

国際医療福祉大学大学院
医療福祉学研究科博士課程

月経周期における着地時の膝関節運動の変化と
前十字靭帯損傷

平成 24 年度

保健医療学専攻・リハビリテーション学分野・リハビリテーション学領域
学籍番号：10S3031 氏名：櫻井好美
研究指導教員：前田眞治教授

要旨

非接触型前十字靭帯（ACL）損傷の発生が女性の月経期に多い原因を検討するため、着地動作における膝関節運動と膝関節周囲筋の筋硬度を計測し月経周期で比較した。その結果、女性は黄体期の前半に他の時期と比べて大腿骨に対する脛骨内旋角度と前方変位量が有意に増加し、黄体期前半をピークとして黄体期後半と月経期まで増加傾向であった。よって膝関節の緩みやすさは月経期まで残存することが示唆され、これはエストロゲンの影響と考えられた。筋硬度は大腿直筋筋腹と大腿二頭筋筋腹において黄体期に有意に上昇し、月経期と排卵期は低下した。これはプロゲステロンによる交感神経活動の活発化による影響と考えられた。このことから月経期は黄体期前半をピークとする脛骨の内旋・前方変位は減少するものの、筋硬度の低下によって膝関節の動的安定性が得られにくい時期であることが示唆され、ここに月経随伴症状が加わることで ACL 損傷リスクが高まると考えられた。

キーワード

前十字靭帯損傷，月経周期，着地動作

Relationship between knee joint motion during landing in the menstrual cycle and anterior cruciate ligament injury.

Abstract

To examine why the development of non-contact-type anterior cruciate ligament (ACL) injury is frequent during the menstrual period, knee movement on landing and periarticular muscle rigidity were measured and compared in the menstrual cycle.

In females, the internal rotation angle of the tibia to the femur and rate of anterior displacement in the early luteal phase were significantly greater than in other phases, reaching a peak in the early luteal phase. This tendency persisted in the latter luteal phase and until the menstrual period. These results suggest that the knees' tendency to loosen remains until the menstrual period. This may be associated with estrogen. The rigidity of the rectus and biceps femoris muscle venters significantly elevated in the luteal phase, but reduced in the menstrual and ovulation phases. This was possibly associated with the progesterone-related activation of sympathetic nerve activity. This suggests that, although the incidence of internal rotation/anterior displacement of the tibia, which reaches a peak in the early luteal phase, decreases during the menstrual period, a reduction in the muscular rigidity makes it difficult to achieve dynamic stability of the knees during this period. Concomitant symptoms related to menstruation may increase the risk of ACL injury.

Keywords

Anterior cruciate ligament injury, Menstrual cycle, Landing movement

目次

I. 緒言

1. 研究背景 1
2. 月経周期と ACL 損傷の関係についての先行研究 3
3. ACL の機械的特性の評価と三次元計測の限界 4
4. 研究の目的 5

II. 対象と方法

1. 対象 6
2. 方法 6

III. 倫理配慮 11

IV. 結果 12

V. 考察

1. データ選別の必要性 20
2. 計測を 12 週行った理由 20
3. 筋硬度計測の信頼性について 20
4. 着地動作における ACL 損傷の受傷機転 21
5. ACL 損傷発生リスクの男女差 22
6. 黄体期前半の膝関節角度増加の原因に関する考察 23
7. 黄体期前半・後半の筋硬度上昇の原因とその作用に関する考察 24
8. ACL 損傷の発生と月経周期との関係 25

VI. 本研究の限界 26

VII. 結語 27

VIII. 謝辞 28

文献一覧 29

参考資料 36

I. 緒言

1. 研究背景

膝関節は人体最大の荷重関節であり，日常生活をおくる上で完璧な安定性¹⁾を保ちつつ大きな屈伸可動性が求められる．凸状の大腿骨表面とほぼ扁平の脛骨上関節面の形状は骨性に連結することは困難であり，極めて適合性が低い．そのため膝関節は能動要素である筋と受動要素である靭帯と関節半月が補強しつつ協調して運動を誘導している．

前十字靭帯（Anterior Cruciate Ligament, 以下 ACL）と後十字靭帯（Posterior Cruciate Ligament, 以下 PCL）は膝関節の回旋中心を規定し中心軸の役割を担っている¹⁾．ACLは膝関節の関節窩にある丈夫な線維性の構造を有する靭帯で，脛骨が大腿骨に対して前方に変位することを制御する第一義的な組織である²⁾．膝関節の前方剪断と回旋運動の安定性は，屈曲伸展時の関節面の適合性を確保するのに不可欠な要素であり，膝関節の動的安定性の維持に ACL の果たす役割は大きい．

ACL 損傷はその多くがスポーツ場面で発生することが知られている．このため ACL 損傷の予防について様々な観点から検討がなされてきた．特に，受傷機転，受傷肢位について数多く報告され，膝関節軽度屈曲外反位（dynamic knee valgus）が受傷機転になりやすいことが報告されている³⁾⁴⁾．

また，近年 ACL 損傷発生率の男女差が注目されており，多くの研究者によって女性スポーツ選手は同じ競技の男性選手と比較して，ACL 損傷の発生率が高いことが報告されている（表 1）．Harmon ら⁵⁾は，大学生のバスケットボール選手を対象として調査を行い，男性の発生率が 0.08%であったのに対して女性は 0.28%で，女性の発生率が 3.5 倍であったと報告している．バスケット選手を対象とした調査ではこの他に Arendt ら⁶⁾が 2.90 倍，Agel ら⁷⁾が 3.38 倍高かったと報告している．

他の競技についてハンドボールでは，Myklebust ら⁸⁾の研究では女性の ACL 損傷の発生率が 2.51 倍，Olsen⁹⁾らの研究では 3.21 倍となり，バスケットボールと同様に女性の発生率が高かったと述べている．また，この他ではサッカー⁶⁾⁷⁾と体操競技¹⁰⁾で女性の ACL 損傷の発生率が高いと報告されている．

表 1. ACL 損傷の発生率の男女差に関する報告

報告者(報告年)	競技	対象	男性		女性		男女比
			件数	発生率	件数	発生率	
Harmon ら(1998) ⁵⁾	バスケットボール	大学生	84	0.08	275	0.28	3.50
Arendt ら(1999) ⁶⁾	バスケットボール	大学生	75	0.10	194	0.29	2.90
Age1 ら(2005) ⁷⁾	バスケットボール	大学生	168	0.08	514	0.27	3.38
Myklebust ら(1997) ⁸⁾ *	ハンドボール	大学生	33	0.55	54	1.38	2.51
Olsen ら(2005) ⁹⁾ *	ハンドボール	大学生	9	0.24	44	0.77	3.21
Arendt ら(1999) ⁶⁾	サッカー	大学生	77	0.12	158	0.33	2.75
Age1 ら(2005) ⁷⁾	サッカー	大学生	192	0.11	394	0.31	2.82
Hutchison ら. (1995) ¹⁹⁾	体操	大学生	47	0.17	5	0.52	3.06

* : 1000 athlete-hours, それ以外は全て 1000 athlete-exposures

これらの競技に共通するのはジャンプの着地や急激な方向転換・停止である。このことから女性の ACL 損傷は他の選手との接触や転倒によって膝に直接外力が加わるコンタクトプレーではなく、ノンコンタクトプレーで好発することが分かる。これらの動作は足部を床面に接地させて荷重位で行うものであり、閉鎖性運動連鎖と定義されている。つまり女性は閉鎖性運動連鎖の中で瞬間的な下肢のコントロールが十分に行えず損傷することが多いと考えられる。この理由として、女性の運動時の膝関節周囲筋の不均衡が挙げられ、膝関節周囲筋の協調性の低下が膝関節の安定性を低下させ、ACL 損傷の一因になっていると考えられている¹¹⁻¹³⁾。

一方バイオメカニクスの検討では、着地動作における ACL 損傷は多くが踵接地時に発生していると報告されており¹⁴⁾、このときの dynamic knee valgus について、女性は膝関節屈曲角度が減少し外反角度が増加することで ACL の張力が増し損傷しやすくなるとされている¹⁵⁻¹⁸⁾。しかし脛骨の回旋方向については回旋方向については内旋と外旋のそれぞれの報告が散見され¹⁰⁾¹⁷⁾³⁶⁾一定の見解は得られていない。櫻井ら¹⁹⁾はジャンプの着地動作を比較し女性の脛骨内旋角度は男性と比較して大きく、足尖接地から短時間で内旋角度が最大になることを報告し、女性の ACL 損傷率が高いのは脛骨の急激な内旋により ACL が強く伸張されるのと同時に、PCL とのインピンジメントが起こることで ACL

の剪断力が増加することが原因であるとした。

さらに解剖学的な検討では Muneta ら²⁰⁾が屍体膝の観察から女性の ACL の長さが短く断面積が小さいことを挙げている。また Steubil²¹⁾は MRI 画像の分析から女性の ACL は男性に比べて断面積と体積が小さいと述べている。ACL の力学的な強度を計測した研究²²⁾では、破断強度と stiffness の値について男性が統計学的に有意に大きいことが示された。よって、女性の ACL は解剖学的に小さく力学的にみて脆弱であると示唆されている。

2. 月経周期と ACL 損傷の関係についての先行研究

女性の ACL 損傷の発生に関して、性周期との関連を示唆する報告も散見される(表 2)。Myklebust ら²³⁾²⁴⁾はハンドボール選手を対象にインタビューによる後ろ向き研究を行い、ACL 損傷は月経期に多く発生すると報告している。また ACL 損傷後 72 時間以内の選手を対象に行われた研究²⁵⁾では唾液の分析から月経周期を決定し、27 名中 10 名が月経期初期(1, 2 日のみ)であったと報告されている。一方 Wojtys ら²⁶⁾はアンケート調査を行い排卵期に損傷が増加すると述べている。これら 4 件の報告を総合すると、ACL 損傷者 118 名中 38 名が月経期に損傷しており最も高い割合となった。ただし、4 件中 3 件の報告では月経周期の判別を被験者の自己申告によって行っているため正確性に欠ける可能性がある。またこれらの報告から一定の性周期との傾向は示唆できず、どの期に多く発生しているのかは統一した見解はみられない。

女性ホルモンとの関連については組織学的研究結果が散見される。Liu²⁷⁾らはウサギ ACL を用いて ACL にはエストロゲンとプロゲステロンのレセプターが存在することを解明した。続いて Liu ら²⁸⁾は高濃度のエストラジオールは繊維芽細胞で生成されるコラーゲンを有意に減少させることを報告し、女性ホルモンは ACL の組成と構造に影響を与え女性アスリートの ACL 損傷の原因になっている可能性があるとした。

また、Yu²⁹⁾³⁰⁾らは組織培養されたヒト ACL ではエストロゲン濃度が高まるにつれて、線維増殖や Type I コラーゲンの代謝が減少し緊張が低下することと、この現象はエストロゲンを投与して 3 日間の間だけ一時的に起こる現象であったと報告している。

このように女性ホルモンが ACL のコラーゲン構造や代謝を変化させることは明らかになっているものの、月経周期と ACL 損傷の関連については不明である。

表 2. 性周期と ACL 損傷発生の関係 (損傷者への調査)

研究者(発表年)	対象	人数	調査方法	損傷時期(注)
Myklebust ら ²³⁾ (1998)	ハンドボール選手	17	インタビュー (後ろ向き)	月経期(1-7日)29% 黄体期後半(22-28日)53%
Myklebust ら ²⁴⁾ (2003)	ハンドボール選手	46	インタビュー (後ろ向き)	月経期(1-7日)50%
Slauterbeck ら ²⁵⁾ (2002)	受傷後 72 時間以内 競技不明(若年者)	27	アンケート 唾液検査	月経期初期(1, 2日のみ)37%
Wojtys ら ²⁶⁾ (1998)	競技不明(若年者)	28	アンケート (後ろ向き)	排卵期(10-14日)に増加

(注) 日数は月経初日を 1 日目として計算

3. ACL の機械的特性の評価と三次元計測の限界

従来の ACL の機械的特性の評価は、安静位で直接脛骨に外力を加えて脛骨の前方変位量を計測することで行われてきた³¹⁻³³⁾。この方法でエストロゲン濃度との関係性を検討した報告では、Shultz ら³³⁾が黄体期のはじめの 1～3 日目は月経期と比べて脛骨の前方変位量が大きかったと述べている。

一方、運動中の関節のダイナミックアライメントがどのように変化しているかについては、従来 X 線撮影による方法が用いられてきた³⁴⁾³⁵⁾。しかし X 線を用いた方法では、計測中に被験者が被曝することや、撮影環境によって動作が制限されるなどの問題があり、多くの健常若年者を対象とした研究を行うには適していない。また、生体への侵襲を伴わない方法として、体節の皮膚表面に標点を貼付して行う計測手法がとられてきた³⁶⁾³⁷⁾が、皮膚と骨とのずれの影響が大きく³⁸⁾詳細なデータを得ることが困難であった。この問題を解決する手法として、Andriacchi らによって皮膚表面の標点計測から骨運動の計測を可能にする Point Cluster 法 (以下 PC 法) が考案されている³⁹⁾。PC 法では大腿部と下腿部皮膚表面に貼付した多数の標点の位置データからそれぞれの慣性主軸を求めることにより膝関節の角度を算出するため、皮膚のずれによるノイズが相殺されやすいという特徴を持つ。骨模型を使用した検証実験において、実際の骨運動との整合性が高いことが報告されており、誤差は屈曲角度では 1.39° (SD 0.63°)、内外旋角度では 0.67° (SD 0.38°)、前後方向変位量は 0.56mm (SD 1.4mm) と精度の高い測定法であるとされる⁴⁰⁾。

4. 研究の目的

これまで述べてきたように, ACL 損傷の発生率の男女差は多くの研究者の注目を集め, その原因について解剖学, バイオメカニクス, 性ホルモンの観点から多数の報告がなされてきた. その結果, 女性の ACL は男性に比べて短く断面積が小さいことや, 動作時に ACL を損傷しやすい肢位をとりやすいことが分かってきた. また, 女性ホルモンが ACL の組成に変化を与えることや, 他動的な脛骨の前方変位量が月経周期中に変化することも報告され, 月経周期中に損傷リスクが上下する可能性も示唆されている. しかし, 競技に関連する動作中の膝関節運動が月経周期中に変化するかということについては明らかになっていない.

よって, 本研究では女性の ACL 損傷発生メカニズム解明の基礎的なデータを得るために, 基礎体温と月経の記録をもとに性周期を分類し, 着地動作中の膝関節運動との関連を調べることを目的とした.

II. 対象と方法

1. 対象

被験者は下肢に整形外科的既往がなく，膝関節の内反・外反変形や外反母趾・扁平足を呈していない健常若年女性 42 名（平均年齢 21.8 歳（SD1.0 歳，19～24 歳），身長 158.9cm（SD5.8cm），体重 52.3kg（SD4.4kg），および同じ条件の健常若年男性 12 名（平均年齢 21.7 歳（SD1.1 歳，20 歳～23 歳），身長 169.6cm（SD7.9cm），体重 68.8kg（SD8.5kg）とした．研究に先立ち，Beighton⁴¹⁾ の評価法（表 3）を用いて関節弛緩性の評価を行い，被験者全員が 4 点以下で関節弛緩性がないことを確認した．また，経口避妊薬などを服薬している者と神経病性関節症に影響する⁴²⁾ 糖尿病の既往のある者は除外した．

表 3 Beighton の関節弛緩性評価

	右	左
各小指が 90 度以上過背屈する		
各拇指の過屈曲による前腕との接触		
各肘関節の 10 度以上の過伸展		
各膝関節の 10 度以上の過伸展		
膝伸展位で脊柱を前屈させ手掌が床につく		

各項目 1 点で 9 点満点である．5 点以上で関節弛緩性有りと診断される

2. 方法

1) 基礎体温と月経期間の記録

女性被験者には 12 週間の基礎体温と月経期間について記録用紙（参考資料）への記入を求めた．基礎体温の計測は基礎体温計（オムロン社製 MC672-L）を用いた．被験者には毎朝起床直前の 1 分間に，寝具の中で可能な限り安静を保ち，舌下で計測するように指示した．

記録用紙は 12 週間を経過し全ての動作計測が終了した時点で回収した．

2) 月経周期の決定

月経周期の決定は尾上ら⁴³⁾の方法に則って行った。まず、月経初日を低温期の第1日目とし、月経第1日目から10日目までの基礎体温の平均値を求め、この上下 0.10°C 以内を低体温の変動範囲とした。次に4日連続して低体温の変動範囲を超えた場合に高温期(黄体期)に入ったと判定し、遡って4日間の初日を高温期の第1日目とした。さらに、低温期と高温期を1/2ずつに分け、月経期、排卵期、黄体期前半、黄体期後半の4期間に分けた(図1)。

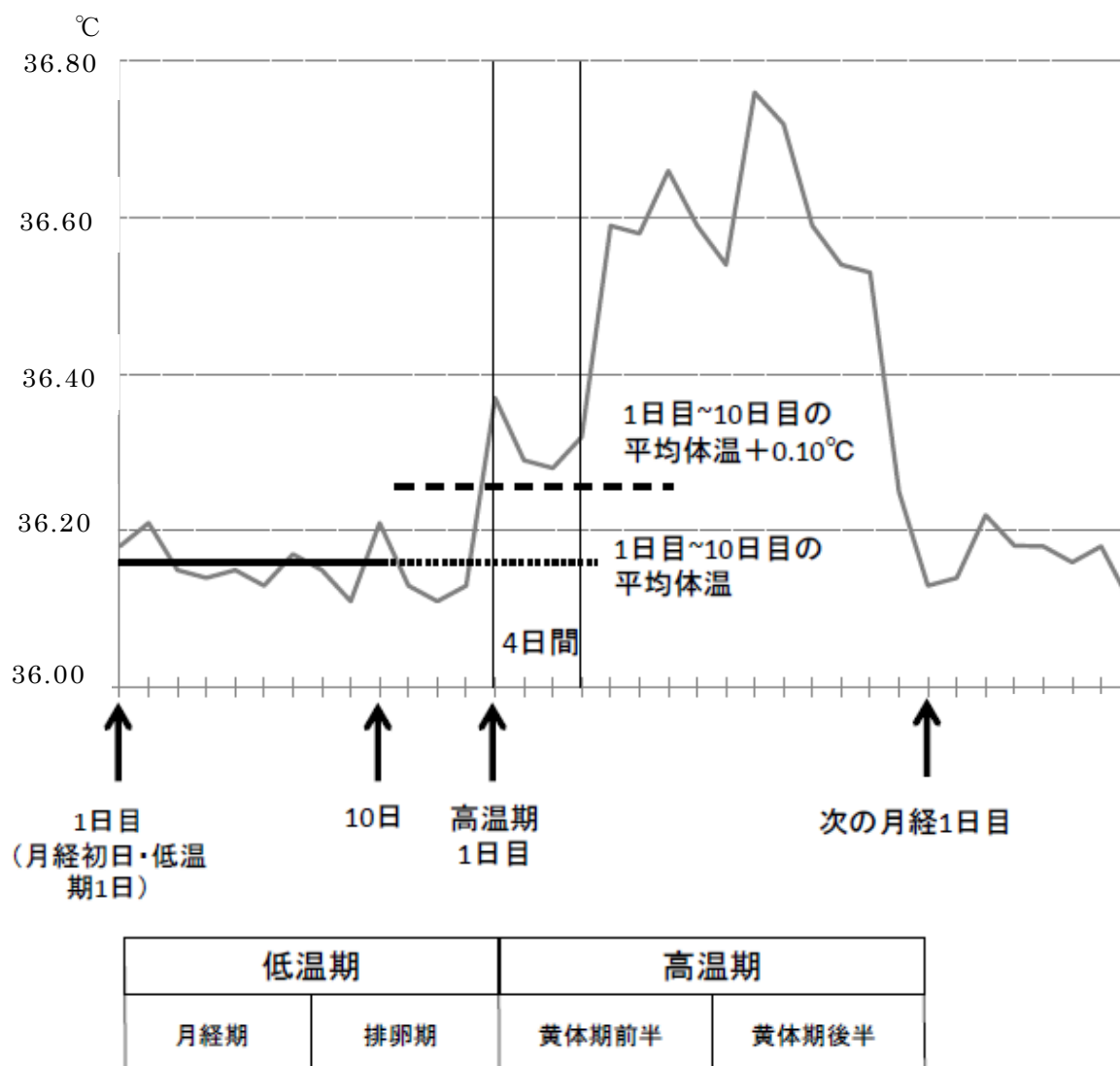


図1 基礎体温の変化と月経周期の判定方法

3) 三次元動作分析装置を用いた動作計測と筋硬度の測定

i) 計測頻度と回数

三次元動作計測と筋硬度の測定は、7日ごとに行い12週間で合計12回行った。12週間の間、測定者が月経の状態や基礎体温の変化などについて被験者に確認はとらず、測定者が認知できないようして測定し、測定に影響が出ないように配慮した。

ii) 三次元動作分析装置を用いた計測の方法

計測課題は最大努力下での両脚垂直ジャンプとし、両脚で同時着地させた。被験者には計測前に十分な練習を行わせ、口頭で「できるだけ高くジャンプすること」と「飛び上がる位置と着地する位置ができるだけずれないように注意すること」を指示した。測定者の目視にて着地位置が動作開始から著しくずれた試行を除外して、1回の計測について5試行ずつ記録した。測定環境の都合上、すべての被験者において左側の膝関節を対象とした。

被験者の体表面上のPC法で決められた位置³⁹⁾（計25カ所：図2）と、左右肩峰、左右股関節、左右膝関節、左右外果、左右第5中足骨頭に赤外線反射標点を貼付し（図3）、三次元動作解析装置VICON 612（VICON PEAK社製）を使用してサンプリング周波数120Hzで計測した。また、床反力計（AMTI JAPAN社製）を用いて足尖部が床に接触するタイミングを確認した。

得られた各標点の座標データをPC法演算プログラム³⁹⁾で演算処理を行い、膝関節屈曲角度、内・外反角度、回旋角度、および大腿骨に対する脛骨の前後変位量を算出した。また、臨床歩行分析研究会作成の処理ソフトDIFF gait⁴⁴⁾を用いて、股関節屈伸角度、足関節底背屈角度を算出した。

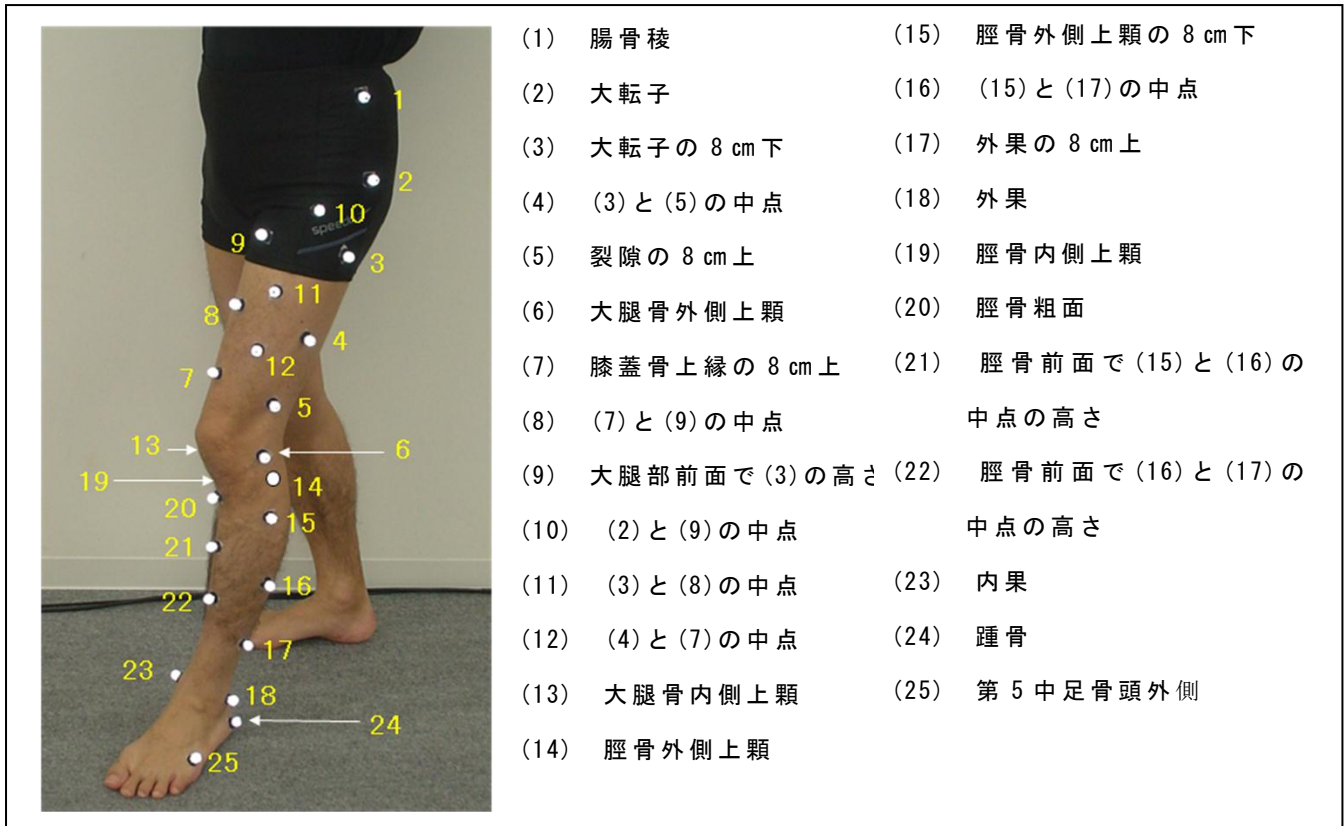


図 2 PC 法³⁹⁾による計測のための標点貼付位置

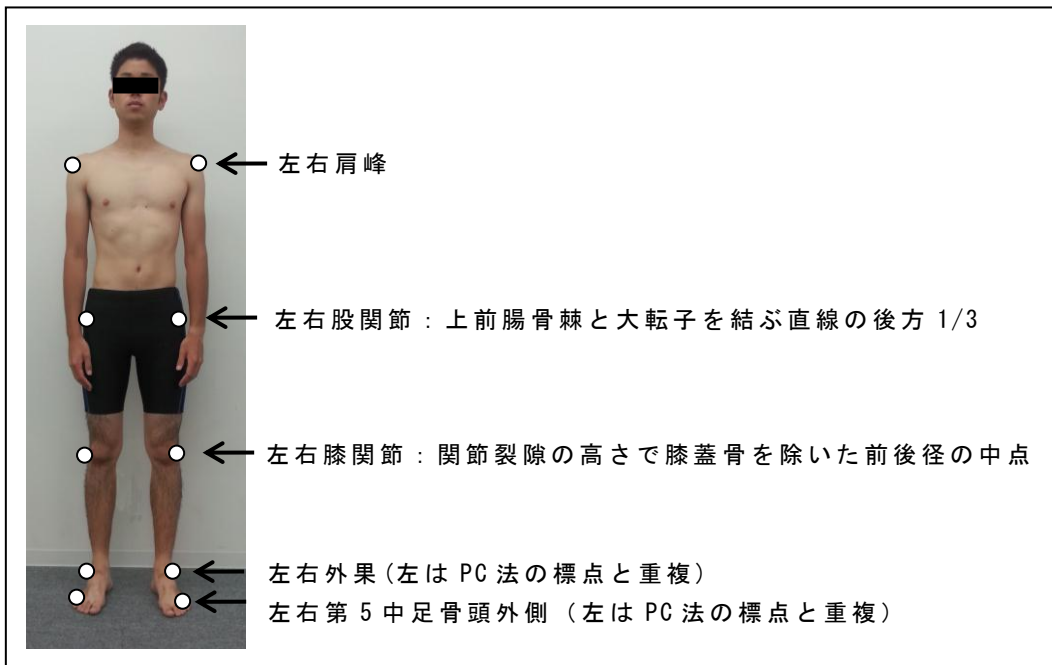


図 3 DIFF gait⁴⁴⁾による計算のための標点貼付位置

iii) 筋硬度の測定

筋硬度の測定は、筋硬度計（NEUTONE TDM-N1, TRY-ALL社製）を用いて行った。計測筋は大腿直筋、大腿二頭筋、半膜様筋とした。計測は筋腱移行部にあたる筋の停止部から筋の全長の25%と、筋腹にあたる筋の全長の50%の部位で行った。筋の全長の決定方法は大腿直筋が上前腸骨棘から膝蓋骨上縁まで、大腿二頭筋は坐骨結節から腓骨頭まで、半膜様筋は坐骨結節から脛骨内側顆までとし⁴⁵⁾、すべての被験者のすべての計測について同一測定者が触診で測定部位を決定した。測定は筋収縮を起こさないようリラックスした状態で行い、目的筋に対して筋硬度計を垂直に押し当てて測定した。計測肢位は大腿直筋が背臥位、大腿二頭筋と半膜様筋は腹臥位で行った。測定は5回ずつ行い最大値と最小値を除外した3回分の平均値を求めた。

なお、本研究で使用した筋硬度計には単位がないため、メーカーが指定した計算式 ($N = 0.0238 \times \text{測定値} + 0.532$) にて単位をニュートンに換算した。また研究に先立ち、計測者は被験者とは別の男性1名と女性1名の協力の下、筋硬度計測の練習を行い、同一部位での計測誤差が ± 1 目盛り ($\pm 0.56N$) に収まるまで十分な練習を行った。

4) 解析するデータの選別方法

12週間の計測で得られた60(5試行 \times 12週間)試行分の角度データのうち、股関節屈伸角度、膝関節屈伸角度、足関節底背屈角度について足尖が床に接触した瞬間の角度を求め被験者ごとに平均値と標準偏差(SD)を算出した。次に3つの関節角度が1SDに収まっている試行を選別した。1SDに収まらない場合は解析データから除外した。選別された試行の膝関節内・外反角度、回旋角度、大腿骨に対する脛骨の前後変位量について、月経周期との関連を検討した。

5) 統計学的検討

月経周期中のデータの比較には反復測定による分散分析を用いて分析し、危険率5%未満をもって有意とした。男女差の比較にはT検定を用い、危険率5%未満をもって有意とした。分析にはIBM SPSS Statistics.ver19(IBM)を使用した。

Ⅲ. 倫理配慮

本研究の実施に際して、神奈川県立保健福祉大学研究倫理審査委員会の承認を得た(20-34-008).被験者には事前に本研究の趣旨と内容について書面と口頭で説明を行い、研究参加ならびに研究終了後のデータの開示に関して同意署名を得て実施した.

IV. 結果

1. 被験者の選別

女性被験者 42 名のうち、12 週間連続で動作計測ができなかった者 2 名と研究期間中に月経周期が乱れた者（計測期間中に無月経の月があった者 3 名、月経から次の月経までの日数が 25 日以下または 38 日以上⁴⁶⁾で月経周期が乱れたと判断された者 4 名、月経初日から 10 日未満で高温期に入った月があった者 2 名）と方法 4)（上述）で選別したデータ数が 45 未満であった 1 名を除外し、最終的に 30 名のデータを採用した。男性被験者は 12 週間連続で動作計測ができなかった者 2 名を除外し 10 名のデータを採用した。

2. 最終的に使用できたデータ数

選別された女性被験者 30 名と男性被験者 10 名の関節角度データについて、足尖接地時の股関節屈伸角度、膝関節屈伸角度、足関節底背屈角度が 1 SD に収まっていた試行数は平均 49.4 試行（46-52），SD が 3.6 であった（表 4）。

表 4 足尖接地時の関節角度と SD の範囲

	全被験者の 平均角度	SD	SD の範囲
股関節屈曲角度	11.3°	8.1°	5.5-9.3°
膝関節屈曲角度	10.8°	6.6°	5.1-8.6°
足関節底屈角度	27.9°	5.7°	3.9-7.1°

3. 着地動作における関節角度の変化

着地動作中の関節角度変化を図 4 に示す。グラフは Tokuyama⁴⁷⁾の報告した最小二乗法に基づいて位相合わせによる平均化を行い，男女別の平均データを表している。グラフは縦軸が関節角度（屈曲・外反・内旋を+）と前後方向位置（前方を+），横軸が時間（msec）を表す。また，踵骨の標点が静止立位と同じ高さに位置したタイミングを踵接地とし，グラフ中に踵接地の変動範囲を示した。足尖接地直後，全被験者において膝関節は屈曲・外反し，大腿骨に対する脛骨の内旋が生じた。その後は膝関節屈曲から伸展に，外反角度が減少して内反方向に，脛骨外旋へと運動方向が変化して動作が終了した。脛骨の前後方向位置については，足尖端接地から大腿骨に対して前方に位置しており，膝関節屈曲角度の増加に合わせてより前方へ変位し，伸展に合わせて後方へ戻り静止立位時の位置に変位した。

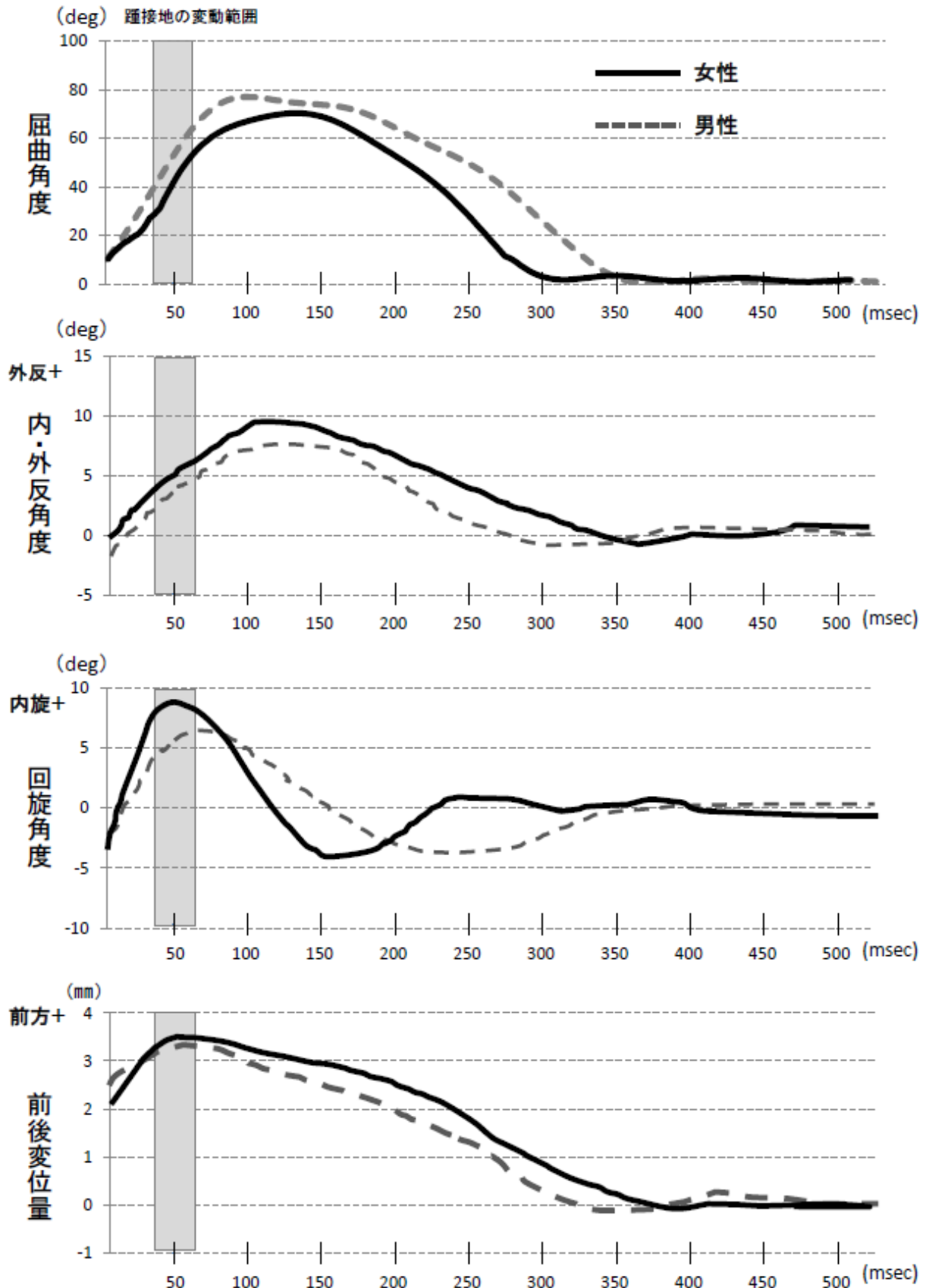


図 4 着地動作中膝関節運動

1) 膝関節屈曲角度

女性の最大屈曲角度は平均 71.6° , $SD5.3^{\circ}$ となった (12 週間の平均) . 各期については, 月経期が平均 70.3° ($SD3.8^{\circ}$) , 排卵期が平均 71.9° ($SD4.4^{\circ}$) , 黄体期前半が平均 70.8° ($SD2.1^{\circ}$) , 黄体期後半が平均 71.3° ($SD2.3^{\circ}$) となり, 月経周期中に変化は生じなかった. 男性の最大屈曲角度は平均 76.6° , $SD4.5^{\circ}$ となり (12 週間の平均) , 12 週間で変化は生じなかった. 男女で比較すると女性は男性よりも有意に最大屈曲角度が小さかった ($p < 0.05$) (図 5) が, 最大屈曲角度に到達する時間に男女差は生じなかった.

また踵接地時の膝関節屈曲角度は女性が平均 36.6° , $SD1.9^{\circ}$, 男性が平均 45.2° , $SD0.8^{\circ}$ となり, 女性が有意に小さかった ($p < 0.05$) .

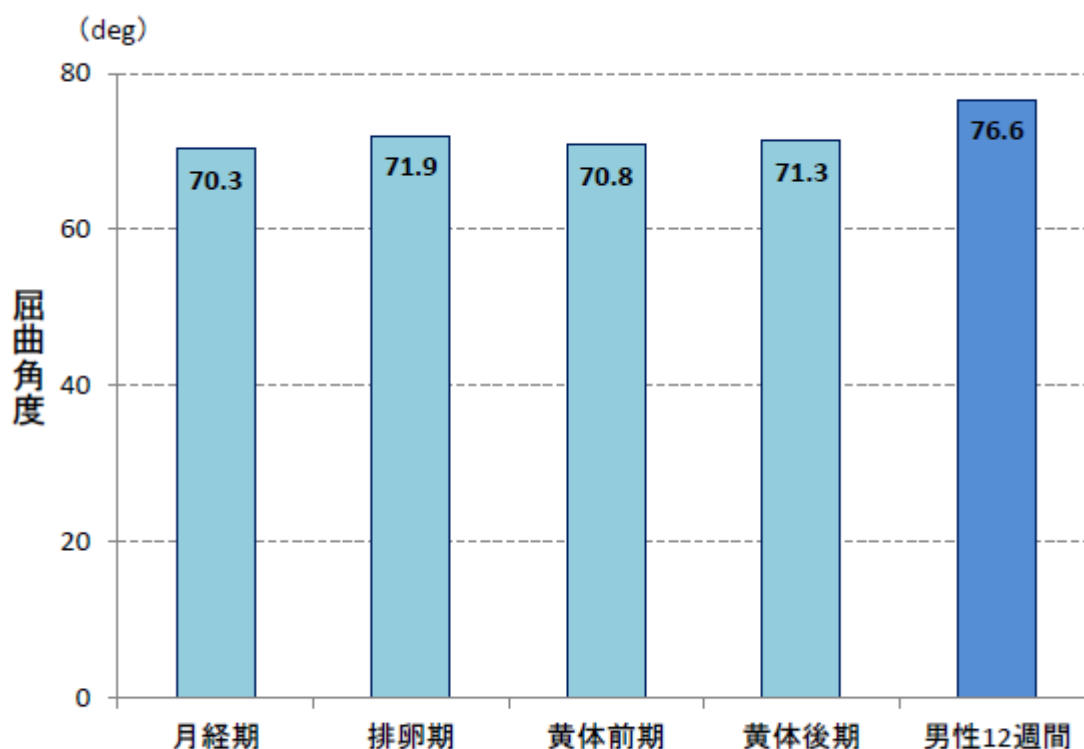


図 5 最大屈曲角度の変化

女性は全ての期において男性より有意に小さい.

2) 膝関節外反角度

女性の最大外反角度は平均 9.5° , $SD4.6^{\circ}$ で、最大角度に達した時間（足尖接地を 0 とする．以下、最大角度到達時間）は平均 110.1msec , $SD25.3 \text{ msec}$ あった（12 週間の平均）．各期については、月経期の最大角度が平均 9.7° （ $SD3.1^{\circ}$ ）, 最大角度到達時間は平均 108.1msec （ $SD20.1\text{msec}$ ）, 排卵期の最大角度が平均 9.4° （ $SD5.5^{\circ}$ ）, 最大角度到達時間は平均 112.0msec （ $SD26.3 \text{ msec}$ ）, 黄体期前半の最大角度が平均 9.6° （ $SD3.9^{\circ}$ ）, 最大角度到達時間は平均 109.4msec （ $SD28.9 \text{ msec}$ ）, 黄体期後半の最大角度が平均 9.3° （ $SD7.6^{\circ}$ ）, 最大角度到達時間は平均 107.9msec （ $SD22.2 \text{ msec}$ ）となり、最大角度と到達時間について月経周期中に変化は生じなかった．

男性の最大外反角度は平均 8.1° , $SD2.6^{\circ}$ で、最大角度到達時間は平均 121.6msec , $SD48.3 \text{ msec}$ （12 週間の平均）となり、最大角度と到達時間について 12 週間で変化は生じなかった．

女性はすべての期において男性よりも最大外反角度が大きく（図 6）, かつ、すべての期において最大角度に到達する時間が早かった（ $p < 0.05$ ）．

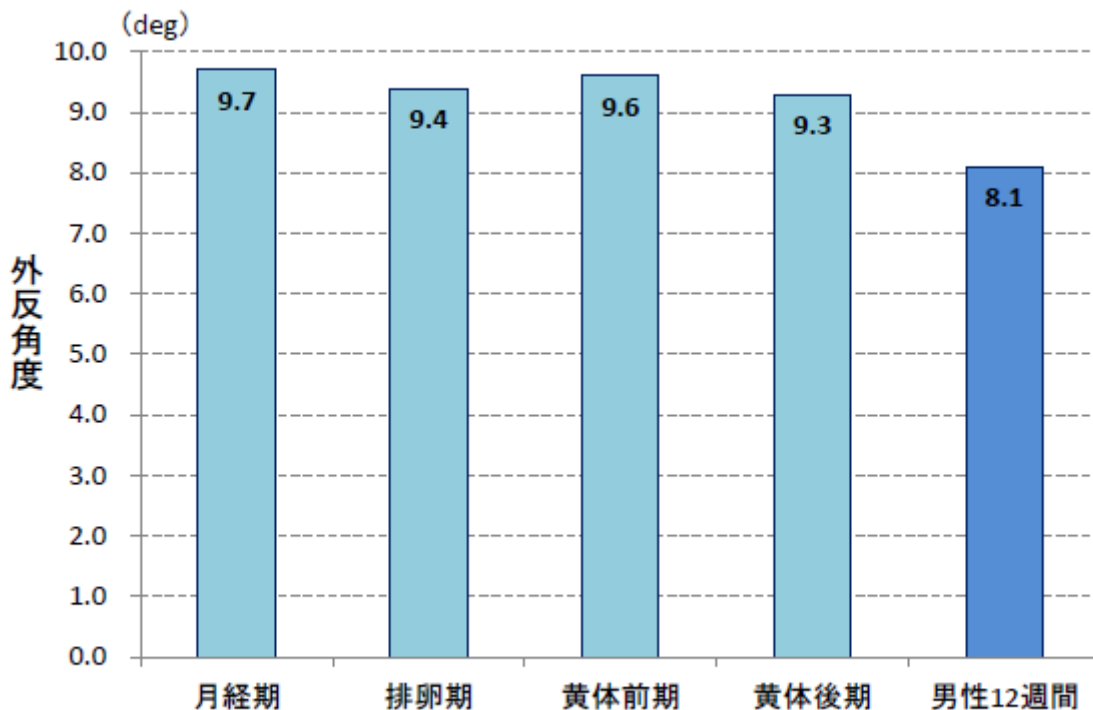


図 6 最大外反角度の変化

女性は全ての期において男性より有意に大きい。

3) 脛骨内旋角度

女性の脛骨最大内旋角度は平均 8.1° ,SD 1.6° で,最大角度到達時間は平均 50.6msec ,SD 17.6msec であった(12週間の平均)。各期については月経期の最大角度が平均 8.3° (SD 1.3°) ,最大角度到達時間が平均 51.2msec (SD 9.6msec) ,排卵期の最大角度が平均 7.7° (SD 1.1°) ,最大角度到達時間が平均 50.4msec (SD 1.5msec) ,黄体期前半の最大角度が平均 9.2° (SD 4.4°) ,最大角度到達時間が平均 52.8msec (SD 8.8msec) ,黄体期後半の最大角度が平均 8.6° (SD 2.8°) ,最大角度到達時間が平均 51.4msec (SD 18.2msec) となり,黄体期前半が他の時期と比べて有意に内旋角度が大きかった($p < 0.05$)。最大角度到達時間に有意差は認められなかった。

男性の脛骨最大内旋角度は平均 7.3° ,SD 4.6° で,最大角度到達時間は平均 57.7msec ,SD 22.0msec (12週間の平均)となり,最大角度と到達時間について12週間で変化は生じなかった。女性は全月経周期において,最大内旋角度が男性と比較して有意に大きく(図7),かつ,最大内旋角度に到達する時間が早かった。($p < 0.05$)。

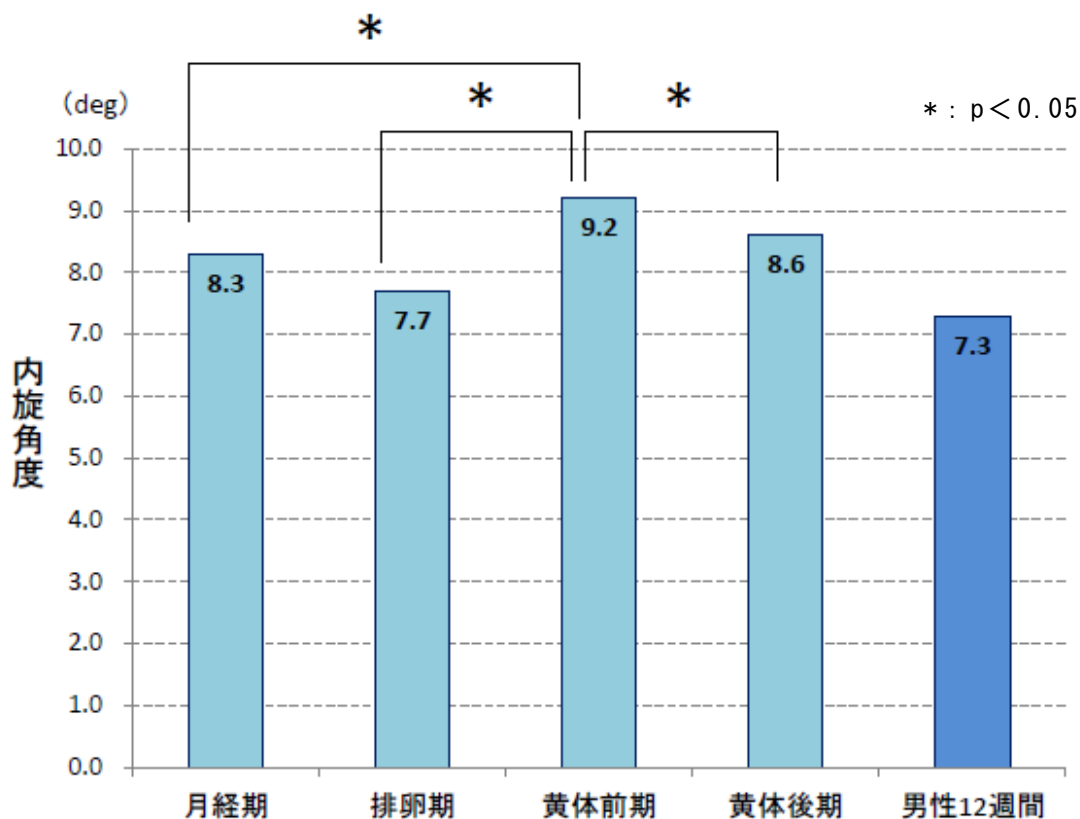


図7 最大内旋角度の変化

女性は全ての期において男性より有意に大きい。

4) 脛骨前方変位量

女性の脛骨前方変位量の最大値は平均 3.4mm, SD1.6 mm で, 最も前方に位置する時間 (以下, 最大前方到達時間) は平均 50.3msec, SD11.0 msec であった (12 週間の平均). 各期については月経期の最大値が平均 3.7mm (SD0.9 mm), 最大前方到達時間が平均 49.6msec (SD19.3 msec), 排卵期の最大値が平均 3.4mm (SD1.5 mm), 最大前方到達時間が平均 51.2msec (SD14.6 msec), 黄体期前半の最大値が平均 4.4mm (SD1.5 mm), 最大前方到達時間が平均 51.8msec (SD10.2 msec), 黄体期後半の最大値が平均 3.9mm (SD0.7 mm), 最大前方到達時間が平均 50.1msec (SD16.6msec) となり, 黄体期前半が他の時期と比較して有意に最大前方変位量が大きかった ($p < 0.05$). 最大前方到達時間に差は生じなかった.

男性の脛骨前方変位量の最大値は平均 3.3mm, SD1.6 mm で, 最大前方到達時間は平均 51.2msec, SD28.5msec となり (12 週間の平均), 12 週間で変位量と時間に変化は生じなかった. また女性の黄体期前半・黄体期後半・月経期の最大前方変位量は, 男性の最大前方変位量と比較して有意に大きくなった ($p < 0.05$) (図 8).

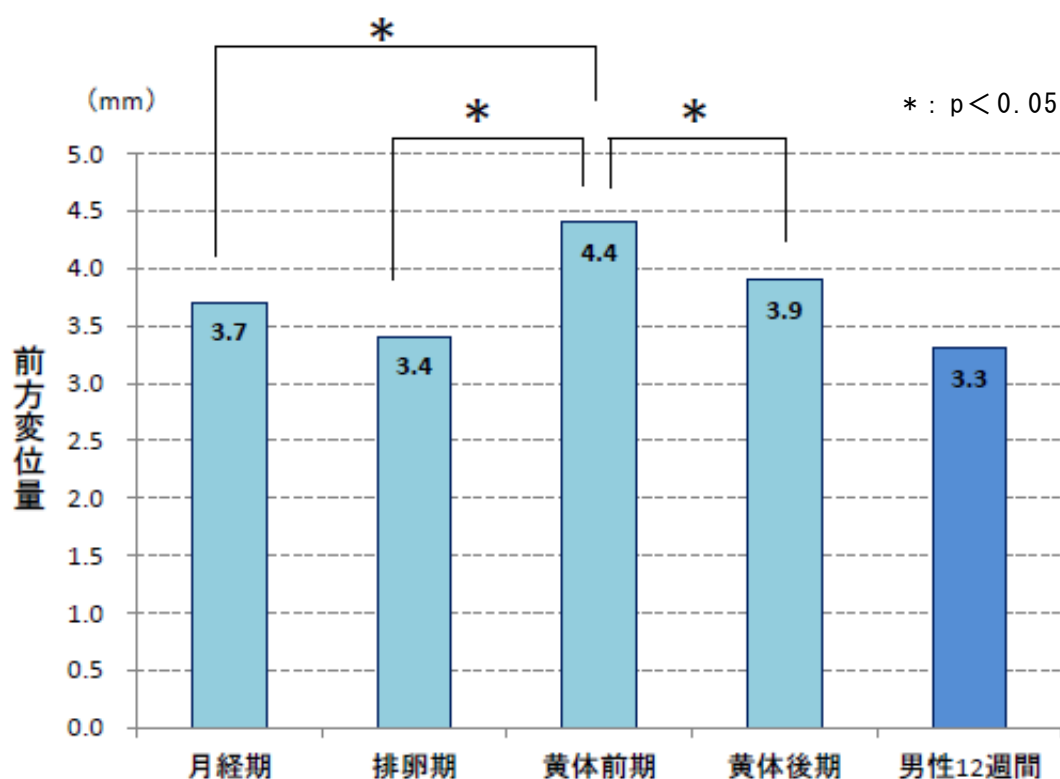


図 8 最大前方変位量の変化

女性の黄体期前半・黄体期後半・月経期は男性より有意に大きい.

4. 筋硬度の変化

筋硬度測定についての再現性を調べるために、男性被験者 10 名分のデータのうち無作為に抽出した 4 回分（非連続）について検者内級内相関係数 ICC Case 1 を求めた（巻末表参照）。ICC (1.1) は $\rho = 0.68 \sim 0.79$ となり、高い再現性が確認された ($p < 0.01$)。

筋硬度の計測結果を表 5 に示す。女性の大腿直筋筋腹の筋硬度は、黄体期前半が他の時期と比較して有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。また黄体期後半は月経期・排卵期と比較して有意に高かった。大腿二頭筋筋腹も同様に黄体期前半が他の時期と比較して有意に高くなり、黄体期後半が月経期・排卵期と比較して有意に高かった ($p < 0.05$)。半膜様筋筋腹については、月経周期中に変動は見られなかった。

筋腱移行部については、すべての筋で月経周期中における変動はみられなかった。

男性は 12 週間で変動はみられなかった。

表 5 月経周期中における筋硬度の変化

	月経期	排卵期	黄体期前半	黄体期後半
大腿直筋				
筋腹	0.82 (0.74-0.84)	0.83 (0.74-0.86)	0.86 (0.80-0.92)	0.84 (0.79-0.89)
筋腱移行部	0.89 (0.77-0.93)	0.89 (0.81-0.95)	0.91 (0.84-0.97)	0.90 (0.84-0.94)
大腿二頭筋				
筋腹	0.88 (0.81-0.92)	0.88 (0.80-0.91)	0.92 (0.85-0.97)	0.91 (0.83-0.95)
筋腱移行部	0.97 (0.90-1.21)	0.96 (0.89-1.15)	0.97 (0.91-1.22)	0.97 (0.92-1.10)
半膜様筋				
筋腹	0.94 (0.89-1.15)	0.95 (0.88-1.21)	0.96 (0.88-1.23)	0.95 (0.86-1.19)
筋腱移行部	1.05 (0.97-1.25)	1.06 (0.95-1.23)	1.05 (0.94-1.22)	1.03 (0.96-1.19)

* : $p < 0.05$, 値 : 平均値 (最小値—最大値), 単位 : N

V. 考察

1. データ選別の必要性

ジャンプ動作は同一被験者であっても試行ごとのばらつきが大きい動作であるため、着地動作の解析では計測条件を一定にするために30～40 cmの高さの台から落下させ、片脚で着地する方法で行われることが多い（ドロップジャンプテスト）⁴⁸⁾⁴⁹⁾。本研究では被験者の安全性を考慮して両脚でジャンプし両脚で着地する方法を選択した。よって解析に際してより再現性の高いデータを選別する必要があった。このため方法4で述べたように、60試行の足尖接地時の股関節、膝関節、足関節角度から平均値と1SDを算出し、3関節の角度が全て1SDに収まっている試行のデータを解析データとして選択した。結果として、被験者一人あたり平均49.4データ（SD3.6データ、82.3%）が解析データとして使用できた。

2. 計測を12週間行った理由

月経周期の特定を正確に行うためには、血液³²⁾の検査からホルモン濃度を分析する方法や、超音波検査⁵⁰⁾による排卵の有無の確認する手法がとられる。しかし、本研究では研究環境の都合上これらの方法は選択できず、基礎体温と月経記録をもとに月経周期を分類した。そのため、上記の方法に比べて正確性が低下⁵⁰⁾することが予想された。よって、健常女性の月経周期3サイクル⁴⁶⁾に相当する12週間を計測期間とし、3サイクルの基礎体温の変化に異常⁴⁶⁾がないことや月経が周期的に⁴⁶⁾に起きていることが確認できた被験者のデータを使用した。

3. 筋硬度計測の信頼性について

本研究で使用した筋硬度計は、同一測定者による測定での再現性が確認されている一方、検査者が複数に及ぶ場合に再現性が低下することが報告されている⁵¹⁾。そのため本研究の筋硬度計測ではすべての被験者のすべての計測について一名の測定者が行った。その結果男性10名の計測結果について $ICC(1,1) = 0.67 \sim 0.72$ と高い再現性が確認された。女性被験者については月経周期中に筋硬度が変化することを予測していたため、検者内信頼性の確認は行わなかったが、同一測定者による計測であるため男性被験者と同程度の精度を保って計測ができたと考える。

4. 着地動作における ACL 損傷の受傷機転—脛骨回旋方向について—

本研究では全被験者において、足尖接地後膝関節屈曲・外反・脛骨の内旋が生じた後、膝関節屈曲から伸展に、外反が減少して内反方向に、脛骨外旋へと運動方向が変化した。このとき足尖接地後 50msec 前後で脛骨の内旋角度が最大となった。足尖接地から 50msec 前後は踵接地の時期にあたる。先行研究では着地動作における ACL 損傷は多くが踵接地時に発生していると報告されている¹⁴⁾。ACL 損傷時の脛骨の回旋方向については内旋と外旋のそれぞれの報告が散見され¹⁰⁾¹⁷⁾³⁶⁾一定の見解は得られていなかったが、膝関節屈曲・外反・脛骨の内旋を組み合わせた肢位が要因になっているという仮説を筆者ら¹⁹⁾が報告しており本研究結果でも追試し確認された。

脛骨を内旋させているのは足部からの運動連鎖⁵²⁾の影響であると考えられる。着地時、足尖から接地した足部は回内しながら踵接地となる。このとき足部回内から距骨下関節を介して脛骨は内旋する。さらに、着地時には膝関節とともに股関節も屈曲位をとり股関節伸展筋である大殿筋が遠心性に収縮している。大殿筋は腸骨・仙骨・尾骨の後面から大腿骨大転子と腸脛靭帯に向かってに走行し⁴⁵⁾大腿骨外旋作用をもつ。荷重位で脛骨が固定された状態では脛骨に対して大腿骨が外旋方向へ運動する。つまり脛骨は大腿骨に対して内旋位となる。さらに、閉鎖性運動連鎖での下肢の運動連鎖では、脛骨は内旋しながら外転（近位部が内側へ傾斜）するため、膝関節の外反が生じる。これが、着地時の膝関節外反・脛骨内旋のメカニズムであると考えた。

ACL は脛骨の前顆間区から大腿骨外側顆に走り、脛骨前方変位と内旋を制動する作用をもつ。また、脛骨の回旋軸は脛骨内側顆の顆間隆起側を垂直に走るため最大内旋角度が約 10° なのに対して最大外旋角度は約 $30\sim 40^{\circ}$ ⁵³⁾であり、もともと内旋の可動域は小さい。よって生来 ACL に備わる内旋制動能は 10° が限界であると考えられる。本研究では着地動作中の脛骨最大内旋角度（12 週間平均）は男性が平均 7.3° （SD 4.6° ）、女性が平均 8.1° （SD 1.6° ）となり可動域の 70~80%の運動をごく短時間で行っており、ACL に対する伸張負荷が強い状態であると考えた。さらに ACL による脛骨の内旋制動は屈曲 $0\sim 30^{\circ}$ で有効とされ⁵⁴⁾、本研究の着地動作のように膝関節の屈曲角度が 40° を上回った場合には、ACL によって内旋を制動することは困難になると考えられる。

また膝関節 $30\sim 40^{\circ}$ 程度の屈曲位では、膝蓋腱と脛骨長軸のなす角度が約 $10\sim 20^{\circ}$ となり脛骨を前方に引きだす力が最大になるとされている⁵⁵⁾⁵⁶⁾。本研究の膝関節屈曲角度

と脛骨前方変位量の結果を照らし合わせると、男女とも屈曲 40～50° の付近で前方変位量が最大となっている。着地動作の初期は、膝関節を緩やかに屈曲させて着地の衝撃を緩衝するために大腿四頭筋を強く遠心性収縮させており、屈曲角度による影響と大腿四頭筋収縮による作用が組み合わさって前方変位が大きくなると考察した。

ACL と PCL は膝関節内において交差性配列であるため、本来は膝関節の内旋によってお互いの回りで捻じれることで関節面を安定させる働きをしている¹⁾。膝関節軽度屈曲外反位で脛骨が前方に変位しながら大きく内旋すると、ACL は引き伸ばされると同時に交差した PCL に後外側から強く圧迫され剪断力が強くなる。これが着地動作における ACL 損傷発生のメカニズムであると考察した。

一方 PCL は ACL よりも厚く、かつ、後顆間区から大腿骨内側顆の外側面に走り ACL に比べて走行が垂直である⁵³⁾。よって回旋の影響を受けにくく着地動作での損傷リスクは高くないと考えられる。

5. ACL 損傷発生リスクの男女差

上述したように着地動作では膝関節屈曲・外反・脛骨の内旋の組み合わせが ACL の受傷機転となると考えられた。ここで着地動作において ACL 損傷が発生しやすいタイミングとされる踵接地前後¹⁴⁾の膝関節角度を男女で比較すると、女性は屈曲角度が小さく、外反角度と脛骨内旋角度が大きい結果であった。外反角度と脛骨内旋角度の差は ACL の伸張の度合いと PCL から受ける圧迫力の差につながると考えられる。またこのとき女性の膝関節屈曲角度は大腿四頭筋の脛骨前方に引き出し作用が最大になる 30° ～ 40°⁵⁵⁾⁵⁶⁾の範囲にあり、脛骨前方引き出しによる ACL への伸張負荷も男性より大きいと考えられる。つまり、踵接地時の膝関節屈曲角度、外反角度、脛骨内旋角度の男女差が ACL 損傷発生率の男女差の原因になっていると考えた。

この 3 つの男女差を生じさせる原因として考えられるのは、骨格構造と運動時の膝関節周囲筋の筋出力特性の性差である。まず骨格構造では大腿骨長軸と脛骨長軸のなす角度 (Q-angle) の影響が考えられる。女性は男性に比較して Q-angle が大きい⁵⁴⁾⁵⁷⁾ため、解剖学的に膝関節が外反しやすいと考えられる。また、外反角度が増加する原因については、大腿骨前捻角の影響⁵⁸⁾も報告されている。

次に運動時の膝関節周囲筋の筋出力特性については、女性は運動時に大腿四頭筋の筋

出力が強まりハムストリングスの筋出力が低下するため、運動時に膝関節伸展位をとりやすいことが諸家により報告されている¹¹⁻¹³⁾。本研究でみられた踵接地時の屈曲角度の差は、この膝関節周囲筋の不均衡¹¹⁾によるものであると考えた。また大腿四頭筋腱は膝蓋骨から外側下方へ斜めに走行して脛骨に付着する⁴⁵⁾ため、収縮すると脛骨粗面が膝蓋骨に近づく方向への回旋、すなわち脛骨の内旋を起こす。この大腿四頭筋の内旋作用に拮抗する作用を持つのはハムストリングスの一部である大腿二頭筋のみであるが⁴⁵⁾、筋出力の低下により外旋作用が低下し脛骨の内旋を制動することが困難になると考えた。このため女性は内旋角度が大きく、かつ、短時間で最大値となったと考える。

短時間で脛骨内旋角度が最大値に達するということは女性の ACL が速い速度で伸張されていることを意味する。佐久間⁵⁹⁾らは長時間の運動負荷を与えたラット ACL においては粘性成分が増加し、速い引っ張り速度における力学的強度が弱化する述べている。本研究では持続的な運動負荷は与えていないため比較することはできないが、女性は競技中に負荷が加わった状態において、男性より速い速度で ACL が伸張されることで損傷リスクが高まることが予想される。

以上の男女差は月経周期と関係なく生じており、女性は男性に比べて常に ACL 損傷のリスクが高い着地動作パターンになりやすいと考えられた。

6. 黄体期前半の膝関節角度増加の原因に関する考察

本研究結果より、女性の黄体期前半では着地時動作中の脛骨前方変位量と大腿骨に対する脛骨の内旋角度が増加することがわかった。外反角度には変化がなかった。膝関節の前方剪断と脛骨の内旋を制動する第一義的な役割を担っているのは ACL である。よって、前方変位量と内旋角度の増加は ACL による制動力が低下した結果であると考えられる。

ACL は線維芽細胞と Type I コラーゲンを含む軟部組織で、特に Type I コラーゲンが主要な構成要素である⁶⁰⁾。ACL の細胞機構に女性ホルモンがどのような影響を与えるかに関しては、エストロゲン投与によるコラーゲン吸収の増加⁶¹⁾、線維直径と密度の減少が報告されている⁶²⁾。また、Yu²⁹⁾³⁰⁾らは組織培養されたヒト ACL を用いてエストロゲンの影響を調べ、エストロゲン濃度が上昇するにつれて線維増殖や Type I コラーゲンの代謝が減少すること、さらにこの変化は投与した日と翌日、翌々日の 3 日間に一時的に

起こるものであったと述べている。

一方、ACLの機械的特性についてはKT-2000を用いた脛骨前方変位量の評価において、Shultz³³⁾らが血清ホルモン濃度との関係を調査し、黄体期前半の前方変位量は月経期と比較して大きいことを報告した。Shultzらは、エストロゲンが最も高濃度になる排卵期ではなく黄体期に前方変位量が大きくなることについて、エストロゲンサージが遅延した結果であると述べている。

本研究でみられた黄体期前半の膝関節角度や脛骨変位量の変化は、このエストロゲンサージの遅延にあてはまるものと考えられ、排卵期のエストロゲン分泌増加によるACLの細胞機構の変化の影響が、黄体期前半に時間差で生じ、前方剪断と内旋制動力を低下させた結果であると推測した。

7. 黄体期前半・後半の筋硬度上昇の原因とその作用に関する考察

筋緊張と張力は γ 運動ニューロンと交感神経によって制御されている。 γ 運動ニューロンの亢進は筋紡錘の感受性を高め、求心性のインパルスを増加させることで伸張反射を高め、これが α 運動ニューロンの活動を亢進させ錘外筋の張力を高める⁶³⁾。一方、交感神経は筋肉の血管を支配するとともに側枝を出して錘外筋線維と錘内筋線維を同時に支配している。そのため骨格筋の張力は交感神経の興奮・抑制の影響を受ける⁶⁴⁾。諸家の報告では、プロゲステロンが交感神経の緊張を高める作用があることが示唆され²⁷⁾、正常女性では黄体期に交感神経活動が活発になるとされている⁶⁵⁾⁶⁶⁾。本研究では女性の黄体期前半に他の期と比較して大腿直筋と大腿二頭筋の筋腹において筋硬度の有意な上昇が認められた。さらに黄体期後半は月経期・排卵期よりも有意に高くなった。男性では12週間で変動はなかった。よって黄体期の筋硬度の上昇はプロゲステロン濃度の上昇によって活発化された交感神経の働きによるものと考えた。

一方でプロゲステロンには線維芽細胞の増殖³⁰⁾とコラーゲン合成を促進させる作用があると報告されている⁶⁷⁾。よって筆者は黄体期には筋腹よりもコラーゲンが豊富な筋腱移行部の硬度が上昇すると予想していた。また半膜様筋は全長の遠位50%程度から徐々に腱へ移行するため⁴⁵⁾、他の二筋の筋腹よりもコラーゲン量が多いと考えられ、プロゲステロンのコラーゲン合成の作用により他の二筋よりも筋硬度が上昇すると考えていた。しかし本研究では筋腱移行部において筋硬度の有意な変化は生じなかった。また半膜様

筋の筋腹においても変化は生じなかった。このことについて岡崎ら⁶⁸⁾はプロゲステロンのコラーゲン合成作用は筋硬度を変化させるほどの影響はないと述べている。よって、プロゲステロンは女性の交感神経活動を活発化させ筋紡錘の感受性を高めることに影響していると考えた。

膝関節周囲筋の協調的な収縮は関節面の圧着力を増大させ、大腿脛骨関節の偏位を減少させることに寄与している。Wojtysらは大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮による脛骨の前後偏位⁶⁹⁾や回旋⁷⁰⁾に対する影響を検討し、同時収縮によって前後偏位・回旋ともに減少したことを示している。これは大腿四頭筋が脛骨の内旋・前方変位作用をもち、ハムストリングスの一部である大腿二頭筋が外旋・後方変位に働くためである⁴⁵⁾と考えられる。よって、大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮は、各方向の膝関節運動に対して関節を安定化させる効果があるといえる。

筋力は月経周期の影響を受けないことが報告されている⁷¹⁾⁷²⁾。エストロゲンの作用でACLの構造が粗となり脛骨内旋・前方変位を制動する機能が低下する黄体期には、筋出力ではなく筋硬度を高めることで膝関節の剛性を強めて動揺を制御していると考えた。本研究で計測した脛骨前方変位距離の最大値は黄体期前半の4.4mm (SD1.5mm)であった。Pflumら⁷³⁾が行った研究では着地動作でACLにかかる張力負荷は最大で約250N (体重の約40%)と報告されている。対して、KT-2000を用いて130Nの負荷をかけて行われた計測では健常人606例の前方変位距離の平均は5.0mm (SD1.9mm)であった⁷⁴⁾。計測条件が異なるため単純に比較することはできないが、筋収縮を伴わない状態で外力を受けた方が脛骨の変位距離は大きくなると考えられる。つまり、黄体期の筋硬度の上昇がなければ、黄体期前半の脛骨の内旋角度と前方変位量はさらに増加したのではないかと推察する。

8. ACL 損傷の発生と月経周期との関係

従来の性周期と ACL 損傷発生率の関連を示した報告では、Myklebustら²³⁾²⁴⁾とSlauterbeckら²⁵⁾は月経期、Wojtysら²⁶⁾は排卵期に高まると述べている。目崎ら⁷⁵⁾によると、一流女性アスリートの月経周期に伴う自覚的・主観的コンディションは黄体期と月経期間中に悪化する。また女性ハンドボール選手を対象に行われた研究では、月経期に瞬発力や俊敏性が低下する結果となった⁷⁶⁾。さらに、Lebrum⁷⁷⁾は最善の競技成績は月経終了直後の期間にみられ、よくない競技成績は月経前の期間と月経開始の2.3日

にみられると報告している．このように女性アスリートのパフォーマンスは月経期に低下しスポーツ障害発生のリスクを高めていると報告が多く散見され，どの報告でも月経随伴症状の影響によるものであると結論付けられている．

しかし，本研究結果からは ACL が弛緩する黄体期前半が最も損傷リスクが高くなると考えられた．また，KT-2000 を使用した研究においても黄体期に脛骨の前方変位量が大きい結果となっており³³⁾，ACL の構造が粗となり膝関節のずれやすさが生じる時期と，実際に ACL 損傷が多く発生している時期に相違がみられる．この原因を以下のように考察した．

内旋角度と前方変位量は黄体期前半，黄体期後半，月経期，排卵期の順に大きい．血中エストロゲン濃度は排卵期に最も高くなり一度低下した後黄体期後半に再び上昇するため二峰性のグラフで表わされる⁴⁶⁾．よって，エストロゲンサージの遅延は月経期まで持続し，粗になった ACL の構造が回復するまで損傷リスクが高い状態であると考えられる．対してプロゲステロンは黄体期にピークをもつ一峰性のグラフで表され⁴⁶⁾，黄体期終盤(月経期直前)に低下する．エストロゲンが ACL の構造に変化させるのに *time-delay*³³⁾ があるのに対して，筋硬度はプロゲステロンの血中濃度が増加する黄体期のみ上昇しており *time-delay* はないものと考えられる．つまり，月経期は ACL の緩みやすさは残存しながら，筋性防御による膝関節周囲の剛性が低下する時期であると推測される．ここに月経随伴症状が加わることでパフォーマンスが低下し損傷しやすくなると考えた．

Hewett ら⁷⁸⁾らは ACL 損傷発生時期に関する近年の報告をまとめ，月経期に多いことを示し，女性ホルモンは靭帯機構と神経・筋コントロール双方に影響を与えるが ACL 損傷は後者の影響がより強いと示唆しており，本研究はそのメカニズムについて新しい知見を与えるものであると考える．

VI. 本研究の限界

1. 基礎体温計測の限界

本研究では月経周期の判別に基礎体温記録を用いた．田中ら⁷⁹⁾は排卵時期のモニタリングについては超音波診断が確実な方法であり，排卵時期を判断するのに基礎体温は正確ではないと述べている．また記録に関しては被験者自身に記録用紙に記入することを求めたが，12 週間毎日記録し続けることは被験者にとって負担が大きく困難なことであ

ったと推測され記録忘れがなかったと断言することはできない。客観性を担保するために自動記録機能が備わった測定機器を選択・使用すべきであった。以上のことから本研究の女性対象者 30 名が確実に排卵していたかどうかについては不明であり、その点が本研究の限界である。

一方、本研究被験者と同世代の女子学生を対象として行われた研究⁸⁰⁾では、基礎体温が女性ホルモン（エストラジオール・プロゲステロン・黄体形成ホルモン・卵胞刺激ホルモン・プロラクチン）濃度の変化をきわめてよく反映する結果であったと述べられており、これは排卵を伴う月経周期群と無排卵周期群に共通するものであった。さらに本研究では 3 周期分のデータから月経周期の判別を行っており、排卵日の特定はできないが低温期（月経期・排卵期）と高温期（黄体期）の判別については精度を保って判別することができたと推測する。また、基礎体温記録という簡便な方法を用いて損傷リスクの高い時期を推測できることは臨床的に意義のあることであると考える。

2. 三次元動作解析の限界

本研究は、三次元動作解析によって着地動作中の膝関節角度ならびに大腿骨に対する脛骨の前後変位量の変化を調べ、月経周期との関連を検討した研究である。よって女性の着地動作における脛骨内旋角度と前方変位量が月経周期中に増減するという事実までしか確認ができておらず、この 2 つが増加することによる ACL への伸張負荷の増加については、機能解剖学的見地からの推論の域を脱していない。また本研究で生じた脛骨内旋角度と前方変位量の差が、実際に ACL 損傷を引き起こす程度の負荷になるかどうかについても検証されていない。さらに、ACL が損傷する要因として、角度の増加だけでなく伸張する力の大きさや伸張する速さの影響も考えられる。今後は解剖学的手法と生体工学的手法を用いて ACL の緊張変化や破断強度を検証する必要があると考える。

VII. 結語

ACL 損傷発生率の男女差に関して、組織学的な観点では女性ホルモンが ACL の組成に変化を与えることが解明され、黄体期に損傷リスクが最も高くなると示唆されてきた。しかし、実際に ACL 損傷が発生した時期を調査した研究では月経期が最も報告が多い。バイオメカニクスの観点では競技に関連する動作の男女差を比較した報告はあったが、月経周期中に変動がみられるかについては明らかになっていない。よって、本研究では健常若年者を対象に、着地時の膝関節運動と筋硬度について月経周期との関連を調べた。その結果、黄体期前半には脛骨内旋角度と前方変位量が有意に増加した。これはエストロゲンの影響と考えられ、この影響は黄体期前半をピークに月経期まで残存することが考えられた。筋硬度については黄体期前半・黄体期後半に有意に増加した。これは ACL の構造が粗になり内旋と前方変位を制動することが困難になる黄体期に、筋硬度を上昇させることで膝関節の剛性を増し対応していると考えられた。

月経期はエストロゲン ACL の緩みやすさは残存しながら、筋性防御による剛性が低下する時期であり、そこに月経随伴症状が加わることでパフォーマンスが低下して ACL 損傷のリスクが高まると考えられた。

VIII. 謝辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり適切かつ細やかな御指導を賜りました国際医療福祉大学大学院リハビリテーション学分野教授前田眞治先生に感謝申し上げます。また長期間の計測にご参加くださいました神奈川県立保健福祉大学リハビリテーション学科理学療法専攻の計 54 名の在校生・卒業生の皆様に感謝の意を表します。

PC 法の使用方法やデータの解釈、膝関節のバイオメカニクスについては同専攻准教授石井慎一郎先生にご助言をいただきました。深謝いたします。

最後に論文作成にご協力くださった国際医療福祉大学大学院リハビリテーション学分野修士課程前田ゼミの小暮英輔さん、山本潤さんのお二人にお礼申し上げます。

文献一覧

- 1) Bousquet G, Beguec PL, Girardin P. (弓削大四郎, 井原秀俊監訳) . 膝の動的安定性. 図解
膝の機能解剖と靭帯損傷. 東京, 協同医書出版社: 1995: 50-89
- 2) 日本整形外科学会診療ガイドライン委員会, ACL 損傷ガイドライン策定委員会 [編] .
前文. 前十字靭帯 (ACL) 損傷診療ガイドライン. 東京, 南江堂: 2012: 1-6
- 3) Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Injury mechanisms for anterior
cruciate ligament injuries in team handball. A systematic video analysis. Am J
Sports Med. 2004; 32(4): 1002-1012
- 4) Hewett TE, Myer GD, Ford KR, et al. Biomechanical measures of neuromuscular
control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament
injury risk in female athletes: a prospective study. Am J Sports Med.
2005 ; 33(4): 492-501
- 5) Harmon KG, Dick R. The relationship of skill level to anterior cruciate ligament
injury. Clin J Sport Med. 1998; 8: 260-266
- 6) Arendt EA, Agel J, Dick R. Anterior cruciate ligament injury patterns among
collegiate men and women. J Athl Train. 1999; 34: 86-92
- 7) Agel J, Arendt EA, Bershadsky B. Anterior cruciate ligament injury in National
Collegiate Athletic Association basketball and soccer. A year review. Am J
Sports Med. 2005; 33: 524-530
- 8) Myklebust G, Maehlum S, Engebretsen L, et al. Registration of cruciate ligament
injury in Norwegian top level team handball: a prospective study covering two
seasons. Scand J Med Sci Sports, 1997; 7: 289-292
- 9) Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Relationship between floor type and
risk of ACL injury in team handball. Scand J Med Sci Sports. 2003; 13: 299-304
- 10) Hutchison MR, Irland ML. Knee injury in female athletes. Sports Med. 1995; 19:
288-302
- 11) Myer GD, Ford KR, Hewett TE. The effect of gender on quadriceps muscle
activation strategies during a maneuver that mimics a high ACL injury risk
position. J Electromyogr Kinesiol. 2005; 15: 181-189
- 12) Malinzak RA, Colby SM, Kirkendall DT, et al. A comparison of knee joint motion

- patterns between men and women in selected athletic tasks. *Clin Biomech.* 2001;16:438-445
- 13) Moul JL. Differences in selected predictors of anterior cruciate ligament tears between male and female NCAA division I collegiate basketball players. *J Athl Train.* 1998; 33(2):118-121
- 14) Kirkendall DT, Garrett WE. The anterior cruciate ligament enigma. Injury mechanism and prevention. *Clin Orthop.* 2000;372:64-68
- 15) Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball player. *Med Sci Sports Exerc* 2003. 35:1745-1750
- 16) Chappell JD, Yu B, Kirkendall DT, et al. A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *Am J Sports Med.* 2002; 30: 261-267
- 17) Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med.* 2004;32:1002-1012
- 18) McLean SG, Felin RE, Suedekum N, et al. Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:502-514.
- 19) 櫻井好美, 石井慎一郎, 前田眞治. 両脚着地動作における膝関節角度の男女差と前十字靭帯損傷. *理学療法科学* 2012;27(4):461-464.
- 20) 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;26:65-72
- 21) Steubli HU, Adam O, Becker W, et al. Anterior cruciate ligament and intercondylar notch in the coronal oblique plane. Anatomy complemented by magnetic resonance imaging in cruciate ligament-intact knee. *Arthroscopy* 1999;15:349-359
- 22) Chandrashekar N, Mansouri H, Slauterbeck J, et al. Sex-based differences in the tensile properties of the human anterior cruciate ligament. *J Biomech.* 2006;39:2943-2950

- 23) Myklebust G, Meahlum S, Holm I, et al. A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in the elite Norwegian team handball. *Scand J Med Sci Sports*. 1998;8:149-153
- 24) Myklebust G, Engebretsen L, Braekken IH, et al. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball player: a prospective intervention study over three seasons. *Clin J Sport Med*. 2003;26:614-619
- 25) Slauterbeck JR, Fuzie SF, Smith MP, et al. The menstrual cycle, sex hormones, and anterior cruciate ligament injury. *J Athl Train*. 2002;37:275-278
- 26) Wojtys EM, Huston LJ, Boynton MD, et al. The effect of the menstrual cycle on anterior cruciate ligament injuries in woman as determined by hormone levels. *Am J Sports Med*. 2002;30:182-188
- 27) Liu SH, Al-Shaikh R, Panossian V, et al. Primary immunolocalization of estrogen and progesterone target cells in the human anterior cruciate ligament. *J Orthop Res*. 1996;14(4):526-533
- 28) Liu SH, Al-Shaikh R, Panossian V, et al. Estrogen affects the cellular metabolism of the anterior cruciate ligament. A potential explanation for female athletic injury. *Am J Sports Med*. 1997;25:704-709
- 29) Yu WD, Lim SH, Hatch JD, et al. Effect of estrogen on cellular metabolism of the human anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res*. 1999;366:229-238
- 30) Yu WD, Panossian V, Hatch JD, et al. Combined effect of estrogen and progesterone on the anterior cruciate ligament. *Clin Orthop Relat Res*. 2001;383:268-281
- 31) Deie M, Sakamaki Y, Sumen Y, et al. Anterior knee laxity in young women varies with their menstrual cycle. *Int Orthop*. 2002;26:154-156
- 32) Balanger MJ. Knee laxity does not vary with the menstrual cycle, before or after exercise. *Am J Sports Med*. 2004;32:1-8
- 33) Shultz SJ, Kirk SE, Johnson ML, et al. Relationship between sex hormones and anterior knee laxity across the menstrual cycle. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(7):1165-1174
- 34) 浅野太洋, 高木治樹, 高塚和孝ら. 前十字靭帯損傷膝の運動解析: 荷重下での回旋不安定性の検討. *膝* 2008;33(1):21-25

- 35)竹井仁,根岸徹,中俣修ら. MRI による股関節屈曲運動の解析.理学療法学 2002;29(4):
113-118
- 36)加賀谷善教.膝前十字靭帯再建例に対する膝関節回旋機能の解析～三次元剛体モデル
を用いた分析～.日本臨床スポーツ医学会誌 2007;15(1):33-40
- 37)瀧上秀威,腰野富久,斉藤知行ら.3次元動作解析装置 VICON を用いた内側型変形性膝
関節症患者の膝の歩行時側方動揺.日本臨床バイオメカニクス学会誌 1996;
17:213-21
- 38)Reinshmidt C,A.J. van den Bogert,Nigg BM,et al.Effect of skin movement on the
analysis of skeletal knee joint motion during running.J Biomech.1997; 30(7):
729-732
- 39)Andriacchi TP,Alexander EJ,Toney MK,et al. A point cluster method for in vivo
motion analysis:applied to a study of knee kinematics.J Biomech Eng. 1998 ;
120:743-749
- 40)石井慎一郎,山本澄子.実験用模型を使用した Point Cluster 法による膝関節運動の計測
精度.理学療法 2007;24(10):1361-1369
- 41)Beighton PH,Solomon L,Soskolne CL.Articular mobility in an African population.
Ann Rheum Dis.1973;32:413-418
- 42)藤中雄一.糖尿病に合併する骨・関節疾患.Clinical Calcium2009;19(9):1299-1303
- 43)尾上敏一,楠田雅彦.基礎体温表による簡易な排卵日推定法に関する一考察.日本産科婦
人科学会雑誌 1980;32:886-890
- 44)臨床歩行分析研究会〔編〕.歩行データ・インターフェイス・ファイル活用マニュアル.
東京,1991
- 45)中村隆一,齋藤 宏,長崎 弘.下肢帯と下肢の運動.基礎運動学第 6 版,東京,医歯薬出
版:2003:235-261
- 46)佐藤和雄,藤本征一郎〔編〕.性周期の調節機構(正常性周期).臨床エビデンス婦人科学.
東京.メジカルビュー:2003:54-58
- 47)Tokuyama M.Individuality and reproducibility in high-speed motion of volleyball
spike jumps by phase-matching and averaging.J Biomech.2005;38(10):
2050-2057

- 48)Huston LJ,Vibert B, Ashton-Miller JA,et al. Gender differences in knee angle when landing from a drop-jump. *Am J Knee Surg*.2001;14(4):215-220
- 49)今直樹,堀尾暁,佐々木誠.片脚着地動作における下肢アライメントの相違が膝関節ストレスに与える影響. *理学療法科学* 2007;22(3):403-407
- 50)千石一雄,石川陸男,浅川竹仁.基礎体温法による排卵および排卵日診断における正確性に関する検討. *日本不妊学会雑誌* 1985;30(2):219-223
- 51)肥田朋子,天野幸代.筋硬度計による生体の硬さ測定 再現性と妥当性と有用性. *名古屋学院大学論集 (人文・自然科学編)* 2010;46(2):55-61
- 52)山寄勉編.足底挿板療法 (dynesole PC) .*整形外科理学療法の理論と技術*.東京,メジカルビュー:1997:62-83
- 53)Schunke M,Schulte E,Schumacher U,et al.(坂井建雄,松村讓兒,監訳).*下肢 骨,関節,靭帯.プロメテウス解剖学アトラス 解剖学総論/運動器系*.東京,医学書院:2007:360-419
- 54)Chao EY,Neluheni EV,Hsu RW,et al.Biomechanics of malalignment.*Orthop Clin North Am*.1994;25:379-386
- 55)Herzog W, Read JL. Lines of action and moment arms of the major force-carrying structures crossing the human knee joint. *J Anat*.1993;182:213-230
- 56)Delp SL, Loan JP, Hoy HG, et al. An interactive graphics based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures. *IEEE Trans Biomed Eng*.1990;37:757-767
- 57)Woodland LH,Francis RS.Parameters and comparison of the quadriceps and of college-aged men and women in the supine and standing positions.*Am J Sports Med*.1992;20:208-211
- 58)Braten M, Terjesen T, Rossvoll I. Femoral anteversion in normal adults. Ultrasound measurements in 50 men and 50 women. *Acts Orhop Scand*.1992;63:29-32
- 59)佐久間 克彦,水田 博志,高木 克公ら.強制運動負荷が膝前十字靭帯に及ぼす影響について Bipedal Rats を用いた生体力学的検討. *日本整形外科学会雑誌* 1992 ; 66(11) : 1146-1155
- 60)中村隆一,齋藤宏,長崎弘.運動器の構造と機能.基礎運動学第 6 版,東京,医歯薬出版:2003:235-261

- 61)Ho KK,Weissberger AJ.Impact of short-term estrogen administration on growth hormone secretion and action:distinct route-dependent effects on connective and bone tissue metabolism.J Bone Miner Res.1992;7:821-827
- 62)Abubaker AO, Hebda PC, Gunsolley JN. Effects of sex hormones of protein and collagen content of the temporomandibular joint disc of the rat. J Oral Maxillofac Surg. 1996; 54:721-727
- 63)田中勳作. 痙縮の神経機構－再訪. リハビリテーション医学 1995;32:97-105
- 64)Passatore M,Filippi GM,,Grassi C, et al.Cervical sympathetic nerve stimulation can induce and intrafusal muscle fiber contraction in the rabbit. The muscle spindle. NewYork,Stocton Press:1985:212-220
- 65)Matsumoto T, Ushiroyama T, Morimura M, et al. Autonomic nervous system activity in the late luteal phase of eumenorrheic women with premenstrual symptomatology.J Psychosom Obset Gynaecol.2006;27:131-139
- 66)Carter JR,Lawewnce JE.Effect of the menstrual cycle on sympathetic neural responses to mental stress in humans. J Physiol.2007;585:635-641
- 67)青野敏博〔編〕.ホルモン療法の基本.産婦人科におけるホルモン療法の実際.東京,永井書店 1994:1-2
- 68)岡崎倫江,那須千鶴,吉村和代ら.健常若年女性における月経周期中の大腿筋群筋硬度の変動.理学療法科学 2008;23(4):509-513
- 69)Wojtys EM,Ashton-Miller JA,Huston LJ.A gender-related difference in the contribution of the knee musculature toe sagittal-plane shear stiffness in subjects with similar knee laxity.J Bone Joint Surg Am.2002;84:10-16
- 70)Wojtys EM,Huston LJ,Schock HJ,et al.Gender differences in muscular protection of the knee in torsion in size-matched athletes.J Bone Joint Surg Am.2003; 85:782-789
- 71)Friden C,Hirschberg AL,Saartok T.Muscle strength and endurance do not significantly vary across 3 phases of the menstrual cycle in moderately active premenopausal women.Clin J Sports Med.2003;13(4): 238-241
- 72)Janse de Jonge XAK,Boot CRL,Thom JM,et.al.The influence of menstrual cycle phase on skeletal muscle contractile characteristics in humans. J Physiol. 2001;530: 161-166

- 73)Pflum MA,Shelburne KB,Torry MR et al.Model prediction of anterior cruciate ligament force during drop-landings.Med Sci Sports Exerc.2004;36(11):1949-1958.
- 74)Uhorchack JM,Scoville CR,Williams GN,et al.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
- 75)目崎登,佐々木純一,庄司誠ら.大学運動選手の月経症状.日本産婦人科学会雑誌 1984; 36:247-254
- 76)橋本有紀,目崎登.月経周期と女子ハンドボール選手のパフォーマンスの関連.女性心身医学2001;6:108-115
- 77)Lebrum CM. Effect of the different phases of the menstrual cycle and oral contraceptives on athletic performance.Sports Med.1993;16(6):400-430
- 78)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; 35:659-668
- 79)田中温,山本勉,長沢敢.各種検査法を用いた排卵時期のモニタリング 超音波学および内分泌学的検討.日本産科婦人科学会埼玉地方部会会誌 1985;15:42-47
- 80)杉原千歳,前田隆子,菊川章仁ら.一般婦人の思春期における基礎体温ならびに内分泌学検査成績の検討.思春期学 1986;4:31-35

参考資料 2

筋硬度測定^{の再現性} 人的効果^{が変量であるとき}の一元変量効果モデル.

大腿直筋筋腹 級内相関係数

	級内相関	95% 信頼区間		真の値 0 を使用した F 検定			
		下限	上限	値	df1	df2	有意確率
単一測定値	.718	.628	.861	13.497	29	90	.000
平均測定値	.926	.871	.961	13.497	29	90	.000

大腿直筋筋腱移行部 級内相関係数

	級内相関	95% 信頼区間		真の値 0 を使用した F 検定			
		下限	上限	値	df1	df2	有意確率
単一測定値	.712	.567	.832	10.874	29	90	.000
平均測定値	.908	.840	.952	10.874	29	90	.000

大腿二頭筋筋腹 級内相関係数

	級内相関	95% 信頼区間		真の値 0 を使用した F 検定			
		下限	上限	値	df1	df2	有意確率
単一測定値	.695	.514	.804	9.117	29	90	.000
平均測定値	.890	.809	.943	9.117	29	90	.000

大腿二頭筋筋腱移行部 級内相関係数

	級内相関	95% 信頼区間		真の値 0 を使用した F 検定			
		下限	上限	値	df1	df2	有意確率
単一測定値	.705	.546	.821	10.106	29	90	.000
平均測定値	.901	.828	.948	10.106	29	90	.000

半膜様筋筋腹 級内相関係数

	級内相関	95% 信頼区間		真の値 0 を使用した F 検定			
		下限	上限	値	df1	df2	有意確率
単一測定値	.717	.574	.835	11.126	29	90	.000
平均測定値	.910	.843	.953	11.126	29	90	.000

半膜様筋 級内相関係数

	級内相関	95% 信頼区間		真の値 0 を使用した F 検定			
		下限	上限	値	df1	df2	有意確率
単一測定値	.669	.514	.804	9.100	29	90	.000
平均測定値	.890	.809	.942	9.100	29	90	.000