

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

女子サッカー選手における
膝前十字靭帯損傷に関わるプレーと動作特性

Playing type and maneuver related to anterior
cruciate ligament injury in female soccer players

2017年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

金子 聡

Satoshi, Kaneko

研究指導教員： 福林 徹 教授

目次	
第1章 序章	1
序	2
研究小史	3
本研究の目的、構成	9
第2章 女子サッカー選手のACL損傷時の受傷機転	
~ACL損傷既往歴を持った女子サッカー選手へのアンケート調査~	10
緒言	11
方法	12
結果	14
考察	18
第3章 ボールに片脚を伸ばすサッカー特有動作の動作解析	21
緒言	22
方法	23
結果	28
考察	35
第4章 競技現場におけるプレッシングの動作解析	38
緒言	39
第1節 競技現場の映像を用いた2D Video Analysisのパイロット・スタディ	
目的	41
方法	41
結果	44
考察	45
第2節 2D Video Analysisによる動作抽出とMBIM 法を用いた動作解析	
目的	47
方法	47
結果	50
考察	55
第5章 総合考察	59
第6章 結論	63
付録 女子サッカー選手のACL損傷場面に関するアンケート調査用紙	65

参考文献	66
業績一覽	78
謝辭	79

第一章

序章

【序】

世界中でスポーツは行われており、アスリートの健康やスポーツでの怪我、病気を予防するために、各国の研究機関や大学、病院でスポーツ医学の分野の研究は進められている。

2001年に国際オリンピック委員会（IOC）の会長の Jacques Rogge は IOC 医事委員会の最も重要な目標は、「アスリートの健康を保護することである」ことを述べ、IOC 医事委員会は、危険因子や予防プログラム、若年女性アスリートにおける非接触 ACL 損傷に関する更なる研究のために、医師、理学療法士、バイオメカニストと ACL の研究に積極的な科学者のグループを招待した。また、2009年には、実績のある研究センターを同定し、スポーツ選手の健康を保護するために、長期的な研究プログラムの確立や経済的な支援を約束している。

日本においては、日本オリンピック委員会（JOC）や国立スポーツ科学センター（JISS）を中心に、各競技団体、大学やスポーツ研究機関が連携して、日本の国際競技力向上への支援を行っている。また、2016年のリオオリンピックでの大量のメダル獲得や2020年に開催が決定している東京オリンピックの影響もあり、アスリートのみならず国民全体的にスポーツ及び健康に対する意識が高くなっている。現在では、怪我や痛みを対症療法として治療する事から、いかに予防出来るかが大事かという風潮が強くなってきている。

その中でも多く最も重篤な外傷の一つである膝前十字靭帯（以下:ACL）についても予防の取り組みが長年なされてきている。また、予防には、まず疫学調査、次に受傷メカニズムやリスクファクターの検証、その上で介入を行い効果の検証、そして再度疫学調査という四段階を行う事が大切とされている（van Mechelen et al. 1992）。

本論文においては、この四段階に則して、最初の二段階にあたる疫学調査及びリスクファクターの検証を行う。また近年では、競技特有の受傷メカニズムやリスクファクターの分析の重要性も説かれており、少しずつ研究が進められている。よって、本論文においては、女子サッカー選手の ACL 損傷の受傷機転及びその動作特性を明らかにし、競技特性を踏まえた予防指針を提示したい。

【研究小史】

サッカーは世界中で最も人気のスポーツであり、265 万人以上の人が行っており、その中でも 10%が女性であり、急激な増加が認められている (FIFA. 2007)。北中米とカリブ海の中では、全てのサッカー選手の 23%が女性 (アメリカ: 40%、カナダ: 33%) と報告されている (FIFA. 2007)。また、女子サッカー選手が 10 年間でアメリカでは 210%、ドイツでは 160%、スイスでは 250%以上も増加し、人気は成長を続けている (FIFA. 2007)。1991 年には初の女子サッカーの FIFA ワールドカップが中国で開催され、1994 年からはオリンピックの種目にも女子サッカーが加わっている。更に、FIFA では 2002 年以来、女子サッカーでも U-19 及び U-20 の世界選手権を開催している。

このように普及が広まり選手数の増加が顕著な女子サッカー選手にとって、最も重篤で復帰までに時間がかかる内の一つとされているのが ACL 損傷である。

アメリカでは約 3000 人に 1 人、年間 8 万から 10 万人 (Miyasaka et al. 1991)、ノルウェーでは 18 ヶ月で市民約 10000 人のうち 34 人、スウェーデンでは 10~64 歳の中で約 10000 人のうち 81 人が ACL 受傷している (Lodenfoffer. 1999)。また、National Collegiate Athletics Association (NCAA) Injury Surveillance System (ISS)では、大学の 15 競技で年 2000 件以上、競技者の約 15%が ACL 受傷している (Hootman et al. 2007)。ACL 損傷発生の性差でみると、サッカー及びバスケットボールやハンドボールなど方向変換や着地動作を繰り返すスポーツにおいて、女子選手が男子選手よりも受傷率が高いと多く報告されている (Deitch et al. 2006, Mihata et al. 2006, Agel et al. 2005, Arendt et al. 1999, Myklecust et al. 1998, Arendt et al. 1995, Messina et al. 1990)。また、女子選手が 30 年間で、高校で 10 倍、大学で 5 倍と急激な ACL 損傷の発生に繋がっている要因は女子の ACL 損傷リスクの高さにあるとも言われている (NCAA. 2002, NFHS. 2009)。

このような ACL 損傷リスクの性差は、外的因子 (物理的及び視覚的な動揺、シューズ) や内的因子 (解剖学的な構造や神経筋機能、バイオメカニクス、ホルモン) など、様々な要素から検討は行われており、複合的に作用しているが (Huston et al. 2000, Hewett et al. 2010)、

本論文においては、内的因子に関してこれまでの研究小史を論じていく。

ACL 損傷のリスクに性差があることの一つとして、解剖学的な構造の差異が多く検討されている。まず ACL 損傷リスクの性差に多く検討されているのが、関節弛緩性についてであり、女性は男性よりも弛緩性が大きいと言われている (Nguyen et al. 2007, Shultz et al. 2005, Jansson et al. 2004)。。そして、ACL 損傷者は非損傷者よりも全身弛緩性や反張膝の割合が多いという報告 (Ramesh et al. 2005) や、サッカー選手において脛骨前方変位量が大きく反張膝が ACL 受傷のリスクファクターであるという報告もされている (Myer et al. 2008)。また、顆間窩幅の性差についても検討が進められ、男性よりも女性が小さいと言われており (Charlton et al. 2002, Anderson et al. 2001, Davis et al. 1999, Shelbourne et al. 1998, Shelbourne et al. 1997)、ACL 損傷者は非損傷者よりも小さいと言われている (Uhorchak et al. 2003, Souryal et al. 1993, Souryal et al. 1988)。大腿骨前捻角の性差についても検討が進められ、男性よりも女性が大きいと言われており (Nguyen et al. 2007, Braten et al. 1992)、ACL 損傷側が健常側より大腿骨前捻角が大きいという報告もされている (國田ら, 2016)。さらに、Q アングルは男性よりも女性が大きいと報告されている (Nguyen et al. 2007, Livingston . 1998, Woodland et al. 1992, Horton et al. 1989)。

これらにより、静的アライメントにおいて、関節弛緩性や顆間窩幅、大腿骨前捻角は ACL 損傷のリスクファクターとして高い可能性がある。しかし、Q アングルについては、性差はあるものの ACL 損傷の間に関連があるという報告はなく、ACL 損傷に対する影響は現状不明である。

ACL 損傷のリスクの性差の検討として神経筋活動の差異についても検討は行われている。女性は片脚でのホップジャンプ及び垂直跳び、サイドカッティングにおいて、大腿四頭筋よりもハムストリングスの活動が小さかったと言われている (Husted et al. 2016)。また、サイドカッティング動作において、男性よりも女性は大腿四頭筋の活動が大きくハムストリングスの活動が小さく (Landry et al. 2007, Sigward et al. 2006)、ストップジャンプ動作においても、男性よりも女性は大腿四頭筋の活動が大きくハムストリングスの活動が小

さかったと報告されている (Chappell et al. 2007)。大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮が脛骨の前後変位及び回旋を減少させ、同時収縮による関節運動の制動力が男性よりも女性が小さかったという報告もあり (Wojtys et al. 2003, Wojtys et al. 2002)、女性が大腿四頭筋の活動が大きいことは ACL 損傷のリスクファクターとしてなり得る事が考えられ、また接地時に大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮をすることが ACL 受傷の差異になる可能性があると考えられる。

さらに、ACL 損傷のリスクの性差の検討としてバイオメカニクスの差異についても検討は行われている。ストップジャンプ動作において、女性が男性よりも接地前の膝関節屈曲、内転、外旋角度が小さく、接地後の膝外転モーメントが大きくなると言われている (Chappell et al. 2002)。ストップジャンプ動作の方向を変化させた検討もされており、反応課題において、女性が男性よりも膝屈曲角度が減少し、膝外転モーメントが増加しており、男女共にジャンプの方向が支持脚側の際に、膝外転モーメントが増加することが報告されている (Sell et al. 2006)。また、カッティング動作においては、女性が男性よりも膝外転角度が大きいという報告が多くなされている (Ford et al. 2005, McLean et al. 2005, McLean et al. 2004, Malinzak et al. 2001)。膝屈曲角度においては、性差が認められないという報告が多くなされている (Landry et al. 2007, Sigward et al. 2006, Ford et al. 2005, McLean et al. 1999, Pollard et al. 2004)。股関節屈曲角度においては女性が男性よりも小さいという報告が多くなされている (Landry et al. 2007, McLean et al. 2005, McLean et al. 2004)。股関節外転や角関節の回旋角度においては、性差の結果が一致しておらずコンセンサスが得られていないのが現状である (Landry et al. 2007, McLean et al. 2005, McLean et al. 2004, Pollard et al. 2004)。また、思春期におけるバイオメカニクスの性差の検討もされており、ドロップジャンプ動作において、思春期後期 (15 歳前後) に女性が男性よりも膝外転角度が増加した事が認められてる (Hewett et al. 2004)。ストップジャンプ動作においても、12 歳以降に女性が男性よりも膝外転角度が増加した事が報告されている (Yu et al. 2005)。そして、ACL 損傷者が非損傷者よりも膝外転角度が大きく、膝外転モーメントは 2.5 倍であったと

言われている (Hewett et al. 2005)。

これらにより、バイオメカニクスリスクファクターとしては、接地時の膝外転角度の増加が考えられ、膝屈曲角度の減少は動作によってリスクが異なり、また回旋運動や股関節運動については報告が少なく、更なる検討が必要である。

ACL 損傷の受傷機転についても多く検討されており、質問紙による調査や受傷時のビデオ分析により検討が行われている。

質問紙による調査においては、ACL 損傷は方向変換や着地動作時における非接触型損傷が多いという報告でコンセンサスが得られている (Olsen et al. 2004, Boden et al. 2000, Myklebust et al. 1998, McNaire et al. 1990)。また、受傷肢位は膝軽度屈曲位であったという報告もされている (Boden et al. 2000, McNaire et al. 1990)。しかし、キネマティクスに関しては本人の記憶に頼らざるを得なく、正確な受傷肢位であったかは明らかではない。

受傷時のビデオ分析においては、簡易的な二次元動作分析や新しい手法を用いた三次元動作分析によって検討が行われている。二次元動作分析としては、受傷時の動作について分析されているものが多く、着地動作や方向変換動作、ストップ動作、着地からの方向変換動作における非接触型損傷が多いのが特徴である (Sheehan et al. 2012, Krosshaug et al. 2007, Olsen et al. 2004, Teitz. 2001, Boden et al. 2000)。また、受傷時のキネマティクスについても検討されており、膝軽度屈曲位及び外反位、そして後方重心であったという報告も多数なされている (Sheehan et al. 2012, Krosshaug et al. 2007, Olsen et al. 2004, Teitz. 2001, Boden et al. 2000)。三次元動作分析としては、受傷時の複数方向からのビデオ映像を用いて骨格モデルを当てはめ、三次元的な運動を再構築する Model-Based Image-Matching (MBIM) 法が開発され (Krosshaug et al. 2005)、この手法を用いて ACL 受傷時の分析を行い、受傷時のキネマティクスは膝軽度屈曲位で接地し、接地後 40msec 以内に急激な膝外転及び内旋変位を起こしていたと報告されている (Koga et al. 2010)。

これら現状解明されている受傷機転やリスクファクターを元にした予防介入も行われている。ジャンプトレーニング等のプライオメトリクスを行った予防介入においては、着地

時のハムストリングスの筋活動の増加、股関節内外転筋群の筋活動の増加、膝内外転モーメントや床反力の減少、股関節屈曲角度の増加、股関節内転角度の減少がトレーニング効果として挙げられている (Myer et al. 2006, Noyes et al. 2005, Lephart et al. 2005, Chimera et al. 2004, Irmischer et al. 2004, Hewett et al. 1996)。バランストレーニングを行った予防介入においては、ハムストリングスの筋活動の増加、膝外転角度の減少、膝屈曲角度の増加、股関節内転角度の減少がトレーニング効果として挙げられている (Hurd et al. 2006, Myer et al. 2006)。このように、神経筋活動やバイオメカニクスの改善は一定の効果を上げているが、ACL 損傷発生率は 1990 年から 2012 年までで変化がない事が報告されている (Agel et al. 2014)。

競技毎の受傷機転や予防介入の検討も進められている。サッカーにおいては、試合中の受傷が練習中の受傷よりも多いと言われている (Dragoo et al. 2012)。攻撃の選手と守備の選手の間には受傷の差はなく、ゴールキーパーがボールに触れる時間がフィールドの選手に比べて少ないにも関わらず、膝前十字靭帯損傷のリスクに差はなかったことを報告している (Fauno. 2006)。攻守の受傷率では、守備の際に受傷が多く、特に女子選手は守備の際の非接触型損傷が多かったと言われている (Brophy et al. 2015)。さらに、プロサッカー選手を対象に ACL 損傷時のプレーを分析した研究もなされており、最も受傷が多かった場面は、片脚でボールを奪いに行きながら片足でカッティングやストップ動作を行うプレッシングであった事が認められている (Walden et al. 2015)。サッカーにおける予防介入に関しては、従来行われてきた予防プログラム (Pfeiffer et al. 2006, Mandelbaum et al. 2005) に加えてサッカー選手のために作成された FIFA 11+ (Steffen et al. 2008) が進められている。筋力トレーニングに加えてプライオメトリクスや動的アライメントに焦点を当てた基礎的な予防プログラムを用いた予防介入は効果があったものとならないもの双方ありコンセンサスが得られていない (Pfeiffer et al. 2006, Mandelbaum et al. 2005, Hewett et al. 1999)。また、FIFA 11+を用いた予防介入に関しても、十分な介入効果を認められた検討はなされていないのが現状である (Steffen et al. 2008)。しかし、従来の基礎的な予防プログラムに加えてフィ

ールドでの競技特有のドリルを加えた予防プログラムでは、効果があったという報告もなされている (Walden et al. 2012, Kiani et al. 2010)。

このように、これまで様々な ACL 損傷の受傷機転やリスクファクター、予防介入についての検討が行われており、サッカーやバスケットボール、ハンドボール等、方向変換動作や着地動作が頻繁に行われる競技に受傷が多いのは明らかであるが、方向変換や着地動作を行う際に競技毎にボールを蹴る、投げるなど支持脚以外の動きは異なり、今後はより競技特性を踏まえた受傷機転やリスクファクターについての検討が必要と考えられる。そして、これらを元に競技毎の予防プログラムの構築をしていく事が重要であると考えられる。

【本研究の目的、構成】

本論文では、女子サッカー選手に多く復帰に時間を要す重篤な外傷であるACL損傷の受傷機転を明らかにし、受傷機転となったサッカー特有の動作特性の特徴を明らかにして、サッカーの競技現場における予防トレーニングにつなげる指針を提示する事を目的として研究を進めた。

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、女子サッカー選手のACL損傷の受傷時のアンケート調査により、受傷時の環境や状況、動作やプレータイプについて検討を行った。

第3章では、第2章で明らかになったACL受傷時に多かったプレーであるプレッシングを想定したボールに脚を伸ばす動作について、カッティングやストップ動作との比較から検討を行った。

第4章では、実際の競技現場の映像から、プレッシングの場面を選出し、まずはスクリーニングに使用する2D Video Analysisの精度の検討を行った。さらに、簡易的な2D Video Analysisによって抽出されたプレッシング動作をModel-based Image Matching法を用いて動作の検討を行った。

第5章では、第2章から第4章までの実験結果を踏まえ、女子サッカー特有のACL受傷機転とその動作特性について総合的に考察を行った。また、本論文での課題、今後の展望についても述べた。

第6章では、本論文によって得られた結論を簡潔にまとめた。

本論文においてキーワードとなるプレッシングの定義は、一般的には積極的にボールを奪うというチーム全体の守備戦術と示されている(前田ら, 2003)。本論文におけるプレッシングとは、ボールを奪いに行く局面のことを示し、プレッシング動作とは、ボールを奪いに行く局面の動作を示している。

第二章

女子サッカー選手の ACL 損傷時の受傷機転

~ACL 損傷既往歴を持った女子サッカー選手へのアンケート調査

~

【緒言】

ACL損傷は70~84%が非接触型であるのが特徴である (Boden et al. 2009, Fauno. 2006, McNair. 1990)。また、非接触型損傷は急激な減速からのカッティングやストップ動作、ジャンプの着地動作が主な受傷機転である (Fauno. 2006, Boden et al. 2000)。そして、非接触型損傷時の動作は、減速場面における受傷側への体重移動や地面へのフラットな着地であると言われている (Boden et al. 2000, Teitz. 2001, Krosshaug et al. 2007, Olsen et al. 2004)。非接触型損傷時の膝のアライメントは、膝軽度屈曲位での接地をし、接地後急激な外反と内旋を伴うと報告されている (Koga et al. 2010)。

ACL損傷時のプレー状況についての研究もなされており、攻撃の選手と守備の選手の間に受傷の差はなく、この先行研究では、ゴールキーパーがボールに触れる時間がフィールドの選手に比べて少ないにも関わらず、膝前十字靭帯損傷のリスクに差はなかったことを報告している (Fauno. 2006)。近年では、プロサッカー選手を対象にACL損傷時のプレーを分析した研究もなされており、最も受傷が多かった場面は、片脚でボールを奪いに行きながら片足でカッティングやストップ動作を行うプレッシングであった事が認められている (Walden et al. 2015)。

しかしながら、これらプレー状況についての研究は男子を対象にした研究であるが、ACL損傷のリスクは男子選手よりも女子選手が4~6倍多いと言われている (Hewett. 2000)。また、女子サッカー選手は男子サッカー選手の9倍、膝前十字靭帯損傷のリスクが高いという報告もある (Gwinn et al. 2000)。

このように受傷リスクが高い女子サッカー選手のACL損傷時のプレー状況は明らかになっていないのが現状である。

そこで本研究は、女子サッカー選手のACL損傷時のプレー状況を明らかにすることを目的とした。また、本研究での仮説は、ACL損傷は守備の際のカッティングやストップ動作及びヘディング等空中での相手との接触後の着地動作で起こる非接触型損傷が多いと考えた。

【方法】

1. 対象

15チーム（日本サッカー協会に加盟する大学11チーム及びクラブユース4チーム）に所属する518名の女子サッカー選手の中から、ACL損傷既往歴のある80名にアンケート調査を行った。80名の女子サッカー選手から、再受傷や反対側の受傷含めて90件のACL損傷のデータを入手した。

対象者にはあらかじめ実験内容について十分に説明したうえで参加の同意を得た。また、本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した。

2. アンケート調査

選手には受傷時の状況や環境、動作やプレーの種類について調査を行った。また、受傷時のプレーエリアについての調査も行った。選手は各チームのメディカルスタッフの確認の元、受傷時の状況を思い出し、アンケートを記載した。アンケートは、以下の内容であった：1) 年齢、2) 利き脚、3) 受傷側、4) グラウンドの種類、5) スパイクの種類、6) ポジション、7) 接触の有無、8) 練習か試合か、9) プレーエリア、10) 攻守の種類、11) ボールの関わりの有無、12) プレーの種類（ドリブル、パス、トラップ、シュート、ヘディング、スライディング、クリア、プレッシング、ルーズボール、ゴールキーパー動作、その他）、13) 動作の種類、14) プレー強度。

接触の種類は、「非接触」や「間接的な接触（受傷脚以外の部位への接触）」、「直接的な接触（受傷脚への直接的な接触）」に分類した。練習試合は試合に含んだ。Figure 2.1 のフィールドエリアの分類は先行研究を参考に以下のように定義した：attacking zone（フィールドの攻撃エリア；1 と 2、3）、midfield zone 2（フィールドの中盤の攻撃側エリア；4 と 5）、midfield zone 1（フィールドの中盤守備側エリア；6 と 7）、defensive zone（フィールドの守備エリア；8 と 9）(Andersen et al. 2003)。

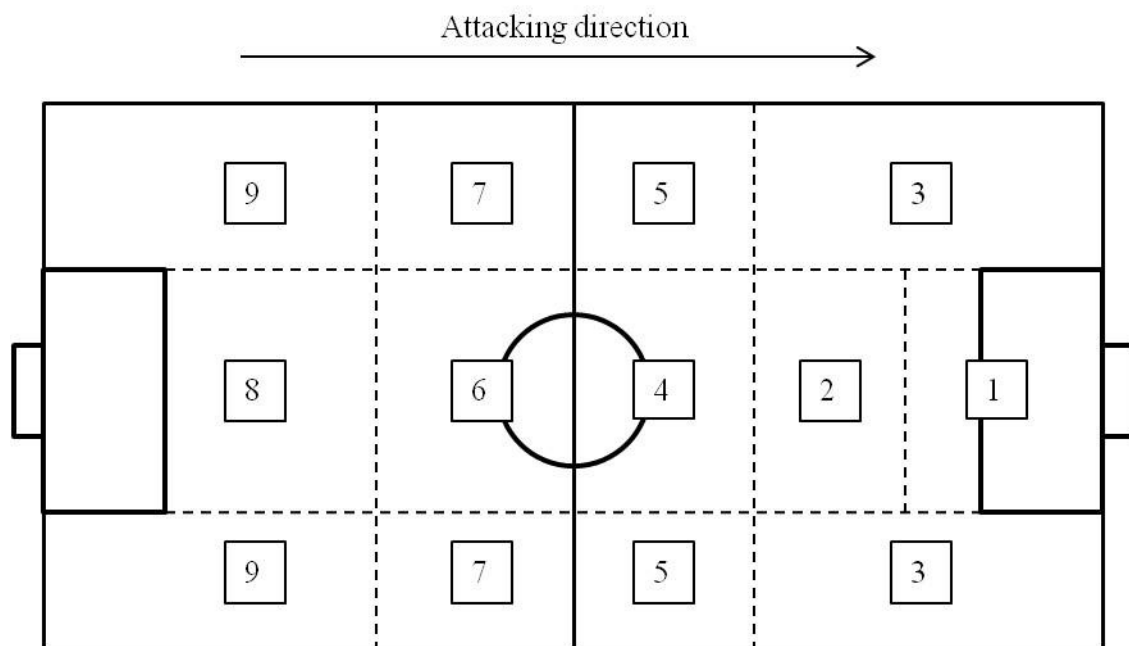


Figure 2.1 The definition of the field area classification. Attacking zone is 1-3 of the field, Midfield zone 2 is 4-5 of the field, Midfield zone 1 is 6-7 of the field, Defensive zone is 8-9 of the field in the questionnaire.

3. 統計処理

測定結果は平均値 (mean) ± 標準偏差 (SD) で表示し、統計的検定量の算出にはIBM SPSS Statistics (ver.21.0 for Windows) を用いた。プレータイプ (プレッシングとその他) 及び接触の有無 (非接触と接触) の関係はフィッシャーの正確確率検定 (Fisher's exact test) を用いて、95%信頼区間及びオッズ比を算出した。統計学的有意水準は5%未満とした。

【結果】

本研究は、女子サッカー選手のACL損傷時についてのアンケート調査90件を分析した。選手のアンケート調査時の平均年齢は 19.4 ± 2.3 歳、受傷時の平均年齢は 17.4 ± 1.9 歳であり、18歳での受傷が最も多かった (Figure 2.1)。90件の受傷の中で、62件 (69%) は人工芝において受傷、57件 (63%) は丸形スパイクを着用の際に受傷、41件 (46%) はディフェンスの選手が受傷、54件 (60%) は守備の際に受傷、56件 (62%) は試合中の受傷、そして55件 (61%) は非接触型損傷であった (Table 2.2)。

55件の非接触型損傷の中で、動作としては29件 (55%) がカッティング動作中、プレーとしては22件 (44%)がプレッシング中に受傷しており、ヘディングからの着地中の受傷は3件 (5%) であった (Table 2.3)。プレータイプ (プレッシングとその他) 及び接触の有無 (非接触と接触) の度数分布は、プレッシングにおける非接触型損傷がその他のプレーにおける接触の有無の割合と比較して優位に多い (オッズ比: 3.03; 95%CI, 1.11–8.25, $p=0.036$) という結果であった (Figure 2.2)。56件の試合中の受傷の中で、35件 (63%) が守備の局面での受傷であり、その内16件 (46%) がdefensive zoneにおける受傷であった。そして、守備の局面の中で16件 (46%) がプレッシングのプレー中の受傷であり、その内defensive zoneにおける受傷は4件 (25%)であった。

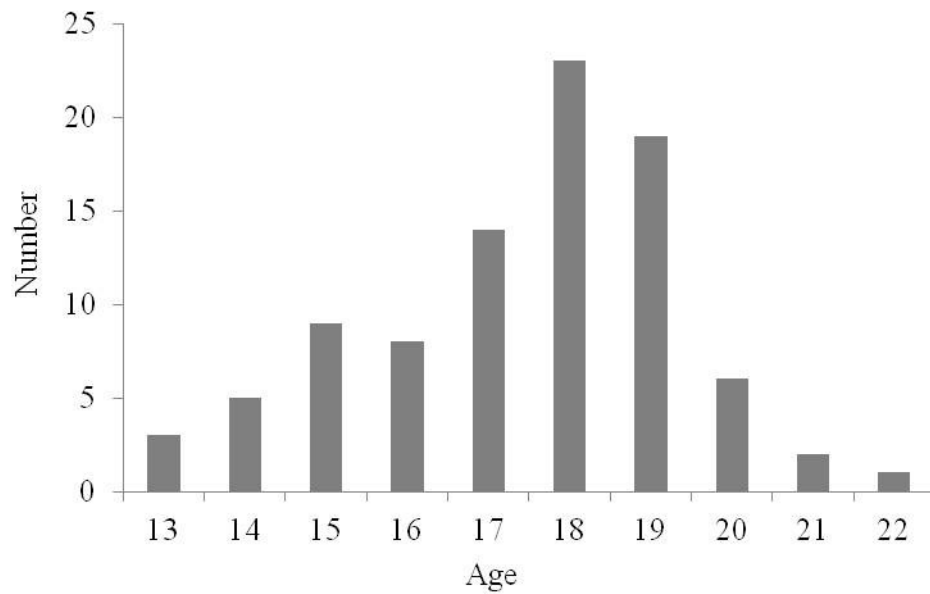


Figure 2.2 Age at anterior cruciate ligament injury

Table 2.1 Characteristics and circumstances during anterior cruciate ligament injuries

Characteristics and circumstances	Total (n = 90)
Dominant leg/Non-dominant leg	48/42
Natural turf/Artificial turf/Soil	16/62/12
Round-type spikes/Blade-type spikes/Unknown	57/32/1
GK/DF/MF/FW	7/41/26/16
Offense/Defense	36/54
Game/Practice	56/34
Lower contact/Upper contact/Non-contact	21/14/55

GK, goalkeeper; DF, defender; MF, midfielder; FW, forward

Table 2.2 Playing type, playing situation, and maneuver during anterior cruciate ligament injuries

	Playing type	Playing situation	Player contact	Maneuver at non-contact injury
Pressing (n = 29)	Pressing to opponent (n = 29)	Defense (n = 29)	Non-contact (n = 22)	Cutting (n = 17)
			Indirect (n = 3)	Stopping (n = 5)
			Direct (n = 4)	
Dribbling (n = 14)	Dribbling (n = 14)	Offense (n = 14)	Non-contact (n = 6)	Cutting (n = 5)
			Indirect (n = 3)	The other (n = 1)
			Direct (n = 5)	
Trapping (n = 11)	Trapping (n = 11)	Offense (n = 10) Defense (n = 1)	Non-contact (n = 3)	Stopping (n = 1)
			Indirect (n = 2)	Landing (n = 2)
			Direct (n = 6)	
Loose ball (n = 6)	Competing for loose ball (n = 6)	Offense (n = 2) Defense (n = 4)	Non-contact (n = 2)	Landing (n = 1)
			Direct (n = 4)	The other (n = 1)
Kicking (n = 9)	Shooting (n = 4)	Offense (n = 8)	Non-contact (n = 7)	Landing (n = 2)
	Passing (n = 4)	Defense (n = 1)	Indirect (n = 1)	The other (n = 5)
	Clearing (n = 1)		Direct (n = 1)	
Others (n = 15)	Pass cutting (n = 4)	Offense (n = 2)	Non-contact (n = 9)	Cutting (n = 2)
	GK (n = 4)	Defense (n = 12)	Indirect (n = 3)	Stopping (n = 1)
	Heading (n = 3)		Direct (n = 2)	Landing (n = 7)
	Sliding (n = 2)			
	Others (n = 2)			

GK, goalkeeper

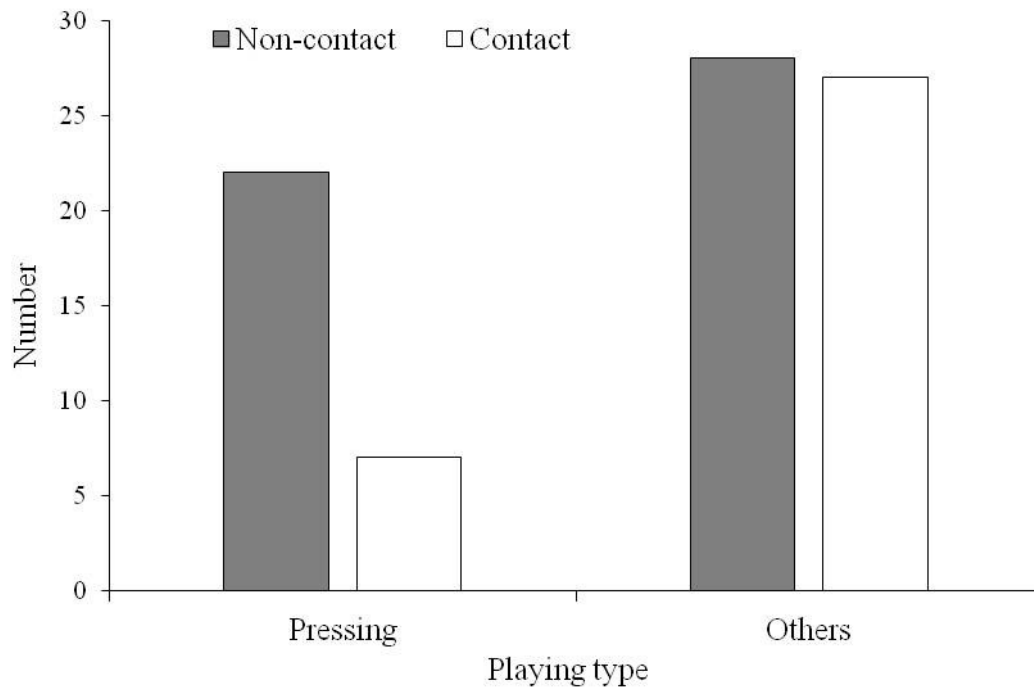


Figure 2.3 Playing type at anterior cruciate ligament injury

【考察】

本研究において、女子サッカー選手の ACL 損傷は、プレーエリアに関係なく、守備の際のプレッシングのプレー中に非接触型の損傷が多いことが分かった。

本研究において、女子サッカー選手は非接触型損傷が接触型損傷よりも多く、これは様々な先行研究の知見と一致している (Boden et al. 2009, Fauno. 2006, McNair. 1990)。さらに、非接触型損傷の割合は、プレッシング (76%) がドリブルやトラップ、キック等その他のプレー中の受傷 (49%) よりも多かった。これは、先行研究において男子プロサッカー選手の非接触型損傷の受傷機転はプレッシングが多かった事と一致している (Walden. 2015)。加えて、この先行研究では、受傷時の動作はプレッシングの際に片脚をボールの方に伸ばしながらのサイドカッティングであったと報告している。過度の股関節の内旋と膝関節の内旋はカッティング動作で起こりやすく、この動作は非接触型 ACL 損傷のリスクファクターとして報告されている (Imwalle et al. 2009)。また、女子アスリートが男子アスリートよりも膝外転 (外反) 角度が大きい事は女子アスリートにとって非接触型 ACL 損傷のリスクを増長させていると言われている (Chappell et al. 2002, Ford et al. 2005)。本研究では、受傷動作の確認は出来ていないが、先行研究のような要因によってプレッシングにおける ACL 損傷が多かった可能性はある。また、本研究では、ACL 損傷は攻撃よりも守備の際に多く、守備の際の ACL 損傷は守備のエリアで多かった。しかし、プレッシング中の ACL 損傷はエリアに関係なく発生していた。先行研究では、守備中の外傷・障害は守備のエリアで、攻撃中の外傷・障害は攻撃のエリアで発生していた (Andersen et al. 2003)。プレッシングがどこのエリアで多く行われるかどうかはチームの戦術によっても異なる可能性があるが、プレッシングは他のプレーとくらべてどのエリアでプレーする選手も ACL 損傷の可能性ある事が示唆された。女子サッカー選手にとって、プレッシング動作が非接触型損傷のリスクを増長させるかどうか更なる検討をしていくべきである。

本研究では、ヘディング後の着地動作による受傷が非接触型損傷の中の 5%であった。男子サッカー選手を対象にした先行研究によると、ヘディング後の着地による受傷は方向変

換に次いで多いという報告が多くなされている (Walden et al. 2015, Brophy et al. 2015, Fauno et al. 2006) 。着地動作による受傷が少ない事が女子サッカー選手の特徴の一つと考えられ、よりプレッシングなど方向変換動作やストップ動作を繰り返すプレーや動きに焦点を当てて予防に取り組む必要性が考えられた。

本研究では、ACL 損傷時の年齢は 18 歳が最も多かった。さらに、18 歳までに ACL 損傷の発生が増えていたのに対して、18 歳以降 20 歳までの ACL 損傷の発生が急激に減っていた。先行研究において、女性の ACL 損傷は 15 歳から 19 歳までが多いと報告されており (Renstrom et al. 2008) 、本研究の結果と一致している。また、膝のモーメントは急激な身長や体重の増加に伴って増加するという報告や (Quatman et al. 2006) 、ジャンプ動作時の動的アライメントは思春期の間の身長や体重などの身体の成長に伴って変化するという報告もある (Sasaki et al. 2013) 。思春期の成長による身長や体重の増加が、膝など動的アライメントの変化を引き起こし、18 歳までの ACL 損傷の増加の一原因になった可能性はある。よって、若年、特に 18 歳までの女子サッカー選手に対して、動的アライメントなどに焦点を当てて予防トレーニングを実施していく事が必要だと考えられた。

本研究では ACL 損傷は人工芝での発生が非常に多かった。先行研究では、サッカーにおける ACL 損傷は人工芝での受傷が多いが、人工芝が受傷のリスクを高めているかどうかは明らかではなかった (Balazs et al. 2015) 。日本において、若年女子サッカー選手が天然芝でプレーする事は稀である。よって、本研究においても、人工芝での受傷が非常に多い結果であったが、人工芝が ACL 損傷のリスクを高めているかどうかは明らかではない。また、本研究では、丸形スパイクを着用時の ACL 損傷が多かった。先行研究では、女子サッカー選手における着地動作で足の力学と靴の種類は関係なかった (Mitchell et al. 2008) 。丸形スパイクが ACL 損傷のリスクを増加させているかどうかを判断するには、全チームの選手の着用しているスパイクの種類を確認しなければならない。

本研究では、練習よりも試合での ACL 損傷が多く、これは試合の方が練習よりも選手の運動量や強度が高い事が原因と考えられる。また、相手との駆け引きによって姿勢のコン

トロールが困難になり、試合中の ACL 損傷が多かった可能性もある。

今後、高強度で瞬時の判断を必要とするプレッシングのような動作をこれまで行われてきた基礎的な予防トレーニングに加えて行うべきだと考えられた。

本研究の限界としては、まず記述的研究であるという事である。そして、受傷時の情報が選手の記憶に頼らざるを得ない事である。今後は、ビデオ映像にて ACL 損傷時の状況も同時に確認していく事が必要である。

【結語】

そこで本研究は、女子サッカー選手の ACL 損傷時のプレー状況を明らかにすることを目的として検討を行った。その結果、女子サッカー選手の ACL 損傷は、18 歳までの受傷が多く、プレーエリアに関係なく守備の際のプレッシングにおける方向変換動作での非接触型損傷が多かった。よって、若年期にポジション関係なくプレッシングのようなサッカー特有の動作も考慮して予防に取り組む必要性が示唆された。

第三章

ボールに片脚を伸ばすサッカー特有動作の動作解析

～ **Motion Analysis** を用いた動作解析 ～

【緒言】

これまで ACL 損傷の主な受傷機転とされているカッティング動作の動作解析は盛んに行われており、女性は男性よりも膝屈曲角度が小さく (Malinzak et al. 2001, McLean et al. 2004)、膝外転角度が大きい (Ford et al. 2003, McLean et al. 2007, Hewett et al. 2004) と言われている。また、カッティングの際の股関節や体幹の動きの検討もされており、股関節内旋が膝外転モーメントを増加させるという報告 (McLean et al. 2005, Sigward et al. 2007) や、体幹の側方傾斜が膝外転モーメントを増加させるという報告もある (Houck et al. 2006)。

近年では、プロサッカー選手を対象に ACL 損傷時のプレーを分析した研究もなされており、最も受傷が多かった場面は、片脚でボールを奪いに行きながら片足でカッティングやストップ動作を行うプレッシングであった事が認められている (Walden et al. 2015)。本研究の第二章でも、女子サッカー選手を対象にした ACL 損傷時のプレーはプレッシングが多かったという結果であった。

先行研究において、プレッシング時の損傷の解析は二次元的に行われており、ほとんどが 30-90 度の横方向へのカッティングにて受傷していたと報告されている (Walden et al. 2015)。また、キネマティクスの検討もされているが、二次元動作解析でありプレッシング動作の正確なキネマティクスは明らかになっていないのが現状である。更に、ACL 損傷の主な受傷機転であるカッティングやストップ動作の検討は多くされているが、プレッシングのように片脚をボールに伸ばしながらのカッティング動作との違いは明らかになっていない。

そこで、本研究ではストップやカッティング動作との比較から、片脚をボールに伸ばしながら方向変換するサッカー特有の動作特性を明らかにすることを目的とした。本研究の仮説は、ストップやカッティング動作と比べて、ボールに片脚を伸ばすサッカー特有動作は体幹の伸展や側屈位での接地をし、接地後の膝の外転角度が増加することである。

【方法】

1. 対象

関東大学女子サッカーリーグに所属する女子サッカー選手 10 名 (年齢: 21.0 ± 1.1 歳、身長: 160.1 ± 5.0 cm、体重: 52.0 ± 2.8 kg) を対象者とした。対象者は ACL 損傷の既往がなく、6 ヶ月以内に下肢の傷害がない者とした。

対象者にはあらかじめ実験内容について十分に説明したうえで参加の同意を得た。また、本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した。

2. 動作課題

対象者はストップ、90 度カッティング、競技現場におけるプレッシング動作を想定した 90 度横へのボールに脚を伸ばしながらのストップ動作 (以下: プレッシング動作) の計測を行った。各試技は、フォースプレートから 3m 離れた地点をスタートとして、出来る限り早いスピードで突入し、フォースプレート上にて右足で各試技を行った。なお、対象者は全員右足が利き足であった。スタート地点とスタートから 2m の地点には赤外線タイム計測器 (Brower Timing 社) を配置し、突入スピードを計測した。突入スピードは、各対象者のストップ動作における最速スピードを基準とした (Figure 3.1)。

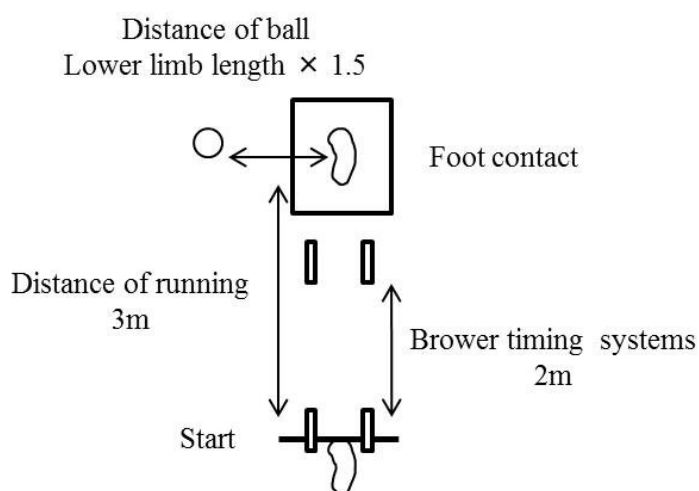


Figure 3.1 Illustrations of maneuver criteria for 1) Stopping, 2) Cutting, 3) Pressing tasks.

各試技の条件は以下の通りである (Figure 3.2)。

ストップ動作は、フォースプレート上にて右足で止まる動きである。ストップ後安定するまで片脚立位姿勢を維持した。姿勢の維持、フォースプレート上の接地位置が正確で、突入スピードが最速スピードの 80% 以上の場合を成功試技とし、成功試技 3 回の計測を行った。

90 度カッティング動作は、フォースプレート上にて右足で 90 度方向変換する動きである。方向変換の角度、フォースプレート上の接地位置が正確で、突入スピードがストップ動作の最速スピードの 80% 以上の場合を成功試技とし、成功試技 3 回の計測を行った。

プレッシング動作は、フォースプレート上にて右足で止まりながら左足で 90 度横方向へのボールを触るように足を伸ばす動作である。予備実験にて実際のプレッシング動作の際のボールの位置が下肢長の 1.5m 程度の横方向であったため、プレッシング動作で使用したボールの位置は、各対象者の下肢長×1.5m 横方向に配置した (Figure 3.1)。ストップ後明らかに姿勢が崩れておらず、フォースプレート上の接地位置が正確で、突入スピードがストップ動作の最速スピードの 80% 以上の場合を成功試技とし、成功試技 3 回の計測を行った。

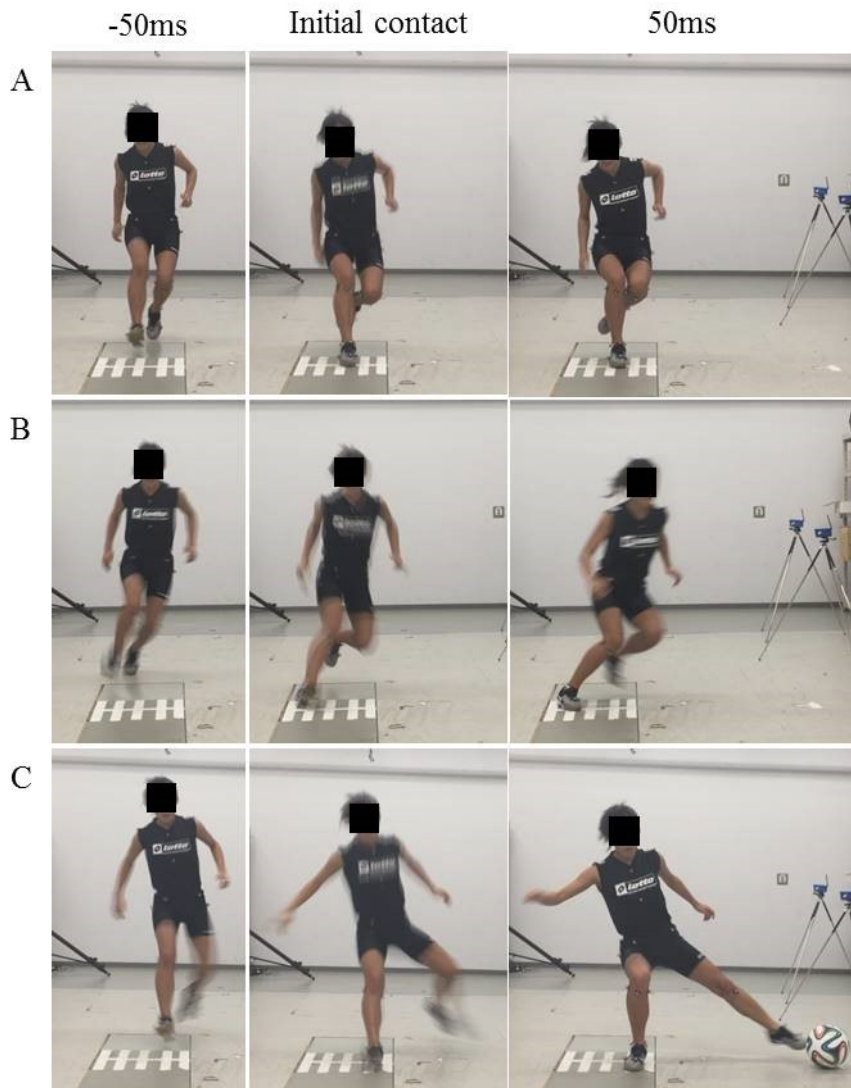


Figure 3.2 Picture of maneuver criteria for A) Stopping, B) Cutting, C) Pressing tasks.

3. 動作計測

対象者に 30 個の反射マーカを貼付した。貼付位置は胸骨柄、剣状突起、第二胸椎、第七胸椎、両側の肩峰、上前腸骨棘、上後腸骨棘、大転子、大腿骨外側顆、大腿骨内側顆、脛骨粗面、外果、内果、踵骨隆起、第一中足骨頭、第2中足骨頭、第5中足骨頭であった (Figure 3.3)。貼付位置は先行研究 (Leardini et al. 2011, Cappozzo et al. 1995) を参考に決定した。マーカは両面テープを用いて貼布し、粘着が不安定な部位にはサージカルテープにてマーカベースを固定した。動作計測は早稲田大学所沢キャンパス内の動作解析室にて行われ

た。動作解析システムは赤外線カメラ 8 台 (Motion Analysis Inc.) において、サンプリング周波数 200Hz にて各マーカーの三次元位置座標の計測を行った。計測された各マーカーの三次元位置座標より Visual 3D (C-Motion Inc.) を用いて、体幹屈曲、側屈及び回旋角度、股関節屈曲、外転及び外旋角度、膝関節屈曲、外転及び外旋角度を算出した。カッティング地点にはフォースプレートが設置されており、サンプリング周波数 1000Hz にて床反力データの計測を行った。床反力データは接地の判定に用いた。



Figure 3.3 Thirty reflective marker were secured the limb

4. データ解析

体幹屈曲及び側屈、回旋、股関節屈曲及び外転、外旋、膝関節屈曲及び外転、外旋を接地の100ms前より200ms後までの間においてそれぞれ算出した。膝関節角度については接地から床反力垂直成分 (Vertical Ground Reaction Force [以下: vGRF]) が最大値に達するまでの変位量を算出した。すべての値は成功試技3回の平均値として求めた。各関節の接地の100ms前、50ms前、接地時における動作間の比較、膝関節は接地後の変位量における動作間の比較から検討を行った。

5. 統計処理

測定結果は平均値 (mean) ±標準偏差 (SD) で表示し、統計的検定量の算出にはIBM SPSS Statistics (ver.21.0 for Windows) を用いた。各動作間の比較は反復測定一元配置分散分析及び事後検定としてBoferroniの多重比較検定を用いた。また、全動作における体幹側屈角度と膝外転変位量の関係には、Pearsonの相関関係を用いた。それぞれ、統計学的有意水準は5%未満とした。

【結果】

各動作の接地の 100ms 前から 200ms 後までの時系列変化を体幹角度は Figure 3.4 に、股関節角度は Figure 3.5 に、膝関節角度は Figure 3.6 に示した。また、接地の 100ms 前、50ms 前、接地時の体幹角度は Table 3.1 に、股関節角度は Table 3.2 に、膝関節角度は Table 3.3 に示した。

体幹屈曲角度において、接地の 100ms 前 ($F(2,18) = 13.773, p < 0.01$) 及び 50ms 前 ($F(2,18) = 9.538, p < 0.01$) に主効果を認めた。多重比較によると、接地の 100ms 前及び 50ms 前においてプレッシング動作がストップ動作及びカッティング動作より有意に小さかった ($p < 0.05$)。また、体幹の軸足側への側屈において、接地の 100ms 前 ($F(2,18) = 46.455, p < 0.01$)、50ms 前 ($F(2,18) = 45.340, p < 0.01$) 及び接地時 ($F(2,18) = 39.280, p < 0.01$) に主効果を認めた。多重比較によると、接地の 50ms 前及び接地時においてプレッシング動作がストップ動作より有意に大きかった ($p < 0.01$)。接地の 100ms 前においてプレッシング動作がストップ動作及びカッティング動作より有意に大きかった ($p < 0.05$)。体幹回旋角度について有意差は認められなかった。

股関節屈曲角度において、接地時 ($F(2,18) = 8.757, p < 0.01$) に主効果を認めた。多重比較によると、プレッシング動作及びカッティング動作がストップ動作よりも有意に小さかった ($p < 0.05$)。また、股関節外転角度において、接地の 100ms 前 ($F(2,18) = 10.610, p < 0.01$)、50ms 前 ($F(2,18) = 11.523, p < 0.01$) 及び接地時 ($F(2,18) = 20.485, p < 0.01$) に主効果を認めた。多重比較によると、接地の 100ms 前、50ms 前及び接地時においてプレッシング動作及びカッティング動作はストップ動作より有意に大きかった ($p < 0.05$)。そして、股関節外旋角度において、接地の 100ms 前 ($F(2,18) = 18.026, p < 0.01$)、50ms 前 ($F(2,18) = 12.779, p < 0.01$) 及び接地時 ($F(2,18) = 15.441, p < 0.01$) に主効果を認めた。多重比較によると、接地の 100ms 前、50ms 前及び接地時においてプレッシング動作はカッティング動作とストップ動作より有意に大きかった ($p < 0.05$)。

膝関節角度については、接地の 100ms 前、50ms 前及び接地において、有意差は認められ

なかった。

そして、接地からvGRFが最大値に達するまでの膝関節変位量を Table 3.4 に示した。vGRFが最大値に接するまでの時間を Table 3.5 に示した。体幹側屈角度と膝外転変位量の関係を Figure 3.7 に示した。

接地からvGRFが最大値に達するまでの膝関節外転角度変位量において主効果を認めた ($F(2,18) = 9.131, p < 0.01$)。多重比較によると、プレッシング動作がカッティング動作及びストップ動作よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。また、膝関節内旋角度変位量において主効果を認めた ($F(2,18) = 16.233, p < 0.01$)。多重比較によると、プレッシング動作及びカッティング動作がストップ動作よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。膝関節屈曲変位量においては有意差が認められなかった。なお、vGRFが最大値に達するまでの時間は、プレッシング動作とその他の動作との有意差は認められなかった。

体幹の軸足側への側屈における接地の100ms前の角度と接地後からvGRF最大までの膝関節外転角度変位量に正の有意な相関関係 ($r=0.355, p<0.05$) が認められた。

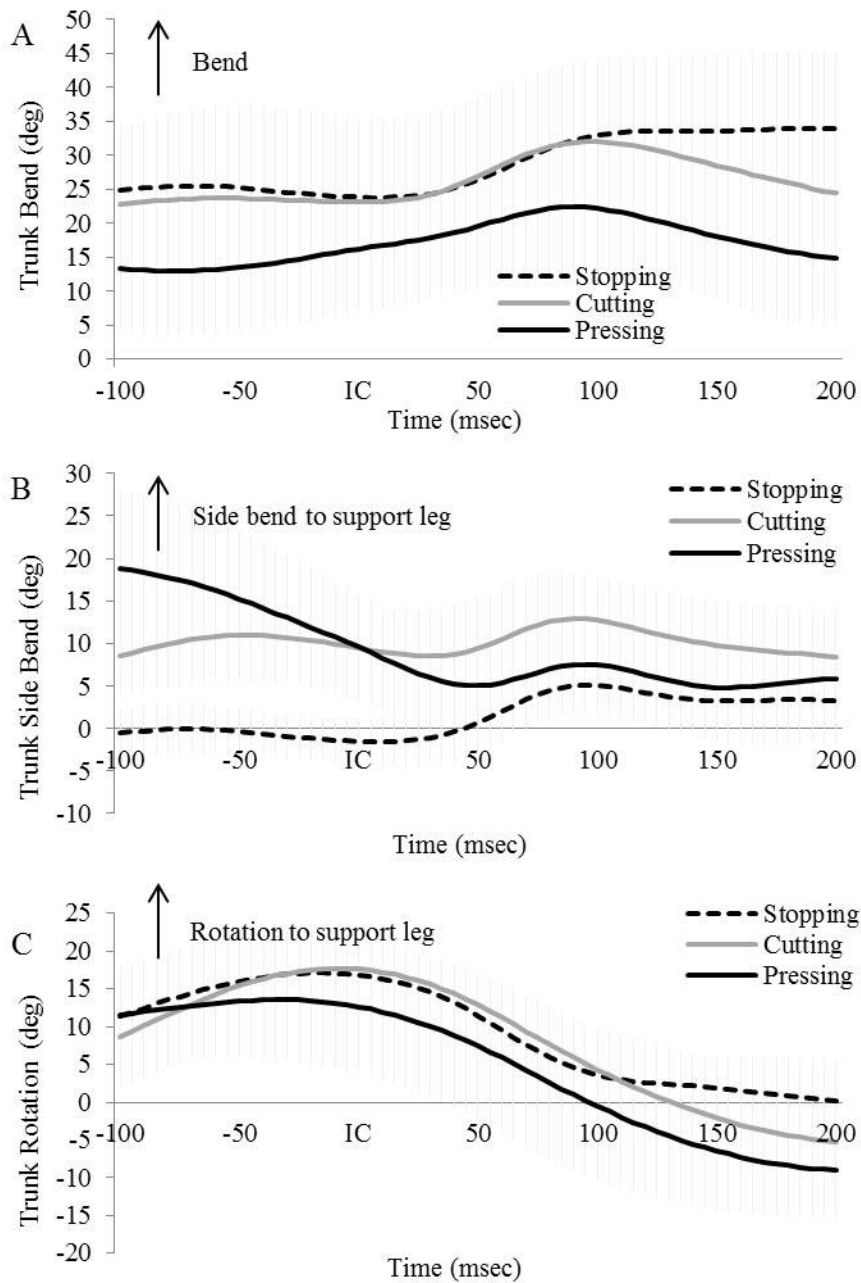


Figure 3.4 Task-based comparisons of joint motion

Data are presented for (A) Trunk bend, (B) Trunk side bend, and (C) Trunk rotation

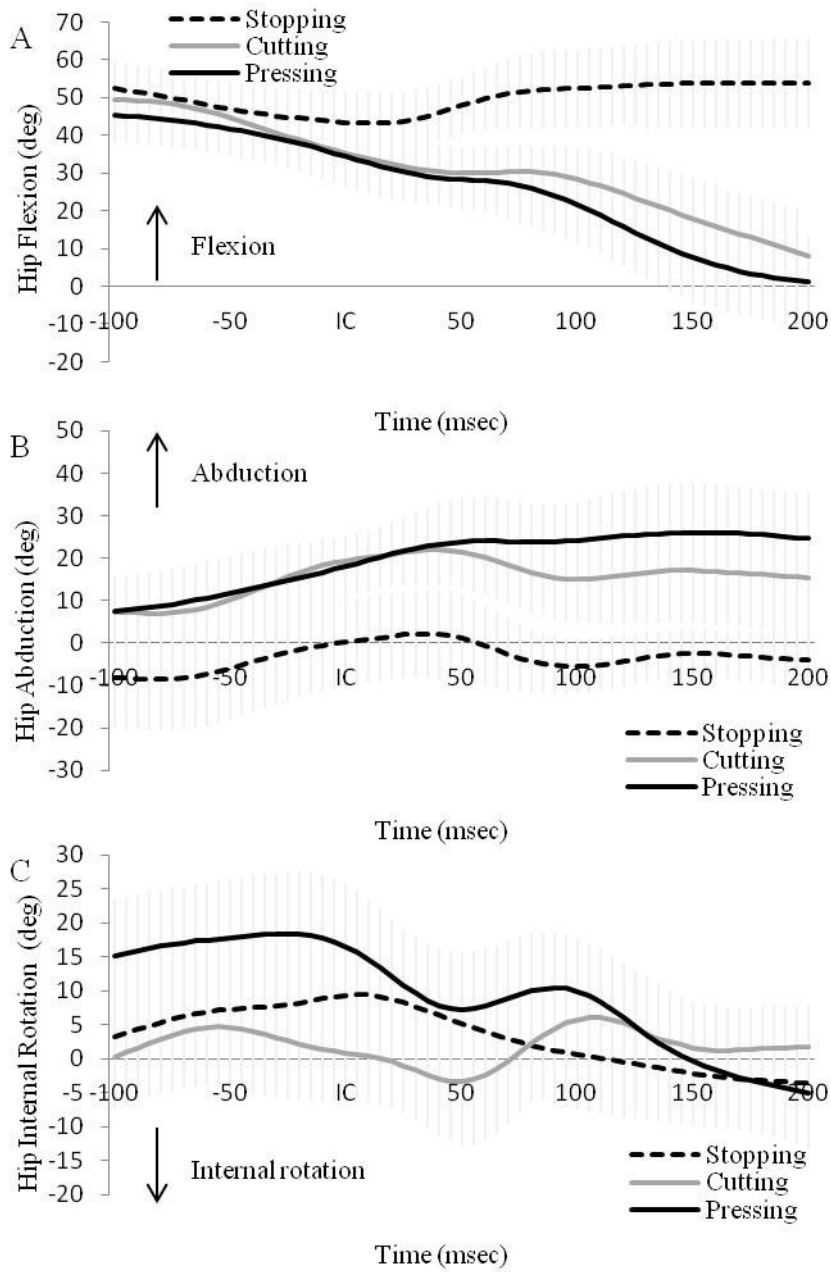


Figure 3.5 Task-based comparisons of joint motion

Data are presented for (A) Hip flexion, (B) Hip Abduction, and (C) Hip external rotation

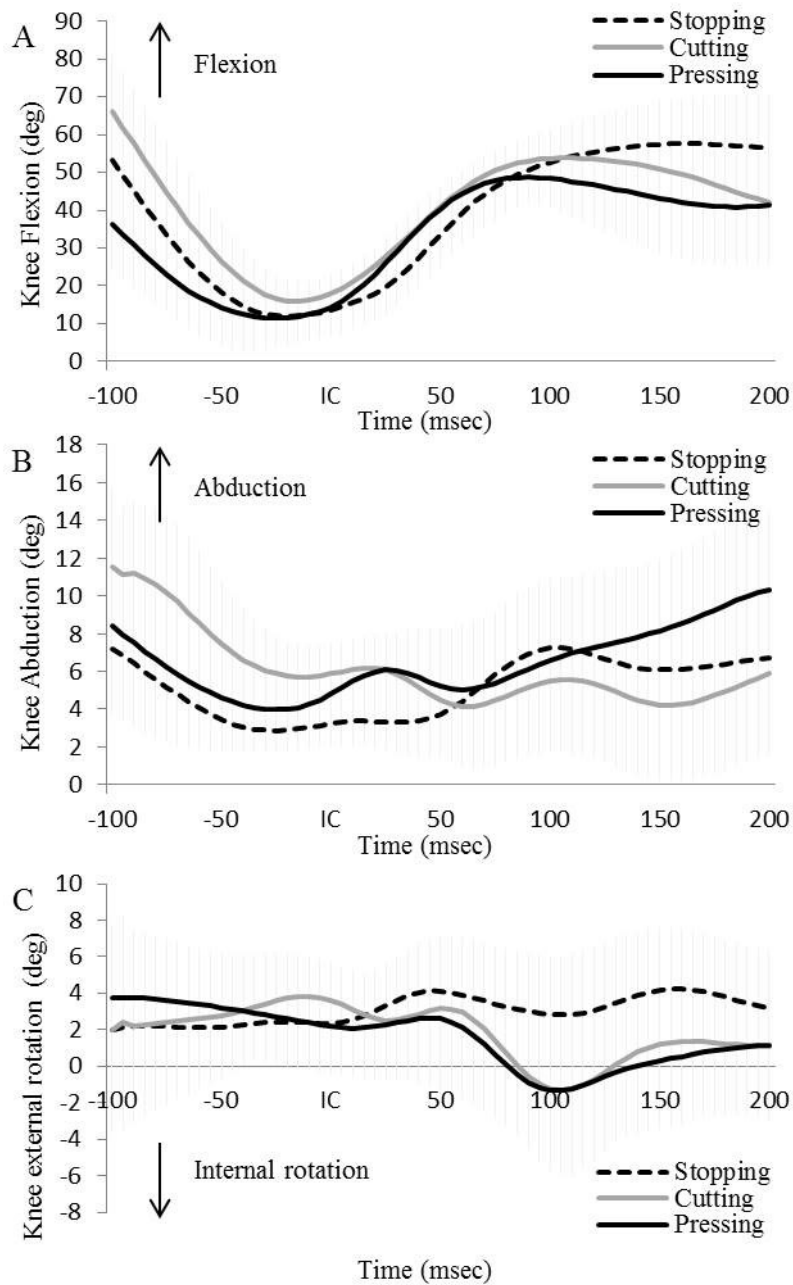


Figure 3.6 Task-based comparisons of joint motion

Data are presented for (A) Knee flexion, (B) Knee Abduction, and (C) Knee external rotation

Table 3.1 Mean (SD) for tasks of trunk angle (deg) at the time of IC-100ms, IC-50ms and IC

Maneuver	Trunk bend			Trunk side bend			Trunk rotation		
	-100ms	-50ms	IC	-100ms	-50ms	IC	-100ms	-50ms	IC
Pressing	13.4	13.5	16.2	18.9	15.2	9.5	11.6	13.4	12.6
	(9.4)	(9.5)	(9.3)	(9.2)	(8.1)	(6.3)	(6.3)	(7.6)	(8.8)
Stopping	25.0*	25.2*	23.8	-0.6**	-0.4**	-1.5**	11.4	16.0	16.8
	(9.5)	(12.1)	(11.7)	(2.9)	(2.7)	(2.7)	(6.4)	(6.2)	(4.9)
Cutting	22.8**	23.7**	23.1	8.5*	11.0	9.4	8.7	15.4	17.6
	(9.1)	(9.6)	(9.6)	(4.7)	(5.4)	(5.0)	(6.6)	(6.4)	(4.3)

Pressing vs Stopping or Cutting *: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

Trunk side bend: Trunk side bend to support leg, Trunk rotation: Trunk rotation to support leg

Table 3.2 Mean for tasks of Hip angle at the time of IC-100ms, IC-50ms and IC

Maneuver	Hip flexion			Hip abduction			Hip external rotation		
	-100ms	-50ms	IC	-100ms	-50ms	IC	-100ms	-50ms	IC
Pressing	45.3	41.7	34.4	7.4	11.8	18.1	15.1	17.8	16.5
	(7.4)	(7.2)	(8.2)	(8.3)	(8.8)	(7.1)	(8.3)	(8.6)	(9.2)
Stopping	52.5*	47.0	43.4	-8.1*	-6.0*	0.3*	3.3*	7.3*	9.3*
	(9.2)	(8.8)	(9.7)	(11.9)	(12.1)	(10.3)	(7.3)	(8.3)	(6.5)
Cutting	49.3	44.7	35.2	7.3	10.1	19.4	0.2*	4.6*	0.9*
	(7.2)	(5.8)	(6.3)	(6.1)	(5.7)	(6.0)	(7.8)	(9.0)	(7.1)

Pressing vs Stopping or Cutting *: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

Table 3.3 Mean for tasks of Knee angle at the time of IC-100ms, IC-50ms and IC

Maneuver	Knee flexion			Knee abduction			Knee external rotation		
	-100ms	-50ms	IC	-100ms	-50ms	IC	-100ms	-50ms	IC
Pressing	36.4	14.2	14.4	8.4	4.6	4.8	3.8	3.2	2.2
	(12.0)	(6.9)	(6.0)	(3.4)	(1.7)	(1.7)	(3.9)	(2.5)	(2.5)
Stopping	52.3	18.2	13.7	7.2	3.4	3.2	2.0	2.1	2.3
	(23.6)	(14.2)	(6.9)	(3.6)	(1.7)	(1.2)	(3.7)	(2.2)	(2.1)
Cutting	66.2	26.5	17.9	11.6	7.4	5.9	2.0	2.8	3.6
	(14.8)	(10.3)	(4.9)	(4.1)	(3.3)	(1.6)	(5.6)	(3.4)	(2.0)

Pressing vs Stopping or Cutting *: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

Table 3.4 Mean (SD) for knee angular excursion (deg) between IC and the time of peak vGRF

Maneuver	Knee flexion	Knee abduction	Internal tibial rotation
Pressing	17.4 (7.7)	1.3 (1.3)	0.2 (1.3)
Stopping	13.4 (5.4)	0.1 (0.9)**	-1.2 (1.6)*
Cutting	16.0 (9.1)	-0.5 (0.9)*	1.2 (1.7)

Pressing vs Stopping or Cutting *: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

Table 3.5 Mean (SD) for time of peak vGRF (ms)

Maneuver	Time
Pressing	47.0 (25.8)
Stopping	40.5 (11.7)
Cutting	48.0 (30.0)

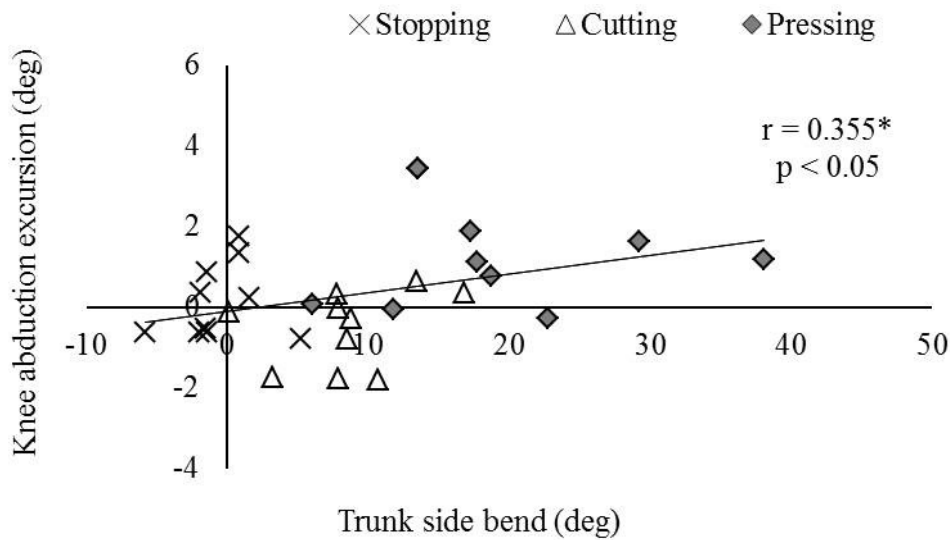


Figure 3.7 Correlation plot between trunk side bend angle 100ms before IC and knee abduction angular excursion between IC and the time of peak vGRF

【考察】

本研究の目的は、片脚をボールに伸ばしながら方向変換するサッカー特有の動作特性を明らかにすることであった。カッティング動作やストップ動作との比較から、接地前の予備動作や接地後の膝関節角度変化の考察を行う。

本研究の結果は、接地から接地後の vGRF が最大値に達するまでの膝関節外転角度変位量において、プレッシング動作がカッティング動作及びストップ動作と比較して大きかった。先行研究において、膝外転角度や外転モーメントの増加は ACL 損傷リスクであるという報告はされており (Sell et al. 2006, Chapell et al. 2002, Besier et al. 2001)、実際の ACL 受傷場面の映像からも接地後の膝外転は特徴的に認められている (Bere et al. 2011, Krosshaug et al. 2007, Olsen et al. 2004, Teiz et al. 2001, Boden et al. 2000)。さらに、実際の競技中の受傷時の映像から 3 次元的に受傷動作を分析したものでは、接地後 40 ms までに膝外転が 12 度と急激に増大していたと報告されている (Koga et al. 2010)。本研究における、プレッシング動作における vGRF が最大値に接した時間は接地から 47.0 ± 25.8 ms であり (Table 3.5)、プレッシング動作がカッティング動作やストップ動作よりも接地直後の膝外転変位が大きかった事は、ACL 受傷のリスクになり得ると考えられる。

接地前の予備動作において、プレッシング動作はカッティング動作及びストップ動作と比較して、体幹の軸足側への側屈が大きかった。先行研究によると、体幹の支持脚側への側屈は膝外転モーメントを増大させると報告されている (Weltin et al. 2015, Ogasawara et al. 2014.)。また、女性の体幹の固有感覚の低下と過剰な横方向への体幹の変異は、膝の外転トルクを増大させ ACL 損傷の強い予測因子になると言われている (Zazulak et al. 2007)。さらに、この研究によると、体幹中心が腕の相対位置への変化であっても、29~60%の膝外転負荷が増大する (Zazulak et al. 2007)。本研究において、プレッシング動作及びカッティング動作では接地前から接地後まで股関節外転角度が大きかった。先行研究において、サイドステップカッティング時には股関節外転角度及び内旋角度が大きくなるにつれて膝外転角度も大きかったと報告されている (Zaslow et al. 2016, Sigward et al. 2007, McLean et

al. 2004)。しかし、本研究においてプレッシング動作、カッティング動作共に股関節外転角度が大きいにも関わらず、カッティング動作では接地後の膝外転変位はほとんど起こっていない。また、本研究において、接地前の体幹側屈角度と膝外転変量は有意な相関関係を示していた。このことから、本研究においては、プレッシング動作における接地前の支持脚側への体幹側屈が膝外転変位増大に影響している事が考えられた。

さらに、本研究ではプレッシング動作で接地前に体幹屈曲角度が小さかった。先行研究において ACL 受傷時の肢位は体幹屈曲角度が小さく、体幹屈曲角度の小さい接地はリスクファクターである可能性が挙げられている (Sheehan et al. 2012, Boden et al. 2009, Hewett et al. 2000)。また、先行研究において、予測条件下での方向変換時の過大な体幹変位は姿勢を調整するために身体重心をコントロールするための補正動作であると報告されている (Houck et al. 2006)。本研究において、プレッシング動作が接地前に支持脚側へ体幹側屈が大きく、体幹屈曲が小さかった事は、ボールを触るために反対側へ脚を伸ばすための身体重心のコントロールによるものだと考えられ、この体幹の接地前動作がプレッシング動作の特徴であり、ACL 損傷のリスクを含んでいる可能性が示唆された。

しかしながら、本研究は実験室内の予測条件下でのプレッシング動作であり、リスクを回避するための準備動作が行われた可能性は高い。Toe-out での着地は、膝外転及び内旋角度を減少させると言われている (Tran et al. 2016)。本研究では股関節が外旋位で膝もやや外旋位であった事から Toe-out での接地であった可能性が高い。接地前の体幹の動きによる危険を回避するための予備動作として接地前に股関節外旋させ、Toe-out での接地をしていた可能性も考えられる。

本研究の限界としては、力学的情報が明らかになっていない事が挙げられる。また、予測条件下のみでの検討であることが挙げられる。今後は、上記2点の要素を加えて更なる検討をしていく必要がある。

【結語】

本研究では、プレッシングのように片脚をボールに伸ばしながら方向変換を行うサッカー特有の動作特性を明らかにすることを目的としてカッティング動作やストップ動作との比較から検討を行った。その結果、プレッシング動作は接地前動作において、体幹屈曲角度が小さく、軸足側への側屈が大きく、接地後は膝外転角度が大きくなった。体幹が危険肢位を取りやすい事がプレッシングの特徴の一つと考えられるが、予測条件下のプレッシング動作では股関節を外旋させるなど体幹以外の関節によって危険肢位を回避していた可能性もあり、準備動作時の姿勢の制御をコントロールするように予防トレーニングしていく事が大切と考えられた。

第四章

競技現場におけるプレッシング動作の動作解析

【緒言】

本研究の第3章において、プレッシングのような横方向へのボールを片脚で伸ばしながら止まる動きは、サイドカッティング動作やストップ動作と比較して、接地前の体幹の伸展や側屈が大きくなり、接地後に膝外転が大きくなるという結果であった。しかし、止まったボールへのプレッシングは接地前から股関節を外旋させ、体幹の姿勢不良を代償して、姿勢制御を可能にしていた事が考えられた。実際の競技現場では相手との駆け引きの中でボールの奪い合いを行うので、競技中のプレッシングでは姿勢制御が更に困難になる可能性があり、実験室内において競技現場と同様の動作を再現する事は限界がある。したがって、実際の競技現場のプレッシングを分析することが動作特性の解明には必要不可欠と考えられる。

競技現場のビデオ映像を用いて三次元的に動作を分析・評価する Model-based Image matching (以下: MBIM) 法 (Krosshaug et al. 2005) が開発され、実際の競技中の受傷場面のキネマティクスなど受傷機転の分析において、貴重なデータを示している (Koga et al. 2010, Koga et al. 2011, Krosshaug et al. 2007)。しかし、この手法は分析に時間がかかる事が懸念点として挙げられている。また、より簡易的に ACL 損傷場面のビデオ映像から動作を分析・評価する二次元動作解析も進められおり (Boden et al. 2009, Hewett et al. 2009, Krosshaug et al. 2007, Olsen et al. 2004)、矢状面の二次元動作評価 (以下: 2D Video Analysis) によって、受傷前の競技場面の動作からスクリーニングを行う事が出来る可能性が考察されている (Sheehan et al. 2012)。

サッカー選手のプレッシング動作による非接触型 ACL 損傷は、片脚接地で 30-90 度の横方向へのカッティングが多かった事が認められている (Walden et al. 2015)。また、矢状面上の評価において非接触型 ACL 損傷時は、「接地足から体幹中心が離れている」、「下肢角度が大きく」、「体幹前傾斜角度が小さくなる」と報告されている (Sheehan et al. 2012)。

そこで、本研究は、2D Video Analysis によって、非接触型 ACL 損傷に近似した動きをしているプレッシングを抽出し、MBIM 法による三次元動作評価によって、実際の競技現場

におけるプレッシングの動作特性を明らかにする事を目的として、以下の研究を進めていった。1 節では、2D Video Analysis の有用性の検討をし、2 節では、実際に競技現場の映像から 2D Video Analysis によって抽出された ACL 損傷リスクを含んだプレッシング動作の典型例を MBIM 法による三次元動作評価により検討を行った。本研究の仮説は、第 1 節では、矢状面上の 2D Video Analysis は膝屈曲角度や体幹角度など ACL 損傷リスクとされる関節角度の判別を簡便に行うことが出来るとした。また第 2 節では、実際の競技現場のプレッシングは相手との駆け引きにより実験室内の動きよりも股関節外旋といった予備回避動作が困難になるが、接地後の股関節屈曲によって受傷を回避出来るとした。

第4章 -1節 競技現場の映像を用いた 2D Video Analysis のパイロット・スタディ

【目的】

第4章 -1節では、実際の競技現場の定量的な評価に 2D Video Analysis を用いるためのパイロット・スタディを行った。本研究では、競技現場のビデオ映像から分析する二次元動作解析である 2D Video Analysis の矢状面上における ACL 損傷リスクの抽出方法としての有用性を検討することを目的とした。

【方法】

1. 対象

対象者は、関東女子サッカーリーグに所属する女子サッカー選手で、通常の競技活動を行っている者とした。対象者にはあらかじめ実験内容について十分に説明したうえで参加の同意を得た。また、本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した。

2. ビデオ映像収集

被験者が出場している関東女子サッカーリーグ戦の試合を 3～5 台のサンプリング周波数が 60Hz、解像度が高画質 (1080i) に設定されたデジタルビデオカメラ (HDR-CX590V, Sony 社製) を用いて撮影し、ビデオ映像を収集した。ビデオカメラは、試合に支障がない範囲でサッカーグラウンドを取り囲むように配置し、ボールを追って 90 分間撮影した。記録されたビデオ映像のうち、被験者によるボールを奪いに行く際の片脚でのプレッシング動作を抽出し、解析画像として用いた。撮影された映像は、画質を下げないように AVCHD (Advanced Video Codec High Definition) フォーマットとしてパーソナルコンピュータに保存した。保存された映像は、さらにビデオ編集ソフト (Edius Neo 3.5, Grass Valley 社製) を用いて非圧縮 TIFF (1960×1080 ピクセル) に変換され、静止画像として記録された。

3. ビデオ分析の手順

A systematic video analysis (Stuelcken et al. 2015, Bere et al. 2011) の手順を参考にして、ビデオ映像から二段階を経てプレッシング動作を選出した。第一段階として、中央に位置するカメラの映像から3名のアスレティックトレーナー (以下:AT) によってプレッシングと考えられる66場面を抽出した。なお、抽出する際に、(1) 矢状面に近い映像である事、(2) 接地前後の選手の動き全体が映っている事、(3) 選手の動きが把握出来る程度に暗くなく遠くない映像である事を基準にした。第二段階として、(1) 片脚でのカッティング及びストップ動作であること、(2) 脚の踏み替えをせずにワンステップであること、(3) 浮いている脚をボールの方へ伸ばしていることを基準にして、3人のATで協議して更に28場面を選出して、接地時の静止画像について2-D Video Analysisを用いて分析を行った。

3. 2D-Video Analysis

28場面の静止画像は、先行研究を参考に以下の通り分析を行った (Sheehan et al. 2012)。接地脚側の体幹軸、大腿軸、下腿軸、体幹中心 (Body's center of mass; 以下 COM) を手動で表記した。体幹軸は肩関節中心と股関節中心を結ぶ線、大腿軸は股関節中心と膝関節中心を結ぶ線、下腿軸は膝関節中心と足関節中心を結ぶ線、COMは体幹の楕円の中心と定義した。また、体幹軸は、COMを通る鉛直線より前方への傾斜をプラス (+)、後方への傾斜をマイナス (-) とし、体幹軸と鉛直線の成す角度を体幹角度 (Trunk angle)、大腿軸と鉛直線の成す角度を下肢角度 (Limb angle)、大腿軸と下腿軸の成す角度を膝角度 (Knee angle) と定義した。さらに、地面と接している足底部の中心を (The base of support; 以下 BOS) とし、COMを通る鉛直線が地面と交わる点とBOSまでの距離のピクセル数を計測し、股関節中心から膝関節中心の線の長さのピクセル数で除したものをCOMからBOSまでの距離 (COM_BOS) と定義した (Figure 4.1.1)。測定項目の算出には、フリーソフトウェアであるImage-J (National Institutes of Health) を用いた。なお、全ての測定項目は3回ずつ計測し、それぞれの平均を測定値として採用した。

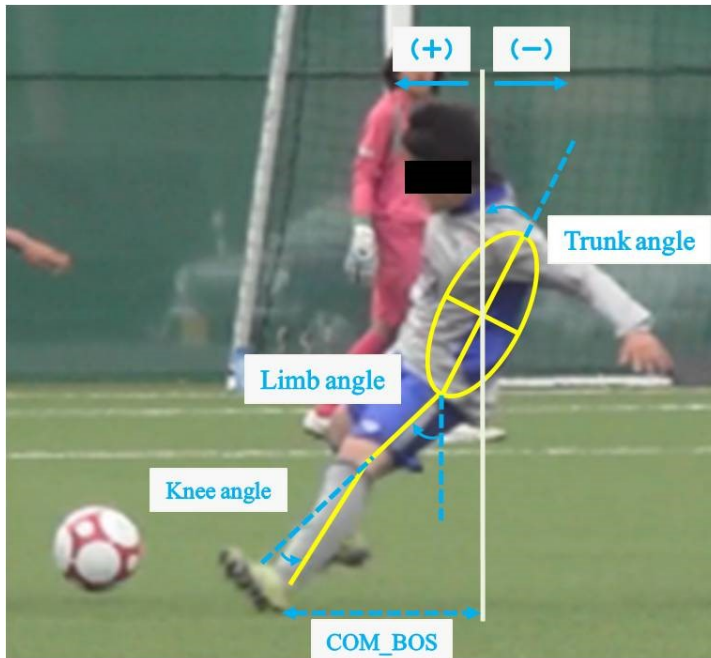


Figure 4.1.1 2D-Video Analysis during pressing

5. データ解析

測定結果は平均値 (mean)±標準偏差 (SD) で表示し、統計的検定量の算出にはIBM SPSS Statistics (ver.21.0 for Windows) を用いた。さらに予備実験として、21場面のCOM_BOS及び体幹角度、下肢角度、膝角度について、検者内及び検者間の級内相関係数 (以下: ICC) を算出した。検者内ICC (1, 1) は、COM_BOSが0.99、体幹角度が0.98、下肢角度が0.99、膝角度が0.94であった。検者間ICC (2, 1) は、COM_BOSが0.94、体幹角度が0.93、下肢角度が0.98、膝角度が0.93であった。

6. 統計処理

測定結果は平均値 (mean)±標準偏差 (SD) で表示し、統計的検定量の算出にはIBM SPSS Statistics (ver.21.0 for Windows) を用いた。COM_BOS及び体幹角度、下肢角度、膝角度の関係には、Pearsonの相関関係を用いた。統計学的有意水準は5%未満とした。

【結果】

接地の際の各角度とCOM_BOSの平均値は、体幹角度： -8 ± 11 度、下肢角度： 49 ± 8 度、膝角度： 29 ± 11 度、COM_BOS： 1.2 ± 0.4 pix/pixであった。また、COM_BOSと体幹角度 ($r=-0.71$, $p<0.01$) に負の有意な相関関係、COM_BOSと下肢角度 ($r=0.49$, $p<0.05$)に正の有意な相関関係、COM_BOSと膝角度 ($r=-0.55$, $p<0.01$)に正の有意な相関関係が認められた (Figure 4.1.2)。

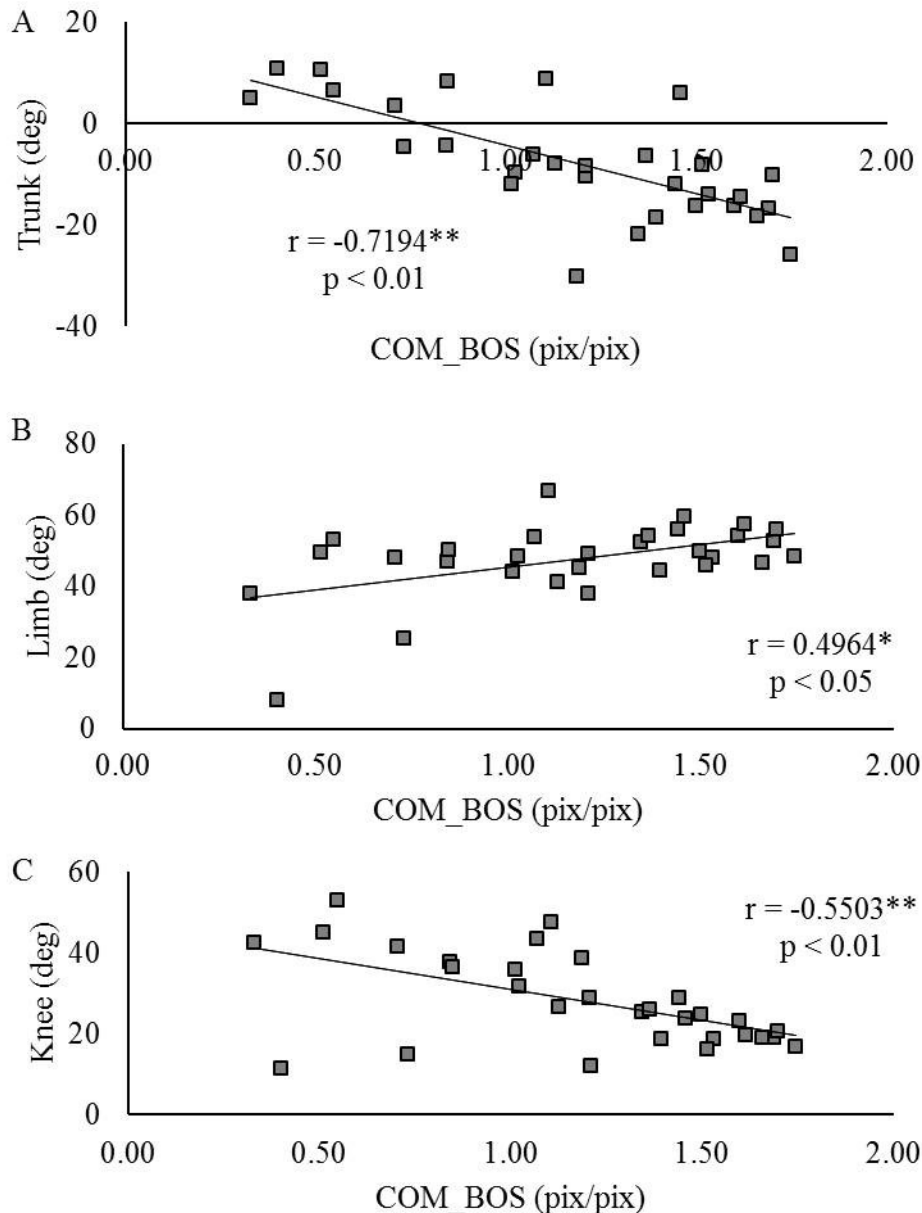


Figure 4.1.2 Correlation plot between COM_BOS and (A) Trunk angle, (B) Limb angle, and (C) Knee angle

【考察】

本研究では、競技現場のビデオ映像から分析する 2D Video Analysis の矢状面上における ACL 損傷リスクを含んだ動作の抽出方法としての有用性を検討することを目的とした。

本研究の結果は、実際の競技現場のプレッシングの際の接地時は、COM_BOS : 1.2 ± 0.4 pix/pix、体幹角度 : -8 ± 11 度、下肢角度 : 49 ± 8 度、膝角度 : 29 ± 11 度であった。先行研究において、ACL 受傷の際に、膝軽度屈曲位での接地が特徴である事がと挙げられている (Sheehan et al. 2012, Olsen et al. 2004, Teiz et al. 2001, Boden et al. 2000) 。そして、接地時に女性が男性よりも膝屈曲角度が浅い事が ACL 損傷のリスクファクターであるという報告もある (Krosshaug et al. 2007) 。また ACL 損傷時には、体幹軽度屈曲位で後方重心での接地をしていると言われている (Sheehan et al. 2012) 。更に、本研究において、膝角度が小さく、下肢角度が大きく、そして特に体幹角度の前傾が小さくなるほど、COM_BOS が大きくなる傾向を示した。本研究と同様の手法を用いて ACL 損傷の際の接地時の分析を行った先行研究において、ACL 損傷群とコントロール群を比較した結果、ACL 損傷群はコントロール群に比べて、COM_BOS が大きく、体幹角度の前傾が小さく、そして下肢角度が大きくなる事が報告されている (Sheehan et al. 2012) 。さらに、ACL 損傷群はほとんどの場合において COM_BOS が 1.2px/pix より大きく、COM_BOS を測ることにより簡易に矢状面上の ACL 損傷リスクを含んだ接地を抽出できる可能性が考察されている (Sheehan et al. 2012) 。よって、矢状面評価においては、COM_BOS が大きくなるほど ACL 損傷時と類似した動作になる事を示唆している。そのため、この評価方法を用いて COM_BOS が大きい動作を抽出することで、簡便に矢状面上の ACL 損傷リスクを含んだ接地肢位を抽出する事が出来る可能性が示唆された。

ビデオ映像を用いた 2D Video Anlysis は矢状面の選別が主観に頼らざるを得ない事が課題の一つとして挙げられる。本研究の場合、3~5 台のカメラを用いているため、最適に配置された場合でも対象者に対するカメラアングルは 3 台で最低 120 度、5 台でも最低 72 度である。つまり、実際の矢状面からは 3 台の場合最大 60 度、5 台の場合最大 36 度の撮影

角度誤差が起こり得る。膝関節角度 30 度の場合、股関節が 50 度外旋すると 9 ± 1 度矢状面上の関節角度評価に誤差が生じると言われている (林ら. 2010) 。このことは、本研究で生じうる 36 度や 60 度といった最大撮影角度誤差があった場合、それ以上の関節角度誤差を生じさせる事が考えられる。さらに、撮影角度誤差に前額面の動きが加わった場合、実際に生じている関節角度との誤差はさらに過大もしくは過小評価される可能性はある。しかし、本研究では、これら撮影角度誤差を抑えるために、A systematic video analysis (Stuelcken et al. 2015, Bere et al. 2011) の手順を参考にして、3 人の AT により出来る限り矢状面に近い角度の映像があるものを選択しており、検者内及び検者間の級内相関係数が非常に高い値を示した。よって、実際の競技現場におけるビデオ映像を用いた 2D Video Analysis は、A Systematic video analysis の手順に従い、複数人の専門家によるコンセンサスを得ながら分析を行う事で、現場の動作の簡易的な動作評価としては利用出来る事が示唆された。

【結語】

本研究では、競技現場のビデオ映像から分析する 2D Video Analysis の矢状面上における ACL 損傷リスクの抽出方法としての有用性を検討した。その結果、矢状面上の静止画像の評価においては、COM_BOS が大きくなるほど膝角度が小さく、下肢角度が大きく、そして体幹角度が後傾位であった。COM_BOS が大きい動作を抽出することで、簡便に矢状面上の ACL 損傷リスクを含んだ接地肢位を抽出する事が出来る可能性が示唆された。

第4章 -2節 2D Video Analysisによる動作抽出とMBIM法を用いた動作解析

【目的】

第4章 -2節では、実際に競技現場の映像から2D Video Analysisによって抽出されたACL損傷リスクを含んだ接地をしているプレッシング動作をMBIM法による三次元動作評価により検討することを目的とした。

【方法】

1. 対象

対象者は、関東女子サッカーリーグに所属する女子サッカー選手で、通常の競技活動を行っている者とした。対象者にはあらかじめ実験内容について十分に説明したうえで参加の同意を得た。また、本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に則り、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した。

2. ビデオ映像収集及び動作分析

ビデオ映像収集及び2D Video Analysisは1節と同様の方法を用いた。

3. ビデオ分析の手順

1節に示された基準で選出された28場面のプレッシング動作の映像から、2-D Video Analysisを用いてACL損傷場面に近い場면을定量的に抽出した。本研究1節において、2D Video Analysisにおいて、COM_BOSが大きくなるほど膝角度が小さく、下肢角度が大きく、そして体幹角度が後傾位になり、COM_BOSが大きい動作を抽出することで、簡便に矢状面上のACL損傷リスクを含んだ接地肢位を抽出する事が出来る可能性が示唆された。よって、COM_BOSが大きい場面が矢状面上のキネマティクスがACL損傷リスクを含んでいる接地として4例 (COM_BOS: 1.74, 1.70, 1.53, 1.50) を抽出した。そしてMBIM法を用いて4

例のプレッシング動作の三次元的なキネマティクスを算出した。

4. Model-based Image matching (MBIM) 法

2D Video Analysis において更に選出された 4 場面に対し、4 方向から撮影されたビデオ映像を用いて、MBIM 法での三次元動作解析を行った。MBIM 法は、複数のビデオ映像に背景と骨格モデルをマッチングさせて動作を再構築し、三次元的なキネマティクスを分析する手法である (Krosshaug et al. 2005)。マッチングには、3 次元アニメーションソフトウェアである Poser4 及び Poser Pro Pack (Smith Micro Software Inc.) を使用した。実寸のサッカー場の白線やゴール等背景を仮想環境で構築し、4 方向のビデオ映像の背景を手動でマッチングさせた。さらに、撮影された選手の実寸を骨格モデル (Zygot Media Group Inc.) (Figure 4.2.1) にて構築し、4 方向のビデオ映像の動きを手動でマッチングさせた (Figure 4.2.2)。マッチングされた映像は、バイアスを最小限にするために、別の専門家によるコンセンサスが得られるまで調整された。そして、マッチングされた骨格モデルのキネマティクスをカスタマイズされた Matlab Script (Math Works Inc, USA) を用いて算出した。



Figure 4.2.1 Zygot skeleton model had 21 segment and 57 degrees of freedom

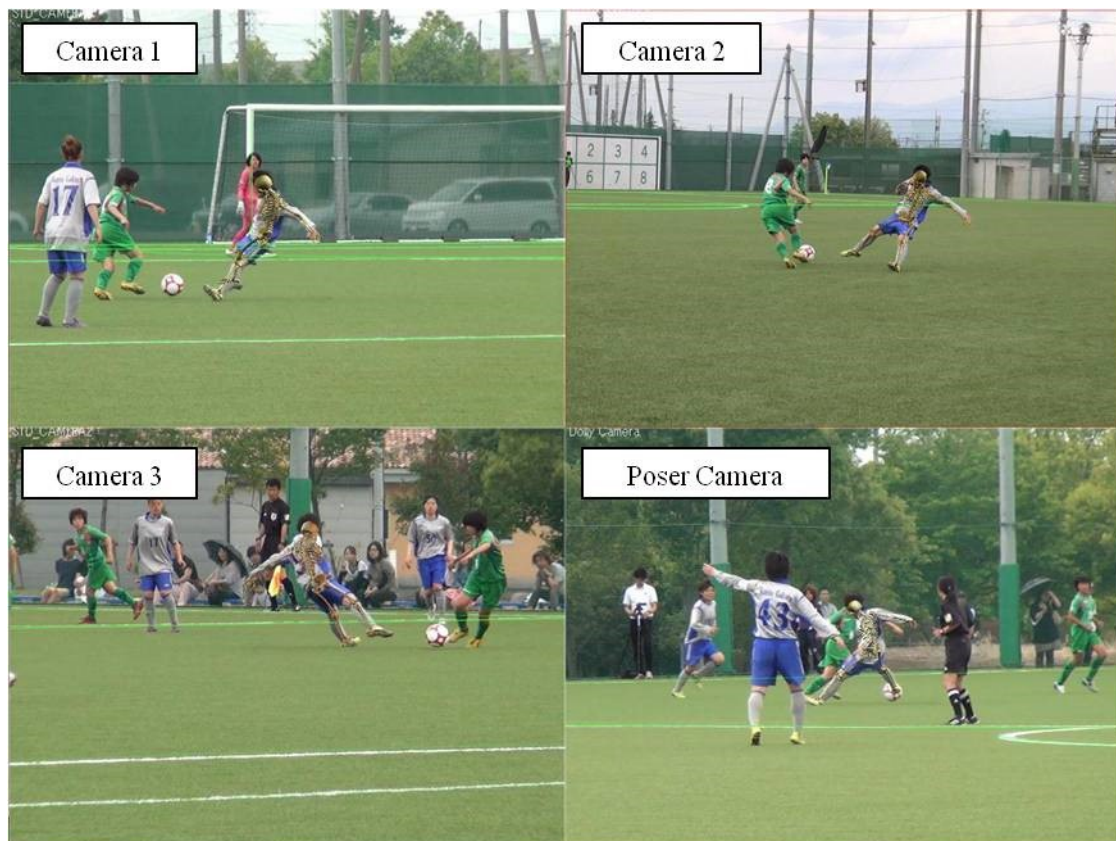


Figure 4.2.2 A video matched in Poser. These 4 panels show the customized skeleton model and the soccer court model superimposed on and matched with the background video image from 4 different cameras.

4. 分析方法

COM_BOSの値を参考に抽出されたプレッシング動作をMBIM法によって体幹屈曲及び側屈、回旋角度、股関節屈曲及び外転、外旋角度、膝関節角度屈曲及び外転、外旋角度を接地の100ms前より200ms後までの間においてそれぞれ算出した。そして、各角度は接地の100ms前及び接地時の角度、接地後50msの角度から検討を行った。

【結果】

各関節の接地の 100ms 前から 200ms 後までの時系列変化を Figure 4.2.3、Figure 4.2.4 及び Figure 4.2.5 に示した。

接地前から接地時の関節角度は、体幹屈曲角度において、接地 100ms 前は 23.4 ± 9.1 度、接地時は 25.2 ± 12.6 度と軽度屈曲位を示した。体幹の支持脚側への側屈角度において、接地 100ms 前は 2.9 ± 6.8 度、接地時は 7.5 ± 8.0 度と支持脚側への軽度側屈位を示した。股関節外転角度において、100ms 前は 26.3 ± 7.0 度、接地時は 32.2 ± 5.1 度と外転位を示した。股関節外旋角度において、100ms 前は -7.9 ± 16.7 度、接地時は 10.0 ± 6.3 度と接地前は内旋位で接地時には軽度外旋位を示した。膝屈曲角度において、100ms 前は 70.8 ± 13.8 度、接地時は 10.5 ± 3.3 度と接地前は屈曲位で接地時には軽度屈曲位を示した。

接地後の関節角度は、膝外転角度において接地時が -0.8 ± 2.4 度、50ms 後は 0.5 ± 1.9 度とわずかな外転方向への変位を示した。膝内旋角度において接地時が 0.5 ± 2.7 度、50ms 後は 0.4 ± 1.6 度と角度変位は過少であった。

股関節屈曲角度において、接地時は 24.0 ± 17.0 度、接地 50ms 後は 33.5 ± 12.8 度と屈曲方向への変化を示した。膝屈曲角度において、接地時は 10.5 ± 3.3 度、接地 50ms 後は 26.7 ± 6.0 度と屈曲方向への変化を示した。

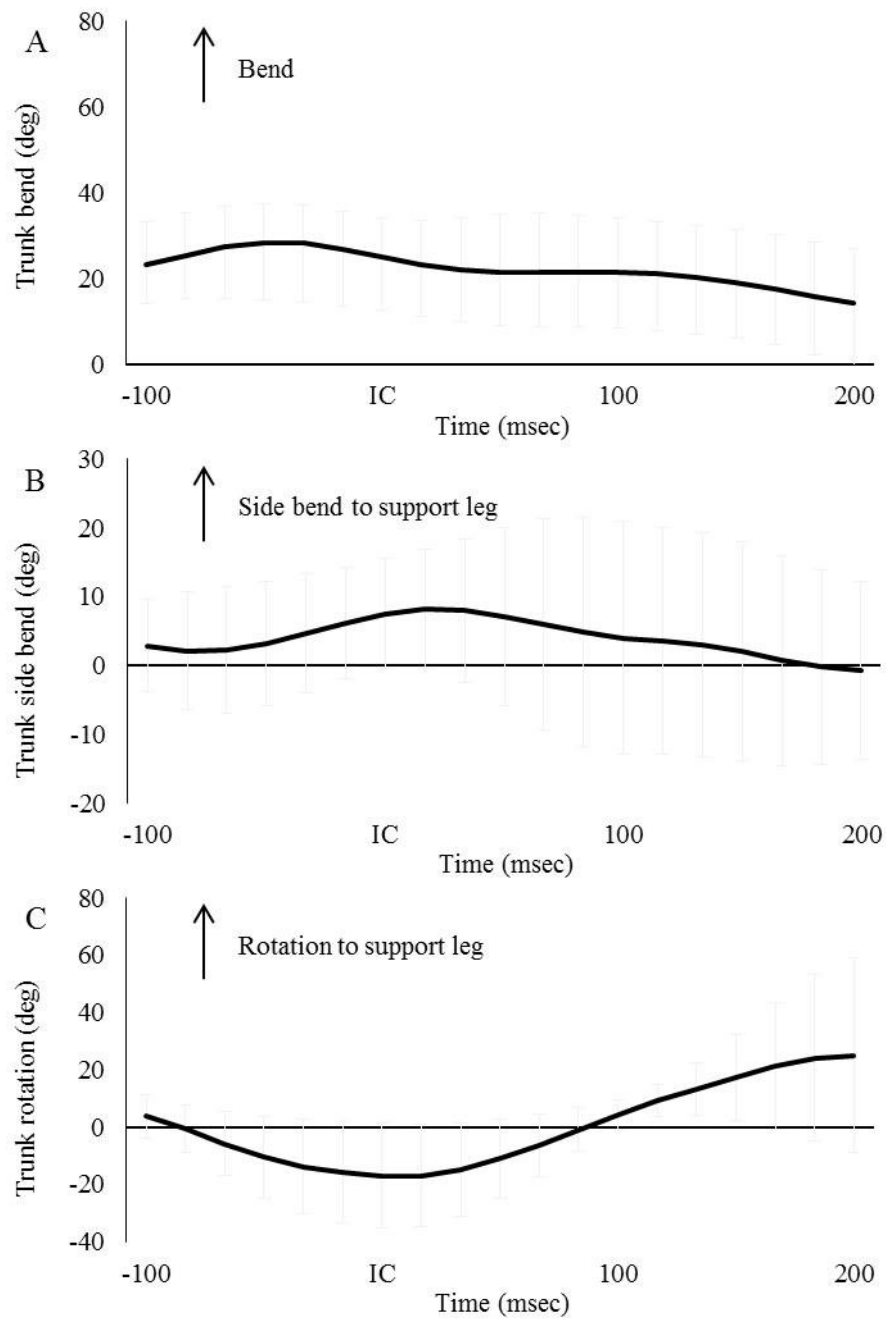


Figure 4.2.1 Model-based comparisons of joint motion

Data are presented for (A) Trunk bend, (B) Trunk side bend, and (C) Trunk rotation

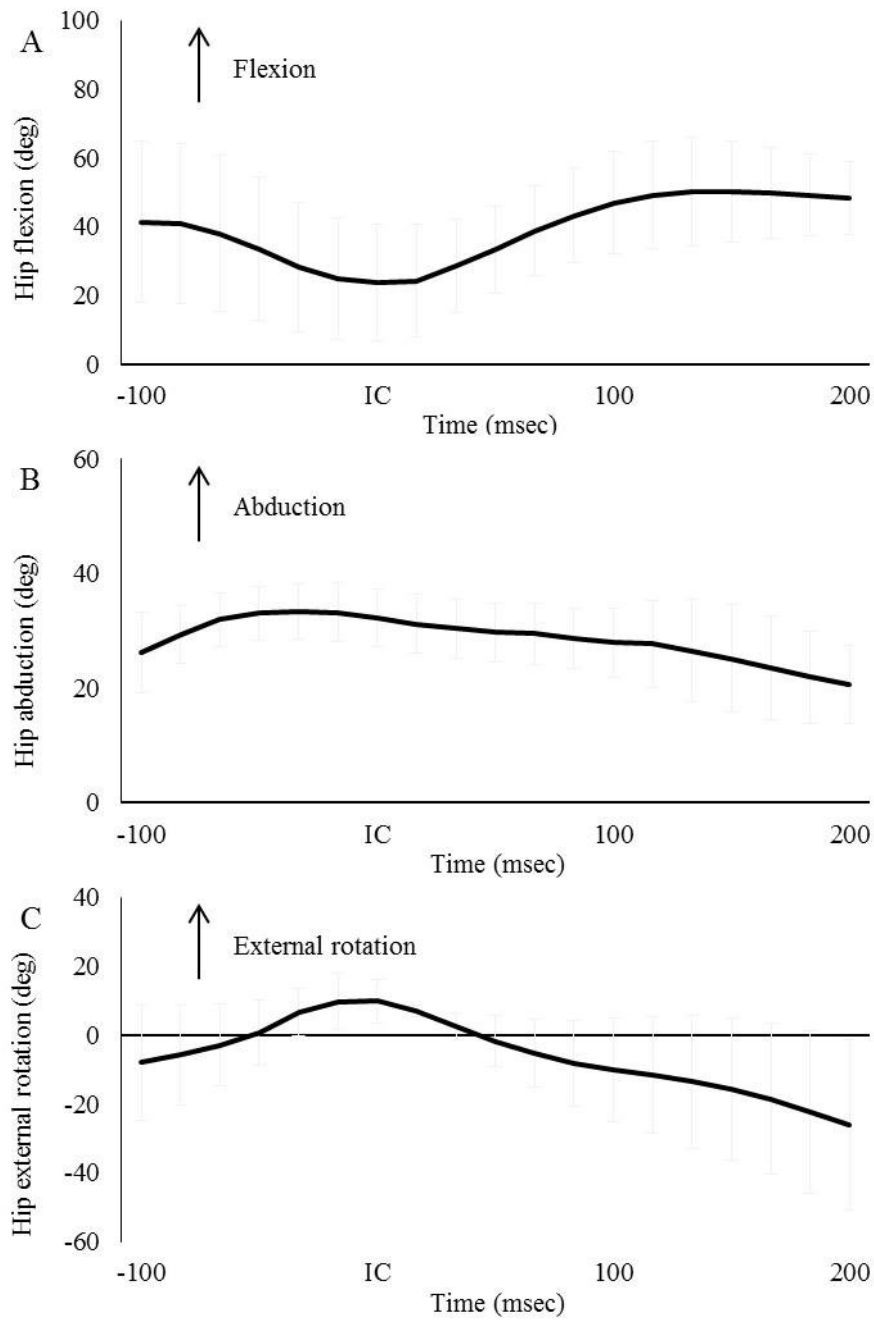


Figure 4.2.2 Model-based comparisons of joint motion

Data are presented for (A) Hip flexion (B) Hip abduction, and (C) Hip external rotation

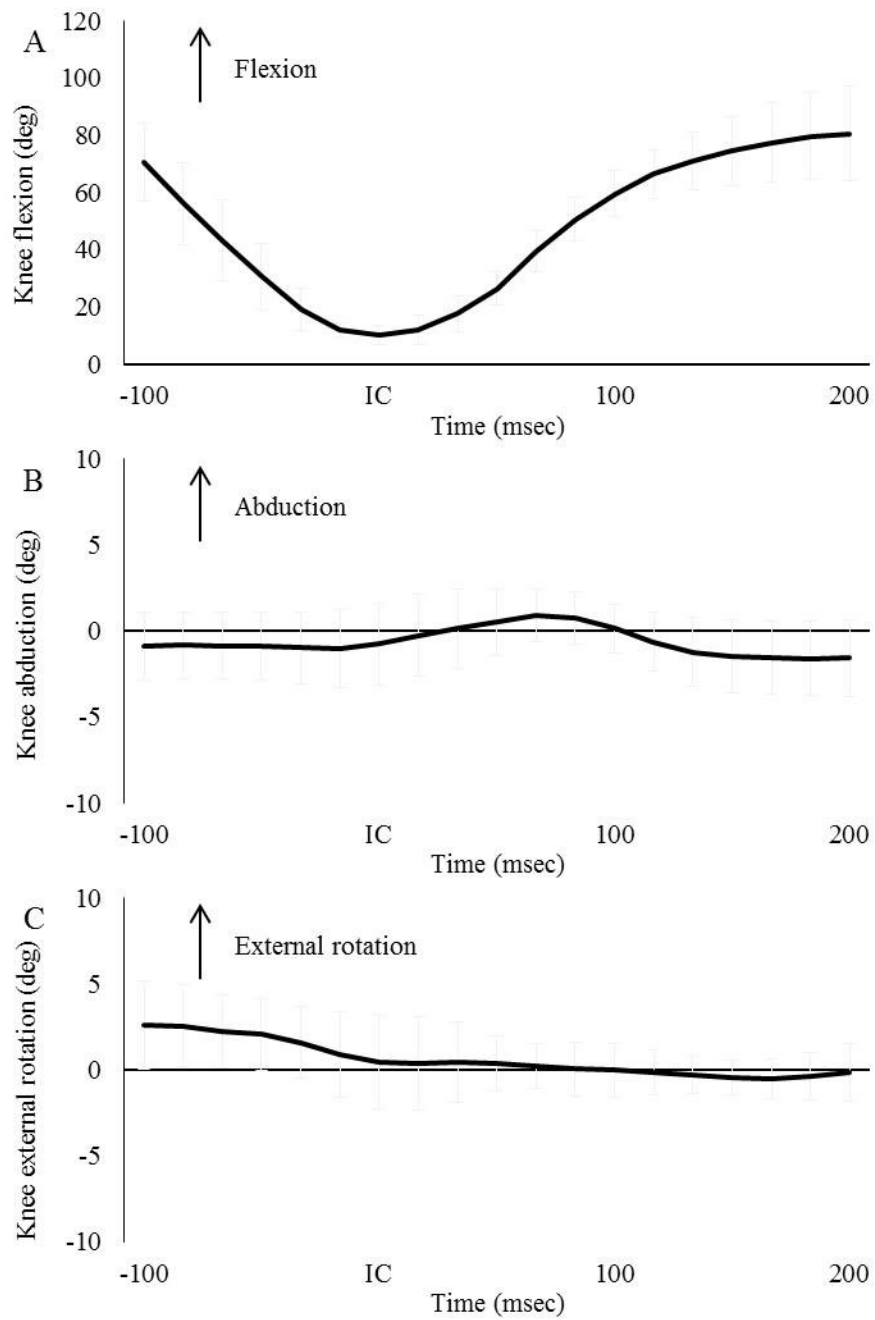


Figure 4.2.3 Model-based comparisons of joint motion

Data are presented for (A) Knee flexion (B) Knee abduction, and (C) Knee external rotation

Table 4.2.1 Mean (SD) for trunk, hip and knee angle at the time of IC-100ms, IC and IC+50ms

	-100ms	IC	50ms
Trunk bend	23.4 (9.1)	25.2 (12.6)	21.6 (12.5)
Trunk side bend	2.9 (6.8)	7.5 (8.0)	7.1 (12.9)
Trunk rotation	3.8 (7.5)	-17.0 (18.3)	-11.0 (14.0)
Hip flexion	41.6 (23.4)	24.0 (17.0)	33.5 (12.8)
Hip abduction	26.3 (7.0)	32.2 (5.1)	29.7 (5.2)
Hip external rotation	-7.9 (16.7)	10.0 (6.3)	-1.6 (7.3)
Knee flexion	70.8 (13.8)	10.5 (3.3)	26.7 (6.0)
Knee abduction	-0.9 (2.0)	-0.8 (2.4)	0.5 (1.9)
Knee external rotation	2.6 (2.6)	0.5 (2.7)	0.4 (1.6)

【考察】

本研究の目的は、実際の競技現場のプレッシング動作における動作特性を検討することを目的とした。実際の競技現場のプレッシング動作を3次元的に分析した研究はこれまでなされておらず、競技現場におけるサッカー特有のACL損傷リスクを含んだプレッシング動作の代表例を分析する意義は高いと考えられる。

本研究の結果は、膝軽度屈曲位、体幹軽度屈曲位で接地していた。先行研究において、ACL受傷の際の接地時の肢位は、膝軽度屈曲位及び体幹軽度屈曲位である事は特徴として挙げられている (Sheehan et al. 2012, Krosshaug et al. 2007, Olsen et al. 2004, Teiz et al. 2001, Boden et al. 2000)。また、膝軽度屈曲位での接地は膝への軸圧を高め、膝外転モーメントを増大させるという報告もある (Ogasawara et al. 2014)。さらに本研究では、体幹角度は支持脚側への側屈位、股関節外転位であった。先行研究によると、体幹の支持脚側への側屈は膝外転モーメントを増大させる (Weltin et al. 2015, Ogasawara et al. 2014, Zazulak et al. 2007)。股関節外転位での接地は膝外転角度やモーメントを増加させると報告されている (Zaslow et al. 2016, Sigward et al. 2007)。これらにより、実際の競技現場で行われている危険肢位を含んだプレッシング動作は、接地前から接地時の動作において、ACL受傷のリスク肢位を取りやすい可能性があると考えられる。しかしながら、本研究では、外転角度変位においても 1.3 ± 1.1 度の変位であり大きな変位ではなく、膝内旋角度変位においては接地時から 50ms までに変化が認められていない。先行研究によると、ACL受傷時には 40ms 後が床反力のピークであり、接地から 40ms 以内に膝外転は 12 度、内旋は 8 度と急激な変位が起こっていた (Koga et al. 2010)。したがって、本研究のプレッシング動作は接地前から接地の動きはリスクを含んだ動作になっていたが、実際には受傷しておらず、接地後の膝角度変位を軽減させた要因が接地後にあると考えられる。

本研究において、膝関節が接地から 50ms 後までに屈曲変位を示していた。先行研究において、接地時の膝屈曲モーメント及び股関節伸展モーメントが脛骨の前方剪断力を増やすという報告がされている (Hashemi et al. 2011)。さらに、膝屈曲 30 度以下の屈曲位では、

大腿四頭筋の収縮は脛骨の前方剪断力を増やすという報告もある (Beynon et al. 1995) 。本研究における膝屈曲位は、接地時で 10.5 ± 3.3 度、50ms 後で 26.7 ± 6.0 度であり、接地後の膝屈曲変位では大腿四頭筋の伸張性収縮が行われているはずであり、脛骨の前方剪断力が増えている可能性も否定はできず、膝屈曲角度変化が接地後の膝外転や回旋の角度変位を減少させたとは考えにくい。

本研究において、股関節が接地から 50ms 後までに屈曲変位を示していた。先行研究において、ACL 損傷時は接地から 40ms 後までに 1 度と接地後の股関節屈曲角度にほとんど変化がなかった事が報告されている (Koga et al. 2015) 。本研究では、接地後 50ms までに 9.5 度の屈曲変化があり、この角度変化の差は受傷時との大きな差異であると考えられる。また、接地時の股関節屈曲の角速度が大きいほど床反力が小さくなる事が認められている (Yu et al. 2006) 。そして、強い床反力が膝のモーメント変化に影響をあたえるという報告もされている (Ogasawara et al. 2014) 。よって、本研究においては、接地後の股関節屈曲変位が床反力の軽減等、衝撃吸収の一端を担っていた可能性が考えられた。

これらにより、本研究においては、接地前及び接地後のキネマティクスは ACL 損傷時と類似していたが、接地後の股関節屈曲変位によって衝撃吸収が出来る可能性が示唆された。しかし、本研究の限界として、力学的情報が明らかになっていない事が挙げられる。また、競技現場のビデオ映像を用いた検討であるため、各ケースによって相手選手やボールの位置関係、スピードや戦術など環境の統一が困難である。よって今後は、サンプル数を増やして、更に力学的情報や加速度の算出が可能な手法を加えて統計的に検討していく必要がある。

【結語】

本研究では、実際の競技現場において 2D-Video Analysis を用いて矢状面上 ACL 損傷の危険肢位のプレッシング動作を抽出し、抽出された動作を、MBIM 法を用いて動作特性の検討を行った。その結果、接地足が体幹中心から離れたプレッシングは、接地前から接地

時において、体幹伸展及び支持脚側への側屈位、股関節の外転位、膝軽度屈曲位という ACL 損傷時と近似した動きを見せた。しかし、接地後に股関節屈曲角度が増えており、危険肢位での接地をしても股関節など上位関節での衝撃吸収が出来る事で受傷を回避できる可能性が示唆された。

第五章

総合考察

【総合考察】

本論文は、女子サッカー選手に多い重篤な外傷である ACL 損傷のサッカー特有の受傷機転及びその動作特性を明らかにし、競技特性を踏まえた予防指針を提示することを目的として、スポーツ外傷予防の 4 段階 (van Mechelen et al. 1992) に準じて、最初の 2 段階である 1) 疫学調査、2) 受傷メカニズムやリスクファクターの分析についての検討を行った。

第 1 章では、女子サッカーの人口増加について、そして ACL 損傷の受傷機転やリスクファクターに関する主に性差についてのこれまでの研究の検証を行った。これまで、様々な ACL 損傷の受傷機転やリスクファクターについての検討が行われているが、今後はより競技特性を踏まえて疫学調査や受傷機転、リスクファクターについての検討が必要と考えられた。

第 2 章では、女子サッカーの ACL 損傷の受傷機転を明らかにする事を目的に研究を行った。その結果、受傷時のプレーで多かったプレッシングとその他のプレーを非接触型損傷と接触型損傷の割合から、フィッシャーの正確確率検定を用いて検討した。その結果、非接触型のプレッシングの割合が有意に多かった。プレッシングの際の非接触型 ACL 損傷が女子サッカーの受傷機転である事が示唆された。更に、プレッシングの際の受傷エリアを検討したところ、受傷エリアに差はなく、プレッシングでの ACL 損傷はどのエリアの選手でも発生する可能性あり、全選手が予防に取り組むことの必要性が示唆された。

第 3 章では、第 2 章で示された女子サッカーの非接触型 ACL 受傷機転であるプレッシングを想定した片脚をボールに伸ばしながら動くサッカー特有の動作特性を明らかにする事を目的に研究を行った。そこで、プレッシング動作とカッティング動作及びストップ動作の接地 100ms 前から 200ms 後までの関節角度及び角度変化の比較を、一元配置分散分析を用いて検討した。また、接地前の体幹の軸足側への側屈と接地後の膝外転角度の関係を Pearson の相関関係を用いて検討した。その結果、接地前の体幹屈曲角度及び軸足側への側屈角度、接地後の膝外転角度変化量に有意な差が認められた。また、接地前の体幹の軸足側への側屈と接地後の膝外転角度に正の優位な相関が認められた。このことから、ボール

に片脚を伸ばす事で接地前の準備動作で体幹の姿勢制御が困難になり、接地後の膝の外転変位を増やす事が示唆された。しかし、第3章は実験室内の予測条件下でのプレッシング動作であり、接地前の体幹の動きによる危険を回避するために予備動作として接地前に股関節外旋させていた可能性も考えられる。これらのように、第3章では、プレッシング動作は脚をボールに伸ばす事で体幹の伸展や支持脚側への側方傾斜を引き起こし、カッティング動作及びストップ動作よりも危険肢位になりやすいが、股関節外旋など準備動作を上手く行うことで、危険を回避できる可能性が示唆された。

第4章では、第3章のように実験室内の予測条件下で想定されたプレッシング動作ではなく、実際の競技現場で行われているボールや相手の動きに合わせたプレッシング動作の動作特性を明らかにする事を目的に研究を行った。本章では、実際の競技現場のビデオ映像から解析を行う2次元動作解析の2-D Video Analysis 及び3次元動作解析の Model-Based Image-Matching (MBIM) 法を用いて検討を行った。

第4章-1節では、実際の競技現場の定量的な評価に2D Video Analysis を用いるためのパイロット・スタディとして、競技現場のビデオ映像から分析する二次元動作解析である2D Video Analysis の矢状面上におけるACL損傷の危険肢位の抽出方法としての有用性を検討した。その結果、矢状面上の静止画像の評価においては、COM_BOSが大きくなるほど膝角度が小さく、下肢角度が大きく、そして体幹角度が後傾位になり、COM_BOSが大きい動作を抽出することで、簡便に矢状面上のACL損傷の危険肢位による接地場面を抽出する事が出来る可能性が示唆された。こうした現場の評価を簡便に定量化できる手法の有用性を示すことにより、より競技現場に則した競技特性を踏まえたACL損傷予防への取り組みが期待される。

第4章-2節では、1節にて動作抽出の有用性が示された2D-Video Analysis を用いて矢状面上ACL損傷の危険肢位による接地をしたプレッシング動作を抽出し、抽出された動作を、MBIM法を用いて動作特性の検討を行った。その結果、接地足が体幹中心から離れたプレッシングは、接地前から接地時において、体幹伸展及び支持脚側への側屈、股関節の外転

位、膝軽度屈曲位という ACL 損傷時と近似した動きを見せた。しかし、接地後に股関節屈曲角度が増えており、危険肢位での接地をしても接地後の股関節の屈曲での衝撃吸収が出来る事で危険を回避できる可能性が示唆された。第 3 章の予測条件下でのプレッシング動作と第 4 章の実際の競技現場でのプレッシング動作では、共に接地前から接地時までの動作は体幹軽度屈曲、軸足側への側屈、股関節外転、膝関節軽度屈曲位という ACL 危険肢位を示し、これが横方向のボールを取りに行くプレッシング動作の特徴と考えられる。また、予測条件下でのプレッシング動作では、接地前の予備動作として股関節を外旋して危険を回避出来ていたのに対して、競技現場でのプレッシング動作では、接地前に股関節がより内旋しており、予備動作では十分な危険回避肢位を取る事が出来なかったと考えられる。しかし接地時にはやや外旋位であり、内旋位での接地は避けられていたため、接地後の股関節屈曲変位を可能にしたと考えられる。これらのように、第 3 章のように一定の条件下で行われている動作評価に加えて、第 4 章のように実際の競技現場で行われている動作評価を行うことで、より ACL 損傷との関連性の高い動作評価ができ、ACL 損傷予防に向けたトレーニング立案が可能になるのではないかと考えられた。また、これまで行われている FIFA11+のような基礎的な予防トレーニングに加えて、ボールを脚で扱うサッカー特有の動作、特にプレッシングのように相手との駆け引きの中でストップ及び方向変換が行われる動きを踏まえて予防トレーニングを立案していくべきではないかと考えられた。

本論文の一連の研究では、女子サッカーの競技特性を踏まえた ACL 損傷予防について、その科学的根拠を明らかにすべく研究を行い、新しい知見を得ることが出来た。まず疫学調査により女子サッカーの受傷機転について検討を行い、プレッシングの際の非接触型損傷が多いことを示した。またプレッシング動作を実験室内及び競技現場の動作から評価を行い、プレッシング動作が片脚をボールに伸ばしながらの方向変換を行う姿勢制御が難しい動作であるため接地前に危険肢位を取りやすいが、股関節内旋位での接地を避けること、接地後は股関節屈曲を行うことで危険を回避できる可能性を示した。これらの研究により、女子サッカーにおける ACL 損傷予防の科学的基礎の確立の一端を担うことが出来たと考

える。しかし、スポーツ外傷予防の三段階である介入及び効果の検証、そして四段階である再度疫学調査は行うことが出来なかった。今後、女子サッカーにおける ACL 損傷予防プログラムとして、プレッシングのように相手とボールに対応した動きを取り込んだ介入及び効果の検証を行う必要があり、今後の研究課題として挙げられる。

第六章

結論

【結論】

本論文は、女子サッカー選手に多い重篤な外傷である ACL 損傷の受傷機転及びその動作特性を明らかにし、競技特性を踏まえた予防指針を提示することを目的として研究を行った。その結果、以下の観点についてサッカーの競技特性を踏まえて指導を行うことの重要性が示された。

- ・女子サッカーの ACL 損傷の受傷機転は非接触型のプレッシングである事に有意性が認められた。このことから、受傷時のキネマティクスなど受傷メカニズムに加えて、競技特有の受傷機転を明らかにして、競技毎の予防プログラムを作成していく事が必要と考えられた。

- ・プレッシングのように片脚をボールに伸ばしながら動くサッカー特有の動作は、脚をボールに伸ばす事で体幹の伸展や支持脚側への側方傾斜を引き起こし、カッティング動作やストップ動作よりも危険肢位になりやすいが、股関節外旋など準備動作を上手く行うことで、危険を回避できる可能性が示唆された。

- ・実際の競技現場で行われている動作を 2D-Video Analysis を用いて簡易的に抽出し、抽出された動作を Model-Based Image-Matching Technique を用いて分析する有用性が示唆された。また、競技場面のプレッシングは、接地前に危険肢位をとっていたが、接地後の股関節屈曲により衝撃吸収が出来る事で受傷を回避できる可能性が示唆された。

以上の観点から、サッカーにおける非接触型 ACL 損傷の主な受傷機転であるプレッシング動作では、股関節内旋位での接地を避け、接地後の股関節の屈曲動作をスムーズに行う事が、外傷発生を回避するために重要である事が考えられた。また、ACL 予防プログラムとして従来行われている基礎トレーニングに加えて、脚でボールを扱うサッカー特有の動作を取り入れて、接地前の予備動作及び接地後の衝撃緩和の訓練行っていく事が必要と考えられた。

付録 女子サッカー選手の ACL 損傷場面に関するアンケート調査用紙

ACL 損傷場面に関するアンケート

名前	所属チーム		
	歳	利き足	右 左

受傷時の年齢	歳	受傷時の学年	年
受傷した脚	右 左	手術	あり なし
合併症	あり (損傷部位:) なし		
受傷回数	初めて () 回目		反対側
受傷時のグラウンド	天然芝	人工芝	土
受傷時のスパイク	固定式 (丸型)	固定式 (ブレード型)	取替式スパイク
受傷時のポジション	GK	DF	MF FW
受傷時の内容	試合 (紅白戦) 中		練習中

受傷エリア ※試合中の受傷だった方のみ当てはまるエリアにチェック



相手との接触	直接的に接触あり	間接的に接触あり	なし
--------	----------	----------	----

例) 相手に膝の外から乗られて受傷 → 直接的に接触にあり ヘディングで競ってバランスを崩した着地で受傷 → 間接的に接触にあり 対人の方向変換動作やストップ動作で受傷したが相手には触れていない → なし

受傷時の攻守	攻撃	守備
ボールの関わり	あり	なし

例) ドリブル中のフェイント動作で受傷 → あり ボールを奪いに行ったストップ動作で受傷 → あり
ヘディングの着地動作で受傷 → あり オフザボールの方向変換動作で受傷 → なし

プレー内容 ※ボールの関わりがあった場合当てはまるプレーにチェック (複数可)						
ドリブル	パス	トラップ	シュート	ヘディング	スライディング	クリア
パスカット	プレッシング	ルーズボール	GK 動作	その他 ()		
受傷動作	方向変換	ストップ	着地	その他 ()		
受傷時の動きの強度	高い (ダッシュや中強度のラン)			低い (ジョグや歩き)		

その他、受傷時のプレーや動作などで覚えている事があれば記述してください。

参考文献

1. 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;33:524-530.
2. Agel J, Klossner D. Epidemiologic review of collegiate ACL injury rates across 14 sports: National collegiate athletic association injury surveillance system data 2004-05 through 2011-12. *Br J Sports Med.* 2014;48(7):560.
3. Anderson AF, Dome DC, Gautam S, Awh MH, Rennert 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;29:58-66.
4. Andersen TE, Larsen Ø, Tenga A, Engebretsen L, Bahr R. Football incident analysis: a new video based method to describe injury mechanisms in professional football. *Br J Sports Med.* 2003;37(3):226-232.
5. 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.
6. Arendt EA. Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men and women. *J Athl Train.* 1999;34:86-92.
7. Balazs GC, Pavey G, Brelin AM, Pickett A, Keblish DJ, Rue JP. Risk of anterior cruciate ligament injury in athletes on synthetic playing surfaces: a systematic review. *Am J Sports Med.* 2015;43(7):1798-1804.
8. Bere T, Florenes TW, Krosshaug T, Nordsletten L, Bahr R. Events leading to anterior cruciate ligament injury in World Cup alpine skiing: a systematic video analysis of 20 cases. *Br J Sports Med.* 2011;45(16):1294-1302
9. Bere T, Florenes TW, Krosshaug T, Koga H, Nordsletten L, Irving C, Muller E, Reid RC, Senner V, Bahr R. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in World Cup alpine skiing: a systematic video analysis of 20 cases. *Am J Sports Med.* 2011;39(7):1421-1429
10. Besier TF, Lloyd DG, Cochrane JL, Ackland TR. External loading of the knee joint during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1168-1175.
11. Beynnon BD, Fleming BC, Johnson RJ, Nichols CE, Renstrom PA, Pope MH. Anterior

- cruciate ligament strain behavior during rehabilitation exercises in vivo. *Am J Sports Med.* 1995;23:24-34.
12. Boden BP, Dean GS, Feagin JA Jr, Garrett WE Jr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics.* 2000;23(6):573-578.
 13. 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.
 14. Braten M, Terjesen T, Rossvoll I: Femoral anteversion in normal adults. Ultrasound measurements in 50 men and 50 women. *Acta orthopaedica Scandinavica.* 1992;63:29-32.
 15. Brophy RH, Stepan JG, Silver HJ, Mandelbaum BR. Defending puts the anterior cruciate ligament at risk during soccer: a gender-based analysis. *Sports health.* 2015;7(3):244-249
 16. Charlton WP, 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 Me.* 2002;30:329-333.
 17. Chimera NJ, Swanik KA, Swanik CB, Straub SJ. Effects of plyometric training on muscle-activation strategies and performance in female athletes. *J Athl Train.* 2004;39:24-31.
 18. Chappell JD YB, Kirkendall DT, Garrett WE. A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *Am J Sports Med.* 2002;30(2):261-267.
 19. 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;35:235-241.
 20. Davis TJ, Shelbourne KD, Klootwyk TE. Correlation of the intercondylar notch width of the femur to the width of the anterior and posterior cruciate ligaments. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1999;7:209-214.
 21. Deitch JR, Starkey C, Walters SL, Moseley JB. Injury risk in professional basketball players: a comparison of Women's National Basketball Association and National Basketball Association athletes. *Am J Sports Med.* 2006;34:1077-1083.
 22. Dragoo JL, Braun HJ, Durham JL, Chen MR, Harris AH. Incidence and risk factors for injuries to the anterior cruciate ligament in National Collegiate Athletic Association football: data

from the 2004-2005 through 2008-2009 National Collegiate Athletic Association Injury Surveillance System. *Am J Sports Med.* 2012;40(5):990-995

23. Fauno P, Wulff Jakobsen B. Mechanism of anterior cruciate ligament injuries in soccer. *Int J Sports Med.* 2006;27(1):75-79.
24. FIFA Communications Division Information Services. 270 million people active in football. FIFA Big Count 2006. FIFA website 2007 [cited 2016 Feb 28]; Available from: URL: http://www.fifa.com/mm/document/fifafacts/bcoffsurv/bigcount.statspackage_7024.pdf.
25. Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35:1745-1750.
26. 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.
27. 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.
28. Hashemi J, Breighner R, Chandrashekar N, Hardy DM, Chaudhari AM, Shultz SJ, Slauterbeck JR, Beynon. Hip extension, knee flexion paradox: A new mechanism for non-contact ACL injury. *J Biomech.* 2011;44:577-585.
29. Hewett TE, Stroupe AL, Nance TA, Noyes FR. Plyometric training in female athletes. Decreased impact forces and increased hamstring torques. *Am J Sports Med.* 1996;24:765-73.
30. Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, Noyes FR. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes. A prospective study. *Am J Sports Med.* 1999;27:699-706.
31. Hewett TE. Neuromuscular and hormonal factors associated with knee injuries in female athletes. Strategies for intervention. *Sports Med.* 2000;29(5):313-327.
32. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Decrease in neuromuscular control about the knee with maturation in female athletes. *The Journal of bone and joint surgery.* 2004;86-A:1601-1608.
33. 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;33:492–501.

34. 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.

35. Hewett TE, Ford KR, Hoogenboom BJ, Myer GD. Understanding and preventing ACL injuries: Current biomechanical and epidemiologic considerations. *N Am J Sports Phys Ther.* 2010; 5(4):234-251

36. Hootman JM, Dick R, Agel J. Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives. *J Athl Train.* 2007;42:311-319.

37. Horton MG, Hall TL. Quadriceps femoris muscle angle: normal values and relationships with gender and selected skeletal measures. *Phys Ther.* 1989;69:897-901.

38. Houck JR, Duncan A, De Haven KE. Comparison of frontal plane trunk kinematics and hip and knee moments during anticipated and unanticipated walking and side step cutting tasks. *Gait Posture.* 2006;24:314-322.

39. Hurd WJ, Chmielewski TL, Snyder-Mackler L. Perturbation-enhanced neuromuscular training alters muscle activity in female athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2006;14:60-69.

40. Husted RS, Bencke J, Andersen LL, Myklebust G, Kallermose T, Lauridsen HB, Holmich P, Asqaard P, Zebis MK. A Comparison of hamstring muscle activity during different screening tests for non-contact ACL injury. *Knee.* 2016;23(3):362-366

41. Huston LJ, Greenfield ML, Wojtys EM. Anterior cruciate ligament injuries in the female athlete. Potential risk factors. *Clin Orthop.* 2000;50-63.

42. Imwalle LE, Mayer 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;23(8):2223-2230.

43. Irmischer BS, Harris C, Pfeiffer RP, DeBeliso MA, Adams KJ, Shea KG. Effects of a knee ligament injury prevention exercise program on impact forces in women. *J Strength Cond Res.*

2004;18:703-707.

44. Jansson A, Saartok T, Werner S, Renstrom P. General joint laxity in 1845 Swedish school children of different ages: age- and gender-specific distributions. *Acta Paediatr.* 2004;93:1202-1206.
45. 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;170:43-49.
46. Koga H, Nakamae A, Shima Y, Iwasa J, Myklebust G, Engebretsen L, Bahr R, Krosshaug T. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *Am J Sports Med.* 2010;38(11):2218-2225.
47. Koga H, Bahr R et al. Estimating anterior tibial translation from model-based image-matching of a noncontact anterior cruciate ligament injury in professional football: a case report. *Clin J Sport Med.* 2011;21(3): 271-274.
48. Koga H, Muneta T, Bahr R, Engebretsen L, Krosshaug T. Video analysis of ACL injury mechanisms using a model-based image-matching technique. *Sports Injuries and Prevention.* 2015;3(9):109-120
49. Krosshaug T, Bahr R. A model-based image-matching technique for three-dimensional reconstruction of human motion from uncalibrated video sequences. *J Biomech.* 2005;38(4): 919-929.
50. Krosshaug T, Slauterbeck JR et al. Biomechanical analysis of anterior cruciate ligament injury mechanisms: three-dimensional motion reconstruction from video sequences. *Scand J Med Sci Sports.* 2007;17(5): 508-519.
51. Krosshaug, Nakamae T, Boden BP, Engebretsen L, Smith G, Slauterbeck JR, et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med.* 2007;35(3):359-367.
52. 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 side-cut maneuver. *Am J Sports Med.* 2007;35:1888-1900.
53. 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;35:1901-11.
54. Lephart SM, Abt JP, Ferris CM, Sell TC, Nagai T, Myers JB, Irrgang JJ. Neuromuscular and biomechanical characteristic changes in high school athletes: a plyometric versus basic resistance program. *Br J Sports Med.* 2005;39:932-938.
55. Livingston LA. The quadriceps angle: a review of the literature. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1998;28:105-109.
56. Lobenhoffer P. Injuries of the knee ligaments. II. Surgical therapy of anterior and posterior knee instability. *Chirurg.* 1999;70:326-338.
57. 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;16:438-445.
58. Mandelbaum BR, Silvers HJ, Watanabe DS, Knarr JF, Thomas SD, Griffin LY, Kirkendall DT, Garrett W, Jr. 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;33:1003-1010.
59. McLean SG, Neal RJ, Myers PT, Walters MR. Knee joint kinematics during the sidestep cutting maneuver: potential for injury in women. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31:959-968.
60. 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;36:1008-1016.
61. McLean SG, Huang X, van den Bogert AJ. Association between lower extremity posture at contact and peak knee valgus moment during sidestepping: implications for ACL injury. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon).* 2005;20:863-870.
62. McLean SG, Walker KB, van den Bogert AJ. Effect of gender on lower extremity kinematics during rapid direction changes: an integrated analysis of three sports movements. *J Sci Med Sport.* 2005;8:411-422.
63. McLean SG, Walker K, Ford KR, Myer GD, Hewett TE, van den Bogert AJ. Evaluation of a two dimensional analysis method as a screening and evaluation tool for anterior cruciate ligament

injury. *Br J Sports Med.* 2005;39:355-362.

64. McLean SG, Felin RE, Suedekum N, Calabrese G, Passerallo A, Joy S. Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:502-514.
65. McNair PJ, Marshall RN. Important features associated with acute anterior cruciate ligament injury. *N Z Med J.* 1990;103(901):537-539.
66. 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;27:294-299.
67. Mitchell LC, Ford KR, Minning S, Myer GD, Manigne RE, Hewett TE. Medial foot loading on ankle and knee biomechanics. *N Am J Sports Phys Ther.* 2008;3(3):133-140.
68. Miyasaka KC, Daniel DM, Stone ML. The incidence of knee ligament injuries in the general population. *Am J Knee Surg.* 1991;4:3-8.
69. Myer GD, Ford KR, McLean SG, Hewett TE: The effects of plyometric versus dynamic stabilization and balance training on lower extremity biomechanics. *Am J Sports Med.* 2006;34:445-455.
70. 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.
71. 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;8:149-153.
72. NCAA. NCAA injury surveillance system summary. Indianapolis: National Collegiate Athletic Association. 2002.
73. NFHS. 2008-09 High School Athletics Participation Survey. Kansas City, Missouri: National Federation of State High School Associations. 2009.
74. Nguyen AD, Shultz SJ. Sex differences in clinical measures of lower extremity alignment. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2007;37:389-398.
75. 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;33:197-207.

76. Ogasawara I, Miyakawa S, Wakitani S. The external force model determining the frontal plane knee loading pattern -Implication for the mechanism of non-contact anterior cruciate ligament injury-. *MJHES*. 2014;4(1):13-22
77. 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.
78. 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;330:449.
79. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Huang B, Hewett TE. Biomechanical Measures During Landing and Postural Stability Predict Second Anterior Cruciate Ligament Injury After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Return to Sport. *Am J Sports Med*. 2010;38(10):1968-1978
80. Pfeiffer RP, Shea KG, Robert D, Grandstrand S, Bond L. Lack of effect of a knee ligament injury prevention program on the incidence of noncontact anterior cruciate ligament injury. *J Bone Joint Surg Am*. 2006;88:1769-1774.
81. Pollard CD, Davis IM, Hamill J. Influence of gender on hip and knee mechanics during a randomly cued cutting maneuver. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2004;19:1022-1031.
82. Pollard CD, Sigward SM, Ota S, Langford K, Powers CM. The influence of in-season injury prevention training on lower-extremity kinematics during landing in female soccer players. *Clin J Sport Med*. 2006;16:223-227.
83. Quatman CE, Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Maturation leads to gender differences in landing force and vertical jump performance: a longitudinal study. *Am J Sports Med*. 2006;34(5):806-813.
84. 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;87:800-803.
85. Renstrom P, Ljungqvist A, Arendt E, Beynon B, Fukubayashi T, Garrett W, 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.

86. Sasaki S, Nagano Y, Kaneko S, Sakurai T, Fukubayashi T. The relationship between performance and trunk movement during change of direction. *J Sports Sci Med*. 2011;10(1):112-118.
87. Sasaki S, Koga H, Krosshaug T, Sakurai T, Fukubayashi T. A biomechanical approach to evaluating field sports performance using a model-based image-matching technique: a case report of 4 defensive football game situations. *Gazz Med Ital*. 2013;172(10):799-805.
88. Sasaki S, Tsuda E, Yamamoto Y, Maeda S, Hayashi Y, Kimura Y, Sasaki E, Fujita Y, Takahashi I, Umeda T, Nakaji S, Ishibashi Y. Change with increasing age in control of the lower limbs during jump-landing in adolescents: a 5-year prospective study. *J Orthop Sci*. 2013;18(5):774-781.
89. Sell TC, Ferris CM, Abt JP, Tsai YS, Myers JB, Fu FH, Lephart SM. The effect of direction and reaction on the neuromuscular and biomechanical characteristics of the knee during tasks that simulate the noncontact anterior cruciate ligament injury mechanism. *Am J Sports Med*. 2006;34:43-54.
90. Sheehan FT, Sipprell WH 3rd et al. Dynamic sagittal plane trunk control during anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med*. 2012;40(5):1068-1074.
91. Shelbourne KD, Facibene WA, Hunt JJ. Radiographic and intraoperative intercondylar notch width measurements in men and women with unilateral and bilateral anterior cruciate ligament tears. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 1997;5:229-233.
92. Shelbourne KD, Davis TJ, Klootwyk TE. The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears. A prospective study. *Am J Sports Med*. 1998;26:402-408.
93. Sheppard JM, Young WB. Agility literature review: classifications, training and testing. *J Sports Sci*. 2006;24(9):919-932.
94. Shultz SJ, Kirk SE, Sander TC, Perrin DH. Sex differences in knee laxity change across the female menstrual cycle. *J Sports Med Phys Fitness*. 2005;45:594-603.
95. 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;21:41-48.

96. Sigward SM, Powers CM. Loading characteristics of females exhibiting excessive valgus moments during cutting. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2007;22:827-833.
97. Sigward SM, CesarGM, Havens KL. Predictors of Frontal Plane Knee Moments During Side-Step Cutting to 45 and 110 Degrees in Men and Women: Implications for Anterior Cruciate Ligament Injury. *Clin J Sport Med*. 2015;25(6):529-534
98. Souryal TO, Moore HA, Evans JP. Bilaterality in anterior cruciate ligament injuries: associated intercondylar notch stenosis. *Am J Sports Med*. 1988;16:449-454.
99. Souryal TO, Freeman TR. Intercondylar notch size and anterior cruciate ligament injuries in athletes. A prospective study. *Am J Sports Med*. 1993;21:535-539.
100. Steffen K, Myklebust G, Olsen OE, Holme I, Bahr R. Preventing injuries in female youth football: a cluster-randomized controlled trial. *Scand J Med & Sci Sports*. 2008;18:605-614.
101. Stuelcken MC, Mellifont DB, Gorman AD, Sayers MDL. Mechanisms of anterior cruciate ligament injuries in elite women's netball: a systematic video analysis. *J Sports Sci*. 2015;34(16):1516-1522
102. Tran AA, Gatewood C, Harris AH, Thompson JA, Dragoo JL. The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury. *J Exp Orthop*. 2016;3(1):Epub 2016 Jun 18
103. Teitz CC. Video analysis of ACL injuries. In: Griffin LY, editor. *Prevention of Noncontact ACL Injuries*. Rosemont, IL. *American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2001;87-92.
104. 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;31:831-842.
105. van Mechelen W, Hlobil H, Kemper HC. Incidence, severity, aetiology and prevention of sports injuries. A review of concepts. *Sports Med*. 1992;14:82-99.
106. Waldén M, Atroshi I, Magnusson H, Wagner P, Häggglund M. Prevention of acute knee injuries in adolescent female football players: cluster randomized controlled trial. *BMJ*. 2012;344:e3042.
107. Waldén M, Krosshaug T, Bjørneboe J, Andersen TE, Faul O, Häggglund M. Three distinct

- mechanisms predominate in non-contact anterior cruciate ligament injuries in male professional football players: a systematic video analysis of 39 cases. *Br J Sports Med.* 2015;49(22):1452-1460.
108. Weltin E, Mornieux G, Gollhofer. Influence of gender on trunk and lower limb biomechanics during lateral movements. *Res Sports Med.* 2015;23(3):265-277.
109. 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;84-A:10-16.
110. 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;85-A:782-789.
111. Woodland LH, Francis RS. Parameters and comparisons of the quadriceps angle of college-aged men and women in the supine and standing positions. *Am J Sports Med.* 1992;20:208-211.
112. Yu B, McClure SB, Onate JA, Guskiewicz KM, Kirkendall DT, Garrett WE. Age and gender effects on lower extremity kinematics of youth soccer players in a stop-jump task. *Am J Sports Med.* 2005;33:1356-1364.
113. Yu B, Lin CF, Garrett WE. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2006;21:297-305.
114. Zaslow TL, Pace JL, Mueske NM, Chua MC, Katzel MJ, Dennis SW, Wren AL. Comparison of lateral shuffle and side-step cutting in young recreational athletes. *Gait Posture.* 2016;44:189-193
115. Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B, Cholewicki J. The effects of core proprioception on knee injury: a prospective biomechanical/epidemiological study. *Am J Sports Med.* 2007;35(3):368-373.
116. 國田泰弘, 金子雅志, 大見頼一, 川島達宏, 栗原智久, 関大輔, 井上拓海, 栗山節郎, 星田隆彦. 日本臨床スポーツ医学会誌. 2016;24(3):390-395.
117. 古賀英之, 宗田大. 競技中のビデオ画像に基づいたスポーツ外傷の受傷機転の解析.

臨床スポーツ医学. 2016;33(1):82-88

118. 林真範, 本郷雄太. Image-J の関節角度測定値の信頼性検討. 理学療法科学.

2010;25(4): 529-532.

119. 前田秀樹. サッカーの戦術&技術. 新星出版社. 2003

業績一覧

本論文の内容の一部は、以下の雑誌に掲載されている。

1. 金子聡、笹木正悟、永野康治、小林拓馬、福林徹. ビデオ映像を用いた ACL 損傷リスクに関連した動作の評価方法についての検討. 臨床バイオメカニクス 2014;15:291-296
2. Kaneko S, Sasaki S, Hirose N, Nagano Y, Fukubayashi T. Mechanism of anterior cruciate ligament injury in female soccer players. Asian J Sport Med. In press.

本論文の一部は、以下の学会において発表されている。

1. 金子聡、笹木正悟、馬越博久、今村省一郎、小林拓馬、福林徹: 女子サッカー選手に対するビデオ映像を用いた膝前十字靭帯損傷リスク動作の抽出. 第40回日本臨床バイオメカニクス学会, 兵庫, 11月, 2013.
2. Kaneko S, Sasaki S, Koga H, Krosshaug T, Hirose N, Fukubayashi T: Video analysis of at-risk movements related to ACL injury in soccer player. 7th World Congress of Biomechanics, Boston, July, 2014.
3. Kaneko S, Sasaki S, Nagano Y, Hirose N, Fukubayashi T: Mechanism of anterior cruciate ligament injuries in female soccer players. 8th World Congress on Science and Football, Copenhagen, May, 2015.
3. 金子聡、笹木正悟、永野康治、広瀬統一、福林徹: 若年女子サッカーにおける膝前十字靭帯損傷の受傷機転. 第26回臨床スポーツ医学会, 兵庫, 11月, 2015.

謝辞

本論文は早稲田大学スポーツ科学学術院福林徹教授、そして広瀬統一教授の指導のもとに行われたものであり、稿を終えるにあたり、適宜ご指導ご鞭撻、そしてたくさんの貴重な経験を与えていただいた事に深く感謝の意を表す。また、早稲田大学スポーツ科学学術院堀野博幸教授には大変ご多忙な中、審査員として親身なご指導と貴重なご意見を賜り、心より感謝する。

東京有明医療大学笹木正悟講師には、研究のデザインならびに実施にあたって多大なるご指導とご協力を賜り、深く感謝する。

関東学園大学女子サッカー部山口重信監督と選手には、貴重な現場経験と研究活動の場を与えて頂いたことを深謝する。また、関東女子サッカーリーグに所属するチームの監督、メディカルスタッフ及び選手には、アンケート調査においてご協力を賜り、深く感謝する。

研究活動を進めるに当たり、公私ともに支えて頂いた早稲田大学大学院スポーツ科学研究科スポーツ外科学研究室に所属する仲間、また、同研究室から旅立たれた同窓生の皆様に深く感謝する。

研究活動に理解と協力を示して頂いた株式会社フィジカルラボのスタッフに深く感謝する。最後に、これまでの長い学生生活を常に支え、励まし、後押ししてくれた両親と家族に、この場を借りて深く感謝の意を表す。