足関節底屈モーメントを働かせた上で足底接地を避けた着地動作が損傷予防に必要な可能性が示唆された。この矢状面上の下肢関節戦略による衝撃吸収方法で、危険因子である床反力値を低値に抑えることができず、さらに股関節外転筋力が十分でない場合、膝外反も誘発されることにより、ACL 損傷が引き起こされる可能性が本研究結果から示唆された。

6. 本研究の限界

本研究の問題点として、床反力パラメーターが ACL の歪みに及ぼす影響が不明であることが考えられる。非接触型損傷の予防を検証しているため、唯一の外力である床反力が損傷に影響を及ぼしていることは明白ではあるが、直接的に損傷に結びついているか、不明な点が多い。さらに Notch Width など、解剖学的特徴などのリスクファクターによる影響を考慮していないことが挙げられる。加えて、床反力最大値や最大値までの時間は、着地時の下肢・体幹等の関節角度や筋活動の影響を受けるが、それらを検討していないことが計測上の問題点として挙げられる。また Hewett らは、着地時の膝外反モーメントが非接触型 ACL 損傷のリスクファクターであると述べており⁷⁹⁾、矢状面上のみならず前額面上の下肢関節の着地戦略の検討も必要であり、今後はさらに、運動学的、運動力学的特徴について検証する余地を残している。

7. 引用文献

1. Fu FH, Shen W, Starman JS, Okeke N, Irrgang JJ. Primary anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a preliminary 2-year prospective study. *Am J Sports Med.* 2008 Jul;36(7):1263-74
2. Fong DT, Hong Y, Chan LK, Yung PS, Chan KM. A systematic review on ankle injury and ankle sprain in sports. *Sports Med.* 2007;37(1):73-94.
3. 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):1116-22.
4. 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):1798-805.
5. 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):462-69.
6. 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):2386-91.
7. Mochizuki T, Muneta T, Nagase T, Shirasawa S, Akita K, Sekiya I. Cadaveric knee observation study for describing anatomic femoral tunnel placement for two-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy.* 2006;22(4):356-61.
8. 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):154-61.
9. 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):585-92.
10. 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):259-70.

11. Bach JM, Hull ML, Patterson HA. Direct measurement of strain in the posterolateral bundle of the anterior cruciate ligament. *J Biomech.* 1997;30(3):281-83.
12. Gabriel MT, Wong EK, Woo SL, 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):85-9.
13. 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):233-40.
14. 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):285-93.
15. 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):557-67.
16. 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):930-35.
17. 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.
18. 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):348-53.
19. 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.
20. 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.
21. 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):422-26.
22. 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.
 23. 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):311-19.
 24. 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):669-75.
 25. 岩曾弘志. 非接触型膝前十字靭帯損傷の損傷頻度. 臨床スポーツ医学. 2002;19(9):985-90.
 26. Granan L-P, Forssblad M, Lind M, Engebretsen L. The Scandinavian ACL registries 2004-2007: baseline epidemiology. Acta Orthop. 2009;80(5):563-67.
 27. Majewski M, Susanne H, Klaus S. Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study. Knee. 2006;13(3):184-88.
 28. 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):623-28.
 29. 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):524-30.
 30. 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.
 31. Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Garrett WE. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. Orthopedics. 2000;23(6):573-78.
 32. 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):502-9.
 33. 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.

34. Faunø P, Wulff Jakobsen B. Mechanism of anterior cruciate ligament injuries in soccer. *Int J Sports Med.* 2006;27(1):75-9.
35. Ferretti A, Papandrea P, Conteduca F, Mariani PP. Knee ligament injuries in volleyball players. *Am J Sports Med.* 1992;20(2):203-7.
36. Bjordal JM, Arnly F, Hannestad B, Strand T. Epidemiology of anterior cruciate ligament injuries in soccer. *Am J Sports Med.* 1997;25(3):341-5.
37. 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):294-9.
38. 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.
39. 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.
40. Bonamo JJ, Fay C, Firestone T. The conservative treatment of the anterior cruciate deficient knee. *Am J Sports Med.* 1990;18(6):618-23.
41. 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):825-33.
42. 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):2509-16.
43. Ajuied A, Wong F, Smith C, Norris M, Earnshaw P, Back D, Davies A. Anterior cruciate ligament injury and radiologic progression of knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2014;42(9):2242-52.
44. 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.
45. Tandogan RN, Taşer O, Kayaalp A, Taşkiran E, Pinar H, Alparslan B, Alturfan A. 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):262-70.
46. 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):1139-47.
 47. Andriacchi TP, Dyrby CO. Interactions between kinematics and loading during walking for the normal and ACL deficient knee. *J Biomech.* 2005;38(2):293-8.
 48. 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):467-71.
 49. 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):181-87.
 50. 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.
 51. 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):215-22.
 52. Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, Bahr R, Beynon BD, Demaio M, Dick RW, Engebretsen L, Garrett WE Jr, Hannafin JA, Hewett TE, Huston LJ, Ireland ML, Johnson RJ, Lephart S, Mandelbaum BR, Mann BJ, Marks PH, Marshall SW, Myklebust G, Noyes FR, Powers C, Shields C Jr, Shultz SJ, Silvers H, Slaughterbeck J, Taylor DC, Teitz CC, Wojtys EM, Yu B. 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):1512-32.
 53. 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 3:31-6.
 54. 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-

70.

55. 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):213-26.
56. 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):2693-702.
57. 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.
58. 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):462-70.
59. 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):222-9.
60. 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):175-80.
61. Freedman KB, Glasgow MT, Glasgow SG, Bernstein J. Anterior cruciate ligament injury and reconstruction among university students. *Clin Orthop Relat Res*. 1998;(356):208-12.
62. 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.
63. 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.
64. Barber-Westin SD, Noyes FR. Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*. 2011;27(12):1697-705.

65. 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):767-72.
66. Mather RC, Koenig L, Kocher MS, Dall TM, Gallo P, Scott DJ, Bach BR Jr, Spindler KP; MOON Knee Group. Societal and economic impact of anterior cruciate ligament tears. *J Bone Joint Surg Am.* 2013;95(19):1751-9.
67. 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):705-11.
68. 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):252-9.
69. 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):417-22.
70. Koga H, Nakamae A, Shima Y, Iwasa J, Myklebust G, Engebretsen L, Bahr R, Krosshaug T. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *Am J Sports Med.* 2010;38(11):2218-25.
71. Krosshaug T, Nakamae A, Boden BP, Engebretsen L, Smith G, Slauterbeck JR, Hewett TE, Bahr R. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med.* 2007;35(3):359-67.
72. 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):1002-12.
73. Krosshaug T, Nakamae A, Boden B, Engebretsen L, Smith G, Slauterbeck J, Hewett TE, Bahr R. Estimating 3D joint kinematics from video sequences of running and cutting maneuvers--assessing the accuracy of simple visual inspection. *Gait Posture.* 2007;26(3):378-85.
74. 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):281-93.
75. 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):927-33.
 76. Yoon KH, Yoo JH, Kim K. 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):1510-18.
 77. Quatman CE, Kiapour A, Myer GD, Ford KR, Demetropoulos CK, Goel VK, Hewett TE. Cartilage pressure distributions provide a footprint to define female anterior cruciate ligament injury mechanisms. *Am J Sports Med.* 2011;39(8):1706-13.
 78. Alentorn-Geli E, Myer GD, Silvers HJ, Samitier G, Romero D, Lázaro-Haro C, Cugat R. 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):705-29.
 79. 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.
 80. 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.
 81. 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):155-9.
 82. 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):304-6.
 83. 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.
 84. Orchard JW, Powell JW. Risk of knee and ankle sprains under various weather conditions in American football. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(7):1118-23.

85. 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):704-9.
86. 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):71-8.
87. 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):11-9.
88. Fung DT, Zhang L. Modeling of ACL impingement against the intercondylar notch. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2003;18(10):933-41.
89. 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.
90. Park H, Ahn C, Fung DT, Ren Y, Zhang L. A knee-specific finite element analysis of the human anterior cruciate ligament impingement against the femoral intercondylar notch. *J Biomech.* 2010.
91. Zeng C, Gao S, Wei J, Yang TB, Cheng L, Luo W, Tu M, Xie Q, Hu Z, Liu PF, Li H, Yang T, Zhou B, Lei GH. 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):804-15.
92. 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):329-33.
93. Dienst M, Schneider G, Altmeyer K, Voelkerling K, Georg T, Kramann B, Kohn D. 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):253-60.
94. 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):1702-07.
95. 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):1492-98.
96. 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.
 97. 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.
 98. 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.
 99. 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):2943-50.
 100. 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):1282-87.
 101. Dejour H, Bonnin M. Tibial translation after anterior cruciate ligament rupture. Two radiological tests compared. *J Bone Joint Surg Br.* 1994;76(5):745-9.
 102. Matsumoto H. Mechanism of the pivot shift. *J Bone Joint Surg Br.* 1990;72(5):816-21.
 103. McLean SG, Oh YK, Palmer ML, Lucey SM, Lucarelli DG, Ashton-Miller JA, Wojtys EM. 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):1310-17.
 104. Meyer EG, Haut RC. Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibiofemoral compression. *J Biomech.* 2008;41(16):3377-83.
 105. 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):1673-81.
106. 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):800-3.
107. Motohashi M. Profile of bilateral anterior cruciate ligament injuries: a retrospective follow-up study. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2004;12(2):210-5.
108. 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):1073-80.
109. 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):831-42.
110. 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):91-7.
111. Lin HC, Lai W-H, Shih YF, Chang CM, Lo C-Y, Hsu HC. Physiological anterior laxity in healthy young females: the effect of knee hyperextension and dominance. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2009;17(9):1083-8.
112. Shultz SJ, Nguyen A, Levine BJ. The Relationship Between Lower Extremity Alignment Characteristics and Anterior Knee Joint Laxity. *Sports Health.* 2009;1(1):54-60.
113. Shultz SJ, Shimokochi Y, Nguyen A, Schmitz RJ, Beynon 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):989-96.
114. Allen MK, Glasoe WM. Metrecom measurement of navicular drop in subjects with anterior cruciate ligament injury. *J Athl Train.* 2000;35(4):403-6.
115. 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.
116. Hertel J, Dorfman JH, Braham RA. Lower extremity malalignments and anterior cruciate ligament injury history. *J Sport Sci Med.* 2004;3(4):220-5.
117. 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):371-6.
118. 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):25-8.
119. 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):343-6.
120. 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):577-84.
121. 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):657-63.
122. 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):526-33.
123. 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):704-9.
124. Yoshida A, Morihara T, Kajikawa Y, Arai Y, Oshima Y, Kubo T, Matsuda K, Sakamoto H, Kawata M. 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):121-31.
125. 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):229-38.
126. 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):268-81.
127. 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.
128. 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):405-8.
129. 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):659-68.
130. 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):473-78.
131. 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):571-5.
132. Ruedl G, Ploner P, Linortner I, Schranz A, Fink C, Sommersacher R, Pocecco E, Nachbauer W, Burtscher M. 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):1065-9.
133. Agel J, Bershadsky B, Arendt EA. Hormonal therapy: ACL and ankle injury. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(1):7-12.
134. Huston LJ, Wojtys EM. Neuromuscular performance characteristics in elite female athletes. *Am J Sports Med.* 1996 Jul-Aug;24(4):427-36.
135. Chu D, LeBlanc R, D'Ambrosia P, D'Ambrosia R, Baratta RV, Solomonow M. Neuromuscular disorder in response to anterior cruciate ligament creep. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2003 Mar;18(3):222-30.
136. Dyhre-Poulsen P, Krogsgaard MR. Muscular reflexes elicited by electrical stimulation of the anterior cruciate ligament in humans. *J Appl Physiol (1985).* 2000 Dec;89(6):2191-5.
137. Cerulli G, Benoit DL, Lamontagne M, Caraffa A, Liti A. In vivo anterior cruciate ligament strain behaviour during a rapid deceleration movement: case report. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2003 Sep;11(5):307-11
138. Markolf KL, Graff-Radford A, Amstutz HC. In vivo knee stability. A quantitative assessment using an instrumented clinical testing apparatus. *J Bone Joint Surg Am.* 1978 Jul;60(5):664-74.
139. Lloyd DG, Buchanan TS. Strategies of muscular support of varus and valgus isometric loads at the human knee. *J Biomech.* 2001 Oct;34(10):1257-67.
140. Wojtys EM, Ashton-Miller JA, Huston LJ. A gender-related difference in the

- contribution of the knee musculature to sagittal-plane shear stiffness in subjects with similar knee laxity. *J Bone Joint Surg Am.* 2002 Jan;84-A(1):10-6.
141. Wojtys EM, Huston LJ, Schock HJ, Boylan JP, Ashton-Miller JA. Gender differences in muscular protection of the knee in torsion in size-matched athletes. *J Bone Joint Surg Am.* 2003 May;85-A(5):782-9.
142. Colby S, Francisco A, Yu B, Kirkendall D, Finch M, Garrett W, Jr.. Electromyographic and kinematic analysis of cutting maneuvers. Implications for anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2000 Mar-Apr;28(2):234-40.
143. Fagenbaum R, Darling WG. Jump landing strategies in male and female college athletes and the implications of such strategies for anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2003 Mar-Apr;31(2):233-40.
144. Cowling EJ, Steele JR. Is lower limb muscle synchrony during landing affected by gender? Implications for variations in ACL injury rates. *J Electromyogr Kinesiol.* 2001 Aug;11(4):263-8.
145. Kellis E, Kouvelioti V. Agonist versus antagonist muscle fatigue effects on thigh muscle activity and vertical ground reaction during drop landing. *J Electromyogr Kinesiol.* 2009 Feb;19(1):55-64.
146. Sigward S, Powers CM. The influence of experience on knee mechanics during side-step cutting in females. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2006 Aug;21(7):740-7
147. Lephart SM, Ferris CM, Riemann BL, Myers JB, Fu FH. Gender differences in strength and lower extremity kinematics during landing. *Clin Orthop Relat Res.* 2002 Aug;(401):162-9.
148. Issei Ogasawara, Shumpei Miyakawa, Shigeyuki Wakitani. The external force model for determining the frontal plane knee loading pattern -Implication for the mechanism of non-contact anterior cruciate ligament injury-. *Mukogawa journal of health and exercise science.* 2014 Feb;4(1):13-22.
149. 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 Jul;17(4):263-8.
150. Hewett TE, Ford KR, Myer GD, Wanstrath K, Scheper M. Gender differences in

- hip adduction motion and torque during a single-leg agility maneuver. *J Orthop Res.* 2006 Mar;24(3):416-21.
151. Jacobs CA, Uhl TL, Mattacola CG, Shapiro R, Rayens WS. Hip abductor function and lower extremity landing kinematics: sex differences. *J Athl Train.* 2007 Jan-Mar;42(1):76-83.
152. 小笠原一生, 宮川俊平, 朴 時英. 片脚着地動作における着地姿勢が膝外反モーメントに与える効果の静力学的検討 - 膝前十字靭帯損傷のリスクを高める動作の同定 -. *体力科学* 2010 59 : 485-494
153. Nessler T, Denney L, Sampley J. ACL Injury Prevention: What Does Research Tell Us? *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2017 Jun 27.
154. 大橋義徳, 中瀬順介, 虎谷達洋, 小坂正裕, 土屋弘行. 現場が求めるスポーツ傷害予防プログラムに関するアンケート調査. *日本臨床スポーツ医学会誌* 2013 21(3): 771-5.
155. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Paterno MV, Quatman CE. Mechanisms, prediction, and prevention of ACL injuries: Cut risk with three sharpened and validated tools. *J Orthop Res.* 2016 Nov;34(11):1843-55.
156. Takahashi S, Okuwaki T. Epidemiological survey of anterior cruciate ligament injury in Japanese junior high school and high school athletes: cross-sectional study. *Res Sports Med* 2017 25(3):266-76.
157. Curran AR, Park AE, Bach BR Jr, Bush-Joseph CA, Cole BJ, Yao ES. Outpatient anterior cruciate ligament reconstruction: an analysis of charges and perioperative complications. *Am J Knee Surg* 2001 14(3):145-51.
158. Tamura A, Akasaka K, Otsudo T, Shiozawa J, Toda Y, Yamada K. Dynamic knee valgus alignment influences impact attenuation in the lower extremity during the deceleration phase of a single-leg landing. *PLoS One* 2017 20:12(6).
159. 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):459-66.
160. Huston LJ, Greenfield ML, Wojtys. Anterior cruciate ligament injuries in the female athlete. Potential risk factors. *Clin Orthop Relat Res* 372 : 2000 50-63.
161. Claiborne TL, Armstrong CW, Gandhi V, Pincivero DM. Relationship between hip

- and knee strength and knee valgus during a single leg squat. *J Appl Biomech* 2006 22(1):41-50.
162. Ahlen M, Liden M, Bovaller A, Sernert N, Kartus J. Bilateral magnetic resonance imaging and functional assessment of the semitendinosus and gracilis tendons a minimum of 6 years after ipsilateral harvest for anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 2012 40(8):1735-41.
163. 藤井康成, 小倉 雅, 東郷泰久, 山口 聡, 梶 博則, 前田昌隆, 福田隆一, 福田秀文, 永濱良太. Knee-in のメカニズムの解析 -動的 Trendelenburg test を用いた骨盤機能評価と Knee-in との関連性-. *臨床スポーツ医学* 2004 21(7):827-31.
164. 三木英之, 榎本 晃, 杉村 聡, 安竹重幸, 吉久武志, 持田 尚, 鈴川仁人, 能 由美, 清水 結, 玉置龍也, 石毛勇介. ACL の受傷メカニズムと予防法 女子バスケットボール選手の片足ジャンプ着地時の三次元動作解析. *日本臨床スポーツ医学会誌* 2005 13(4):S71
165. 三木英之. バスケットボールの ACL 損傷とバイオメカニクスからみた予防法. *臨床スポーツ医学* 2001 18(1):53-7.
166. Zeller BL, McCrory JL, Kibler WB, Uhl TL. Differences in kinematics and electromyographic activity between men and women during the single-legged squat. *Am J Sports Med* 2003 31(3):449-56.
167. 林 慶充, 石橋恭之, 津田英一, 福田 陽, 塚田晴彦, 藤 哲, 浅野由佳美, 秋元博之, 尾田 敦, 吉田英樹, 三本木 温, 法元康二. 高校バスケットボール選手を対象としたジャンプ動作における下肢アライメントの評価. *青森県スポーツ科学センター研究学会誌* 14: 2005 20-4.
168. Power JA. Characteristic features of injuries in the knee in woman. *Clin Orthop Relat Res* 1979 Sep(143):120-4.
169. Pantano KJ, White SC, Gilchrist LA, Leddy J. Differences in peak knee valgus angles between individuals with high and low Q-angles during a single limb squat. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2005 Nov; 20(9):966-72.
170. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt RS Jr, Colosimo AJ, McLean SG, van den Bogert AJ, Paterno MV, Succop P. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med* 2005 33(4):492-501.
171. 小笠原一生, 白木 仁, 向井直樹, 竹村雅裕, 宮川俊平: 前十字靭帯損傷リスクの簡便

- なスクリーニング指標としての前額面膝関節偏位指標の提案. 体力科学 2008 57:553-562.
172. 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: 2781-8.
173. 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: 681-8.
174. Sheehan FT, Sipprell WH, 3rd, Boden BP. Dynamic sagittal plane trunk control during anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med* 2012; 40(5):1068-1074.
175. Myers CA, Hawkins D. Alterations to movement mechanics can greatly reduce anterior cruciate ligament loading without reducing performance. *J Biomech*, 2010, 43: 2657-64.
176. Salmon LJ, Sri-Ram K, 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 :59-64.
177. Chappell, JD, Creighton RA, Giuliani C, Yu B, Garrett WE. Kinematics and electromyography of landing preparation in vertical stop-jump: risks for noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med*, 2007, 35: 235-41.
178. 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: 153-8.
179. 大槻玲子, 馬越博久, 福林 徹. 成長期女子バスケットボール選手における膝前十字靭帯損傷リスクの評価. *日本臨床スポーツ医学会誌*, 2014, 22: 51-8.
180. Imwalie, LE, Myer GD, Ford KR, Hewett TE. Relationship between hip and knee kinematics in athletic women during cutting maneuvers: a possible link to noncontact anterior cruciate ligament injury and prevention. *J Strength Cond Res*. 2009 Nov;23(8):2223-30.
181. 阿江通良 : 日本人幼少年及びアスリーの身体部分慣性係数. *Jpn J Sports Science*, 1996, 15: 155-62.
182. Hewett, TE et al. : Understanding and preventing ACL injuries: current

- biomechanical and epidemiologic considerations—update 2010—. *North Am J Sports Phys Ther*, 2010, 5: 234-251.
183. 玉置正彦, 尹 成祚, 大見頼一, 土井朋美, 栗山節郎. 大学女子バスケットボール選手における膝前十字靭帯損傷予防プログラムの実施効果. *東京女子体育大学・東京女子体育短期大学紀要* 48, 2013 53-8.
184. 鈴川仁人, 永野康治, 玉置龍也, 中村絵美, 清水 結, 赤池 敦, 清水邦明, 三木英之, 入江一憲, 青木治人. 中学生バスケットボール選手の着地動作における性差と下肢外傷予防プログラムの効果. *体力科学* 2012 61(1):119-24.
185. Griffin LY, Agel J, Albohm MJ, Arendt EA, Dick RW, Garrett WE, Garrick JG, Hewett TE, Huston L, Ireland ML, Johnson RJ, Kibler WB, Lephart S, Lewis JL, Lindenfeld TN, Mandelbaum BR, Marchak P, Teitz CC, Wojtys EM. Noncontact anterior cruciate ligament injuries ; risk factors and prevention strategies. *J Am Acad Orthop Surg*. 2000 May-Jun;8(3):141-50.
186. 井原秀俊, 高山正伸, 福本貴彦, 下沖典子. 非接触性 ACL 損傷における性差・左右差. *整形外科と災害外科* 2005 54(2):241-6.
187. Arendt, EA, Agel J, Dick R. Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men and women. *J Athl Train*. 1999 Apr;34(2):86-92.
188. Myklebust, G, Maehlum S, Holm I, Bahr R. A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. *Scand J Med Sci Sports*. 1998 Jun;8(3):149-53.
189. 石橋恭之, 岡村良久. 前十字靭帯再建術後のリハビリテーションの効果と安全性. *臨床スポーツ医学* 2001 18(5):523-8.
190. 佐々木静, 石橋恭之, 津田英一, 山本祐司, 前田周吾, 大塚博徳. 体幹変位に着目した膝前十字靭帯損傷の受傷機転解析. *青森県スポーツ医学研究会誌* 2012 21, 7-10.
191. 大路駿介, 相澤純也, 廣幡健二, 大見武弘, 柳下和慶. 身体の水平回転を伴う片脚ドロップジャンプ着地における垂直床反力パラメーターの特徴. *日本臨床スポーツ医学会誌* 2017 25 (3):360-6.
192. Cerulli G, Benoit DL, Lamontagne M, Caraffa A, Liti A. In vivo anterior cruciate ligament strain behavior during a rapid deceleration movement ; case report. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2003 Sep;11(5):307-11.
193. Yu B, Lin CF, Garrett WE. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2006 Mar;21(3):297-305.
194. 文部科学省：新体力テスト実施要項,

http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/stamina/03040901.htm, (2017.9.19 参照)

195. Altman AR, Davis IS. A kinematic method for footstrike pattern detection in barefoot and shod runners. *Gait Posture*. 2012 Feb;35(2):298-300.
196. Hui, C, Salmon LJ, Kok A, Maeno S, Linklater J, Pinczewski LA. Fifteen-year outcome of endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon autograft for “isolated” anterior cruciate ligament tear. *Am J Sports Med*. 2011 Jan;39(1):89-98.
197. 川島達宏, 大見頼一, 尹成祚, 長妻香織, 金子雅志, 栗原智久, 土井朋美, 吉本真純, 関大輔, 國田泰弘, 井上拓海, 栗山節郎, 星田隆彦, 都賀誠二. 膝前十字靭帯再建術後の同側損傷・反対側損傷の性差. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2015 23(3):496-502.
198. Shimokochi Y, Ambegaonkar JP, Meyer EG, Lee SY, Shultz SJ. Changing sagittal plane body position during single-leg landings influences the risk of non-contact anterior cruciate ligament injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2013 Apr;21(4):888-97.
199. 福井勉. 膝関節固定下における身体運動が脛骨前方移動に及ぼす影響—前十字靭帯機能の関与を中心として— *昭和医学会雑誌* 1994 54(3):176-184.
200. van Mechelen W, Hlobil H, Kemper HC: Incidence, severity, aetiology and prevention of sports injuries. A review of concepts. *Sports Med* 14:82-99, 1992.

8. 謝辞

本論文を完成させるにあたり、指導教員の筑波大学、宮川俊平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、宮川俊平教授には本論文の指導だけではなく、修士課程の時分より、研究に対する考え方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、深く感謝を申し上げます。

理学療法士でもある筑波大学、竹村雅裕准教授には学術的な面のみならず、臨床的な面からの様々なご意見やご指導を賜り、深く感謝を申し上げます。

筑波大学整形外科スポーツ医学、金森章浩講師には、本論文の指導はもちろん、今後の研究内容などにもご意見やご指導を賜り、深く感謝申し上げます。

また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頂いた、新潟医療福祉大学健康スポーツ学科 加藤雅規准教授、また女子バスケットボール部の関係者皆様には深く感謝いたします。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。

9. 業績一覧

【原著論文】

- 1) 菊元孝則, 江玉陸明, 中村雅俊, 宮川俊平: 女子バスケットボール選手の股関節外転筋力が片脚着地時の膝関節アライメントに及ぼす影響. 体力科学. 66 巻 6 号 399-405, 2017.
- 2) 菊元孝則, 宮川俊平: 片脚着地時における矢状面上の下肢関節戦略. 理学療法科学. 33 巻 2 号 (in press)
- 3) Edama M, Kageyama I, Nakamura M, Kikumoto T, Nakamura E, Ito W, Takabayashi T, Inai T, Onishi H. Anatomical study of the inferior patellar pole and patellar tendon. Scand J Med Sci Sports. Feb 16. 2017.

【学会発表】

1. Kikumoto T, Edama M, Nakamura M, Nakamura E, Ito W, Hirabayashi R, Miyakawa S. Comparison of patellar mobility in female basketball players with ACL injury. The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine, 2017. (in press)
(査読有)
2. Fujita M, Furukawa K, Takeda N, Kikumoto T, The relationship between knee joint extension moment and knee joint forces at lay-up shoot landing. The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine, 2017. (in press) (査読有)
3. 菊元孝則, 江玉陸明, 中村雅俊, 中村絵美, 伊藤渉, 宮川俊平. バスケットボール競技における非接触型膝前十字靭帯損傷予防に必要な矢状面上の下肢関節戦略. 第 52 回日本理学療法学会大会, 2017. (査読有)
4. Hirabayashi R, Nakamura M, Kikumoto T, Nakamura E, Ito W, Shimamoto M, Edama M. Validation of trunk function evaluation in limb position change of upper limb. The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine, 2017. (査読有)

5. Kikumoto T, Furukawa K, Takeda M, Miyakawa S; The effect of Hip Abduction Muscle Strength on Knee Alignment during a Single Leg Landing. The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine, Vol15, No.6, 551, 2016. (査読有)
6. 菊元孝則, 古川勝弥, 竹田典広, 藤田匡俊, 江玉睦明, 中村雅俊, 伊藤涉, 中村絵美, 大森豪. レイアップシュート着地時における膝関節外反モーメントと股関節外転機能との関係. 日本臨床スポーツ医学会, Vol. 24, No. 4, S194, 2016. (査読有)
7. 菊元孝則, 中村雅俊, 中村絵美, 伊藤涉, 江玉睦明; 矢状面上における着地動作の下肢関節戦略. 日本電気生理運動学会, 2016. (査読有)
8. 古川勝弥, 菊元孝則, 竹田典広, 藤田匡俊, 大森豪; レイアップシュート着地時における膝関節外反モーメントと身体重心位置との関係. 日本臨床スポーツ医学会, Vol. 24, No. 4, S257, 2016. (査読有)
9. 菊元孝則, 中村雅俊, 中村絵美, 伊藤涉, 江玉睦明. 矢状面上における着地動作の下肢関節戦略. 第 17 回日本電気生理運動学会大会 (新潟), 2016. 11. 4. (査読有)
10. 江玉睦明, 影山幾男, 中村雅俊, 菊元孝則, 伊藤涉, 中村絵美, 高林知也, 大西秀明. 膝蓋骨下極と膝蓋腱の解剖学的特徴～膝蓋腱炎発生メカニズムに着目して～. 第 122 回日本解剖学会 (長崎), 2017. 03. 28～3. 30.
11. 江玉睦明, 影山幾男, 中村雅俊, 菊元孝則, 伊藤涉, 中村絵美, 高林知也, 稲井卓真, 大西秀明. 前距腓靭帯の線維数の違いと足関節内反制動との関係. 第 22 回スポーツ傷害フォーラム (大阪), 2017. 1. 21.
12. 江玉睦明, 中村雅俊, 菊元孝則, 伊藤涉, 中村絵美, 高林知也, 大森豪, 影山幾男. 膝蓋腱炎発生機序の解剖学的検討. 第 27 回日本臨床スポーツ医学会学術集会 (千葉), 2016. 11. 5～11. 6.
13. 中村雅俊, 武内孝祐, 江玉睦明, 菊元孝則, 伊藤涉, 中村絵美, 高林知也, 大森豪. 関節可動域と筋の伸長性および伸長感に対する耐性の関係. 第 27 回日本臨床スポ

- ーツ医学会学術集会（千葉），2016. 11. 5～11. 6.
14. Kumazaki A, Shimojo H, Kikumoto T, Ito W, Nakamura E, Nakamura M. Analysis of physical characteristics among different positions in high school rugby football players. 5th NSCA International Conference. (Chiba) ,2017. 1. 27～1. 29.
 15. 伊藤渉, 加賀谷善教, 江玉睦明, 菊元孝則, 中村雅俊, 中村絵美, 大森豪, 川原貴. 片脚着地動作における膝外反モーメント発生群と非発生群の kinematics の違い. 第 27 回日本臨床スポーツ医学会学術集会（千葉），2016. 11. 5～11. 6.
 16. 古川勝弥, 菊元孝則, 竹田典広, 藤田匡俊, 大森豪. レイアップシュート着地時における膝関節外反モーメントと身体重心位置との関係. 第 27 回日本臨床スポーツ医学会学術集会（千葉），2016. 11. 5～11. 6.
 17. 菊元孝則, 江玉睦明, 中村雅俊, 中村絵美, 伊藤渉, 宮川俊平. バスケットボール競技における非接触型膝前十字靭帯損傷予防に必要な矢状面上の下肢関節戦略. 第 52 回日本理学療法学会学術大会（千葉），2017. 5. 12～5. 14.（査読有）