

博士論文

膝前十字靱帯損傷のリスクスクリーニング指標としての  
膝関節回旋可動域の有用性

平成 30 年度

筑波大学大学院 人間総合科学研究科  
スポーツ医学専攻

柵木 聖也

## 目次

### 第1章 緒言

序論	1
----	---

#### 第1節 膝関節の機能解剖

1. 膝関節靱帯の解剖と機能	3
2. 膝関節の運動	6

#### 第2節 先行研究小史

1. ACL 損傷の疫学	7
1-1. 一般集団における発生率	7
1-2. ACL 損傷が好発する競技	8
1-3. ACL 損傷の性差	9
1-4. ACL 損傷の発生型	11
1-5. ACL 損傷の発生時の競技動作	11
1-6. ACL 損傷の発生時の下肢アラインメント	12
2. ACL 損傷の解剖学的因子	14
2-1. 下肢のアラインメント	15
2-1-1. Q-angle	15
2-1-2. 大腿前捻角	16
2-1-3. 足部過回内	16
2-1-4. 脛骨の後下方傾斜	17
2-2. 膝関節過伸展	17
2-3. 関節弛緩性	18
2-4. ACL のサイズ	19
2-5. 大腿骨顆間窩のサイズと形状	20
3. ACL 損傷のバイオメカニクスの因子	21
3-1. 危険動作のバイオメカニクスの分析	21
3-1-1. 着地動作時の膝関節の運動	21
3-1-2. 着地動作時の股関節および足関節の運動	23

3-1-3. 繰り返し動作時の膝関節の運動	23
3-1-4. 繰り返し動作時の股関節および足関節の運動	24
3-1-5. ストップ動作時の下肢関節の運動	25
3-2. 危険動作が ACL の張力に与える影響	26
4. ACL 損傷のホルモン因子	27
5. ACL 損傷の遺伝的因子	29
6. ACL 損傷の神経筋因子	30
7. 膝関節の回旋可動域の測定	32
8. Pivot shift test の定量的評価	34
9. ACL 損傷の予防プログラムの効果	36
10. 先行研究のまとめ	40
第 3 節 本研究の目的	43
第 4 節 本研究の課題	44

## 第 2 章 [ 研究課題 1 ] 膝関節回旋可動域の測定装置の開発

第 1 節 緒言	45
第 2 節 方法	46
第 3 節 結果	58
第 4 節 考察	66
第 5 節 結語	69

## 第 3 章 [ 研究課題 2 ] 各種条件下での膝関節回旋可動域の測定

第 1 節 緒言	70
第 2 節 方法	71
第 3 節 結果	87
第 4 節 考察	92
第 5 節 結語	96

第4章	【研究課題3】 ACL 損傷と膝関節回旋可動域の関連	
第1節	緒言	98
第2節	方法	99
第3節	結果	105
第4節	考察	107
第5節	結語	112
第5章	総合討論	
第1節	本研究の目的	113
第2節	本研究のまとめ	113
第3節	本研究の限界	115
3-1.	対象者に起因する限界	115
3-2.	測定方法に起因する限界	115
3-3.	研究デザインに起因する限界	116
第4節	今後の展望	116
第6章	結論	118
付記		119
引用文献		121
謝辞		141

## 図表一覧

### Figures

Figure 2-1: RotorMeter の全景	47
Figure 2-2: メータ部	49
Figure 2-3: ワイヤの取り回し方法の変更による回転方向の相違	50
Figure 2-4: 測定時の肢位	52
Figure 2-5: 大腿部の固定方法	53
Figure 2-6: 大腿骨内・外側上顆の固定方法	54
Figure 2-7: ハンドポンプによるエアバッグへの加圧	55
Figure 2-8: 3次元 DLT 法による下腿の回旋角度の算出	57
Figure 2-9: 3次元 DLT 法と RotorMeter の相関（内旋可動域）	63
Figure 2-10: 3次元 DLT 法と RotorMeter の相関（外旋可動域）	64
Figure 2-11: 3次元 DLT 法と RotorMeter の相関（総回旋可動域）	65
Figure 3-1: RotorMeter II の全景	73
Figure 3-2: Thigh Board の傾斜角度調節機構	74
Figure 3-3: ロータ部	76
Figure 3-4: ワイヤの取り回し方法の変更による回転方向の相違	77
Figure 3-5: タッチ式液晶ディスプレイの表示内容	79
Figure 3-6a: 測定時の肢位（膝関節 30°屈曲位）	80
Figure 3-6b: 測定時の肢位（膝関節 60°屈曲位）	81
Figure 3-6c: 測定時の肢位（膝関節 90°屈曲位）	82
Figure 3-7: クランプおよびベルクロテープによる大腿部の固定方法	84
Figure 3-8: ハンドポンプによるエアバッグへの加圧	85
Figure 3-9: Neutral Position の規定	86
Figure 4-1: 測定時の肢位	102
Figure 4-2: 東大式全身関節弛緩性テスト	104
Figure 4-3: 膝関節の回旋可動域の測定結果	106
Figure 4-4: GJLT のスコア	106

**Tables**

Table 1-1: 膝関節周囲の靱帯および半月板等の機能 . . . . . 5

Table 2-1: 検者 A による測定結果 . . . . . 60

Table 2-2: 検者 B による測定結果 . . . . . 60

Table 2-3: 画像解析による結果 . . . . . 61

Table 2-4: 測定値の信頼性 . . . . . 61

Table 3-1: 各測定条件での検者間信頼性 . . . . . 89

Table 3-2: 検者 B による測定結果および性差, 左右差の検定結果 . . . . . 90

Table 3-3: 検者 C による測定結果および性差, 左右差の検定結果 . . . . . 91

Table 4-1: 対象者の身体特性その他の情報 . . . . . 100

## 略語一覧

本研究で用いられる主な略語を、以下に記す（アルファベット順）.

ACL: anterior cruciate ligament 前十字靱帯

ADT: anterior drawer test 脛骨前方引き出しテスト

AE: athlete-exposures 1 人のアスリートが 1 回のスポーツ活動を行うことを表す単位

AH: athlete-hours 1 人のアスリートが 1 時間スポーツ活動を行うことを表す単位

AMB: anteromedial bundle (ACL の) 前内側線維束

GJL: general joint laxity 全身関節弛緩性

LCL: lateral collateral ligament (膝の) 外側側副靱帯

LT: Lachman test ラックマンテスト

MCL: medial collateral ligament (膝の) 内側側副靱帯

NCAA: National Collegiate Athletic Association 全米大学体育協会

NDT: navicular drop test 舟状骨下降テスト

NW: notch width (大腿骨の) 顆間窩幅

NWI: notch width index (大腿骨の) 顆間窩幅指数

PCL: posterior cruciate ligament 後十字靱帯

PLB: posterolateral bundle (ACL の) 後外側線維束

PST: pivot shift test ピボットシフトテスト

## 第 1 章

### 緒言

#### 序論

今日に至り医療は、その方向性を疾病および外傷、障害の治療から予防へと大きく転換しつつある。スポーツにおける整形外科的領域もその例に漏れることは無く、スポーツに関わる多くの医療従事者や指導者にとって、スポーツ傷害の予防は非常に大きい関心事となっている。特に膝前十字靱帯 (anterior cruciate ligament, 以下 ACL) 損傷は、競技スポーツの現場で頻発する重篤な外傷のひとつであり、受傷から靱帯再建術、アスレティックリハビリテーションを経て、競技復帰までに 1 年近くの長い期間を要することから、その予防に対しては大きい関心が寄せられている。

1970 年代後半に端を発した ACL 損傷への世界的な関心の高まりにより、世界中の整形外科医、理学療法士、そしてアスレティックトレーナーが、正確な診断と治療、競技復帰を目標としたアスレティックリハビリテーションの実現に取り組んだ。以来、約 40 年にわたり、ACL 損傷の診断方法と靱帯再建術、アスレティックリハビリテーション術は飛躍的な進歩を遂げ、高度な競技スポーツに挑むアスリートであっても ACL 損傷後に競技に復帰することは不可能ではなくなった。しかしその反面、ACL 損傷の発生頻度は、増加することはあれども減少することは決してなく、予防医学の考え方を ACL 損傷の予防に導入することは非常に重要であると言える。

van Mechelen et al. (1992) はスポーツ傷害の予防モデルとして、4 段階で構成される Sequence of Prevention を提唱し、今日広く認知されている。まず第 1 段階では、スポーツ傷害に関する疫学的調査を実施し、問題の所在を明らかにすることとしている。第 2 段階では、明らかにされたスポーツ傷害に関する問題について、その危険因子と発生メカニズムを検討し、第 3 段階において予防的介入プログラムを実践、その後第 4 段階において介入効果を検証して、再度第 1 段階へ戻ることを繰り返していくというものである。



スポーツ傷害の危険因子は、競技者自身の年齢、性別、アラインメント、筋力、柔軟性等の内的危険因子、トレーニングの質および量、気象条件、サーフェスや用器具の問題等の外的危険因子、そしてスキルや神経筋協調性等の内外の危険因子の両者が混在する複合危険因子に大別される。このうち、内的危険因子をメディカルチェック等のスクリーニングによって把握することは、スポーツ傷害のハイリスク者を抽出することに有効であると思われる。

ACL 損傷の内的危険因子には、関節の弛緩性<sup>(注)</sup>、膝関節の静的・動的アラインメント、ACL のサイズ等があるとされている。これらの因子のうち、関節の弛緩性については、全身関節弛緩性、また膝関節そのものの矢状面内および前額面内での弛緩性と ACL 損傷との関連が、多くの先行研究によって指摘されている。しかし、膝関節の水平面内での弛緩性、すなわち回旋方向の弛緩性については、ACL 損傷の内的危険因子として認識されてはいるものの、回旋可動域の測定方法に関するコンセンサスは得られておらず、ACL 損傷との関連について言及した報告も見られない。

本研究では、この膝関節の回旋可動域に着目し、ACL 損傷のリスクスクリーニング指標としての有用性について研究を進めたい。

## 注

本研究では、関節がその標準的な可動域を超える可動域を有する状態を「弛緩性」と表現する。なお「動揺性」は、関節が生理的な運動方向以外の方向への可動性を有する状態を表現するものとする。

## 第 1 節

### 膝関節の機能解剖

#### 1. 膝関節靱帯の解剖と機能

本項では、膝関節周囲に存在する靱帯のうち、前十字靱帯（ACL）、後十字靱帯（posterior cruciate ligament, 以下 PCL）、内側側副靱帯（medial collateral ligament, 以下 MCL）、外側側副靱帯（lateral collateral ligament, 以下 LCL）の主要 4 靱帯の解剖と機能について記述する。

ACL は、膝関節の関節包内に存在する索状の靱帯である。大腿骨顆間窩外側壁後方から脛骨顆間隆起内側部前方へと走行し、前内側線維束（anteromedial bundle, 以下 AMB）と後外側線維束（posterolateral bundle, 以下 PLB）とに肉眼で判別できる。ACL の機能は、第 1 次的には大腿骨に対する脛骨の前方変位の制動であり、大腿骨に対する脛骨の前方変位に対する全抵抗の 85%を担うとされる（Butler et al. 1980）が、脛骨の内旋および内反、外反をも制動する。成人における ACL の破断強度は、約 2,000N と報告されている（Woo et al. 1991）。ACL は膝関節角度によって緊張が変化するとされ、ACL 全体としては軽度屈曲位にて最大緊張し、90°伸展位では最大弛緩する。また、2 本の線維束のうち AMB は ACL 全体と同様の屈曲角度－緊張関係であるが、PLB は屈曲角度が大きくなるにつれ緩やかに緊張が増す（Sakane et al. 1997）。

PCL は ACL と同様に、膝関節の関節包内に存在する索状の靱帯である。大腿骨顆間窩内側壁前方から脛骨顆間隆起外側部後方へと走行し、前外側線維束と後内側線維束とに判別できる。PCL の機能は、第 1 次的には大腿骨に対する脛骨の後方変位の制動であり、後方変位に対する全抵抗の 95%を担うとされる（Andriacchi et al. 1993）が、大腿骨に対する脛骨の内旋および内反、外反をも制動する。PCL も ACL と同様に膝関節角度によって緊張が変化するとされ、伸展位では弛緩しているが、屈曲とともに緊張を増すと報告されている（Covey et al. 2008）。一方で、PCL の全長は膝屈曲 0°から 60°までは徐々に伸長し、60°付近をピークにしてそれ以上の屈曲角度においては短縮するという

報告も見られる（石田ら，1993）

MCLは膝関節内側に存在する扁平な靱帯で，浅層部と深層部の2層から成る．大腿骨内側上顆から起始し，浅層部は脛骨内側上顆に，深層部は膝関節包後内側および内側半月，半膜様筋腱に停止する．MCLの機能は，第1次的には膝関節の外反制動であるが，外旋および伸展をも制動する．また，膝関節伸展位で緊張し，屈曲位で弛緩するとされる（Park et al. 2005）．

LCLは膝関節外側に存在する索状の靱帯であり，大腿骨外側上顆から腓骨頭へ走行する．PCLの機能は，第1次的には膝関節の内反制動であるが，MCLと共同し外旋および伸展をも制動する．MCLと同様に，膝関節伸展位で緊張し，屈曲位で弛緩するとされる（Park et al. 2005）．

膝関節周囲の靱帯および半月板等の機能を，Table 1 - 1 に示す．

Table 1 - 1. 膝関節周囲の靱帯および半月板等の機能 (Halewood and Amis 2015 より改変引用)

運動方向	膝関節屈曲角度	1次制動要素	2次制動要素
脛骨前方変位	0°	ACL	ITB, dMCL, LCL, 半月板, PT
	30°	ACL	半月板, dMCL, PT
	60° - 120°	ACL	—
脛骨後方変位	0° - 40°	POL, OPL	aPCL, LCL, PFL, MFLs
	40° - 120°	aPCL	pPCL, PFL, MFLs
	120° - 140°	pPCL, aPCL	—
内反	0° - 60°	LCL, PLC, ITB, ALL	PCL, PT
外反	0°	sMCL, POL, OPL	ACL
	30°	sMCL	ACL
	60°	dMCL	—
外旋	0°	LCL	半月板, dMCL, PFL
	30° - 90°	sMCL, LCL, PT	PCL, 半月板, PFL
内旋	0° - 30°	POL, ITB	ACL, sMCL, 半月板, PT, ALL
	60°	dMCL, ITB	ACL, 半月板, PT, ALL
過伸展	< 0°	OPL	ACL, POL, pPCL, PFL

略語: *ACL* 前十字靱帯, *aPCL* 後十字靱帯前外側線維, *pPCL* 後十字靱帯後内側線維, *sMCL* 内側側副靱帯浅層, *dMCL* 内側側副靱帯深層, *LCL* 外側側副靱帯, *ITB* 腸脛靱帯, *POL* 後斜靱帯, *OPL* 斜膝窩靱帯, *MFL* 半月大腿靱帯, *PT* 膝蓋靱帯, *PFL* 膝窩腓骨靱帯, *PLC* (膝関節)後外側支持機構, *ALL* Anterolateral ligament

## 2. 膝関節の運動

膝関節の生理的な運動は屈曲と伸展であり、その可動域は伸展 0°、屈曲 130°である（米本ら 1995）。最大伸展位から屈曲させてゆくと、脛骨側の関節面は大腿骨の関節面上を転がるように運動するが、屈曲 15°から 20°付近で滑りに転じる。内転と外転は他動的にのみ可能であり、その可動域は 6～7°程度である（Markolf et al. 1978）。

また、屈曲角度が大になるにつれ下腿の長軸周りでの回旋が可能となり、膝関節 90°屈曲位での総回旋角度は 40～45°とされる（Mossberg et al. 1983）。これは前述の通り、ACL および MCL, LCL が弛緩する影響を受けるためである。内旋と外旋の角度比は、ほぼ 1 対 2 とされる（Mossberg et al. 1983）。しかし、膝関節完全伸展位ではこの回旋はほぼ 0°に制限される。これは、膝関節 90°屈曲位で弛緩していた上記の 3 靱帯が緊張することに加え、関節包の緊張、関節内での骨性適合性の増大によるものとされる（Neumann 2012）。

膝関節は屈曲位から最大伸展位に移行する際、30°屈曲位から最大伸展位にかけて外旋することが知られている。これは screw - home movement（終末伸展回旋）と呼ばれ、その可動域は非荷重時では約 10°（Ishii et al. 1997）、歩行時では約 17°とされる（Kim et al. 2015）。Screw - home movement は、①大腿骨の膝関節面の形状、②ACL の緊張、③大腿四頭筋による脛骨粗面の外側への牽引、の 3 力学的因子によって生じるが、主たる因子は①の大腿骨の膝関節面の形状であるとされる（Neumann 2012）。すなわち、大腿骨の膝関節面は外側に比して内側の方が大きいため、膝屈曲位から伸展してゆく際に脛骨の膝関節面は外側よりも内側の方が長く転がることになる。これにより、膝関節は完全伸展位に近づく際に screw - home movement が誘発され、膝関節は外旋する。

## 第 2 節

### 先行研究小史

#### 1. ACL 損傷の疫学

ACL 損傷の疫学的研究には多くの報告があるが、本項では、①一般集団における ACL 損傷の発生率、②ACL 損傷が好発する競技、③ACL 損傷の発生率の性差、④ACL 損傷の発生型、⑤ACL 損傷の発生時の競技動作、⑥ACL 損傷の発生時の下肢アラインメントについての先行研究をレビューし、ACL 損傷の疫学的特徴を明確にする。

##### 1-1. 一般集団における発生率

ACL 損傷の約 70%は、スポーツ活動中に発生するとされている (Daniel et al. 1985, Griffin et al. 2000)。一般集団におけるスポーツ活動中の ACL 損傷の発生率に関する報告としては、スイスの Youth and Sports プログラムに 1987 年から 1993 年の 7 年間に参加した、約 370,000 人に対する Loës et al. (2000) による調査報告がある。この報告によれば、スポーツ外傷件数 36,974 件のうち膝関節外傷は 3,864 件で、膝十字靱帯損傷は 470 件であった。膝十字靱帯損傷の発生率は、0.18 件/1,000 人/年であった。この調査では、ACL 損傷と PCL 損傷を合算した総数が膝十字靱帯損傷として報告されているが、Myklebust et al. (1997) は膝十字靱帯損傷のうち 93.5%は ACL 損傷であったと報告している。このため、Loës et al.の報告した発生率は ACL 損傷の発生率の概数と見なして良いものと思われる。また、Sanders et al. (2016) は、アメリカ・ミネソタ州のオームステッド郡の 21 年間にわたる全診療記録から ACL 損傷例を抽出し、その発生率を 0.68 件/1,000 人/年と報告した。

本邦の一般集団における ACL 損傷の発生率に関する報告としては、Takahashi et al. (2017) による日本スポーツ振興センターの災害共済給付制度のデータを分析したものがある。この報告によれば、2005 年から 2014 年の 10 年間にわたる中学 1 年生から高校 3 年生の同制度加入者のうち、運動系部活動に所属する生徒のべ約 37,750,000 人の

ACL 損傷の件数は 30,458 件で、ACL 損傷の発生率は 0.81 件/1,000 人/年であった。

上記より、一般集団における ACL 損傷の発生率は 0.18～0.81 件/1,000 人/年であった。

## 1-2. ACL 損傷が好発する競技

前出の Loës et al. (2000) は、一人のアスリートが一時間スポーツ活動したことを意味する単位である athlete・hours (以下 AH) を用いて、ACL 損傷の発生率をスポーツ競技別に集計した。この報告によれば、発生率が最も高かった競技は女子ハンドボールが 0.0230/1,000AH であり、次いで女子サッカー0.0185/1,000AH、男子ハンドボール 0.0159/1,000AH の順であった。一方、損傷例数で見ると、損傷例が最も多かったのは男子サッカーで 225 例、次いで男子ハンドボール 58 例、女子ハンドボール 30 例、男子アイスホッケーが 25 例の順であった。

アメリカでは、全米大学体育協会 (National Collegiate Athletic Association, 以下 NCAA) が 1982 年に外傷調査システム (Injury Surveillance System, 以下 ISS) を構築し、所属する選手の外傷調査を行っている。NCAA では外傷の発生率を、athlete・exposures (以下 AE) という単位を用いて表している。これは、一人のアスリートが一回のスポーツ活動に参加したことを意味している。Hootman et al. (2007) は、1988・89 シーズンから 2003・2004 シーズンに渡る 16 シーズン中の ISS を分析し、全競技の ACL 損傷の発生率を 0.15/1,000AE と報告した。競技別では、男子アメリカンフットボール (春季リーグ) と女子体操競技が 0.33/1,000AE と最も高く、次いで女子サッカー 0.28/1,000AE、女子バスケットボール 0.23/1,000AE、男子アメリカンフットボール 0.18/1,000AE の順であった。

本邦においては、前出の Takahashi et al. (2017) の報告によれば、高校女子バスケットボールが 11.10 件/1,000 人/年で最も高く、次いで高校女子柔道 11.08 件/1,000 人/年、高校女子スキー9.30 件/1,000 人/年、高校女子ハンドボール 9.17 件/1,000 人/年、高校女子サッカー6.08 件/1,000 人/年の順であり、女子の発生率が高いことが特徴であっ

た。この報告において男子で発生率が高かったのは、高校ラグビーで 5.72 件/1,000 人/年、次いで高校柔道 4.74 件/1,000 人/年、高校スキー 2.74 件/1,000 人/年、高校レスリング 2.61 件/1,000 人/年、高校体操競技 2.09 件/1,000 人/年の順であった。

これらの報告はいずれも対象の年齢層が限定されており、また地域間での差はあるものの、総じてバスケットボール、ハンドボール、サッカー等の身体接触を伴うゴール型競技で ACL 損傷が好発していることが示唆された。

### 1-3. ACL 損傷の性差

ACL 損傷の性差についての報告は多数あるが、ここではまず、フィンランドで行われた規模の大きい前向き研究の報告について見てみる。Parkkari et al. (2008) はフィンランド在住の 14~18 歳の男女 46,472 人を対象として、最大で 9 年間にわたる追跡調査を行い、ACL 損傷の危険率を adjusted hazard ratio (以下、AHR) で表した。その結果、スポーツ活動への参加回数が週あたり 3 回以下の対象者群では ACL 損傷の危険率は男性女性ともに 2.0AHR であったが、週あたり 4 回以上の対象者群では男性 4.0AHR に対して女性 8.5AHR であり、定期的かつ頻回にスポーツ活動に参加している女性の ACL 損傷に対するリスクが高いことを示唆した。また前出の Takahashi et al. (2017) は、本邦の中学生および高校生における ACL 損傷の発生率を、男性 0.48 件/1,000 人/年に対し女性 1.36 件/1,000 人/年と報告した。上記より、一般集団における ACL 損傷の発生率は、男性に比して女性が 2.13~2.83 倍であった。

次に、ACL 損傷の好発競技であり、かつ男性および女性の両性がプレーするバスケットボール、サッカー、ハンドボールの三競技について、発生率の性差を見てみる。

バスケットボールにおいては、NCAA 所属学生を対象とした報告 (Harmon and Dick 1998, Arendt et al. 1999, Agel et al. 2005) では、男性の発生率が 0.08~0.10/1,000AE, 女性の発生率が 0.27~0.30/1,000AE であった。米海軍士官学校在学学生を対象とした報告 (Gwinn et al. 2000) では、男性の発生率が 0.09/1,000AE, 女性の発生率が 0.48/1,000AE であった。アメリカ・テキサス州の高校生を対象とした報告 (Messina et



al. 1999) では、男性の発生率が 0.02/1,000AH, 女性の発生率が 0.09/1,000AH であった。上記より、バスケットボールでの ACL 損傷の発生率は、男性に比して女性が 2.90～5.33 倍であった。

サッカーにおいては、NCAA 所属学生を対象とした報告 (Harmon and Dick 1998, Arendt et al. 1999, Agel et al. 2005) では、男性の発生率が 0.11/1,000AE～0.12/1,000AE, 女性の発生率が 0.31～0.33/1,000AE であった。海軍士官学校在学生を対象とした報告 (Gwinn et al. 2000) では、男性の発生率が 0.08/1,000AE, 女性の発生率が 0.77/1,000AE であった。上記より、サッカーでの ACL 損傷の発生率は、男性に比して女性が 2.61～9.48 倍であった。

ハンドボールにおいては、ノルウェーのハンドボールリーグ所属選手を対象とした報告 (Myklebust et al. 1997, Myklebust et al. 1998, Olsen et al. 2003) があり、男性の発生率が 0.03～0.55/1,000AH, 女性の発生率が 0.03～1.60/1,000AH であった。上記より、ハンドボールでの ACL 損傷の発生率は、男性に比して女性が 1.00～6.96 倍であった。また、これらの報告の中には、受傷場面を練習時と試合時とで区別したもの (Myklebust et al. 1997, Myklebust et al. 1998) もある。それらの報告によれば、練習時の ACL 損傷の発生率は男性、女性ともに 0.03/1,000AH であるが、試合時では男性 0.23～0.55/1,000AH, 女性 2.51～6.96/1,000AH と、ハンドボールの試合時における女性の発生率が練習時に比して非常に高い結果であった。

上記三競技に加え、ラクロスにおける ACL 損傷の発生率の性差を見てみる。NCAA 所属学生を対象とした報告 (Hutchinson et al. 1995, Hootman et al. 2007) では、男性の発生率が 0.12～0.19/1,000AE, 女性の発生率が 0.15～0.17/1,000AE で、男性に比して女性が 0.79～1.42 倍という結果であり、他競技に比して男女の発生率が接近している傾向があった。ラクロスはルール上、男性にのみ身体接触が許されており、このルールの相違がラクロスの ACL 損傷の発生率の他競技との違いの原因と思われる。

また、女性のプレーヤーの絶対数は少ないものの、ラグビーにおける ACL 損傷の発生率の性差についての報告もある。米海軍士官学校在学生を対象とした報告 (Gwinn et al.

2000) では、男性の発生率が 0.18/1,000AE、女性の発生率が 0.35/1,000AE であり、ラグビーでの ACL 損傷の発生率は男性に比して女性が 1.94 倍という結果であった。

上記より、一般集団のスポーツ活動全般および ACL 損傷の好発競技においては男性に比して女性における発生率が高いこと、またプレーヤー同士の身体接触がルール上許されている競技においては発生率の性差が小さくなる傾向があることが示唆された。

#### 1-4. ACL 損傷の発生型

ACL 損傷の発生型、すなわち非接触型損傷と接触型損傷の割合についての報告も多い。McNair et al. (1990) は、Otago 大学での ACL 損傷 23 例中 70%が受傷脚接地時の非接触型損傷であったと報告した。また Boden et al. (2000) は、Duke 大学での ACL 損傷 100 例のうち 72%が非接触型損傷であったと報告した。Agel et al. (2005) は、NCAA 所属学生のうちサッカーおよびバスケットボール選手を対象として調査し、サッカーでの ACL 損傷 586 例のうち、受傷機転が不明な症例を除いた 414 例では、男性の非接触型損傷は 48% (66 例)、女性の非接触型損傷は 58% (161 例) であったと報告した。バスケットボールでの ACL 損傷 682 例のうち、受傷機転が不明な症例を除いた 520 例では、男性の非接触型損傷は 70% (78 例)、女性の非接触型損傷は 76% (305 例) であったと報告した。

このように、ACL 損傷の発生型は、一般的に接触型損傷に比して非接触型損傷が多いとされる。しかし、Bradley et al. (2002) は National Football League の 1986 年から 1997 年の 10 年間にわたる ISS を分析した調査の結果、ACL 損傷 209 例のうち非接触型損傷は 21.8%であったと報告している。これは、身体接触が頻発するアメリカンフットボールの競技特性を反映しているものと思われる。

#### 1-5. ACL 損傷の発生時の競技動作

ACL 損傷の発生時の競技動作を把握することは、予防プログラムを立案する上で有益であると思われる。Boden et al. (2000) は Duke 大学での ACL 損傷 143 例中、受傷時

の動作が特定できたビデオ画像の 23 例を分析し、また受傷時の競技動作を思い出すことができた 100 例に対して質問紙調査を行った。その結果、非接触型損傷で最も多かった競技動作は減速動作（48 例）であり、次いで着地動作（31 例）であった。一方、接触型損傷では直達外力による膝関節への強制力が働いた症例が多く、最も多かったのは膝関節外反強制（13 例）で、次いで膝関節内反強制（6 例）、膝関節過伸展強制（4 例）であったと報告した。

また、ACL 損傷の好発競技別に発生時の競技動作を検討した報告もある。Krosshaug et al. (2007) はバスケットボールでの非接触型損傷の発生時の競技動作を分析し、着地動作および停止動作での損傷例が多かったことを報告している。Olsen et al. (2004) はハンドボール選手の ACL 損傷例 19 例の発生時のビデオ分析を行い、受傷時の競技動作を動作速度別に分類して分析した。この報告によれば、中速もしくは高速での切り返し動作での発生が 12 例（うち、非接触型損傷 9 例）と最も多く、次いで高速もしくは超高速での片脚着地動作での発生が 4 例（うち、非接触型損傷 3 例）であったと報告した。

これらの報告より、非接触型損傷は着地、減速、停止、切り返し等の競技動作で頻発するものと思われた。

#### 1-6. ACL 損傷の発生時の下肢のアラインメント

ACL 損傷の発生時の肢位は危険肢位と認識されるが、発生時の下肢のアラインメントは ACL 損傷と深い関連があるものと思われ、その把握は ACL 損傷の発生のメカニズムを明らかにする一助となり、予防策を講じるのに有効であると思われる。

ACL 損傷の発生時の下肢のアラインメントに関する報告は、質問紙調査によるものとビデオ画像分析によるものがある。McNair et al. (1990) は 23 例の ACL 損傷例に対して質問紙調査を行い、受傷時の下肢のアラインメントおよび受傷機転を思い出すことができた 19 例中、70%が受傷脚接地時に発生した非接触型損傷であり、そのうち 53%が膝関節軽度屈曲位かつ脛骨内旋位、21%が膝関節軽度屈曲位かつ脛骨外旋位、16%が膝関節過伸展位であったと報告した。Boden et al. (2000) も質問紙調査の結果、非接触型

損傷のうち着地時に発症した 26 例において膝関節内反位が 11 例、外反位が 9 例、過伸展が 6 例であったと報告した。Arnold et al. (1979) は ACL 損傷 361 例に対する質問紙調査の結果、81.6%で損傷時に下腿が内旋位であったと報告した。しかし同時に、受傷時の正確な肢位を思い出すことの難しさも指摘しており、質問紙調査はその結果に信憑性の問題があることが示唆された。

ビデオ画像分析による報告では、Olsen et al. (2004) は 19 例のハンドボール競技中の非接触型損傷を分析した結果、膝関節 5～25°屈曲位かつ膝関節 5～20°外反位が 19 例、脛骨 5～15°内旋位 7 例、脛骨 5～15°外旋位が 12 例であったと報告した。Boden et al. (2000) は ACL 損傷 23 例のうち、非接触型損傷の 15 例について全例で膝関節はほぼ完全伸展位であり、脛骨の回旋は僅かに外旋位が多かったと報告した。Krosshaug et al. (2007) はバスケットボールの試合中に発生した女性の非接触型 ACL 損傷 17 例について、受傷時の膝関節および股関節の肢位を分析し、9 例で股関節内旋、膝関節外反、脛骨外旋の三徴候が同時に観察されたと報告した。しかし同時に、ビデオ画像分析による調査は、肢位の客観的評価は容易であるものの、ACL 損傷の発生の瞬間を規定するのが困難であり、質問紙調査と同様その結果の信憑性に問題があるものと指摘している。

これらの報告より、非接触型 ACL 損傷の発生時の下肢のアラインメントとしては、膝関節軽度屈曲位で、かつ外反位を強制された際に発生していることが示唆された。しかしながら、膝関節、脛骨あるいは下腿の内旋および外旋の関与については、一定のコンセンサスが得られていない。

脛骨の内旋時に ACL は PCL と接触し緊張するとされており (Kapandji 2010)、また屍体膝を用いた研究 (Kennedy et al. 1974) では、脛骨の外反外旋で ACL が大腿骨外側顆間窩内側縁と接触、緊張して断裂すると報告されている。これらより、膝関節の回旋は ACL の緊張に影響を及ぼすことが推察されるため、

ACL 損傷受傷時の膝関節もしくは脛骨の内旋および外旋と ACL 損傷との関連を精査する必要があるものと思われる。

また、従来のビデオ画像分析では下肢の回旋方向の動作を詳細に把握することは困難

であるとされてきたが、Krosshaug et al. (2005) は多方向から撮影されたビデオ画像を Poser と image matching system を用いて処理することにより、撮影された人間の動きを再現する手法を開発した。Koga et al. (2010, 2011) はこの手法を用い、ACL 損傷受傷時の下肢アラインメントを再現した。その結果、接地後 40ms までに膝関節は内旋を伴いながら外反し、40ms 以降に急激に外旋に転じていたことを報告した。また Meyer et al. (2008) は屍体膝を用いた研究において、膝関節 30 度屈曲位で脛骨大腿関節に圧縮力を負荷してゆくと、脛骨が前方に変位していき、ACL 断裂前までは内旋したが、断裂直後から外旋したことを報告した。これらから、ACL 損傷受傷時の膝関節は内旋位であり、外旋運動は断裂直後に起こっていた可能性があるものとも思われる。

今後、様々な手法の開発、発展によって、ACL 損傷の発生時の詳細な肢位を把握する事が可能になることが期待されている。

## 2. ACL 損傷の解剖学的因子

ACL 損傷の危険因子について Ireland (1999) は、制御不可能な内的危険因子、制御可能な外的危険因子、そして両者が混在し部分的に制御可能な複合危険因子に分類した。さらに内的危険因子については、①下肢のアラインメント、②膝関節過伸展、③膝関節の生理的回旋弛緩性、④ACL のサイズ、⑤大腿骨顆間窩のサイズと形状、⑥ホルモンの影響、⑦遺伝的要因と神経筋協調性をあげており、これらには解剖学的因子が多く含まれているのが特徴である。また外的危険因子には、①筋力、②コンディショニング、③シューズ、④モチベーションをあげ、そして複合危険因子には、①固有感覚受容器、②神経筋活性化パターン、③筋への発火指令、④習得したスキルをあげている。

ACL 損傷の発生率には性差があり、男性に比して女性の発生率が高いことがコンセンサスとして得られているため、性差が存在する解剖学的因子を ACL 損傷の内的危険因子として検討している報告が多い。また、ACL 損傷の誘因となる危険動作とされる急激な減速やストップ、方向転換、切り返し、着地等の動作が非接触型損傷が頻発する競技で多用されることから、これらの危険動作が ACL に与える負荷をバイオメカニクスの

に検討した報告が多く見られる。

加えて、ACL 損傷には非接触型損傷が多いことから、膝関節の動的安定性をもたらすとされている神経筋コントロールの機能低下あるいは破綻を ACL 損傷の内的危険因子の一つとして捉え、その影響を検討した報告も見られる。

そこで本項では、Ireland (1999) があげた ACL 損傷の内的危険因子のうち、解剖学的因子である①下肢のアラインメント、②膝関節過伸展、③生理的回旋弛緩性、④ACL のサイズ、⑤大腿骨顆間窩のサイズと形状についての先行研究を、性差あるいは ACL 損傷の発生率との関連から見てみる。

## 2-1. 下肢のアラインメント

ACL 損傷の解剖学的な内的危険因子と考えられている下肢のアラインメントには、① Q-angle、②大腿前捻角、③足部過回内、④脛骨の後下方傾斜等がある。

### 2-1-1. Q-angle

Q-angle は、大腿軸（上前腸骨棘と膝蓋骨の中心を結んだ線）と下腿軸（膝蓋骨の中心と脛骨粗面の中心を結んだ線）が前額面内でなす鋭角を指し (Livingston et al. 1999)、Q-angle が増大することによって膝関節への外反ストレスが働くことから、ACL 損傷への影響があると考えられている。

Q-angle の性差については、X線を用いた報告 (Chao et al. 1994) ならびに臨床的測定方法を用いた報告 (Horton et al. 1989, Woodland et al. 1992, Livingston et al. 1999) で、女性が男性に比して大きいことが報告されている。しかし、臨床的測定方法によって測定された Q-angle と片脚スクワット動作時の膝関節外反角度のピーク値との間に相関が見られないとの報告 (Pantano et al. 2005) があり、静的な Q-angle と動的な Q-angle の関連については精査が必要と思われる。また、Q-angle と ACL 損傷との関連を報告したものは見られない。

これらより、Q-angle においては性差は存在するものの、ACL 損傷との関連は明確

ではないと示唆された。

### 2-1-2. 大腿前捻角

大腿前捻角は、大腿骨頸部軸と前額面が水平面内でなす角度である。大腿前捻角の増大は、見かけ上の股関節内旋角を大きくするため、膝関節の回旋ストレスを増大させると考えられ、ACL 損傷への影響があると考えられている。

Yoshioka and Cooke (1987) は屍体膝を用いた測定の結果、大腿前捻角に性差は見られなかったと報告している。また Nguyen et al. (2007) は Craig test の結果、女性が男性に比して有意に大きい大腿前捻角を示したと報告している。しかし Bråten et al. (1992) は超音波を用いた測定の結果、女性が男性に比して有意に大きい大腿前捻角を示したと報告している。

これらより、大腿前捻角の性差は明確ではないと示唆された。

### 2-1-3. 足部過回内

足部の回内を表す指標としては、舟状骨粗面高の荷重時と非荷重時の差を測定する navicular drop test (以下, NDT), あるいは踵骨の前額面内での傾斜角 (calcaneal angle, 以下 CA) が用いられている。足部の過回内は脛骨の内旋および膝関節の外反を誘発するため、ACL の緊張を増大させると考えられている。

Beckett et al. (1992) は ACL 損傷群と対照群の NDT を測定、比較し、ACL 損傷群の NDT が有意に大きいことを報告した。Woodford - Rogers et al. (1994) も、同様の報告をしている。しかし Smith et al. (1997) は、ACL 片側損傷群の損傷側と非損傷側、および対照群の左右の NDT をそれぞれ測定、比較し、いずれにおいても有意差がなかったことを報告している。

CA については、Smith et al. (1997) は ACL 損傷群は対照群に比して CA が有意に大きいことを報告している。一方で Woodford - Rogers et al. (1994) は、両群に有意差が見られなかったと報告し、同時に NDT についても有意差が見られなかったと報告し

ている。

これらより、足部過回内と ACL 損傷との関連についてはコンセンサスが得られていないことが示唆された。またこれらの研究はすべて後ろ向きにデザインされた研究であったため、前向き研究による詳細な検討が今後必要であると思われる。

#### 2-1-4. 脛骨の後下方傾斜

脛骨の後下方傾斜（posterior - inferior tibial slope, 以下 PITS）は、脛骨の側方長軸と直交する線と脛骨内側高原の前縁と後縁を結んだ線とが矢状面内でなす鋭角であり、荷重時における脛骨の前方変位との相関が報告されている（Dejour and Bonnin 1994）ため、ACL 損傷の内的危険因子のひとつと考えられている。

Jiang et al. (1994) の報告によれば、PITS に性差は見られなかった（男性  $10 \pm 4^\circ$ 、女性  $10 \pm 4^\circ$ ）。また Meister et al. (1998) の報告によれば、ACL 損傷群と対照群の間に PITS の有意差は見られなかった。しかし一方で、Brandon et al. (2006) の報告によれば、ACL 損傷群は対照群に比して PITS が有意に大きかったが、有意な性差は見られなかったとしている。Stijak et al. (2008) は PITS を脛骨内側顆および外側顆それぞれについて測定し、ACL 損傷群の外側顆の PITS が対照群に比して大きかったと報告した。

これらより、PITS の性差および ACL 損傷との関連についてはコンセンサスが得られていないことが示唆されたが、今後の詳細な研究が期待される。

#### 2-2. 膝関節過伸展

ACL は膝関節の過伸展を制動する因子であるため、過伸展膝は ACL 損傷のリスクファクターになり得ると考えられる。

Pfeiffer et al. (2018) は大学生アスリートに対して膝関節の過伸展角度を測定し、男性  $2.8 \pm 2.4^\circ$  に対し女性  $4.0 \pm 2.5^\circ$  と、女性が男性に比して有意に大きい過伸展角度であったことを報告した。Loudon et al. (1996) は膝関節の過伸展角度を high:  $>6^\circ$ , normal:  $0 \sim 5^\circ$ , low:  $<0^\circ$  の 3 種に分類し、ACL 損傷群および対照群それぞれ 20 人を分類した。



その結果、ACL 損傷群では high 群 18 人、normal 群 2 人であったのに対し、対照群では high 群 5 人、normal 群 15 人であったと報告した。Ramesh et al. (2005) は、 $10^{\circ}$  以上の過伸展が見られた場合を膝関節過伸展として定義し測定したところ、ACL 損傷群では 169 例中 133 例 (78.7%) がこれに該当し、一方で対照群は、65 例中 24 例 (36.9%) であったと報告した。女子サッカーおよび女子バスケットボール選手を対象とした Myer et al. (2008) および Ramesh et al. (2005) の報告でも同様に、ACL 損傷群で過伸展膝が多く見られた。

上記より、過伸展膝には性差が存在し、また ACL 損傷のリスクファクターとなり得ることが示唆された。

## 2-3. 関節弛緩性

膝関節の生理的回旋弛緩性については、ACL 損傷の内的危険因子としてあげられている (Ireland 1999) が、性差についての報告は見られるものの、ACL 損傷との関連についての報告は見られない。そこで本項では関節の弛緩性に関しての解釈を拡大し、Ramesh et al. (2005) があげた内的危険因子群に含まれる全身関節弛緩性 (general joint laxity, 以下 GJL)、および膝関節の前後方向弛緩性と、性差、あるいは ACL 損傷との関連についての先行研究について見てみる。

GJL と ACL 損傷との関連については、男性に比して女性の GJL が大きいという報告 (Beighton et al. 1973, Jansson et al. 2004) があることから、ACL 損傷の内的危険因子として検討されてきた。Ramesh et al. (2005) による ACL 損傷例 169 名を対象とした後ろ向き研究では、GJL の判定方法である Beighton Score が 9 項目中 6 項目以上で陽性を示したケースを GJL 陽性と判定したところ、ACL 損傷群の GJL 陽性率 (42.6%) が対照群の陽性率 (21.5%) に比して高かったと報告した。米陸軍士官候補生を対象とした Uhorchak et al. (2003) による前向き研究では、ACL 損傷群の GJL スコア (8 点満点) が  $3.5 \pm 2.7$  であったのに対し、対照群では  $1.8 \pm 2.1$  であったと報告した。また、Barrack et al. (1983) は GJL スコアが大きいダンサーにおいて関節の位置感覚が低か

ったと報告しており、GJL が運動制御に与える影響という点で ACL 損傷に関連するという意見も見られる。

膝関節の前後方向弛緩性、すなわち大腿骨に対する脛骨の前方移動量に関する報告には、KT - 1000 / 2000 を用いた報告が多い。脛骨の前方移動量の性差については、Weesner et al. (1986) はバスケットボール選手を対象とした測定で性差は見られなかったと報告した。しかし、バスケットボールおよびサッカー選手を対象とした Rozzi et al. (1999) の報告では、男性に比して女性の脛骨の前方移動量が有意に大きかったとしている。大学生アスリートを対象とした Rosene and Fogarty (1999) の報告でも、同様の結果が報告されている。

また、ACL 損傷群と対照群の比較検討を報告したものには Uhorchak et al. (2003)、Ramesh et al. (2005) による報告などがあり、いずれも ACL 損傷群が対照群に比して脛骨の前方移動量が有意に大きかったとしている。

上記より、GJL および膝関節の前後方向弛緩性には性差が存在し、ACL 損傷のリスクファクターとなり得ることが示唆された。

#### 2-4. ACL のサイズ

長さ、幅、断面積、体積等の ACL の物理的サイズについては、屍体膝の ACL を測定した報告や、MRI を用いて生体の ACL を測定した報告、3D スキャナを用いて屍体膝の ACL を測定した報告などがある。

Muneta et al. (1997) は屍体膝に対する測定において、ACL の長さおよび断面積で女性が男性に比して有意に小さい値を示したと報告した。MRI を用いた生体に対する測定の報告では、Staeubli et al. (1999) が一般人に対して、Anderson et al. (2001) が高校バスケットボール選手に対して ACL の幅をそれぞれ測定しており、いずれも女性が男性に比して有意に小さい値を示したと報告した。Chandrashekar et al. (2005) は男女各 10、計 20 の屍体膝の ACL を 3D スキャナを用いて分析した結果、長さ、最小断面積、質量、体積で女性が男性に比して有意に小さい値を示したと報告し、また、破断

強度および stiffness でも女性が男性に比して有意に小さい値を示したと報告した。

上記より、ACL の物理的サイズや力学的強度には性差があることが示唆された。

## 2-5. 大腿骨顆間窩のサイズと形状

大腿骨顆間窩のサイズと形状については、Mensch and Amstutz (1975) が顆間窩幅 (notch width, 以下 NW) に関して、Souryal et al. (1988) が顆間窩幅を大腿骨顆間幅で除した notch width index (以下, NWI) に関して報告して以来、ACL 損傷のリスクファクターとして認識され、多くの報告がなされてきた。

これらの報告の中には、性差が見られなかったとする報告 (Anderson et al. 1987, Souryal et al. 1988, LaPrade and Burnett 1994), あるいは ACL 損傷群と対照群との比較で有意差が見られなかったとする報告 (Souryal et al. 1988, Schickendantz and Weiker 1993, Teitz et al. 1997) がある。しかし一方で、Anderson et al. (2001) および Charlton et al. (2002) は、男性に比して女性が有意に小さい NW であったと報告している。NWI については、Davis et al. (1999) や Shelbourne et al. (1998) が、性差について同様の報告をしている。

Ireland et al. (2001) は X 線像による測定の結果、NW, NMI とともに ACL 損傷群が対照群に比して有意に小さい値を示したと報告した。Shelbourne et al. (1998) は ACL 再建術中に NW を測定し、NW が 15mm 以下の群では術後 4 年以内の反対膝の ACL 損傷の発生率が 5.9%であり、NW が 16mm 以上の群の 1.2%に比して有意に高かったことを報告した。Lund - Hanssen et al. (1994) は女子ハンドボール選手を対象とした研究で、片側 ACL 損傷受傷者の非損傷側の NWI が非損傷者に比して有意に小さいことを報告した。LaPrade and Burnett (1994) は NWI が 0.20 以下を顆間窩狭窄と定義し、NCAA の Division 1 大学の所属選手 213 名に対する 2 年間の前向き調査の結果、狭窄例は非狭窄例に比して ACL 損傷を 66 倍起こしやすいことを報告した。Uhorchak et al. (2003) は米陸軍士官候補生を対象とした調査の結果、ACL 損傷群は対照群に比して NW が有意に小さいことを報告した。

これらより，NW および NWI には性差が存在し，ACL 損傷のリスクファクターとなり得る可能性があることが示唆された。

### 3. ACL 損傷のバイオメカニクスの因子

ACL 損傷はジャンプからの着地やストップ，切り返しなどの動作が多用されるバスケットボール，サッカー，ハンドボール等の競技で頻発するとされる．よって，これらの動作は，ACL 損傷の誘因となり得る危険動作として認識されている．Feagin and Lambert (1985) は急激な減速や足部が固定された状態での方向転換を，Boden et al. (2000) は膝関節伸展位での減速，着地，切り返し等の動作を ACL 損傷の危険動作であると指摘している．これらの動作は膝関節では非生理的な運動であり，過剰な負荷となって ACL 損傷を引き起こすものと考えられる．危険動作が ACL にもたらすバイオメカニクスの影響を検討することは，危険動作の回避と動作の改善という観点から，ACL 損傷の予防に有益であると考えられる．

そこで本項では，動作解析による危険動作のバイオメカニクスの分析に関する報告，および危険動作と ACL の張力との関連を分析した報告について見てみる．

#### 3-1. 動作解析による危険動作のバイオメカニクスの分析

ACL 損傷の危険動作としては，着地，ストップ，切り返し等の動作があげられており，それらに対して動作解析によるバイオメカニクスの分析が行われている．

##### 3-1-1. 着地動作時の膝関節の運動

着地動作時の大腿四頭筋の収縮が膝関節に前方剪断力を発生させると考えられることから，膝関節の屈曲動作に関する研究は多い．着地動作の研究では，台上からの落下着地，もしくは着地後直ちにジャンプするドロップジャンプというタスクが採用されることが多い．

Huston et al. (2001)，Lephart et al. (2002)，Decker et al. (2003) はドロップジャ

ンブにおける着地動作時の接地時の膝関節の屈曲角度において、女性は男性に比して小さかったと報告した。一方で Fagenbaum and Darling (2003) や Kernozek et al. (2005) は同様の条件下で、女性は男性に比して大きかったと報告している。このように、着地動作時の膝関節の屈曲角度の性差についてはコンセンサスが得られていない。

また、Hewett et al. (2005) による ACL 損傷群と対照群の比較においても、着地動作時の膝関節の屈曲角度および膝関節の屈曲モーメントそれぞれのピーク値で、両群間に差は無かったと報告されている。

上記より、着地動作時の膝関節の屈曲角度の性差および ACL 損傷に与える影響については、コンセンサスが得られていないものと思われた。

着地動作時の膝関節の外反動作に関しても、屈曲動作同様に報告は多い (Chappell et al. 2002, Ford et al. 2003, Hewett et al. 2004, McLean et al. 2007)。これらの報告では、着地動作時の膝関節の外反角度において女性が男性に比して大きかったとされている。Hewett et al. (2005) による ACL 損傷群と対照群の比較においては、着地動作時の膝関節の外反角度および外反モーメントにおいて、ACL 損傷群が対照群に比して有意に大きいことが示された。

上記より、着地動作時の膝関節の外反角度には性差が存在し、その増大は ACL 損傷のリスクファクターとなり得ることが示唆された。

膝関節の屈曲角度および外反角度に対し、着地動作時の回旋角度については報告が少ない。これは従前の、皮膚面に反射マーカを貼付して行われる動作解析方法の、回旋角度に関する精度に問題があるためとされている。しかしながら、Nagano et al. (2007) は point cluster technic と呼ばれる従前の問題に対応した手法 (Andriacchi et al. 1998) を用いて、男女の着地動作の比較を行った。その結果、着地後 50msec 以内の早期において女性は男性に比して膝関節の内旋角度が大きかったと報告した。

脛骨の内旋時に ACL は PCL と接触し緊張するとされていること (Kapandji 2010)、脛骨の外反外旋で ACL が大腿骨外側顆間窩内側縁と接触、緊張して断裂するとされていること (Kennedy et al. 1974)、あるいは ACL 損傷受傷時に膝関節は外旋位が多かつ

たとする報告（Boden et al. 2000, Olsen et al. 2004）があることなどから、膝関節の回旋運動に対する関心は少なくないものと思われ、今後の研究が期待されている。

### 3-1-2. 着地動作時の股関節および足関節の運動

着地動作時の膝関節の運動に関する報告が多い一方で、股関節および足関節に関する報告は少ないのが現状である。

着地動作時の股関節の運動については、屈曲角度において女性が男性に比して小さかったとする報告（Salci et al. 2004, Yu et al. 2005, 2006）がある一方で、性差が無かったとする報告（Decker et al. 2003）もあり、見解は一致していない。内旋角度においては女性が大きかったとする報告（Lephart et al. 2002）が、内転角度においては性差が存在しなかったとする報告（Kernozek et al. 2005）が見られる。

同じく足関節の運動については、着地動作時の背屈および回内角度において女性が男性に比して大きい値を示したと報告（Decker et al. 2003, Kernozek et al. 2005）されている。回内角度の増大は膝関節の外反を招くため、上記より ACL 損傷のリスクファクターとなり得ることが示唆された。

### 3-1-3. 繰り返し動作の膝関節の運動

繰り返し動作の研究では、直線ランニングから支持脚側の進行方向の内方 45°へ方向変換するサイドカッティング、もしくは繰り返しの直前にその方向が指示されるというタスクが採用されることが多い。

繰り返し動作時の膝関節の屈曲運動についても、着地動作同様に性差に関するコンセンサスは得られていない。Malinzak et al. (2001) および McLean et al. (2004) は繰り返し動作時における膝関節の屈曲角度のピーク値が、男性に比して女性が大きかったと報告した。一方で、Ford et al. (2005) は性差が無かったと報告している。接地時の膝関節の屈曲角度についても、性差は無かったとする報告（Ford et al. 2005, Sigward and Powers 2006）が見られる。

上記より、繰り返し動作時の膝関節の屈曲角度の性差についてはコンセンサスが得られているとはいえないものと思われた。

繰り返し動作時の膝関節の外反運動についても、着地動作時と同様に報告が多い (Malinzak et al. 2001, Ford et al. 2003, McLean et al. 2005, Sigward and Powers 2006)。これらの報告では、繰り返し動作時の膝関節の外反角度において女性が男性に比して大きく、また外反モーメントも同様に女性が男性に比して大きかったとされている。着地動作および繰り返し動作に性差が見られることについて、Hewett et al. (2006) は股関節や膝関節の前額面内でのコントロールに影響を及ぼす神経筋因子、あるいはその他の内的因子に性差がある可能性を指摘している。

しかしながら、繰り返し動作時の膝関節の回旋角度については報告が少なく、それらの中でも男性の回旋角度が大きかったとする報告 (McLean et al. 2004) や性差は無かったとする報告 (Pollard et al. 2004, Sigward and Powers 2006) があり、コンセンサスが得られていないものと思われる。

上記より、繰り返し動作時の膝関節の外反角度には性差が存在することが示唆されたが、回旋角度に関してはコンセンサスが得られていないものと思われた。

#### **3-1-4. 繰り返し動作時の股関節および足関節の運動**

McLean et al. (2004, 2005) は繰り返し動作時の股関節の運動について、女性において股関節内旋角度の変化に対する膝関節外反モーメントの割合が大きいことから、女性が股関節の運動の影響を受けやすいことを報告した。また同時に、繰り返し動作中の接地時の股関節の内旋角度と膝関節の外反角度のピーク値に関連があり、股関節の内旋角度の増大によって膝関節外反モーメントも増大したと報告した。

足関節の運動については、繰り返し動作時の回内角度のピーク値において女性が男性に比して大きい値を示したと報告 (McLean et al. 2004, Ford et al. 2005) されている。

上記より、繰り返し動作時には股関節の内旋角度が膝関節の運動に与える影響、および足関節の回内運動に性差があることが示唆された。

### 3-1-5. ストップ動作時の下肢関節の運動

ストップ動作は着地動作、切り返し動作と並んで ACL 損傷の危険動作として認識されているが、バイオメカニクス的分析は他の動作に比して進んでいない。これは、ストップ動作前の移動速度や動作そのものの様式等の実験条件の定義が、他の動作に比して困難であることによると思われる。

ストップ動作の研究においては、ストップジャンプというタスクが採用されることが多い。これは、前方への直線ランニングから両脚着地し、着地後直ちに上方へジャンプするタスクである。このタスクには、ジャンプする方向がランニングしてきた方向と一致する前方ストップジャンプ、垂直方向へジャンプする垂直ストップジャンプ、ランニング方向と逆方向へジャンプする後方ストップジャンプがある。

Chappell et al. (2005) はストップジャンプ動作について、膝関節の外反モーメントのピーク値および膝関節の前方剪断力が、女性において男性に比して有意に大きかったと報告した。同時に、ジャンプ方向が後方になるほど前方剪断力が大きくなったと報告した。また、ストップジャンプ動作の接地時について、膝関節および股関節の屈曲角度が女性において小さく、膝関節で発揮される伸展モーメントが大きかったとする報告 (Yu et al. 2005, 2006, Chappell et al. 2007) もある。

上記より、ストップ動作時には膝関節および股関節の運動に性差があることが示唆された。

以上の、ACL 損傷の危険動作時の下肢関節の運動に関するバイオメカニクス的分析を総括すると、着地動作、切り返し動作、ストップ動作のいずれにおいても膝関節の運動、特に外反運動に性差が見られ、ACL 損傷の危険因子となり得る可能性があることが示唆されている。これに対して、股関節および足関節に関する危険動作時のバイオメカニクス的分析は進んでいないとも言える。

しかしながら、ACL 損傷の危険動作に限らず、下肢の運動時には股関節、膝関節、足関節が連動するため、膝関節における危険動作は股関節および足関節にも影響を与える



ものと考えられる。また、膝関節における危険動作は他の関節の危険動作に対する代償動作である可能性も考えられる。このため、危険動作時の股関節および足関節のバイオメカニクス的分析は、性差のみならず、ACL 損傷への直接的影響を含めて研究を進める価値があるものと思われる。

### 3-2. 危険動作が ACL の張力に与える影響

運動中に負荷される外力が ACL の張力にどのような影響を与えるかという問題は、非常に興味深い。しかしながら、生体の ACL に対する外力負荷試験は、ACL 損傷の危険性および倫理上の問題から困難である。このため、屍体膝、あるいはコンピュータシミュレーションを用いて実際の運動局面をシミュレーションした研究が多く行われてきた。

Kanamori et al. (2000) は膝関節屈曲角度を変えながら、脛骨外反トルクのみを負荷した場合と、外反トルクに加え脛骨内旋トルクを負荷した場合とを比較し、膝関節完全伸展位および 15°屈曲位、30°屈曲位で、外反+内旋のケースが外反のみのケースに比して ACL の張力が有意に大きいことを報告した。また Markolf et al. (1995) は膝関節屈曲角度を変えながら、脛骨へ前方引き出し力に加え内旋および外旋トルク、内反および外反トルクを加えた際の ACL の張力を測定し、同様の結果を報告した。

これらの研究より、膝関節 30°以下の軽度屈曲時に内旋トルクと外反トルクが同時に負荷された場合、ACL の張力の増大により ACL 損傷のリスクが高まるものと思われた。

近年では、生体膝の様々な運動あるいは外力負荷時に ACL が受ける外力を、ACL に外科的に埋め込んだ DVRT (differential variable reluctance transducer) と呼ばれる小型トランスデューサを用いて測定した研究が見られる。これらの研究では、ACL が受ける外力は ACL の「歪み」として定義され、この歪みは外力負荷後の ACL 長と ACL の自然長の差を ACL の自然長で除した百分率で算出される。Heijne et al. (2004) は様々な運動中の ACL の歪みを測定し、膝関節 15°伸展位での大腿四頭筋等尺性収縮（伸展トルク 30Nm, 以下同様）で 4.4%であったのに対して、30°伸展位で 2.7%, 60°伸展位お

よび 90°伸展位では 0.0%であったと報告している。これは、大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮でも同様の結果であった。

実際のスポーツ動作に近い動作時の、ACL の歪みに関する報告もある。Cerulli et al. (2003) は片膝に DVRT を埋め込み、その側の脚での急激なストップ動作での ACL の歪みを測定した。その結果、接地面に設置したフォースプレートによって測定された床反力がピークを示した直後に ACL の歪みが最大値を示したことを報告した。Fleming et al. (2001) は体重の 40%荷重時に、膝関節 20°屈曲位にて内外旋および内外反トルクを負荷した際の ACL の歪みを測定し、内旋トルク負荷時にのみ ACL の歪みの増加が見られたことを報告した。

また、MRI 画像を 3 次元処理することで、関節運動中の ACL を可視化する手法も考案されている。Li et al. (2005) は片脚でのレッグランジ動作中の ACL の形態と運動を、MRI 画像から構築した 3 次元モデルを用いて測定し、膝関節完全伸展位に比して 90°屈曲位で ACL 長が 10%短縮し、膝関節 30°屈曲位で 20%伸張したことを報告した。Utturkar et al. (2013) は同様の手法で、膝関節完全伸展位、30°屈曲位および valgus collapse position（膝崩れを再現した肢位）での ACL 長を測定し、伸展位で最も長くなることを報告した。

生体の ACL の歪みを測定したこれらの研究より、膝関節軽度屈曲時に内旋トルクが負荷された場合、ACL の歪みの増大により ACL 損傷のリスクが高まるものと思われた。これらの報告で用いられた動作はいずれも、スポーツ動作に比して非常に単純であり、その結果は慎重に検討される必要があるものと思われる。しかしながら、膝関節軽度屈曲位において内旋トルクが負荷された場合に ACL の歪みが増大することは共通の知見であり、ACL 損傷の予防プログラム、あるいは ACL 損傷受傷後のリハビリテーションプログラムを考案する上で重要であると思われる。

#### 4. ACL 損傷のホルモン因子

ACL に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 (Liu et al. 1996,

Hamlet et al. 1997, Dragoo et al. 2003) が報告されて以来, これらの性ホルモン, あるいは性周期と ACL 損傷との関連が検討されてきた.

Slauterbeck et al.(1999)はウサギを用いて, 卵巣切除群とエストロゲン投与群の ACL 破断強度を比較し, エストロゲン投与群で低下したことを報告した. Liu et al. (1997) はラットの ACL の組織培養を行い, エストロゲン投与群が対照群に比してコラーゲン合成および線維増殖が減少したことを報告した. Warren et al.(1999, 2001)はヒト ACL を体外にて組織培養し, エストロゲン濃度の影響を測定した. その結果, エストロゲン濃度が高まるにつれて線維増殖やタイプ I コラーゲンの代謝が減少することを報告した. しかし, Strickland et al. (2003) は羊を用いて, エストロゲン投与群, 卵巣切除群, プラセボ群の 3 群を設定し, ACL の破断強度と stiffness を 6 ヶ月間測定したが, ともに群間で有意差はなかったと報告している.

脛骨の前方移動量と性ホルモンおよび性周期の関連についての報告では, Deie et al. (2002) が排卵期前期と黄体期で月経期に比して脛骨の前方移動量が大きいことを報告した. この報告では, 毎日の基礎体温の測定と週単位での血清エストロゲン濃度の測定が行われた. 一方で, Karageans et al. (2000) および Belanger et al. (2004) の報告では, 性周期による脛骨の前方移動量の変化は見られなかったとしている. これらの報告では, 性周期は毎日の基礎体温の測定結果によって決定されていた. しかし Shultz et al. (2005) は, 血清エストロゲン濃度を毎日測定することで性周期を期分けし, 脛骨の前方移動量との関連を検討して, エストロゲン濃度と脛骨の前方移動量との間に正の相関関係があることを報告した. だが, 性ホルモンおよび性周期と ACL 損傷との関連についての報告 (Myklebust et al. 1998, Wojtys et al. 1998, Arendt et al. 1999, Myklebust et al. 2003) では, 一定の見解が得られていない.

Hewett et al. (2007) はこれらの報告をまとめ, ACL 損傷が排卵期前期に多いこと, 脛骨の前方移動量が排卵期から黄体期にかけて増加傾向にあることを示し, ここから, 性ホルモンおよび性周期が靱帯の機能や力学特性よりも神経筋コントロール能という点で ACL 損傷に影響することを示唆した.

上記より、性ホルモンあるいは性周期と ACL の機械的強度あるいは生物学的特性との関連は明らかにされておらず、ACL 損傷との関連についても十分なコンセンサスが得られていないことが示唆された。また今後は、性周期の決定方法を定量化した上での前向き研究が期待されるものと思われた。

## 5. ACL 損傷の遺伝的因子

ACL 損傷と遺伝的要因との関連についての報告は、ACL 損傷者の家族歴ならびに人種、遺伝子変異に関する報告が散見される。

ACL 損傷者の家族歴に関する報告 (Flynn et al. 2005) では、三親等以内に ACL 損傷者がいる頻度は、ACL 損傷群では対照群に対しオッズ比 2.00 であった。一親等に限れば、オッズ比 2.22 であった。また Harner et al. (1994) および Goshima et al. (2014) も、ACL 損傷者の家族歴について同様の報告をしている。

人種に関する報告では、アメリカのプロ女子バスケットボールリーグ所属選手を対象とした調査報告 (Trojian and Collins 2006) で、白人のヨーロッパ系アメリカ人選手の ACL 損傷の発生率は 0.45/1,000AE であるのに対し、それ以外では 0.07/1,000AE であったと報告されている。しかし、アメリカ・ニューヨーク市のダンスカンパニーに所属するトップレベルのダンサー 298 人 (男性 115 人、女性 183 人) に対する 5 年間にわたる前向き研究 (Liederbach et al. 2008) の結果では、白人ダンサーと非白人ダンサーとの間に ACL 損傷の発生率の有意な差は見られなかったと報告されている。

また、ACL 損傷の解剖学的な内的危険因子とされる NW の人種差に関する報告もある。Shelbourne et al. (2007) はアフリカ系アメリカ人 (African American, 以下 AA) と白人アメリカ人 (White American, 以下 WA) の合計 517 人 (男性 AA146 人、WA237 人; 女性 AA47 人、WA87 人) の NW を比較した。その結果、男性では AA18.0mm に対し WA16.9mm、女性では AA15.5mm に対し WA14.1mm と、両性とも WA が AA に比して NW が有意に小さかったと報告した。

ACL 損傷者の遺伝子変異に関する報告では、いずれも南アフリカ・ケープタウンの某

クリニックを受診した白人の ACL 損傷者を対象とした、COL1A1 の変異に関する報告 (Posthumus et al. 2009)、COL5A1 の変異に関する報告 (Posthumus et al. 2010a)、COL12A1 の変異に関する報告 (Posthumus et al. 2010b)、11q22 の変異に関する報告 (Posthumus et al. 2012) がある。COL1A1、COL5A1、COL12A1 はいずれも、靱帯および腱の主要な構成成分であるコラーゲン線維のタンパク鎖をエンコードすることが知られている。また、11q22 上にはコラーゲンの劈開と除去を行う生理学的因子が座していることが知られている。

関節弛緩性と遺伝子変異との関連を指摘した報告もある。Bell et al. (2012) は 124 名の対象者（男性 50 名、女性 74 名）の遺伝子を分析し、同時に脛骨の前方移動量、膝関節の過伸展、および全身関節弛緩性を測定した。その結果、COL1A1、COL5A1 および COL12A1 の遺伝子多型に上記の関節弛緩性に関する指標との関連があったことを報告した。これらの報告より、ある種の遺伝子変異が ACL の構造あるいは強度へ影響を与える可能性が示唆された。

上記より、家族歴と ACL 損傷との間に関連があることが示唆されたものの、人種および遺伝子変異に関する報告については対象が限定的であったことから、今後詳細な検討がなされることが期待される。

## 6. ACL 損傷の神経筋因子

関節の機能的安定性には二種類が考えられ、それらはすなわち、靱帯、腱、関節包等の緊張および対向する骨の関節面の形状によってもたらされる静的安定性と、関節を構成する骨の運動を司る筋の神経筋コントロールによってもたらされる動的安定性である (Griffin et al. 2000)。Riemann and Lephart (2002a) は、神経筋コントロールを「関節の機能的安定性を維持・回復するための関節運動や外的負荷に対する準備、および反応で起きる、周囲筋の無意識的な活動である」と定義し、神経筋コントロールに破綻が起きると関節の機能的安定性が崩れて運動時の関節外傷が生じやすくなるとしている (Riemann and Lephart 2002b)。運動器に存在する固有感覚受容器からもたらされる

固有感覚は、この神経筋コントロールを正常に機能させるために不可欠であるとされる (Riemann and Lephart 2002b)。

ACL 損傷には非接触型損傷が多いことから、発生時に運動のコントロールが失われている可能性があり、神経筋コントロール能と ACL 損傷との関連が検討されている。

神経筋コントロール能が ACL 損傷に与える影響については、体幹の神経筋コントロール能についての報告がある。Zazulak et al. (2007a) は大学生アスリート男女 277 人に対して 3 年間にわたる前向き研究を行い、女性において ACL 損傷群が対照群に比して体幹の回旋角度の再現性が劣っていたと報告した。また Zazulak et al. (2007b) は同じ対象者での報告で、体幹に継続的に負荷した外力を突然解放した際の体幹の動揺角度を、前方、後方、および側方の負荷方向条件毎に測定した。その結果、側方外力を解放した際、ACL 損傷群は対照群に比して大きい動揺角度であったことを報告した。なおこの報告では、性差については言及されていない。

また、神経筋コントロール能に影響を与える生理学的因子に関しては、固有感覚受容器の感受性を下げる因子として筋疲労 (Graham et al. 1986) が、固有感覚受容器からの情報を受け取り筋に指令を出す中枢神経系に異常を来す因子として高体温 (Todd et al. 2005) があげられている。

固有感覚受容器からの情報は脳皮質で統合され、スポーツ動作時の複雑な運動や動作時の姿勢を制御するとされる (Riemann and Lephart 2002b)。このため、脳皮質の運動制御機能と ACL 損傷との関連は興味深い問題である。大学生アスリートを対象とした ImPACT (immediate post - concussion assessment and cognitive testing : コンピュータを用いた脳震盪直後の評価と認知テスト) を用いた神経認知機能に関する報告 (Swanik et al. 2007) では、言語記憶、視覚記憶、処理速度、反応時間の全てにおいて、非接触型損傷群が対照群に比して低い値であったとしている。

上記より、神経筋コントロールは関節の動的安定性に影響を与えるため、その機能の低下や破綻が ACL 損傷のリスクファクターとなり得ることが示唆された。また、認知機能と ACL 損傷との関連については、今後の詳細な研究が期待される。

## 7. 膝関節の回旋可動域の測定

前述のように、脛骨の前方移動量、すなわち膝関節の前後方向の可動域には性差が存在することが認識されている。また、脛骨の前方移動量と ACL 損傷の関連も指摘されている。これらから、膝関節の前後方向の弛緩性は ACL 損傷のリスクファクターとなり得ると認識されている。これは、膝関節の過伸展についても同様である。

これらに対して膝関節の回旋弛緩性については、ACL 損傷との直接的な関係に言及した研究は見られないものの、回旋方向の可動域や性差、あるいは左右差等、基礎的な知見を報告した研究が散見される。

そこで本項では、膝関節、あるいは脛骨の回旋方向の可動域を測定した先行研究について見てみる。なお、原典に“knee rotation”あるいは“knee joint rotation”と表記されている場合には「膝関節回旋」、*“tibial rotation”* あるいは *“tibiofemoral rotation”* と表記されている場合には「脛骨回旋」と記した。

Khasigian et al. (1978) は Heath - Carter 改法によって体型分類された健常な男性群について、独自に考案、製作した膝関節の回旋可動域測定装置を用い、座位にて 8.82Nm の回旋トルクを負荷して膝関節の回旋可動域を測定した結果、外胚葉型群の膝関節の総回旋可動域が  $97 \pm 16^\circ$  で、meso - endomorphs 群の  $68 \pm 15^\circ$  に比して有意に大きかったことを報告した。

Shoemaker and Markolf (1982) は健常な成人男性に対して、座位にて膝関節屈曲  $20^\circ$ 、 $90^\circ$  および股関節屈曲  $10^\circ$ 、 $90^\circ$  の計 4 条件を設定し、ロードセルによって規定された 5~10Nm の回旋トルクを足部に負荷した際の脛骨の回旋可動域を測定した結果、負荷トルクおよび股関節の屈曲角度に関わらず、膝関節  $90^\circ$  屈曲位での脛骨の回旋可動域が膝関節  $20^\circ$  屈曲位の場合に比して有意に大きいことを報告した。

Zarins et al. (1983) は健常な成人男女に対し、側臥位にて膝関節屈曲  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の 3 条件下で、徒手にて end - feel に相当する回旋負荷を与えた際の膝関節の回旋可動域を測定した結果、左右差および屈曲角度による有意差は見られず、 $90^\circ$  での膝関節の総回旋可動域が  $74^\circ$  であったと報告した。

Almquist et al. (2002) は健常な成人女性に対し、Rottometer を用いた測定の結果、膝関節 90°屈曲位、負荷トルク 9Nm での膝関節の内旋可動域を  $30 \pm 9^\circ$ 、外旋可動域  $36 \pm 7^\circ$ 、総回旋可動域を  $66 \pm 15^\circ$  と報告した。同時に、RSA (Roentgen stereometric analysis) を用いた測定結果との相関があったことを報告している。この報告では、測定肢位は座位であり、回旋トルクの負荷および規定にはトルクレンチが使用された。Almquist et al. (2012) は同じく Rottometer を用い、健常な成人男女に対する測定の結果、内旋可動域、外旋可動域、総回旋可動域の全てにおいて左右差が存在せず、また女性が男性に比して有意に大きい値を示したと報告した。

Shultz et al. (2007a) は健常な成人男女に対し、VKLD (Vermont Knee Laxity Device) を用いた背臥位での測定の結果、膝関節 20°屈曲位、負荷トルク 5Nm での膝関節の内旋可動域を  $9.9 \sim 10.8^\circ$ 、外旋可動域を  $13.4 \sim 13.6^\circ$ 、総回旋可動域を  $23.5 \sim 24.2^\circ$  と報告し、また左右差は存在しなかったと報告した。この報告では、性差については言及されていない。Shultz et al. (2007b) は同じく VKLD を用いて、健常な成人男女の膝関節の回旋可動域の性差および GJL との関連を検討しており、性差については膝関節の総回旋可動域が男性では  $20.2 \pm 4.1^\circ$ 、女性では  $27.5 \pm 7.5^\circ$  で、女性が男性に比して有意に大きい値を示したが、両性とも GJL スコアは膝関節の内旋可動域、外旋可動域、総回旋可動域のいずれとも相関が見られなかったと報告した。なお VKLD は、回旋角度と負荷トルクを 6DF force transducer によって検出し記録している。

Musahl et al. (2007) は、上記の VKLD と同じく負荷トルクを 6DF force transducer によって規定し、回旋角度を電磁トラッキングシステムで検出、記録する KLMD (Knee Laxity Measurement Device) を開発して、これを用いた屍体膝に対する膝関節の総回旋可動域の測定結果の統計学的信頼性について満足できるものであると報告した。また Tsai et al. (2008) は同様に KLMD を用いて、健常な成人男性に対する背臥位での測定を行い、膝関節 90°屈曲位、負荷トルク 6Nm にて膝関節の総回旋可動域  $18.5 \pm 4.7^\circ$ 、膝関節 30°屈曲位、負荷トルク 6Nm にて  $25.8 \pm 5.9^\circ$  であったと報告した。

Lorbach et al. (2009a) はプラスチック製ブーツの底面にトルクセンサおよび角度



センサを取り付けた Rotameter を開発し、屍体膝を用いた測定結果を膝 navigation system による測定結果で評価した結果、5Nm, 10Nm, 15Nm の全ての負荷トルク条件下で Rotameter の統計学的妥当性が満足できるものであったと報告した. Lorbach et al. (2009b) は同じく Rotameter を用い、健常な成人男女に対して腹臥位で膝関節 30°屈曲位での測定を行った結果、脛骨の総回旋可動域が負荷トルク 5Nm で右  $61.1 \pm 2.8^\circ$ , 左  $63.9 \pm 3.1^\circ$ , 10Nm で右  $95.0 \pm 3.5^\circ$ , 左  $98.7 \pm 3.7^\circ$ , 15Nm で右  $115.6 \pm 4.5^\circ$ , 左  $120.8 \pm 4.8^\circ$  であり、左右の測定結果に高い相関 ( $r = 0.95 \sim 0.98$ ) があったと報告した. なおこの報告では、性差については言及されていない.

回旋可動域の測定に MRI を用いた報告も見られる. Haugom et al. (2012) は健常な成人男女に対し、膝関節 15°屈曲位で負荷トルク 3.35Nm の条件下で膝関節の総回旋可動域が男性  $4.7^\circ$  に対し女性  $13.6^\circ$  と、女性が男性に対して有意に大きい値を示したと報告した.

上記のように、膝関節の回旋可動域については女性が男性に比して大きく、また左右差が見られないことで見解が一致している. しかしながらその測定方法については、測定装置、測定肢位、負荷トルクの大きさ、負荷トルクの規定方法、回旋角度の検出方法等の方法論が統一されておらず、可動域の絶対値は各報告によって著しく異なっている. また、膝関節あるいは下腿の回旋可動域と ACL 損傷との関連についての報告も見られず、両者の関連についてのコンセンサスは未だ得られていないのが現状であると言える.

## 8. Pivot shift test の定量的評価

ACL 損傷膝に対しては、膝関節の前後方向の弛緩性の評価として anterior drawer test (以下, ADT) や Lachman test (以下, LT) が、回旋方向の弛緩性の評価として pivot shift test (以下, PST) が徒手検査として頻繁に用いられるが (Benjaminse et al. 2006), 目的, 検査法, 感度および特異度が検査毎に異なるため、臨床現場あるいはスポーツ現場で状況に応じて使い分けることが必要である. ADT, あるいは LT は, KT-1000/2000

あるいは類似した測定原理の測定装置を用いてその結果を数値化することが可能である (Daniel et al. 1985, Higenboten et al. 1989, König et al. 1998).

これに対し PST では, International Knee Documentation Committee(以下, IKDC) が設定した equal, glide (+), clunk (++), gross (+++)の 4 段階の評価基準が一般に用いられるが, その評価結果は検者の主観的判断および臨床経験, スキルに依存する部分が大であるとされる (川野ら 2008, Lorbach et al. 2009a, Lomopo et al. 2012). また, PST で陰性と判断されたにも関わらず, 方向転換動作中の脛骨の回旋制動性が低下している可能性を報告した研究 (Chouliaras et al. 2007) もあり, PST の精度向上が課題であると思われる. このため近年, 様々な手法を用いて PST 時の解剖学的要素の物理学的変化を数値化する試みが行われている.

Hoshino et al. (2007) は 3 次元電磁センサを用い, 6DF 計測システムで PST 時の脛骨の前方移動量と加速度を麻酔下にて測定した. その結果, ACL 損傷膝が非損傷膝に比して有意に脛骨の前方移動量が大きく, 加速度と評価値との間に相関関係があったことを報告した. 川野ら (2008) は複合慣性センサを用い, PST 時の大腿部に対する下腿部の相対的加速度を測定した. その結果, 同時撮影したビデオ画像との比較により, pivot shift 現象を正しく検出できたことを確認した. また, PST 時の大腿部に対する下腿部の相対運動の最大加速度は  $2.19 \pm 0.69 \text{ m/s}^2$  であり, 検者の主観的評価による PST の評価値との相関が示唆されたことを報告した.

Bignozzi et al. (2010) は光学 navigation system を用い, ACL 二重束再建術前後で PST 時の脛骨の前方移動量と回旋角度を測定した. その結果, いずれもが術前に比して術後に有意に減少したことを報告した. Lopomo et al. (2012) は加速度センサと光学 navigation system を併用し, 前者によって脛骨近位端部の PST 時の 3D 加速度を, 後者によって脛骨の前方移動量を測定した. その結果, 両者に相関関係があったことを報告した.

しかしながら, 上記の評価方法はいずれも, 経済性や大量性, 即時性, 簡便性といった問題から, 臨床現場およびスポーツ現場での適用が容易であるとはいえない. そこで

近年では、タブレット端末等を用いて PST 時の膝関節を撮影し、端末にインストールされたアプリケーションによる分析により、PST の結果を定量的に評価する方法 (Hoshino et al. 2012) が開発されている。Hoshino et al. (2013) は Gardy 結節と腓骨頭、大腿骨外側上顆に反射マーカを貼付し、麻酔下での PST 時の膝関節周囲を iPad® (Apple 社製) を用いて撮影して、同じく iPad® にインストールされた動作分析用アプリケーションによって脛骨の外側移動量を測定した。その結果、ACL 損傷膝は非損傷膝に比して有意に大きい移動量であり、また clunk 群が glide 群に比して有意に大きい移動量であったことを報告した。この測定方法では、マーカの移動速度へのカメラの追従能、カメラアングルのセッティング等の問題があるとされるが、今後アプリケーションおよびハードウェアのアップデートにより、研究方法がリファインされることが期待できる。

しかし、PST は膝関節の回旋安定性の評価であるものの、上記の研究では主に大腿骨に対する脛骨の加速度、また脛骨の前方あるいは側方への移動量を測定している。これは、ACL 損傷膝に見られる膝崩れ現象を数値的に表現しようとするものであると思われるが、PST の際の脛骨の回旋角度そのものについて言及した報告は稀である。

## 9. ACL 損傷の予防プログラムの効果

ACL 損傷は受傷から競技復帰までに一般的に 6 ヶ月以上の期間を要するとされ (Delay et al. 2001, Feller et al. 2002)、また、その経済的・社会的損失は決して小さいものではない。このため、スポーツ現場においてはその予防が非常に重要な課題となる。近年では様々な ACL 損傷のための予防プログラムが考案され、その効果が検証されている。

Caraffa et al. (1996) は、バランスボードを用いた固有感覚に作用する予防プログラムが、サッカー選手の ACL 損傷の予防に有効か否かを検討するために、40 チームをプログラム介入群と対照群に分け、介入群では毎日 20 分、段階的に難易度が増す予防プログラムを行った。その結果、1 シーズンあたりの 1 チームあたりの ACL 損傷件数が、対照群 1.15 件に対し介入群 0.15 件であったことを報告した。Mandelbaum et al. (2005)

は 14～18 歳の女子サッカー選手を介入群と対照群に分け、介入群では prevent injury, enhance performance (以下, PEP) プログラムを週 3 回行った。PEP プログラムは膝関節周囲筋の筋力と協調性の向上を目的としており、ウォームアップ、ストレッチング、ストレングス、プライオメトリック、アジリティの 5 項目から構成される、全体で 20 分ほどのプログラムである。その結果、ACL 損傷率が対照群では 0.49/1,000AE であったのに対し、介入群では 0.09/1,000AE であったことを報告した。Gilchrist et al. (2008) は大学生女子サッカー選手での非接触型 ACL 損傷予防に対する PEP プログラムの効果を、無作為化比較対照試験にて検討した。その結果、全体での ACL 損傷発生率が対照群では 0.189/1,000AE、介入群では 0.057/1,000AE で有意差が見られなかったものの、練習中の ACL 損傷の発生率、シーズン後半の ACL 損傷の発生率、ACL 損傷の既往がある選手の非接触型 ACL 損傷の発生率が介入群で有意に小さかったことを報告した。

Olsen et al. (2005) は男女ハンドボール選手を所属クラブ毎にランダムに介入群と対照群に分け、外傷予防ウォーミングアッププログラム (Olsen プログラム) の効果を検証した。Olsen プログラムは、数種のバリエーションのランニング、カッティングおよび着地のテクニク、バランス、ストレングスの 4 項目から構成される、全体で 20 分程度のプログラムである。その結果、下肢外傷全体の発生率が、対照群 13.1% に比して介入群 6.9% と有意に低下し、ACL 損傷も対照群 10 件に対し介入群 3 件と有意に低下したことを報告した。

Myklebust et al. (2007) はノルウェーの 1 部～3 部リーグに所属する女子ハンドボール選手を年度により介入群と対照群に分け、介入群に対して ACL 損傷予防のためのバランストレーニングをシーズン前は週 3 回、シーズン中は週 1 回行った。この研究で用いられたプログラムは、フロア、マット、バランスボードの 3 項目から構成される、全体で 15 分程度のプログラムである。その結果、全体での ACL 損傷の発生率が対照群では 0.09/1,000AH、介入群では 0.14/1,000AH で有意差が見られなかったものの、1 部リーグに所属し予防プログラムを完遂できた選手は完遂できなかった選手に比して有意に発生率が減少したと報告した。

国際サッカー連盟 (Fédération Internationale de Football Association. 以下, FIFA) とその傘下の FIFA Medical Assessment and Research Centre は, スポーツ傷害予防プログラムとして 2004 年に FIFA 11 を, 2009 年に FIFA 11 に改変を加えた FIFA 11+を発表した. これらはいずれも, ウォーミングアップのためのプログラムであり, FIFA 11 はスタビリティ, バランス, プライオメトリクス, ストレングスの 4 項目から構成される, 全体で 10~15 分程度のプログラムである (Steffen et al. 2008). FIFA 11+は FIFA 11 にダイナミックストレッチング的要素を付加し, かつ段階的に構成される, 全体で 20 分程度のプログラムである (Bizzini et al. 2013, Silvers - Ganelli et al. 2015). FIFA 11 および FIFA 11+の効果に関する報告の meta - analysis (Thorborg et al. 2017) によれば, FIFA 11 についてはその効果が不明瞭であったが, FIFA 11+はスポーツ傷害全体の発生を 39%減少させた. また Silvers - Ganelli et al. (2017) は, 2012 年秋シーズンにおいて NCAA 所属のサッカー選手を介入群 (27 チーム 675 名) と対照群 (34 チーム 850 名) に分け, FIFA 11+による ACL 損傷予防の効果を検証した. その結果, 介入群の全外傷, 膝関節外傷, および非接触型 ACL 損傷の発生率が対照群に比して有意に小さかったことを報告した.

一方, 予防プログラムの効果が認められなかったとする報告もある. Pfeiffer et al. (2006) は高校女子スポーツ選手 (サッカー, バスケットボール, バレーボール) を介入群と対照群に分け, 介入群では knee ligament injury prevention (以下, KLIP) プログラムを週 2 回行った. KLIP プログラムは, 方向転換を含んだランニングの減速動作時, 両脚, 片脚での着地動作時の適切な下肢アラインメントの獲得を目的としており, 着地時の床反力の減少に効果があるとされる (Irmischer et al. 2004). KLIP プログラムは段階的にデザインされ, ジャンプトレーニングとアジリティトレーニングから構成される全体で 15 分程度のプログラムである. 2 年間にわたる介入の結果, 非接触型 ACL 損傷の発生率は対照群では 0.07/1,000AE, 介入群では 0.167/1,000AE であり, 発生率に有意差が無かったことを報告した.

本邦においては, Omi et al. (2018) が大学女子バスケットボール選手に対して, Hip

-focused Injury Prevention プログラム（以下、HIP プログラム）の効果を検証している。HIP プログラムは股関節をメインターゲットとしており、①着地動作改善、②筋力強化、③バランス能力向上の 3 要素で構成される、全体で 20 分程度のプログラムである。介入前 4 年間の ACL 損傷の発生率が 0.25/1,000AE であったのに対し、介入後 8 年間は 0.10/1,000AE と、ACL 損傷の発生率が有意に減少したことを報告した。

上記より、一部の例外はあるものの、複数の構成要素を含む予防プログラムは ACL 損傷の予防に一定の効果があることが示唆された。

## 10. 先行研究のまとめ

以下に、前述の先行研究を項目毎にサマライズする。

### 【ACL 損傷の疫学】

ACL 損傷はスポーツ集団に多く発生し、競技としてはバスケットボール、ハンドボール、サッカーなどのゴール型競技に好発する。女性に多く発生し、女性の発生率は男性の約 3～10 倍であるが、ルール上身体接触が許される競技においてはその差が小さくなる傾向にある。発生型は、非接触型損傷が接触型に比して多く、全症例の約 70%を占め、発生の際の競技動作は着地、減速、ストップ、切り返しなどが多い。発生時のアライメントは、膝関節軽度屈曲位で、かつ外反強制された際の発生が多いが、膝関節の内旋および外旋の関与は不明である。

### 【ACL 損傷の解剖学的因子】

ACL 損傷には性差があるため、性差が存在する解剖学的因子は ACL 損傷の内的危険因子と認識されている。膝関節の過伸展、全身および膝関節の関節弛緩性、ACL のサイズ、大腿骨顆間窩のサイズと形状が解剖学的な内的危険因子としてあげられている。

### 【ACL 損傷のバイオメカニクスの因子】

着地動作、切り返し動作、ジャンプ動作時の下肢関節の運動に対する動作解析では、特に膝関節の前額面内での運動に性差が存在し、ACL 損傷との関連が指摘されている。これに対し、膝関節の矢状面内での運動では性差に関するコンセンサスは得られていない。一方、膝関節の水平面内での運動、および股関節や足関節の運動に関する研究は進んでいない。

膝関節軽度屈曲時に脛骨に対して内旋トルクが負荷された場合、ACL の歪みが増大し、ACL 損傷のリスクが高まることが示唆されている。

### 【ACL 損傷のホルモン因子】

ACL には性ホルモンのレセプターが存在するが、性周期および性ホルモンが ACL の機械的強度あるいは生物学的特性に与える影響についてはコンセンサスが得られておらず、ACL 損傷との関連も明らかにはなっていない。

### 【ACL 損傷の遺伝的因子】

家族歴と ACL 損傷の間には関連があることが示唆されている。しかし、人種や遺伝子変異については、ACL 損傷との関連を指摘する報告があるものの、その対象は限定的である。

### 【ACL 損傷の神経・筋因子】

疲労や高体温による神経筋コントロール能の機能低下や破綻は、関節の動的安定性に影響を与えるため、ACL 損傷のリスクファクターとして認識されている。

### 【膝関節の回旋可動域の測定】

膝関節の回旋可動域については、女性が男性に比して大きく、また左右差は存在しないとされている。しかし、測定方法等についての方法論が報告毎に異なり、可動域の絶対値についても著しく異なっている。膝関節の回旋可動域と ACL 損傷との関連についての報告は見られず、両者の関連についてのコンセンサスは得られていない。

### 【Pivot shift test の定量的評価】

Pivot shift test の評価は検者の臨床経験に依存する部分が大であるため、加速度センサや電磁センサ類を用いてテスト時の脛骨の前方移動量、もしくは加速度を測定するという、定量的な評価に関する研究が行われている。しかし、テスト時の脛骨の回旋角度を測定した報告は稀である。近年ではタブレット端末を用いた、臨床現場あるいはスポーツ現場で適用できる簡便な測定方法が開発されている。



#### 【ACL 損傷の予防プログラムの効果】

ACL 損傷の予防プログラムは、FIFA 11+等、複数の要素で構成された予防プログラムが多く用いられており、一定の成果を上げている。

### 第3節

#### 本研究の目的

ACL 損傷の解剖学的危険因子のうち、関節の弛緩性の性差および ACL 損傷との関連については、全身関節弛緩性、また膝関節の矢状面内および前額面内での弛緩性に性差があり、また ACL 損傷の内的危険因子となり得るというコンセンサスが得られている、しかし、ACL 損傷の内的危険因子として膝関節の生理的回旋弛緩性があげられ、また受傷時の危険肢位として膝関節あるいは脛骨の回旋の関与が指摘されているにもかかわらず、回旋方向の弛緩性と ACL 損傷との関連について言及した報告は見られない。

予防プログラムが一定の効果を上げていることを鑑みると、ACL 損傷のハイリスク者抽出のスクリーニング精度を向上させ、そして抽出された対象者に予防プログラムの指導を行うことが、ACL 損傷の予防に結びつくものと期待できる。スクリーニング精度の向上には、ACL 損傷の内的危険因子と認識されている従来の評価指標を用いると同時に、科学的な裏付けのある新たな評価指標を見だし適用することも有効であると考えられる。この点で、膝関節の回旋可動域には ACL 損傷の内的危険因子、すなわちスクリーニング指標としての有用性を有する可能性があるものと思われる。

そこで本研究は、臨床現場およびスポーツ現場での適用が可能な膝関節の回旋可動域の測定方法を考案して、ACL 損傷リスクに対するスクリーニング指標としての有用性を検討し、さらに ACL 損傷との関連を明らかにすることを目的とした。内的危険因子のひとつとされている膝関節の回旋可動域を定量化し、ACL 損傷との関連を検討することは、メディカルチェック等、ACL 損傷のハイリスク者を抽出する目的でのスクリーニングを行う際の新たな評価項目を設定する一助となることが期待できる。これはまた、スクリーニング結果の精度を向上させ、予防プログラムを適用する対象をよりの確に抽出することを可能にし、予防プログラムの効果を上げるものと思われる。

## 第 4 節

### 本研究の課題

本研究の目的の達成のため、以下の 3 つの研究課題を設定した。

#### 【研究課題 1】膝関節回旋可動域の測定装置の開発

臨床現場およびスポーツ現場への適用が可能である膝関節の回旋可動域の測定原理を考案し、その原理を具現化した測定装置を製作して、測定結果の統計学的な信頼性と妥当性を検討する。

#### 【研究課題 2】各種条件下での膝関節回旋可動域の測定

健常者に対する測定を諸条件下にて実施し、膝関節の回旋可動域に関する基礎的な知見を得るとともに、膝関節の回旋可動域の ACL 損傷リスクに対するスクリーニング指標としての有用性を検討する。

#### 【研究課題 3】ACL 損傷と膝関節回旋可動域の関連

ACL 損傷者に対する測定を実施し、膝関節の回旋可動域と ACL 損傷との関連を検討する。

## 第 2 章

### 〔研究課題 1〕 膝関節回旋可動域の測定装置の開発

#### 第 1 節 緒言

ACL 損傷は接触型損傷に比して非接触型損傷が多いとされるが、非接触型損傷の解剖学的な内的危険因子としては、大腿骨顆間窩のサイズおよび形状、関節弛緩性、ACL のサイズ等が認識されている。これらの因子のうち、関節弛緩性と ACL 損傷の関連については、全身関節弛緩性、また膝関節弛緩性との関連に着目した報告がなされてきた。特に、膝関節そのものの弛緩性と ACL 損傷との関連については、脛骨の前方移動量の大きい膝（Uhorchak et al. 2003, Ramesh et al. 2005）や過伸展膝（Loudon et al. 1996, Ramesh et al. 2005, Myer et al. 2008）に ACL 損傷が多いことが報告されている。

ACL は解剖学的に AMB と PLB によって構成され、前者が大腿骨顆部に対する脛骨の前後方向の安定性を、後者が内旋方向の安定性をもたらしっているとされる（Ahrens et al. 2011）。臨床現場およびスポーツ現場においては、前後方向の弛緩性の評価には ADT や LT が用いられ、これらの徒手検査による評価は KT - 1000 / 2000 等を用いて定量的に裏付けることが可能であるとされる（Daniel et al. 1985, Higenboten et al. 1989, Konig et al. 1998）。

これに対して、回旋方向の弛緩性の評価には PST が用いられ、その結果は IKDC が設定した 4 段階の評価基準によって判定される。しかしながら、PST の検査技術の習得には豊富な臨床経験が必要であり、同時にその検査結果は検者のスキルに頼る部分が大であるとされる（川野ら 2008, Lorbach et al. 2009a, Lomopo et al. 2012）。加えて、膝関節の回旋可動域の定量的な測定については、前後方向の弛緩性測定における KT - 1000 / 2000 に匹敵する gold standard と言える測定装置が存在しない。

また、ACL 再建術後におけるランニングやジャンプ着地等の運動時の下腿の回旋異常が報告されている（Tashman et al. 2004, Ristanis et al. 2006）ことから、術後管理の一環として、膝関節の回旋可動域を経時的かつ定量的に観察する必要があるものと思わ

れる。

そこで研究課題 1 では、臨床現場およびスポーツ現場での適用が可能であると思われる膝関節の回旋可動域の測定装置を開発し、その統計学的な信頼性と妥当性を検証することを目的とした。

## 第 2 節 方法

### 1. 対象者

対象者は、下肢および下肢帯に重篤な外傷の受傷経験の無い成人女性 14 名であり、測定対象肢は右側とした。全ての対象者は大学生であり、測定時において習慣的なスポーツ活動を行っていなかった。対象者の身体特性は、年齢  $21.1 \pm 1.12$  歳、身長  $160.3 \pm 5.76\text{cm}$ 、体重  $53.1 \pm 5.05\text{kg}$ （いずれも、平均  $\pm$  標準偏差）であった。なお、全ての対象者で利き脚（ボールを蹴る脚）は右脚であった。

研究の実施に先立っては、新潟医療福祉大学倫理委員会の審査および承認を得た（承認番号：17410 - 130702）。対象者には研究の目的および内容に関する十分な説明を行い、同意書への署名をもって研究参加への同意を得た。

### 2. 測定装置

本研究で用いた測定装置 RotorMeter の全景を、Figure 2 - 1 に示す。

RotorMeter は研究課題 1 にあたって製作された測定装置であり、チェア部とメータ部とで構成される。チェア部は、丸型スチールパイプ（外径 28mm、内径 26mm）で構成された縦  $\times$  横  $\times$  高さが 650mm  $\times$  850mm  $\times$  1050mm の直方体様のフレームに、縦  $\times$  横  $\times$  厚さが 300mm  $\times$  300mm  $\times$  25mm の木製座面を取り付けた構造である。フレームの上面前辺には大腿骨内・外側上顆を固定するクランプが左右一対装着されている。クランプは、その位置を任意に設定することが可能である。また木製座面には、幅 50mm のベルクロテープが二本装着され、測定時に対象者の大腿部を座面に固定するのに用いられる。



Figure 2 - 1 RotorMeter の全景

メータ部を Figure 2 - 2 に示す。メータ部は厚さ 25mm の木製の円盤および台座をボールベアリングを介して連結した構造であり、上側の円盤は下側の台座に対して自由に回転することが可能である。円盤は半径 250mm の円形、台座は一辺 600mm の正方形の形状である。円盤には、エアバッグを内蔵したプラスチック製ブーツ (AIRCAST 社製 FP Walker, Size: S) が、円盤の回転中心とブーツの下腿部の長軸が一致する位置に取り付けられている。エアバッグは、ブーツ内部の前面、内・外側面および後面の計四箇所装着されている。ブーツのシェル（外殻）は前後に 2 分割されており、3 本のベルクロテープで互いに連結される。また台座には、角度測定用の大型の分度器が固定されており、円盤の下面に装着された指針と合わせて円盤の回転量の読み取りに用いられる。このメータ部はガスダンパを介して木製土台に連結され、その高さを無段階に調節することが可能であり、その調節幅は 200mm である。

円盤の外周には直径 1mm のステンレススチール製ワイヤ（以下、ワイヤ）が装着され、円盤の接線方向に沿って前方に引き出された後、台座に装着された定滑車によって下方に誘導される。ワイヤの先端には重錘を装着するための金属製フックが装着される。ワイヤと円盤の連結部分は、円盤の中心を挟んで 180 度反対方向に二箇所設置される。回旋トルクを負荷する方向は内旋、および外旋方向とし、方向の変更は円盤のワイヤとの接合部およびワイヤ誘導用の定滑車を変更することで行う (Figure 2 - 3 a, b)。



Figure 2 - 2 メータ部



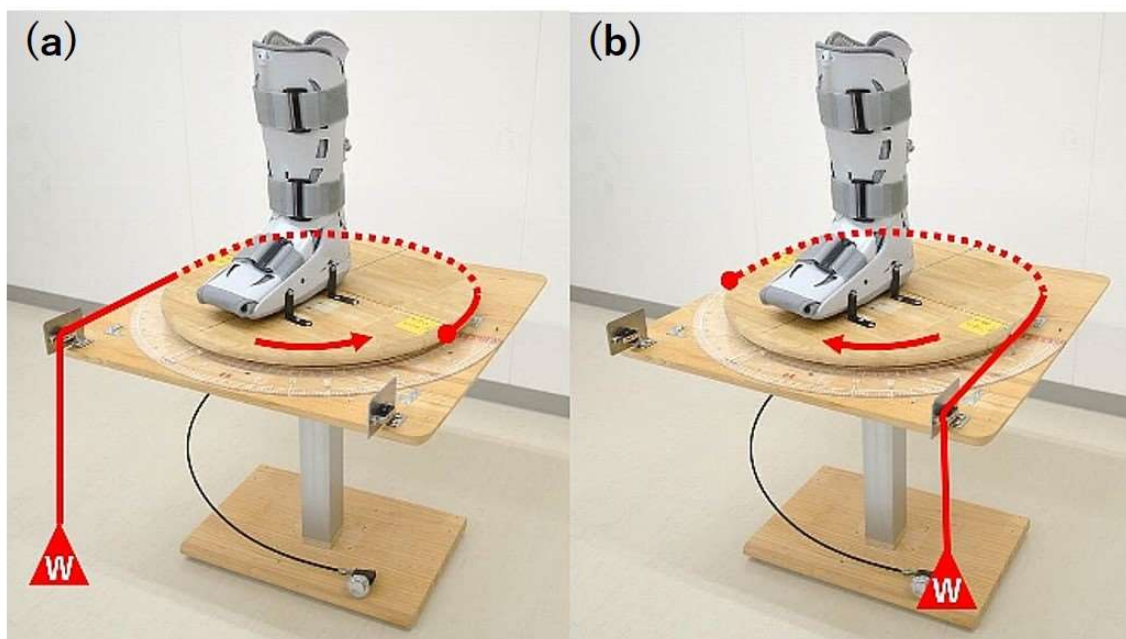


Figure 2 - 3 (a, b) ワイヤの取り回し方法の変更による回転方向の相違（ワイヤを赤色の実線および点線，ワイヤと円盤の接合点を赤丸，重錘を W で示す）

### 3. 測定方法

Figure 2 - 4 に、測定時の対象者の肢位を示す。対象者はチェア部に、股関節 90°屈曲位、膝関節 90°屈曲位、足関節中間位にて座り、測定側の大腿部をベルクロテープによって座面に固定され (Figure 2 - 5)、チェア部に装着されたクランプにて大腿骨内・外側上顆を固定れた (Figure 2 - 6)。ガスダンパの操作によってメータ部の高さが調整された後、下腿部および足部はブーツに挿入され、対象者が十分な圧を感じるまでハンドポンプにてエアバッグに空気を注入し (Figure 2 - 7)、ブーツ内で固定された。その後、数回の自動および他動による回旋運動により測定への慣熟が試みられた。この際、座面上で大腿部が、ブーツ内で下腿部および足部がそれぞれ動揺しないことが確認された。なお非測定側は、足部をチェア部に設置されたフットレストに置いた。上肢は、胸の前で組むよう指示された。



Figure 2 - 4 測定時の肢位



Figure 2 - 5 大腿部の固定方法

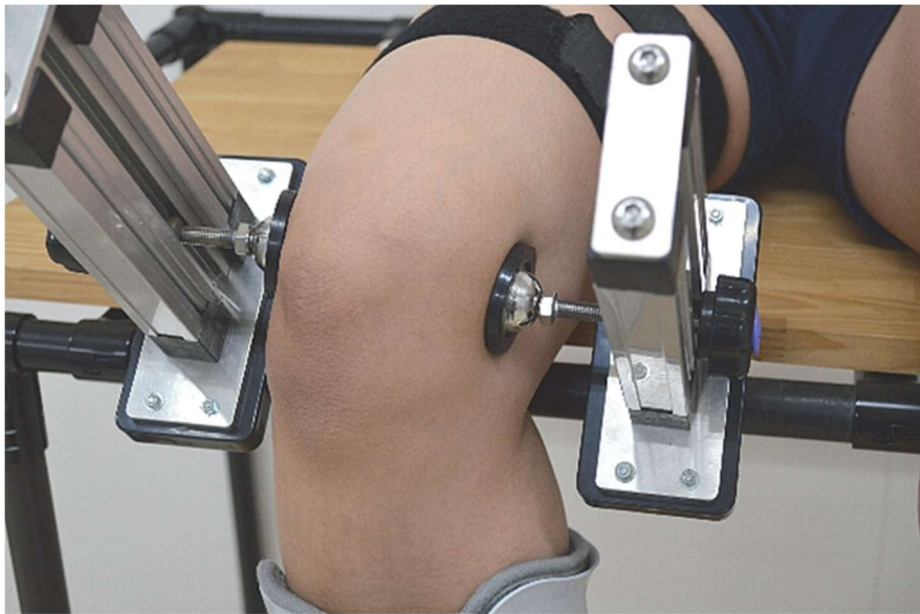


Figure 2 - 6 大腿骨内・外側上顆の固定方法



Figure 2 - 7 ハンドポンプによるエアバッグへの加圧

この状態で、ワイヤの先端に 32.0N の重錘を装着することで円盤に 8.0Nm の回旋トルクを負荷し、円盤の回転量を目視にて読み取った。負荷時には下肢の脱力を対象者に指示した。回旋トルクを負荷した際の円盤の回転量を、内旋可動域、および外旋可動域として記録し、両者の和を総回旋可動域として算出した。内旋および外旋方向の測定順序は無作為とした。なお、トルクを負荷した際に対象者がブーツ内で下腿部もしくは足部とブーツとの間でずれを感じた場合には、エアバッグへ再加圧した上で再測定した。大腿部と座面との間でずれを感じた場合には大腿部固定用のベルクロテープを、大腿骨遠位部とクランプとの間でずれを感じた場合にはクランプを、それぞれ増し締めし再測定した。全測定を通じ、対象者が疼痛や不快感を訴えた場合には直ちに測定を中止した。

上記の測定を、検者 A および検者 B の 2 名の検者によって 24 時間以上の間隔を開けて各 2 回、合計 4 回実施した。

#### 4. 画像解析

前述の測定のうち、検者 A の 1 回目の測定時に腓骨頭 (a) と脛骨粗面 (b) にマーカを貼付した。2 台のスチルカメラによりトルク負荷前後のマーカの位置を撮影し、得られた画像から線分 ab の水平面内での角度変位量を 3 次元 DLT 法 (Miller et al. 1980) により求めた。角度変位量の算出方法の模式図を Figure 2 - 8 に示す。なお、トルク負荷前後で a および b の位置を同定し直し、マーカを都度貼り替えた。

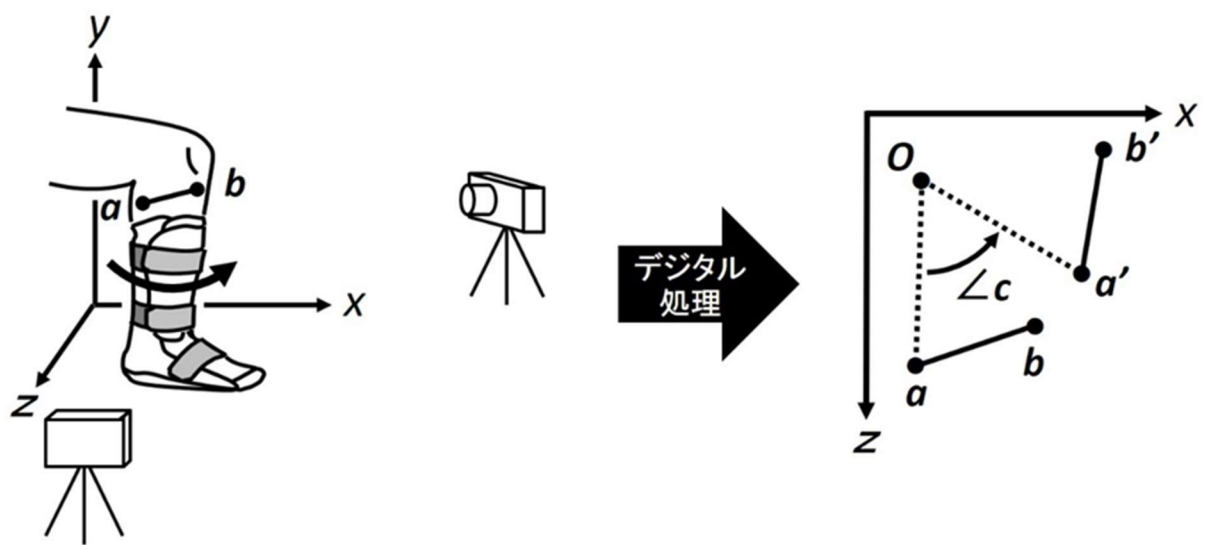


Figure 2 - 8 3次元 DLT 法による下腿の回旋角度の算出



## 5. 統計処理

各検者による各対象者の 2 回の測定値について、級内相関係数（Intra - class Correlation Coefficients：以下、ICC）を ICC(1,1)について算出し、検者 A および検者 B それぞれの測定結果の検者内信頼性を検討した。また、各検者による 2 回の測定値の平均値を用いて ICC(2,2)を算出し、検者 A と検者 B の間の検者間信頼性を検討した。ICC については、Landis and Koch（1977）の基準に基づき、0.7 以上をもって「良好」と判定した。

また、RotorMeter による測定によって得られた結果と画像解析によって得られた結果との相関関係を、ピアソンの積率相関係数を算出し検討した。有意水準は 5%とした。

全ての統計量の算出には、IBM SPSS Statistics Desktop for Japan Ver.20.0 を使用した。

## 第 3 節 結果

### 1. 膝関節の回旋可動域について

検者 A による RotorMeter を用いた測定結果を Table 2 - 1 に、検者 B による測定結果を Table 2 - 2 に、画像解析による結果を Table 2 - 3 に示す。

検者 A による測定値は、1 回目は内旋可動域  $44.8 \pm 9.97^\circ$ （標準誤差  $2.7^\circ$ ）、外旋可動域  $55.0 \pm 8.10^\circ$ （標準誤差  $2.2^\circ$ ）、総回旋可動域  $99.8 \pm 17.33^\circ$ （標準誤差  $4.6^\circ$ ）であり、2 回目は内旋可動域  $46.8 \pm 7.28^\circ$ （標準誤差  $1.9^\circ$ ）、外旋可動域  $56.1 \pm 7.91^\circ$ （標準誤差  $1.9^\circ$ ）、総回旋可動域  $102.9 \pm 13.29^\circ$ （標準誤差  $3.6^\circ$ ）であった。2 回の測定の平均値は、内旋可動域  $45.8 \pm 8.43^\circ$ （標準誤差  $2.3^\circ$ ）、外旋可動域  $55.5 \pm 7.66^\circ$ （標準誤差  $2.0^\circ$ ）、総回旋可動域  $101.3 \pm 14.97^\circ$ （標準誤差  $4.0^\circ$ ）であった。

検者 B による測定値は、1 回目は内旋可動域  $43.9 \pm 4.88^\circ$ （標準誤差  $1.3^\circ$ ）、外旋可動域  $53.8 \pm 5.54^\circ$ （標準誤差  $1.5^\circ$ ）、総回旋可動域  $97.7 \pm 9.47^\circ$ （標準誤差  $2.5^\circ$ ）であり、2 回目は内旋可動域  $44.4 \pm 5.95^\circ$ （標準誤差  $1.6^\circ$ ）、外旋可動域  $53.6 \pm 6.01^\circ$ （標準誤差  $1.6^\circ$ ）、総回旋可動域  $98.0 \pm 11.17^\circ$ （標準誤差  $3.0^\circ$ ）であった。2 回の測定の平均値は、内旋可

動域  $44.2 \pm 5.09^\circ$  (標準誤差  $1.4^\circ$ ), 外旋可動域  $53.7 \pm 5.32^\circ$  (標準誤差  $1.4^\circ$ ), 総回旋可動域  $97.9 \pm 9.78^\circ$  (標準誤差  $2.6^\circ$ ) であった.

また画像解析による結果は, 内旋可動域  $24.8 \pm 3.73^\circ$  (標準誤差  $1.0^\circ$ ), 外旋可動域  $34.7 \pm 4.81^\circ$  (標準誤差  $1.3^\circ$ ), 総回旋可動域  $59.5 \pm 8.10^\circ$  (標準誤差  $2.2^\circ$ ) であった (以上, いずれも平均  $\pm$  標準偏差).

Table 2 - 1 検者 A による測定結果

	1 回目			2 回目			平均		
	内旋	外旋	総回旋	内旋	外旋	総回旋	内旋	外旋	総回旋
平均	44.8	55.0	99.8	46.8	56.1	102.9	45.8	55.5	101.3
標準偏差	9.97	8.10	17.33	7.28	7.91	13.29	8.43	7.66	14.97
標準誤差	2.7	2.2	4.6	1.9	1.9	3.6	2.3	2.0	4.0

(単位：度)

Table 2 - 2 検者 B による測定結果

	1 回目			2 回目			平均		
	内旋	外旋	総回旋	内旋	外旋	総回旋	内旋	外旋	総回旋
平均	43.9	53.8	97.7	44.4	53.6	98.0	44.2	53.7	97.9
標準偏差	4.88	5.54	9.47	5.95	6.01	11.17	5.09	5.32	9.78
標準誤差	1.3	1.5	2.5	1.6	1.6	3.0	1.4	1.4	2.6

(単位：度)

Table 2 - 3 画像解析による結果

	内旋	外旋	総回旋
平均	24.8	34.7	59.5
標準偏差	3.73	4.81	8.10
標準誤差	1.0	1.3	2.2

(単位：度)

Table 2 - 4 測定値の信頼性

		内旋	外旋	総回旋
検者内信頼性	検者 A	0.852	0.838	0.872
ICC(1,1)	検者 B	0.762	0.712	0.798
検者間信頼性 ICC(2,2)		0.755	0.737	0.824

## 2. 測定値の信頼性について

測定値の級内相関係数の算出結果を、Table 2 - 4 に示す。検者 A の ICC(1,1)は、内旋可動域 0.852, 外旋可動域 0.838, 総回旋可動域 0.872 であった。検者 B の ICC(1,1)は、内旋可動域 0.762, 外旋可動域 0.712, 総回旋可動域 0.798 であった。これらの結果より、RotorMeter による測定値の検者内信頼性については、検者 A, 検者 B とともに全ての測定結果について良好と判定された。

また ICC(2,2)は、内旋可動域 0.755, 外旋可動域 0.737, 総回旋可動域 0.824 であった。これらの結果より、RotorMeter による測定値の検者間信頼性についても、全ての測定結果について良好と判定された。

## 3. RotorMeter と画像解析の結果の相関について

RotorMeter と画像解析両者の結果の相関図を Figure 2 - 9, Figure 2 - 10 および Figure 2 - 11 に示す。これら二つの測定方法の結果の相関係数は、内旋可動域では  $r = 0.718$  ( $P = 0.004$ ), 外旋可動域では  $r = 0.673$  ( $P = 0.008$ ), 総回旋可動域では  $r = 0.732$  ( $P = 0.003$ ) であり、両者には全ての測定結果について 5%水準で有意な正の相関関係があることが確認された。

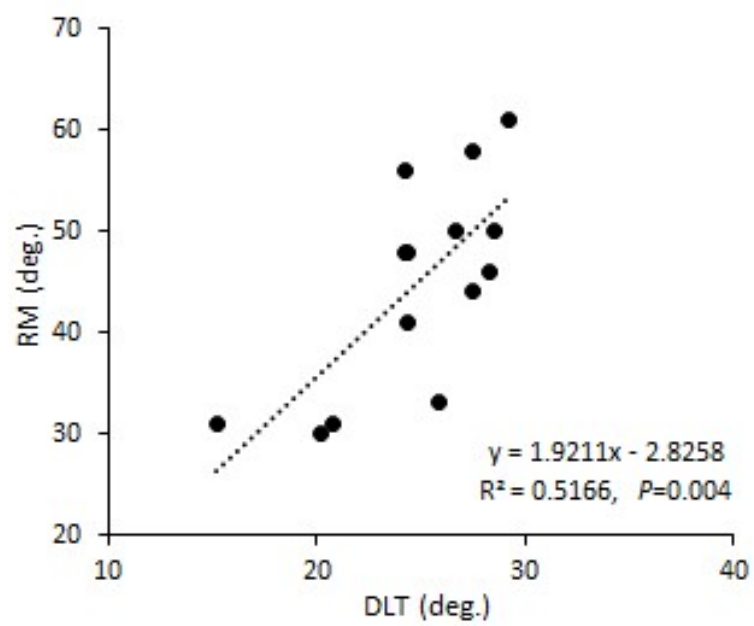


Figure 2 - 9 3次元 DLT 法と RotorMeter の相関（内旋可動域）

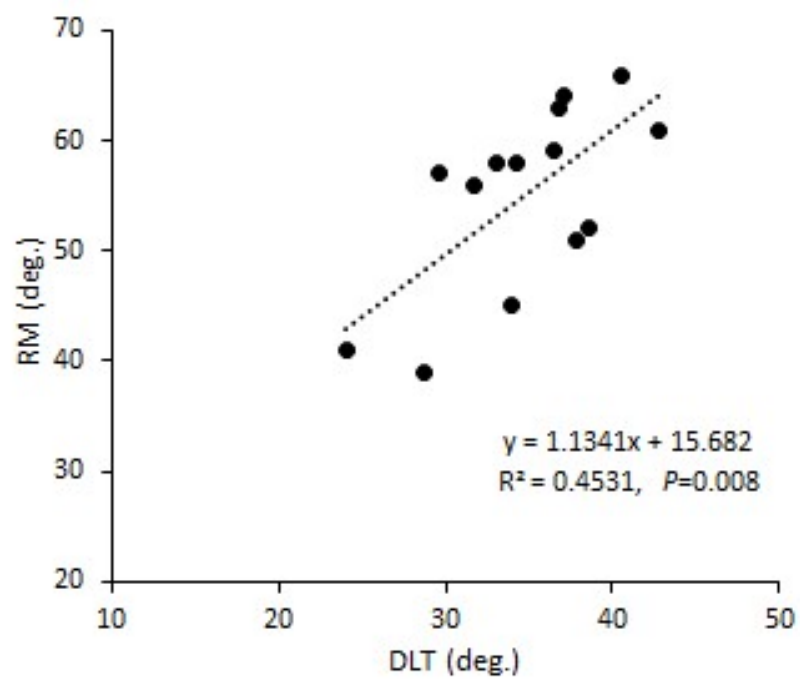


Figure 2 - 10 3次元 DLT 法と RotorMeter の相関（外旋可動域）

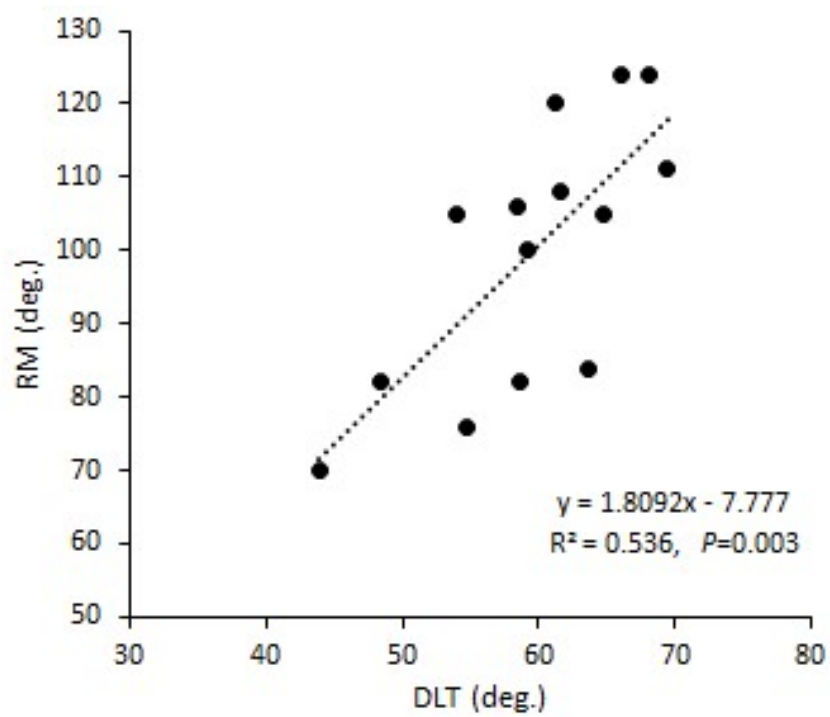


Figure 2 - 11 3次元 DLT 法と RotorMeter の相関（総回旋可動域）



#### 第4節 考察

運動器に対する徒手検査は、メディカルチェックや外傷受傷時の評価、アスレティックリハビリテーションにおける回復過程の評価等で多用される。それらのうち、膝関節の前後方向の弛緩性を評価するための徒手検査としては ADT や LT が考案され、KT - 1000 / 2000 等の測定装置を用いてその信頼性と妥当性が検証された (Daniel et al. 1985, Higenboten et al. 1989, Konig et al. 1998) 上で、今日、臨床現場あるいはスポーツ現場で広く用いられている。膝関節の前後方向の弛緩性は ACL 損傷の解剖学的危険因子として認識されており、これを正確に評価することは ACL 損傷の予防、あるいは受傷後のアスレティックリハビリテーションを安全かつ効率的に進行させることに於いて有益であると考えられる。

同様に、膝関節の回旋方向の弛緩性の評価には PST が考案され (Bach et al. 1988, Noyes et al. 1991), 臨床現場およびスポーツ現場で用いられている。しかしながら、膝関節の回旋可動域の測定装置は見られないため、PST の結果は定性的に表現されるのが慣例であり、また結果の評価は検者の臨床経験の影響を受けるとされる (川野ら 2008, Lorbach et al. 2009a, Lomopo et al. 2012)。このため、膝関節の回旋方向の可動域を定量化し、PST の結果を客観的に評価することのできる測定方法を開発することが必要であると思われる。

膝関節あるいは下腿部の回旋可動域の定量化に関する先行研究については、X 線 (Matsumoto and Seedhom 1993, Jorn et al. 1998, Almquist et al. 2002) や MRI (Haughom et al. 2012) を用いたものなどが見られる。しかし、これらの手法はいずれもラボテストの域を出ず、また経済性、大量性、即時性、簡便性等の課題から、メディカルチェック等での臨床現場あるいはスポーツ現場での適用は困難であると思われる。比較的簡便な測定原理を用いた研究 (Almquist et al. 2002, 2012, Shultz et al. 2007a, Lorbach et al. 2009b) は散見されるものの、測定肢位や負荷トルクは様々である。また、得られた数値の報告間でのばらつきは小さくない。

以上より、膝関節および下腿部の回旋可動域については、未だ統一した測定方法が用

いられておらず、基礎的な知見が得られていないと言える。そこで本研究課題では、簡易的でありながら汎用性が高く、かつ非侵襲的で、臨床現場およびスポーツ現場での適用が可能と思われる測定装置を製作し、その統計学的な信頼性と妥当性を検討した。

本研究課題での対象者 14 名の RotorMeter による測定値の信頼性については、検者内信頼性は 2 名の検者それぞれにおいて全ての測定項目で ICC(1,1)が 0.7 以上であり、検者内信頼性は良好と判定された。また、両検者間における検者間信頼性も、全ての測定項目で ICC(2,2) が 0.7 以上であり、検者間信頼性も良好と判定された。これらの結果から、RotorMeter による膝関節の回旋可動域の測定方法は、統計学的な信頼性について良好であると判定された。

また本研究課題では、脛骨粗面と腓骨頭に貼付した 2 つのマーカが成す線分のトルク負荷前後の水平面内での回旋量を、3 次元 DLT 法により算出し、これを下腿部の回旋可動域として、RotorMeter による測定結果との相関を検討することで、RotorMeter を用いた測定原理の統計学的妥当性を検討した。近位脛腓関節はほとんど可動性を有さない（藤田と寺田 1978）とされており、また本研究課題では骨と皮膚表面とのずれを考慮し、計測点をトルク負荷前後でそれぞれ同定してマーカを貼付した。よって、本研究で 3 次元 DLT 法によって得られた結果は、トルク負荷前後の下腿の回旋量を表現するものとして妥当であると考えられる。本研究では、RotorMeter と 3 次元 DLT 法による両測定結果の間に有意な正の相関関係が確認できたことから、RotorMeter による膝関節の回旋可動域の測定方法は、統計学的な併存的妥当性について良好であると判定できた。これは、Rottometer および RSA による測定結果の相関に関する Almquist et al. (2002) の報告を支持するものであった。

上記より、本研究課題で用いた RotorMeter による膝関節の回旋可動域の測定原理は、統計学的な信頼性、妥当性ともに満足できる水準であることが示唆された。

Tsai et al. (2008) は、同一の負荷トルクにて膝関節屈曲角度を変化させた場合、膝関節の回旋可動域が影響を受けると報告している。また Almquist et al. (2002) は、同一の測定肢位にて負荷トルクを変化させた場合、同様に膝関節の回旋可動域が変化したこ

とを報告している。Shultz et al. (2007a) は、同一の測定肢位および負荷トルクにおいても荷重条件の差異によって測定結果が異なることを報告している。これらより、測定誤差の介入を最小限に抑制するために、測定時の肢位および負荷トルク、荷重条件を正確に規定することの重要性が示唆される。

本研究課題で用いた RotorMeter による測定方法では、負荷トルクの大きさ、測定時の肢位の規定は容易であり、荷重条件は非荷重で統一される。また重錘を用いてトルクを負荷することから、測定中のトルクの変動は無いものと推察される。よって、RotorMeter を用いた測定によって得られた測定値への測定誤差の介入は、最小限に留められているものと考えられる。

しかしながら、同様の測定原理を用いた先行研究との比較においては、本研究課題で得られた結果の数値は比較的大きいものであった。Almquist et al. (2002) は、9Nm のトルクを負荷した際の成人女性の膝関節の総回旋可動域を約 77°と報告している。また Lorbach et al. (2009b) は、成人男女を対象にした同様の研究において、10Nm を負荷した結果を 95.0°~98.7°と報告している。本研究では 8.0Nm を負荷したが、その結果は 97.7°~102.9°であり、これらの先行研究に比して大きい値を得た。

本研究課題においては、足部および下腿部はプラスチック製ブーツを介して円盤に固定され、また大腿部はベルクロテープを用いて座面に、大腿骨内・外側上顆はクランプを用いてチェア部に固定された。しかし、ブーツ内部に挿入された部位についてはエアバッグに空気を注入して加圧し固定するに留まったため、足関節周囲の諸関節の運動は十分に制限されなかったものと推察される。このため、回旋トルクが負荷された際、ブーツ内面と皮膚面の間のずれや、距骨下関節および距腿関節の内外転等の運動が誘発されたものと思われる。また、足根骨間や足根骨と中足骨間の諸関節の運動、軟部組織の変形を誘発したことも推察される。これらより、本研究課題で得られた値は、膝関節の可動域のみならず、足関節および足部の諸関節の運動と軟部組織の変形をも併せた値であると考えられた。

膝関節の回旋可動域のみを測定する方法としては、X 線や MRI の画像を用いる方法が

考えられる。また屍体膝を対象とした先行研究 (Lorbach et al. 2009a) のように、骨ピンを用いて大腿骨および脛骨を測定装置に直接固定する方法が考えられる。しかしながら、臨床現場およびスポーツ現場での適用を考えた場合、これらの方法は非現実的であると言わざるをえない。クランプやベルト等を多用して下肢を測定装置に強固に固定する方法も考えられるが、圧迫や疼痛、不快感により下肢筋群が緊張し、測定結果に影響を及ぼすことが推察される。

上記より、RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域の測定においては、その測定結果にブーツ内面と皮膚面の間のずれ、足部および足関節の諸関節の運動、軟部組織の変形による影響が包含されるものと思われた。

## 第 5 節 結語

本研究課題は、臨床現場およびスポーツ現場での適用が可能であると思われる膝関節の回旋可動域の測定装置を開発し、その統計学的な信頼性と妥当性を検証することを目指した。測定装置として RotorMeter を製作し、健常な一般成人女性 14 名に対して膝関節の回旋可動域を 2 名の検者が 2 回測定して、検者間および検者内信頼性を求めた。また、同じ対象者に対して 3 次元 DLT 法による可動域測定を同時に実施し、RotorMeter による測定結果との相関を求めた。測定側は右側とした。結果は、以下に記すものであった。

8.0Nm の負荷トルクによる可動域は、内旋  $43.9^{\circ} \sim 46.8^{\circ}$ 、外旋  $53.6^{\circ} \sim 56.1^{\circ}$  であり、両者の和である総回旋可動域は  $97.7^{\circ} \sim 102.9^{\circ}$  であった。検者内信頼性は  $ICC(1,1) = 0.712 \sim 0.872$ 、検者間信頼性は  $ICC(2,2) = 0.737 \sim 0.824$  であり、RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域の測定方法の統計学的信頼性が確認された。3 次元 DLT 法および RotorMeter による測定結果の両者には正の相関関係が確認され、RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域の測定方法の統計学的妥当性が確認された。

また、RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域の測定においては、その測定結果に足部の諸関節および足関節の運動、軟部組織の変形による影響が包まれるものと思われた。

### 第3章

#### 【研究課題2】各種条件下での膝関節回旋可動域の測定

##### 第1節 緒言

関節の弛緩性の性差,あるいはACL損傷との関連に関しては,全身関節弛緩性や膝関節の前後方向の弛緩性について多くの先行研究(Beighton et al. 1973, Rozzi et al. 1999, Rosene and Forgarty 1999, Uhorchak et al. 2003, Jansson et al. 2004, Ramesh et al. 2005)がある。膝関節の前後方向の弛緩性に関する報告の多くは,KT-1000/2000あるいは類似した原理の測定装置を用いて大腿骨に対する脛骨の前方移動量を測定している。これに対し,回旋方向の可動域の測定についてはgold standardと言える測定方法が存在しない。そこで本研究では研究課題1において,非侵襲的であり,かつ臨床現場およびスポーツ現場での適用に適していると思われる膝関節の回旋可動域測定装置RotorMeterを製作し,RotorMeterを用いた測定方法の統計学的な信頼性と妥当性について検討した。その結果,いずれもが良好な水準であることが確認された。

RotorMeterの測定原理は,足部および下腿部を回転円盤に固定したブーツに挿入し,円盤に回旋トルクを負荷した際の円盤の回転量を膝関節の回旋可動域とするものである。この測定方法に相似した方法を用いた生体膝を対象とした研究は散見される(Almquist et al. 2002, 2012, Shultz et al. 2007a, Lorbach et al. 2009b)が,測定肢位,負荷トルク等の測定条件は統一されておらず,測定結果のばらつきも小さくない。よって,膝関節の回旋可動域に関するコンセンサスは未だ得られていないものと思われる。

本研究においても,研究課題1における測定条件,すなわち,股関節および膝関節の屈曲角度,負荷トルクがいずれも単一の条件で固定されていたため,これらの測定条件が測定結果に与える影響について精査する必要があるものと思われる。

また,膝関節の過伸展,全身および膝関節の関節弛緩性,ACLのサイズ,大腿骨顆間窩のサイズと形状等,性差が存在する解剖学的因子はACL損傷の内的危険因子と認識されているが,研究課題1においては膝関節の回旋可動域の性差についての検討はなさ

れなかった。また、左右差も検討されなかった。

そこで研究課題 2 では、RotorMeter を改変した測定装置を用い、健常な成人男女に対して異なる測定条件下での膝関節の回旋可動域を測定することを計画した。そして性差、左右差を検討し、加えて測定肢位や負荷トルクを変化させた場合の膝関節の回旋可動域に関する基礎的な情報を得ることを目的とした。また、これらの情報から、膝関節の回旋可動域の ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標としての有用性を検討することを目的とした。

## 第 2 節 方法

### 1. 対象者

対象者は、下肢および下肢帯に重篤な外傷の受傷経験の無い成人男女各 12 名、合計 24 名であり、測定対象肢は両側とした。全ての対象者は大学生であり、測定時において習慣的なスポーツ活動を行っていなかった。対象者の身体特性は、男性群においては年齢  $21.3 \pm 0.94$  歳、身長  $172.4 \pm 5.27$ cm、体重  $66.9 \pm 6.82$ kg であり、女性群においては年齢  $21.3 \pm 0.86$  歳、身長  $160.5 \pm 5.31$ cm、体重  $52.3 \pm 4.75$ kg（いずれも、平均  $\pm$  標準偏差）であった。なお、全ての対象者で利き脚は右脚であった。

研究の実施に先立っては、新潟医療福祉大学倫理委員会の審査および承認を得た（承認番号：17503-14701）。対象者には研究の目的および内容に関する十分な説明を行い、同意書への署名をもって研究参加への同意を得た。

### 2. 測定装置

本研究課題で用いた測定装置 RotorMeter II を、Figure 3 - 1 に示す。RotorMeter II は、研究課題 1 で使用した RotorMeter の測定原理を用いた新造の測定装置であり、基台部、ベッド部、ロータ部、コンソール部から成る。

基台部は、一辺 45mm の正四角柱形状のアルミニウム製角材で構成され、そのサイズは縦×横が 780mm×1900mm である。基台部にはベッド部、ロータ部、コンソール部が

搭載され、また底部に設置された車輪によって人力にて移動することが可能である。

ベッド部は、厚さ約 5mm のネオプレンゴムを貼付したアルミニウム製平板をアルミニウム製角材の上に設置したもので、0°から 90°まで 15°毎にその傾斜角度を設定できる thigh board が端に、またハンドルが両脇に取り付けられる (Figure 3 - 2 参照)。平板のサイズは、縦×横が 780 mm×1210mm である。この平板は、対象者の体格に合わせて水平方向に 200mm スライドさせることが可能である。



Figure 3 - 1 RotorMeter II の全景



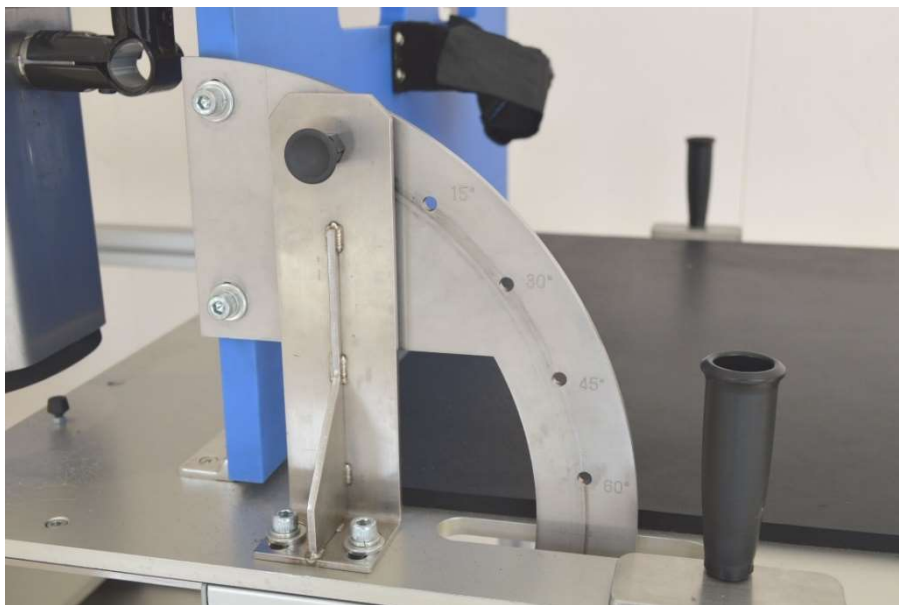


Figure 3 - 2 Thigh board の傾斜角度調節機構

Thigh board のサイズは、縦×横が 700 mm×400mm である。この thigh board の上辺中央には、大腿骨内・外側上顆部を固定するためのクランプが左右一対装着されている。クランプは、その位置を任意に設定することが可能である。クランプが対象者の皮膚と接触する部分は、厚さ 5mm、直径 100mm の円形ネオプレンゴムでカバーされる。Thigh board には、幅 50mm のベルクロテープが二本装着され、測定時に対象者の大腿部を thigh board に固定するのに用いられる。また thigh board には、calf rest がクランプを挟んで左右に一つずつ取り付けられる。

ロータ部には、アルミニウム製基板上に自由に回転できる半径 250mm のプラスチック製円盤（以下、円盤）が取り付けられ、その円盤にエアバッグを内蔵したプラスチック製ブーツ（AIRCRAFT 社製 FP Walker, Size: S）が取り付けられる（Figure 3-3 参照）。エアバッグはブーツ内部の前面、内・外側面および後面の計四箇所に装着されている。

円盤の基板への取り付け部分にはベアリングが組み込まれ、円盤は抵抗なく回転できる。ブーツの下腿部の長軸方向の軸は、円盤の回転軸と一致する。円盤の回転軸には、円盤の回転量を電気信号に変換するロータリーエンコーダが取り付けられる。円盤の円周には直径 1mm のワイヤが取り付けられ、円盤の側方に設置された 2 つの定滑車によって下方に導かれる。ワイヤの先端には、トルク負荷用重錘が取り付けられる。なお、ワイヤの取り回しを変更することによって、負荷方向は内旋および外旋の両方向に設定できる（Figure 3-4 a, b 参照）。ロータ部全体は 2 箇所に設置された回転ハンドルを操作することにより、その位置を上下左右に動かすことができる。

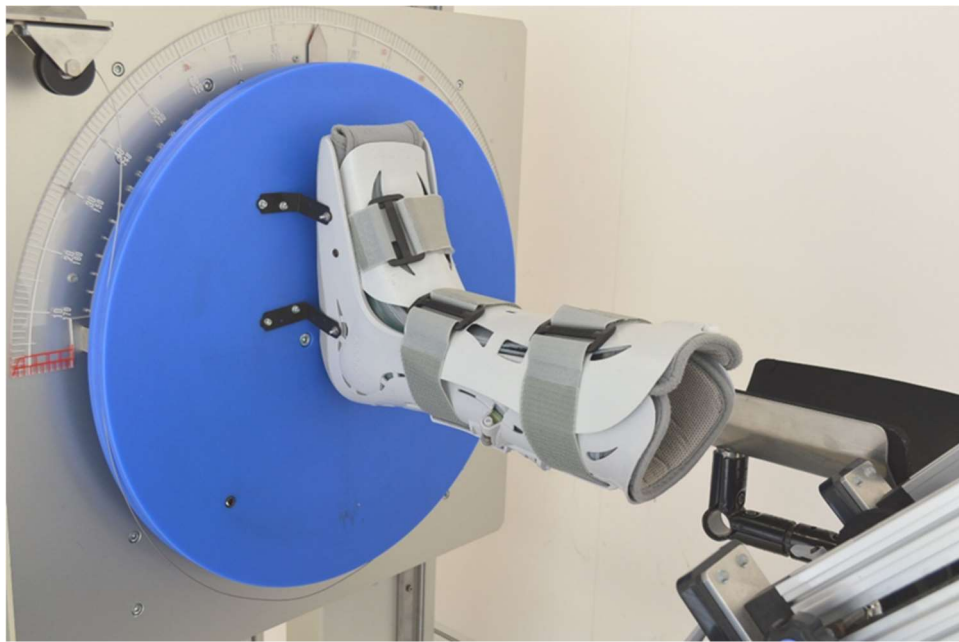


Figure 3 - 3 ロータ部

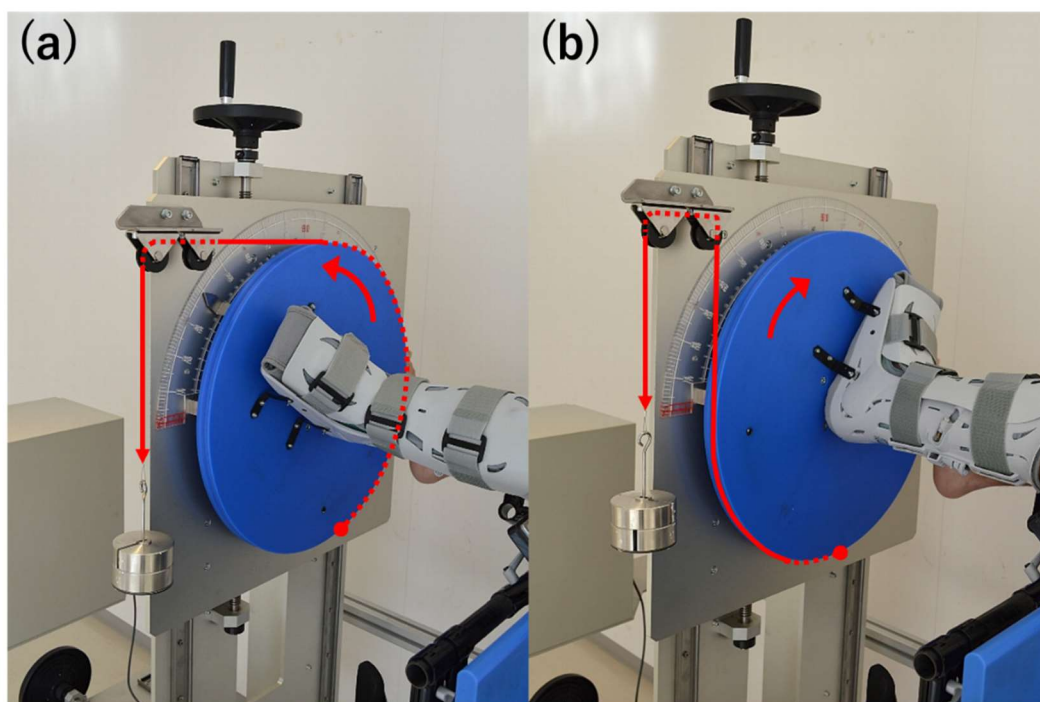


Figure 3 - 4 (a, b) ワイヤの取り回し方法の変更による回転方向の相違（ワイヤを赤色の実線および点線で、ワイヤと円盤の接合部を赤丸で示す）

コンソール部は、内部に電源部およびロータリーエンコーダからの電気信号を処理する基板が設置され、前面には測定データを表示するタッチ式液晶ディスプレイ（Figure 3 - 5 参照）と電源スイッチが設置される。電源は AC100V である。コンソール部からはケーブルが引き出され、その先端にトルク負荷開始時を通知するハンドスイッチが取り付けられる。液晶ディスプレイ上の回旋角度表示は、円盤の回転にリアルタイムで追従するが、ハンドスイッチを押してから任意の時間が経過した時に表示を固定するようプログラミングすることが可能である。本研究課題においては、ハンドスイッチからの信号入力後 20 秒経過時にディスプレイ上の測定値が固定されるよう、システムがプログラミングされた。角度の表示最小単位は  $0.5^{\circ}$  である。

### 3. 測定方法

Figure 3 - 6a, Figure 3 - 6b, および Figure 3 - 6c に測定時の対象者の肢位を示す。測定時の膝関節の屈曲角度は  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  とし、負荷トルクは 2.5Nm (10.0N の重錘を使用), 5.0Nm (20.0N の重錘を使用), 7.5Nm (30.0N の重錘を使用) とした。これらの 3 角度条件と 3 負荷トルク条件の組み合わせである合計 9 条件による測定は、内旋および外旋の回旋方向と合わせランダムに実施された。

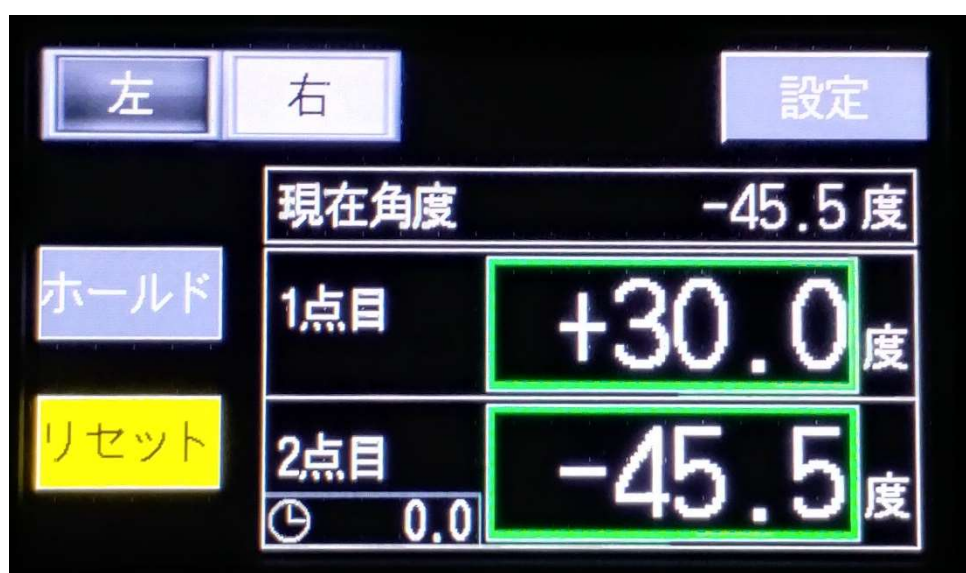


Figure 3 - 5 タッチ式液晶ディスプレイの表示内容



Figure 3 - 6a 測定時の肢位（膝関節 30°屈曲位）



Figure 3 - 6b 測定時の肢位（膝関節 60°屈曲位）





Figure 3 - 6c 測定時の肢位（膝関節 90°屈曲位）

測定にあたっては、対象者にベッド部上で仰臥位をとらせ、①thigh board の傾斜角度の設定、②回転ハンドルの操作によるロータ部の位置の仮決め、③ベルクロテープとクランプによる対象者の大腿部の thigh board への固定 (Figure 3 - 7 参照)、④測定対象側の下腿および足部のブーツへの挿入、⑤対象者の下腿が水平であることの確認、⑥ハンドポンプによるブーツへのエア注入による下腿部および足部の固定 (Figure 3 - 8 参照)、以上の手順で測定肢位が設定された。その後、数回の自動および他動による膝関節の回旋運動により、測定への慣熟が試みられた。この際、大腿部が thigh board 上で動揺しないこと、下腿部および足部がブーツ内で動揺しないことが確認された。非測定側は、下腿部を calf rest に置かせた。トルク負荷前には、円盤に組み込まれたロック機構によってブーツの足部長軸が鉛直になる位置で円盤が固定され、これを neutral position として規定し (Figure 3 - 9 参照)、回旋角度表示ディスプレイを 0 点校正した。

この状態からワイヤの先端に重錘を装着し、ロック機構を解除することで円盤に回旋トルクを負荷した。トルク負荷開始と同時に、検者によってハンドスイッチが操作された。ハンドスイッチの操作後 20 秒経過した時点で、液晶ディスプレイに表示されている回旋角度は固定され、その数値を目視にて読み取り記録した。トルク負荷時には対象者に、両手でハンドルを把持し全身を脱力するよう指示した。内旋方向および外旋方向のそれぞれのトルクを負荷した際の円盤の回転量を内旋可動域、外旋可動域として記録し、両者の和を総回旋可動域として算出した。

トルクを負荷した際に、対象者がブーツ内で下腿部もしくは足部とブーツとの間でずれを感じた際には、エアバッグへ再加圧した上で再測定した。また大腿部と thigh board との間でずれを感じた場合には大腿部固定用のベルクロテープを、大腿骨遠位部とクランプとの間でずれを感じた場合にはクランプを、それぞれ増し締めし再測定した。全測定を通じ、対象者が疼痛や不快感を訴えた場合には直ちに測定を中止した。

上記の測定を、検者 B および検者 C の 2 名の検者によって各 1 回ずつ、24 時間以上の間隔を開けて実施した。検者の測定担当順は、ランダムとした。



Figure 3 - 7 クランプおよびベルクロテープによる大腿部の固定方法



Figure 3 - 8 ハンドポンプによるエアバッグへのエア注入



Figure 3 - 9 Neutral Position の規定

#### 4. 統計処理

RotorMeter II を用いた測定方法の検者間信頼性を検討するため、級内相関係数 ICC(2,1)を算出した。また、膝関節の回旋角度の平均値の性差の検討には Student の  $t$ -test を、左右差の検討には対応のある  $t$ -test を用いた。全ての統計量の算出には IBM SPSS Statistics Desktop for Japan Ver.20.0 を用いた。

ICC については研究課題 1 に倣い、0.7 以上をもって良好と判定した。その他の検定結果については、全ての項目で有意水準を 5%とした。

### 第 3 節 結果

女性の対象者のうち 1 名は、初回測定の翌日に腰部に交通事故による外傷を負い、測定参加が困難になったため、研究対象から除外された。この結果、女性の対象者は 11 名となった。測定条件別の級内相関係数 ICC(2, 1)の算出結果を、Table 3 - 1 に示す。

また、検者 B による測定結果と性差、左右差の検定結果を Table 3 - 2 に示す。同じく検者 C による測定結果と性差、左右差の検定結果を Table 3 - 3 に示す。

#### 1. 測定方法の検者間信頼性

全 54 測定条件での条件別の級内相関係数 ICC(2,1)のうち、良好と判定されなかったのは、右の内旋可動域で 2.5Nm@30°, 2.5Nm@90°, 5.0Nm@30°, 5.0Nm@60°, 右の外旋可動域で 5.0Nm@30°, 7.5Nm@30°, 右の総回旋可動域で 2.5Nm@30°, 左の内旋可動域で 2.5Nm@30°, 2.5Nm@60°の 9 条件であり、これらを除く 45 条件では良好と判定された。

#### 2. 膝関節回旋可動域の性差

両検者とも全ての条件下で、女性群は男性群に比して有意に大きい膝関節の回旋可動域を示した (Table 3 - 2 および Table 3 - 3 参照)。

### 3. 膝関節回旋可動域の左右差

両検者とも全ての条件下で、男性群、女性群共に、膝関節の回旋可動域に有意な左右差は見られなかった (Table 3 - 2 および Table 3 - 3 参照).

Table 3 - 1 各測定条件での検者間信頼性

	2.5Nm			5.0Nm			7.5Nm		
	30°	60°	90°	30°	60°	90°	30°	60°	90°
右	内旋	0.485	0.740	0.687	0.673	0.675	0.761	0.729	0.876
	外旋	0.746	0.881	0.885	0.566	0.704	0.862	0.626	0.963
	総回旋	0.690	0.898	0.832	0.730	0.865	0.844	0.773	0.926
左	内旋	0.620	0.613	0.828	0.702	0.788	0.883	0.785	0.952
	外旋	0.763	0.714	0.851	0.771	0.935	0.908	0.932	0.946
	総回旋	0.830	0.852	0.923	0.779	0.925	0.935	0.840	0.952



Table 3 - 2 検査者Bによる測定結果および性差，左右差の検定結果

回旋 方向	負荷 トルク	膝関節 屈曲角度	右						左						P値		
			男性			女性			男性			女性			性差		左右差
			Mean	SD	SE	Mean	SD	SE	Mean	SD	SE	Mean	SD	SE	右	左	
内旋	2.5Nm	30°	15.0	2.75	0.8	23.5	7.26	2.2	14.8	3.11	0.9	23.2	3.76	1.1	0.002	< 0.001	0.780
		60°	17.9	4.41	1.3	29.3	8.97	2.7	18.3	2.11	0.6	30.3	6.96	2.1	0.001	< 0.001	0.745
		90°	21.2	4.38	1.3	33.9	8.27	2.5	22.2	4.08	1.2	35.3	6.97	2.1	< 0.001	< 0.001	0.451
	5.0Nm	30°	22.0	3.72	1.1	35.9	7.26	2.2	22.3	3.84	1.1	38.0	8.33	2.5	< 0.001	< 0.001	0.255
		60°	27.6	6.17	1.8	38.7	6.15	1.9	28.2	3.92	1.1	40.4	8.14	2.5	< 0.001	< 0.001	0.715
		90°	30.5	4.78	1.4	43.6	7.21	2.2	32.2	5.06	1.5	45.0	7.48	2.3	< 0.001	< 0.001	0.191
	7.5Nm	30°	34.3	7.71	2.2	46.5	9.88	3.0	36.8	5.65	1.6	49.8	7.29	2.2	0.005	< 0.001	0.231
		60°	37.9	6.39	1.8	50.1	9.09	2.7	39.4	6.43	1.9	52.5	7.14	2.2	0.002	< 0.001	0.387
		90°	40.5	5.84	1.7	53.0	9.90	3.0	42.0	5.53	1.6	55.0	7.26	2.2	0.002	< 0.001	0.324
外旋	2.5Nm	30°	32.9	4.02	1.2	41.3	5.37	1.6	31.8	5.79	1.7	40.1	4.72	1.4	0.001	0.002	0.560
		60°	33.3	4.29	1.2	45.6	6.16	1.9	34.3	5.88	1.7	44.0	4.51	1.4	< 0.001	< 0.001	0.412
		90°	37.5	3.71	1.1	48.1	6.37	1.9	36.9	5.79	1.7	46.9	3.46	1.0	< 0.001	< 0.001	0.667
	5.0Nm	30°	43.5	4.77	1.4	52.0	4.55	1.4	41.4	6.16	1.8	51.2	4.00	1.2	< 0.001	< 0.001	0.109
		60°	45.3	5.17	1.5	55.7	4.10	1.2	43.7	7.33	2.1	54.5	5.43	1.6	< 0.001	0.001	0.299
		90°	48.4	5.69	1.6	60.0	5.13	1.5	47.9	8.16	2.4	58.6	4.68	1.4	< 0.001	0.002	0.730
	7.5Nm	30°	52.8	6.29	1.8	61.4	5.07	1.5	50.5	6.24	1.8	58.3	5.56	1.7	0.003	0.007	0.060
		60°	52.5	8.71	2.5	64.2	5.75	1.7	51.5	8.36	2.4	62.3	5.93	1.8	0.002	0.003	0.577
		90°	56.7	6.14	1.8	68.0	7.47	2.3	55.5	9.24	2.7	66.5	5.88	1.8	0.001	0.004	0.421
総回旋	2.5Nm	30°	47.9	3.98	1.1	64.8	10.38	3.1	46.6	5.25	1.5	63.3	6.90	2.1	< 0.001	< 0.001	0.312
		60°	51.2	5.73	1.7	75.0	11.26	3.4	52.6	5.91	1.7	74.3	9.89	3.0	< 0.001	< 0.001	0.274
		90°	58.8	5.66	1.6	82.0	11.78	3.6	59.1	7.95	2.3	82.2	9.03	2.7	< 0.001	< 0.001	0.854
	5.0Nm	30°	65.5	6.16	1.8	87.9	7.48	2.3	63.7	8.07	2.3	89.2	10.05	3.0	< 0.001	< 0.001	0.147
		60°	72.8	7.29	2.1	94.5	6.70	2.0	71.9	8.73	2.5	94.9	10.65	3.2	< 0.001	< 0.001	0.529
		90°	78.9	6.54	1.9	103.6	9.12	2.8	80.1	9.53	2.8	103.6	9.40	2.8	< 0.001	< 0.001	0.522
	7.5Nm	30°	87.1	11.95	3.5	107.9	11.98	3.6	87.3	10.20	2.9	108.1	9.59	2.9	0.001	< 0.001	0.931
		60°	90.4	9.66	2.8	114.3	11.37	3.4	91.0	11.57	3.3	114.9	10.29	3.1	< 0.001	< 0.001	0.818
		90°	97.2	9.04	2.6	121.0	12.91	3.9	97.5	10.36	3.0	121.5	11.08	3.3	< 0.001	< 0.001	0.839

(単位：度)

Table 3 - 3 検者Cによる測定結果および性差，左右差の検定結果

回旋 方向	負荷 トルク	膝関節 屈曲角度	右						左						P値	
			男性			女性			男性			女性			性差	
			Mean	SD	SE	Mean	SD	SE	Mean	SD	SE	Mean	SD	SE	右	左
内旋	2.5Nm	30°	16.1	7.08	2.0	24.0	9.27	2.8	17.7	6.54	1.9	25.9	6.51	2.0	0.037	0.009
		60°	15.8	7.73	2.2	28.4	10.90	3.3	20.0	9.44	2.7	30.2	10.23	3.1	0.006	0.027
		90°	18.1	5.94	1.7	29.9	12.66	3.8	20.9	5.56	1.6	35.5	8.05	2.4	0.012	0.000
	5.0Nm	30°	25.8	9.42	2.7	37.7	13.87	4.2	30.7	5.80	1.7	41.7	11.95	3.6	0.030	0.012
		60°	29.7	10.20	2.9	38.4	7.81	2.4	29.8	8.17	2.4	41.9	10.82	3.3	0.040	0.009
		90°	30.0	6.45	1.9	40.9	7.94	2.4	32.9	6.60	1.9	45.2	8.70	2.6	0.002	0.001
	7.5Nm	30°	35.1	10.26	3.0	52.1	16.52	5.0	38.8	7.80	2.3	49.8	7.29	2.2	0.009	0.003
		60°	38.0	9.27	2.7	47.8	9.81	3.0	40.3	9.21	2.7	51.5	9.88	3.0	0.029	0.014
		90°	38.5	6.34	1.8	50.1	11.49	3.5	41.0	6.58	1.9	54.0	9.29	2.8	0.009	0.001
外旋	2.5Nm	30°	34.9	5.34	1.5	42.4	7.89	2.4	30.1	7.48	2.2	38.2	4.75	1.4	0.018	0.008
		60°	35.3	7.14	2.1	44.6	7.63	2.3	31.7	8.49	2.4	45.8	7.45	2.2	0.009	0.001
		90°	37.0	4.42	1.3	50.5	10.05	3.0	35.7	7.38	2.1	45.8	2.99	0.9	0.001	0.001
	5.0Nm	30°	45.0	7.04	2.0	52.5	5.70	1.7	43.0	6.96	2.0	52.4	5.50	1.7	0.014	0.003
		60°	45.4	7.06	2.0	55.5	5.10	1.5	42.6	8.95	2.6	54.7	6.43	1.9	0.001	0.002
		90°	48.4	6.26	1.8	58.2	7.23	2.2	46.7	8.82	2.5	56.2	6.05	1.8	0.003	0.009
	7.5Nm	30°	50.7	7.50	2.2	58.6	6.90	2.1	50.3	7.01	2.0	57.3	6.40	1.9	0.020	0.026
		60°	52.5	8.71	2.5	64.2	5.75	1.7	50.5	9.21	2.7	61.6	6.44	1.9	0.002	0.005
		90°	55.3	5.92	1.7	65.7	7.28	2.2	53.5	9.79	2.8	63.8	5.20	1.6	0.002	0.007
総回旋	2.5Nm	30°	51.0	9.24	2.7	66.4	14.64	4.4	47.8	8.75	2.5	64.0	7.77	2.3	0.008	< 0.001
		60°	51.0	8.09	2.3	73.0	11.73	3.5	51.6	7.29	2.1	76.0	16.16	4.9	< 0.001	< 0.001
		90°	55.1	8.23	2.4	80.5	18.56	5.6	56.6	9.09	2.6	81.3	8.42	2.5	0.001	< 0.001
	5.0Nm	30°	70.8	12.89	3.7	90.2	15.93	4.8	73.7	9.20	2.7	94.1	15.54	4.7	0.006	0.001
		60°	75.1	9.49	2.7	93.9	7.81	2.4	72.4	9.68	2.8	96.5	15.52	4.7	< 0.001	< 0.001
		90°	78.4	8.17	2.4	99.1	11.30	3.4	79.6	10.77	3.1	101.4	11.84	3.6	< 0.001	< 0.001
	7.5Nm	30°	85.8	14.43	4.2	110.8	18.08	5.5	89.1	11.93	3.4	107.1	10.30	3.1	0.002	0.001
		60°	90.5	9.90	2.9	112.0	11.39	3.4	90.8	11.28	3.3	113.1	13.71	4.1	< 0.001	0.001
		90°	93.8	9.58	2.8	115.8	14.39	4.3	94.5	11.51	3.3	117.9	11.93	3.6	< 0.001	< 0.001

(単位：度)

## 第4節 考察

人体各関節の可動域や弛緩性、動揺性を定量的に測定し評価することは、スポーツ医学分野のみならず、バイオメカニクス、コンディショニング等の分野で重要視されている。また、それらの測定評価の結果と、臨床現場およびスポーツ現場で用いられる各種の徒手検査による評価結果との関連性を明らかにすることにより、徒手検査に客観的な裏付けを与えるものと思われる。

膝関節の回旋方向の弛緩性を評価する徒手検査としては、PST が臨床現場で広く用いられており、PST の評価結果に対する各種の物理学的分析が行われてきた。しかしながら、その検査技術の習得には豊富な臨床経験が必要とされ、熟練した整形外科医であっても実施方法にバリエーションが存在するため、単純な物理学的分析では PST の結果を客観的に評価することは困難であるとする意見もある (Kuroda et al. 2012)。

また PST は、ACL 損傷受傷膝特有の giving way (膝崩れ) 現象の再現を目的として実施されることが多く (Benjaminse et al. 2006)、メディカルチェック等、ACL 損傷のリスク者のスクリーニング目的として健常者を対象に実施することは困難であると思われる。加えて、非麻酔下での PST の感度 (24%) が、同じく非麻酔下での ADT (77%) や LT (85%) に比して著しく低いとする報告もある (Benjaminse et al. 2006)。このため、健常者の膝関節の回旋可動域を非侵襲的かつ的確、簡便に抽出、定量化し評価できる測定方法を開発することが必要であると思われる。

本研究に類似した測定原理を用いた膝関節の回旋可動域に関する報告としては、いくつかの先行研究が散見される。Shultz et al. (2007a) は Vermont Knee Laxity Device を用い、背臥位にて負荷トルク 5Nm、膝 20°屈曲位での総回旋可動域を  $27.5 \pm 7.5^\circ$  と報告している。Lorbach et al. (2009b) は Rotameter を用い、腹臥位にて負荷トルク 10Nm、膝屈曲 30°での総回旋可動域を  $95.0 \pm 3.5^\circ$  と報告している。Almquist et al. (2002) は Rottometer を用い、座位にて負荷トルク 9Nm、膝 30°屈曲位での総回旋可動域を  $78 \pm 16^\circ$ 、また同じ負荷トルク 9Nm で膝 90°屈曲位での総回旋可動域を  $77 \pm 11^\circ$  と報告している。これらの測定結果の相違は、測定装置および測定肢位、トルクの負荷方法、荷重

条件等の測定条件に影響されたものであると思われるため、膝関節の回旋可動域の測定にあたってはこれらの測定条件を正確に規定することが重要である。また、臨床現場およびスポーツ現場での関節可動域測定に必要な条件としては、測定条件を容易かつ正確に規定できること、対象者に対する身心的負担が軽いこと、測定方法に対する特段の習熟が必要でないこと等が考えられる。

本研究課題で用いられた RotorMeter II による測定では、測定肢位の規定は thigh board の傾斜の調整のみによって行われるため容易である。トルクの負荷には重錘を用いるため、測定中の負荷トルクの変動は無い。また荷重条件は、非荷重で統一される。これらにより、測定結果への誤差の介入は最小限度に留められているものと推察される。本研究課題で設定された測定条件は、回旋方向が 2 方向、負荷トルクが 3 条件、膝関節の屈曲角度が 3 条件であり、これら 18 条件での測定が左右両肢に対して行われたが、対象者 1 名あたりの測定時間は約 50 分程度であった。今後、負荷トルクおよび膝関節の屈曲角度の至適な条件が決定されれば、測定時間は大幅に短縮できるものと思われ、測定にあたっての対象者に対する身心的負担を軽減できることが期待される。

本研究課題では、2 名の検者による測定を実施したが、全測定条件を通じての検者間信頼性は良好と判定された。2 名の検者のうち、1 名は体育系大学にてアスレティックトレーニング領域を専攻する学部学生であり、もう 1 名は同大学に勤務する教員で日本体育協会公認アスレティックトレーナー資格を取得後 15 年が経過した者であった。これら 2 名の検者間で検者間信頼性が良好と判定されたことから、RotorMeter II の操作には検者のアスレティックトレーニング分野に対する高度な専門性に依存する特段の習熟は必要とされないものと思われた。

上記より、本研究課題で使用した RotorMeter II は、膝関節の回旋可動域の測定に適した測定機器であることが示唆された。

本研究課題では、全ての条件下で膝関節の回旋可動域には性差が存在し、回旋方向を問わず女性が男性に比して有意に大きい値を示した。これは、脛骨の前方移動量が男性に比して女性の方が有意に大きいことを示した Rozzi et al. (1999) の報告、女性の GJL

スコアが男性に比して大きいとする Beighton et al.(1973)および Jansson et al.(2004)の報告と同様の結果であった。脛骨の前方移動量や GJL スコアが大きいことは、ACL 損傷との関連も指摘されていること (Uhorchak et al. 2003, Ramesh et al. 2005) から、ACL 損傷の解剖学的な内的危険因子として認識されている。同様に ACL のサイズ (Muneta et al. 1997, Staeubli et al. 1999, Anderson et al. 2001) や力学的強度 (Chandrashekar et al. 2005), NW (Anderson et al. 2001, Charlton et al. 2002), NWI (Shelbourne et al. 1998, Davis et al. 1999), 膝関節過伸展角度 (Pfeiffer et al. 2018) にも性差が存在することが報告されており、また ACL 損傷との関連が指摘されている (Lund - Hassen et al. 1994, LaPrade and Burnett 1994, Loudon et al.1996, Shelbourne et al. 1998, Ireland et al. 2001, Uhorchak et al. 2003, Ramesh et al. 2005, Myer et al. 2008) ことから、ACL 損傷の内的危険因子と認識されている。

本研究課題の結果より、膝関節の回旋可動域には性差が存在したことから、上記の解剖学的因子群と同様に、ACL 損傷の解剖学的な内的危険因子の一つとしての可能性を有するものと思われる。ここから、膝関節の回旋可動域には、ACL 損傷に対するリスククリーニング指標としての有用性を持つことが期待できるものと思われる。

本研究課題では、膝関節の回旋可動域に左右差は認められなかった。これは、脛骨の前方移動量に関する Nawata et al. (1999) の報告と同様の結果であり、ACL 損傷者の膝関節の回旋可動域の特性を把握する上で有用な知見であると思われる。すなわち、受傷側が片側のみの ACL 損傷者に対して健常側の膝関節の回旋可動域を測定することにより、その対象者の膝関節の回旋可動域の特性を把握することが可能であると思われる。

しかしながら、本研究課題で設定した測定条件のうち、いくつかの条件では検者間信頼性が良好とは判定されなかった。これは特に、負荷トルクを 2.5Nm に設定した場合、あるいは膝関節の屈曲角度を 30°に設定した場合で、他の負荷トルクや屈曲角度の場合に比して顕著に見られた。

一般に、関節の可動域を他動的に測定する際には、対象となる関節の基本軸を固定し、検者が外力を与えて移動軸側を運動させ、所謂 end - feel を感じられた時点の関節角度

を測定する。しかし、本研究課題にて 2.5Nm の負荷トルクを与えた際は、上記に相当する外力に至らなかったために測定結果が不安定になったことが推察される。

膝関節の各靱帯は特定の膝関節屈曲角度で緊張することが知られており、Sakane et al. (1997) は ACL においては AMB が 15°屈曲位で、PLB が 60°から 90°屈曲位で最大緊張し、ACL 全体では 15°屈曲位で最大緊張すると報告している。Covey et al. (2008) によれば、PCL も ACL と同様に膝関節屈曲角度によって緊張が変化するとされ、伸展位では弛緩しているが、屈曲とともに緊張を増すと報告されている。また Park et al. (2005) は、MCL および LCL は膝関節屈曲 0°、30°、60°、90°の 4 条件下では、0°の場合が最も伸張されたと報告している。これらより、膝関節全体で見ると、屈曲角度が小さくなるにつれ膝関節は回旋方向の緩みが小さくなるものと思われ、本研究課題でも同様の結果が得られた。

本研究課題で用いた RotorMeter II での測定肢位では、膝関節と股関節の屈曲角度が連動して変化するため、膝関節の屈曲角度が小さくなるにつれ負荷トルクの軸と股関節の回旋軸とが接近し、負荷された回旋トルクが大腿部を介して股関節に伝達されやすくなったものと思われる。加えて本研究課題においては、大腿部は一对のクランプと二本のベルクロテープを用いて thigh board に固定されたが、骨ピン等を用いた直接的かつ強固な固定方法ではなかった。またクランプおよびベルクロテープの締め付け強度は、疼痛や不快感が無いことを対象者に確認しながら愛護的に調整された。

これらの理由により、膝関節の屈曲角度を 30°に設定した場合、回旋トルクが膝関節の回旋のみならず、股関節の回旋や大腿部の軟部組織の変形をも惹起し、その結果、膝関節の屈曲角度が 30°の際の測定結果が不安定になったものと思われた。

よって、膝関節の回旋可動域の測定においては、負荷トルクの軸と股関節の回旋軸がなす角度を大きくした肢位にて測定することが安定した測定結果を得るために有効であると思われ、RotorMeter II を用いる場合には膝関節の屈曲角度を 90°に設定するのが適切であることが示唆された。

本研究課題においては、負荷トルクは 2.5Nm、5.0Nm および 7.5Nm の 3 条件が採用

された。ACL の破断強度は約 2,000N とされており (Woo et al. 1991), 本研究課題での負荷トルクは十分に安全であったと言える。同一の膝関節の屈曲角度で負荷トルクを変化させた場合の測定結果は, 男女とも  $2.5\text{Nm} < 5.0\text{Nm} < 7.5\text{Nm}$  であり, 負荷トルクの増大に従って膝関節の回旋可動域は大きくなった。Almquist et al. (2012) は健常人男女で膝関節の屈曲角度を  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ , 負荷トルクを  $6\text{Nm}$ ,  $9\text{Nm}$  と変化させた場合, 全ての関節角度で膝関節の回旋可動域は  $6\text{Nm} < 9\text{Nm}$  であったと報告しており, 本研究課題の結果はこれを支持するものであった。著者らが本研究課題に先立って実施したパイロットスタディでは, 負荷トルクを  $10.0\text{Nm}$  とした際には大腿部遠位端のクランプ部分での動揺が発生したケースが少なかった。また本研究課題においても,  $7.5\text{Nm}$  を負荷した際に同様の現象が観察されたために再測定を実施したケースが散見された。これらより, RotorMeter II を用いた膝関節の回旋可動域の測定では, 負荷トルクを  $5.0\text{Nm}$  に設定するのが適切であることが示唆された。

## 第 5 節 結語

本研究課題は, 膝関節の回旋可動域の特性を明らかにすること, また ACL 損傷リスクに対するスクリーニング指標としての有用性の有無を検討することを目的とした。測定装置として RotorMeter II を製作し, 健常な一般成人男性 12 名, 一般成人女性 11 名を対象として 2 名の検者による測定を 1 回ずつ実施した。測定側は両側とした。測定条件は, 膝関節屈曲角度を  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  の 3 条件, 負荷トルクを  $2.5\text{Nm}$ ,  $5.0\text{Nm}$ ,  $7.5\text{Nm}$  の 3 条件とした。結果は, 以下に記すものであった。

全ての測定条件下で, 女性は男性に比して有意に大きい回旋可動域を示し, また男女とも左右差は見られなかった。検者間信頼性については, 負荷トルクが  $2.5\text{Nm}$  の場合, また膝関節屈曲角度が  $30^\circ$  の場合で良好と判定されないケースが散見された。

これらの結果から, RotorMeter II によって測定された膝関節の回旋可動域が, ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標として有用である可能性が示唆された。また, RotorMeter II を用いた膝関節の回旋可動域の測定においては, 測定条件として膝関節

90°屈曲位および負荷トルク 5.0Nm が適切であると示唆された.



## 第 4 章

### 【研究課題 3】 ACL 損傷者の膝関節回旋可動域の特性

#### 第 1 節 緒言

非接触型 ACL 損傷の解剖学的危険因子には、全身および膝関節そのものの関節弛緩性や膝関節過伸展, NW および NWI, ACL のサイズや力学的強度等が挙げられている。これらの因子にはいずれも、性差が存在することが確認されており、また ACL 損傷との関連を有することが認識されている。

膝関節の回旋可動域も同様に諸家による報告がなされ、そのいずれにおいても女性が男性に比して大きい回旋可動域を有するという性差が存在することが確認されている。しかしながら、膝関節の回旋可動域と ACL 損傷との関連に言及した報告は見られない。本研究では研究課題 2 において、研究課題 1 で統計学的信頼性と妥当性が確認された測定原理を用いた測定装置 RotorMeter II を製作し、健常な成人男女に対する測定を実施して、膝関節の回旋可動域に性差が存在すること、および左右差が存在しないことを確認した。また、膝関節の屈曲角度および負荷トルクを変化させ、異なる条件下での膝関節の回旋可動域を測定し、膝関節の回旋可動域がこれらの条件に影響を受けることを確認した。これらの結果から、膝関節の回旋可動域が ACL 損傷のリスクスクリーニング指標として有用である可能性が示唆され、加えて RotorMeter II を用いて膝関節の回旋可動域を測定する際の測定条件に関する知見を得た。

だが、研究課題 2 で測定された内旋可動域、外旋可動域、総回旋可動域のうちいずれが ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標として有用なのかは確認されなかった。

そこで研究課題 3 では、ACL 損傷者および健常者の膝関節の回旋可動域を測定、比較し、同時に全身関節弛緩性テストを実施して、膝関節の回旋可動域のうち、どの回旋方向の測定値が ACL 損傷のリスクスクリーニング指標として有用なのかを検討することを目的とした。

## 第2節 方法

### 1. 対象者

対象者は、ACL 損傷の受傷経験のある成人女性 13 名（以下、ACL 群）、下肢および下肢帯に重篤な傷害経験の無い成人女性 13 名（以下、対照群）であった。対象者は全て大学生で、測定時には大学の競技スポーツ団体に所属しており、1 回 2 時間以上、週に 4 日以上の競技スポーツ活動を行っていた。ACL 群は全て、靱帯再建術を受けていた。ACL 損傷者の対象者の選定にあたっては、損傷型がスポーツ活動中の非接触型損傷であること、損傷側が片側のみであること、非損傷側の下肢および下肢帯に重篤な傷害経験が無いことを採用条件とした。なお、スキー滑走中の転倒による ACL 損傷は、研究対象から除外した。測定対象肢は、ACL 群は非損傷側、対照群は両側とした。

対象者の身体特性その他の情報を、Table 4・1 に示す。対象者の身体特性は、ACL 群においては年齢  $20.7 \pm 1.54$  歳、身長  $162.1 \pm 6.29\text{cm}$ 、体重  $54.3 \pm 7.44\text{kg}$ 、BMI  $20.6 \pm 1.66$  であり、対照群においては年齢  $19.9 \pm 1.14$  歳、身長  $159.5 \pm 6.11\text{cm}$ 、体重  $54.1 \pm 5.70\text{kg}$ 、BMI  $21.2 \pm 1.52$ （いずれも、平均  $\pm$  標準偏差）であった。年齢、身長、体重、BMI のいずれも、両群間に有意な差はなかった。ACL 群の損傷側は、右側が 6 例、左側が 7 例であり、また利き側（ボールを蹴る脚）の損傷は 13 例中 5 例であった。

研究の実施に先立っては、新潟医療福祉大学倫理委員会の審査および承認を得た（承認番号：17951-180208）。対象者には研究の目的および内容に関する十分な説明を行い、同意書への署名をもって研究参加への同意を得た。

Table 4 - 1 対象者の身体特性およびその他の情報

群	No	性別	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	BMI	受傷側	利き脚
ACL群	A1	女	20	166	62	22.5	右	右
	A2	女	22	169	60	21.0	左	右
	A3	女	23	159	55	21.8	右	右
	A4	女	19	158	50	20.0	右	右
	A5	女	22	157	40	16.2	右	右
	A6	女	18	158	47	18.8	右	右
	A7	女	22	173	66	22.1	左	右
	A8	女	22	173	63	21.0	左	右
	A9	女	22	151	46	20.2	左	右
	A10	女	20	158	48	19.2	左	右
	A11	女	21	163	58	21.8	左	右
	A12	女	19	160	53	20.7	右	左
	A13	女	19	162	58	22.1	左	右
	平均		20.7	162.1	54.3	20.6		
	標準偏差		1.54	6.29	7.44	1.66		
対照群	C1	女	21	152	47	20.3	—	右
	C2	女	21	161	61	23.5	—	右
	C3	女	21	160	58	22.7	—	右
	C4	女	18	177	65	20.7	—	右
	C5	女	20	165	55	20.2	—	右
	C6	女	19	162	55	21.0	—	右
	C7	女	19	160	54	21.1	—	右
	C8	女	22	159	48	19.0	—	右
	C9	女	21	155	45	18.7	—	右
	C10	女	19	156	54	22.2	—	右
	C11	女	20	153	47	20.1	—	左
	C12	女	19	158	58	23.2	—	右
	C13	女	19	156	56	23.0	—	左
	平均		19.9	159.5	54.1	21.2		
	標準偏差		1.14	6.15	5.70	1.52		
<i>P</i> 値			0.177	0.319	0.933	0.330		

## 2. 測定装置

本研究課題においては、研究課題 2 で使用した RotorMeter II を使用した。

## 3. 測定方法

本研究課題における測定条件は、膝関節の屈曲角度を 90°、負荷トルクを 5.0Nm とした。測定時の肢位を Figure 4 - 1 に示す。

測定に際しては、対象者にベッド部上で仰臥位をとらせ、ベルクロテープとクランプによって対象者の大腿部を thigh board へ固定した。その後、測定対象側の下腿および足部をブーツへ挿入し、ハンドポンプによるブーツへのエア注入を行って、下腿および足部をブーツ内で固定した。そして、数回の自動および他動による膝関節の回旋運動により、測定への慣熟が試みられた。この際、大腿部が thigh board 上で、下腿および足部がブーツ内で動揺しないことが確認された。非測定側は、下腿部を calf rest に置かせた。トルク負荷前には、円盤に組み込まれたロック機構によってブーツの足部長軸が鉛直になる位置で円盤を固定し、これを neutral position として規定して、回旋角度表示ディスプレイを 0 点校正した。この状態からワイヤの先端に重錘を装着し、ロック機構を解除することで円盤に回旋トルクを負荷して、液晶ディスプレイに表示される円盤の回転量を目視にて読み取り記録した。回旋方向はランダムに選択された。回旋トルク負荷時には、全身の脱力を対象者に指示した。

トルクを負荷した際に、対象者がブーツ内で下腿部もしくは足部とブーツとの間でずれを感じた際には、エアバッグへ再加圧した上で再測定した。また大腿部と thigh board との間でずれを感じた場合には大腿部固定用のベルクロテープを、大腿骨遠位部とクランプとの間でずれを感じた場合にはクランプを、それぞれ増し締めし再測定した。全測定を通じ、対象者が疼痛や不快感を訴えた場合には直ちに測定を中止した。

内旋方向および外旋方向のそれぞれのトルクを負荷した際の円盤の回転量を、内旋可動域、外旋可動域として記録し、両者の和を総回旋可動域として算出した。



Figure 4 - 1 測定時の肢位

## 2. 全身関節弛緩性テスト

全ての対象者に対して、中嶋ら（1984）による東大式全身関節弛緩性テスト（General Joint Laxity Test, 以下 GJLT）を実施した。GJLT は手関節，肘関節，肩関節，膝関節，足関節，脊柱，股関節の 7 関節を測定対象とし，以下に示す肢位をとれた場合に陽性と判定した。

- ① 手関節：片方の手関節を掌屈させ，もう片方の親指で掌屈している側の第 1 指を押した際，第 1 指の指尖が前腕についた場合。
- ② 肘関節：手掌を上に向けた状態で肘関節を最大伸展させた際，15°以上の過伸展であった場合。
- ③ 肩関節：片側の腕を上方から背部に回し，もう片方の腕を下方から背部に回した際，体の後方で四指を組むことができた場合。
- ④ 膝関節：膝関節を最大伸展させた際，膝関節が 10°以上の過伸展である場合。
- ⑤ 足関節：片側の踵が浮かないように足関節を背屈させた際，背屈角度が 45°以下であった場合。
- ⑥ 脊柱：上体を前屈した際，膝関節を曲げずに手掌が床についた場合。
- ⑦ 股関節：両足の踵を合わせ，足を一直線に伸ばした状態で膝関節を曲げずに直立することができた場合。

各関節に対するテスト実施方法を，Figure 4・2 に示す。陽性の場合のスコアは，脊柱と股関節は 1 点，手関節，肘関節，肩関節，膝関節，足関節は片側 0.5 点とし，計 7 点満点とした。ただし ACL 群については，損傷側の膝関節はテスト対象とせず 6.5 満点とし，その後合計スコアを 7 点満点に換算した。ACL 群の GJLT スコア  $G_{ACL}$  の換算式は，次の通りである。

$$G_{ACL} = x \times 7.0 / 6.5 \quad (\text{ただし } x \text{ は，ACL 群の GJLT の合計スコア})$$

上記の膝関節の回旋可動域測定，および GJLT は検者 B，検者 D，検者 E の 3 人の検者によって行われた。対象者毎の検者の割り当ては，ランダムとした。

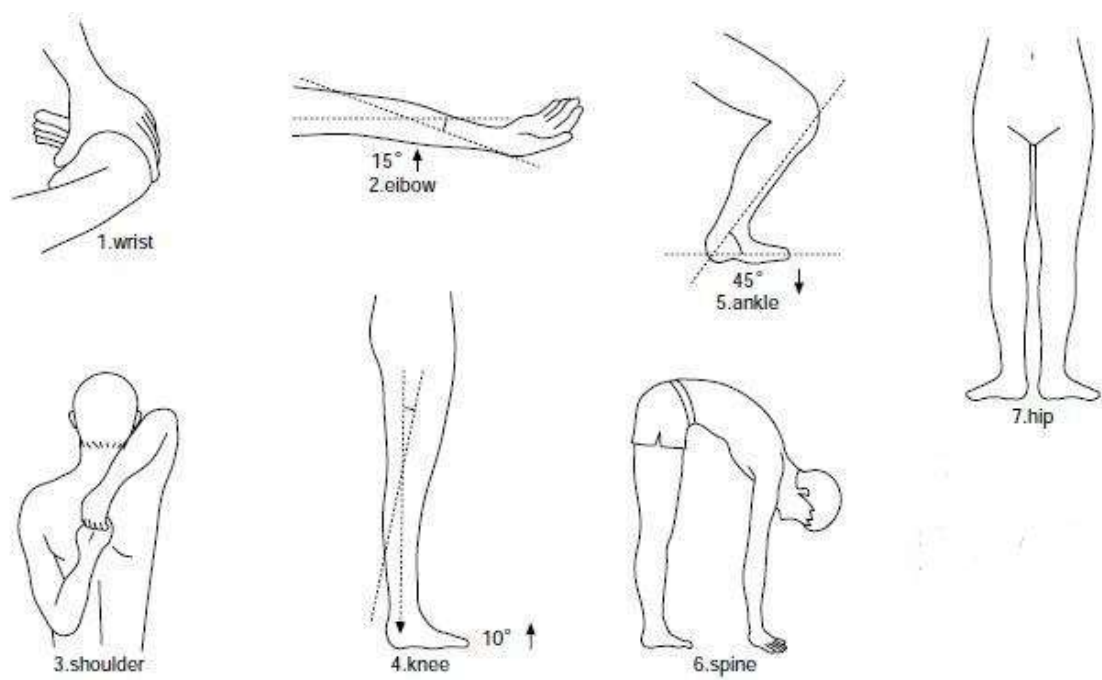


Figure 4 - 2 東大式全身関節弛緩性テスト（中嶋ら，1984 より引用）

### 3. 統計処理

ACL 群および対照群の、内旋可動域、外旋可動域、総回旋可動域の平均値の差の検定には、Student の  $t$ -test を用いた。なお対照群については、両肢の測定結果の平均値を用いた。GJLT スコアの平均値の差の検定には、Mann - Whitney の  $U$ -test を用いた。

全ての統計量の算出には、IBM SPSS Statistics Desktop for Japan Ver.20.0 を用いた。有意水準はいずれも 5%とした。

## 第3節 結果

### 1. 膝関節の回旋可動域について

膝関節の回旋可動域の測定結果を、Figure 4 - 3 に示す。ACL 群においては、内旋可動域は  $37.8 \pm 6.13^\circ$  (標準誤差  $1.7^\circ$ )、外旋可動域は  $50.6 \pm 10.96^\circ$  (標準誤差  $3.0^\circ$ )、総回旋可動域は  $88.4 \pm 14.41^\circ$  (標準誤差  $4.0^\circ$ ) であった。対照群においては、内旋可動域は  $31.3 \pm 6.16^\circ$  (標準誤差  $1.7^\circ$ )、外旋可動域は  $50.8 \pm 8.52^\circ$  (標準誤差  $2.4^\circ$ )、総回旋可動域は  $82.1 \pm 12.71^\circ$  (標準誤差  $3.5^\circ$ ) であった (以上、いずれも平均  $\pm$  標準偏差)。

両群間の有意差の検定結果については、内旋可動域において ACL 群が対照群に比して有意に大きい値を示した ( $P = 0.016$ )。一方、外旋可動域および総回旋可動域においては有意な差は見られなかった (外旋可動域:  $P = 0.966$ , 総回旋可動域:  $P = 0.265$ )

### 2. 全身関節弛緩性テストについて

GJLT の結果を、Figure 4 - 4 に示す。GJLT スコアは、ACL 群においては  $4.3 \pm 1.43$  であり、対照群においては  $2.7 \pm 1.39$  であった。両群間の有意差の検定結果については、ACL 群が対照群に比して有意に大きい値を示した ( $P = 0.009$ )。



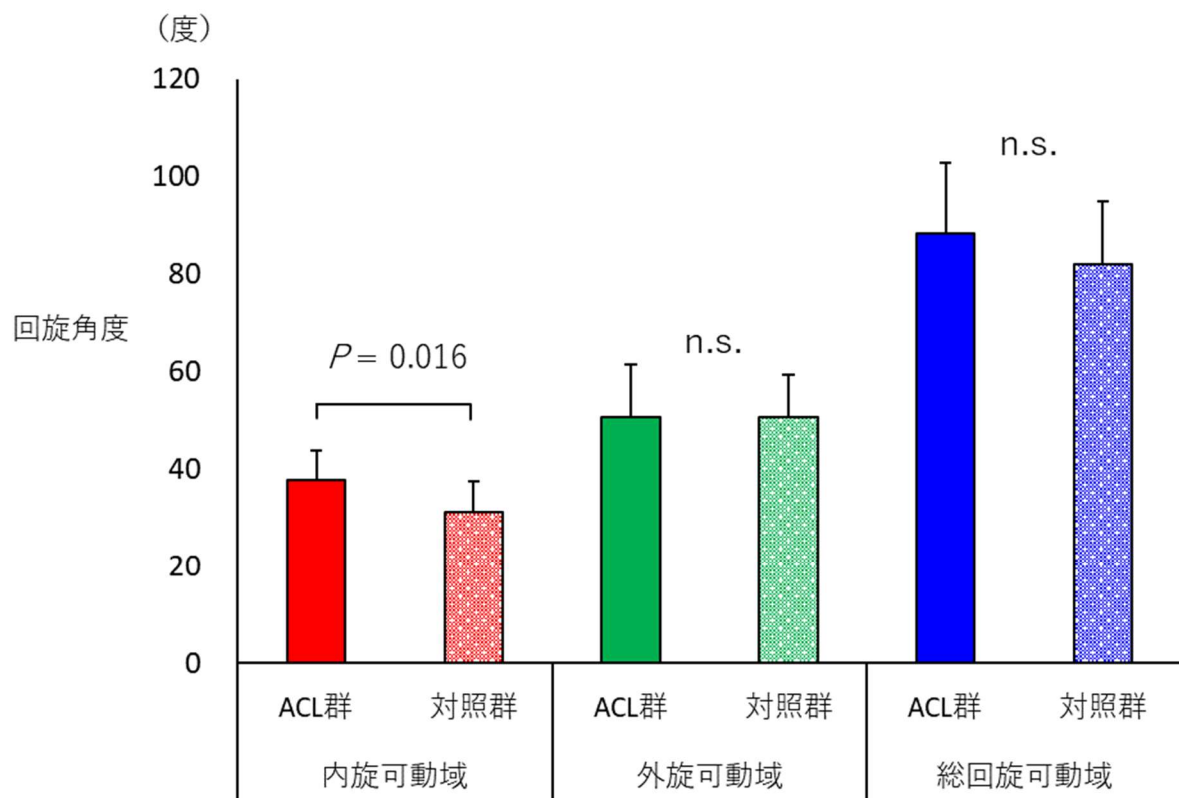


Figure 4 - 3. 膝関節の回旋可動域の測定結果

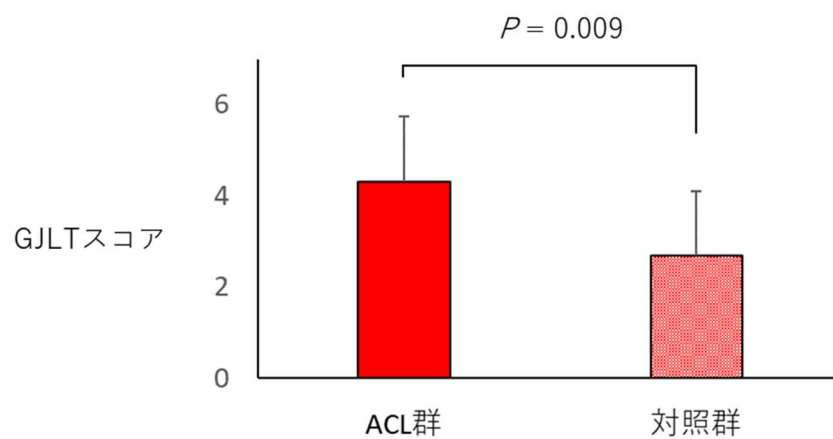


Figure 4 - 4. GJLT のスコア

#### 第4節 考察

非接触型 ACL 損傷の発生率は男性に比して女性が高いとされるため、全身関節弛緩性、脛骨の前方移動量、膝過伸展、NW および NWI、ACL のサイズ等、性差が存在する解剖学的因子は ACL 損傷の内的危険因子として認識され、ACL 損傷との関連も明らかにされている。ACL 損傷の予防には、これらの解剖学的危険因子をメディカルチェック等で測定、評価し、ハイリスク者をスクリーニングして予防プログラムを提供することが有効であると思われる。スクリーニングの精度を向上させるためには、既に有効と認識されている評価指標について精査すると同時に、ACL 損傷の疫学的、解剖学的、バイオメカニクス的研究から新たな指標を見いだすことも有効であると思われる。

研究課題2では、膝関節の内旋可動域、外旋可動域および総回旋可動域全てにおいて、女性は男性に比して大きい値を示したことから、膝関節の回旋可動域が ACL 損傷の内的危険因子としての可能性を有することが示唆された。さらに本研究課題では、ACL 片側損傷者の非損傷側の膝関節の回旋可動域を健常者と比較検討したが、内旋可動域において ACL 群が対照群に比して有意に大きい値を示した一方で、外旋可動域および総回旋可動域では両群間に有意差は見られなかった。ここから、本研究課題で対象とした ACL 損傷者は健常者に対して大きい内旋可動域を有しているものと思われ、膝関節の内旋可動域には、ACL 損傷のリスクスクリーニング指標としての有用性を持つ可能性があることが示唆された。

また、同時に実施した GJLT の結果においても、ACL 群が全身の関節弛緩性を有することが示唆され、これは Uhorchak et al. (2003) や Ramesh et al. (2005) の先行研究の結果を支持するものであった。

全身、もしくは膝関節の弛緩性が ACL 損傷の内的危険因子となる詳細な背景に関しては、未だ明らかになっていないが、竹田ら (1997) は膝関節の前後方向の弛緩性の増大が脛骨－大腿骨間の過大な前後運動を招き、この反復が靱帯の疲労現象につながる可能性を指摘している。また Lipps et al. (2013) は屍体膝を用いた研究において、膝関節に体重の4倍に相当する圧縮力を負荷した状態で脛骨に内旋トルクを負荷した場合、10

例中 8 例で ACL が断裂し、断裂に至る平均負荷回数は約 8 回であったと報告しており、膝関節外反内旋位での接地を繰り返すことにより ACL が摩耗し破断閾値が低下する可能性を指摘している。Halewood and Amis (2015) によれば、膝関節の内旋制動は 1 次的には後斜靭帯、腸脛靭帯、MCL 深層部が担っており、ACL は MCL 浅層部、膝蓋靭帯、Anterolateral Ligament (注)、および半月板と並び 2 次的な制動要素とされる。このため、前述の 1 次的な制動要素の何らかの原因によって内旋可動域が大きい膝関節においては、着地および切り返し、ストップ等の ACL 損傷の危険動作時に内旋運動が増大し、ACL への伸張ストレスが増大することによって ACL の物理的強度を低下させる可能性が示唆される。

関節弛緩性が神経・筋因子に影響を与え、ACL 損傷の誘因になる可能性も指摘されている。Barrack et al. (1983) は、GJLT スコアが大きいダンサーの関節位置感覚が低かったことを報告している。また Ramesh et al. (2005) は、過伸展膝の患者が固有感覚受容器によるフィードバック能に劣るために、保護的な動作が遅れる可能性を指摘している。このように、関節弛緩性を有する者は神経・筋因子に潜在的な危険性を有し、着地、切り返し、ストップなどの危険動作の際に“the point of no return (体幹：前屈・損傷側対側へ回旋、股関節：内旋・内転、膝関節：外反・軽度屈曲、脛骨：外旋)”と呼ばれる肢位 (Ireland 2002) を回避できない可能性があると思われる。また、ACL 損傷は接地後 40~70msec. の極短時間で発生しているとされる (Yasuda et al. 1993, Meyer et al. 2008, Koga et al. 2011) ため、膝関節の弛緩性を有する者が神経・筋因子に問題を抱えている場合、危険肢位からの姿勢の修正が間に合わず、ACL 損傷が発生する可能性があるものと思われる。

膝関節に対する内旋強制が ACL に与えるバイオメカニクスの影響、あるいは ACL 損傷の危険動作との関連については、いくつかの報告がある。屍体膝を用いた報告 (Markolf et al. 1990, 1995) およびシミュレーションを用いた報告 (Kanamori et al. 2000) では、膝関節に対して内旋強制した場合、ACL に負荷される伸張ストレスは外旋強制よりも大きいとされている。生体膝および ACL に対する研究では、膝関節に対する

内旋トルクが ACL の歪みを増加させたという報告 (Fleming et al. 2001) が見られる。

繰り返し動作時の膝関節外反角度および外反モーメントは、男性に比して女性が多いことが報告 (Chappell et al. 2002, Ford et al. 2003, Hewett et al. 2004, 2005, McLean et al. 2007) されており、これらは上述の内旋強制と同様に ACL に対する伸張ストレスを増大させるものと思われる。また、予測外の繰り返し動作においては、動作が予測された場合に比して体幹のポジションはより立った状態になり、また膝関節はより伸展位になると報告されている (Houck et al. 2006)。このような肢位では、膝関節屈筋群等の膝関節の動的安定機構の機能の効率が低下する (Huston et al. 1996) とされるため、脛骨は外反を伴いながら急激に内旋強制される。このため、内旋可動域が大きい場合には ACL に対する過大な伸張ストレスが負荷され、ACL 損傷を引き起こす誘因となり得るものと思われる。

ACL 損傷に伴う膝関節の回旋不安定性に関しては、臨床的兆候としての pivot shift 現象の存在が古くから指摘されている。Bull and Amis (1998) によれば、回旋不安定性を有する膝関節に対する徒手検査は Jones and Smith による症例報告で “slipping knee” として 1914 年に既に紹介されており、“pivot shift” の初出文献は 1972 年である (Galway et al.)。また Slocum et al. は 1976 年に、回旋不安定性に対する徒手検査方法を紹介している。

ACL は膝関節の内旋制動要素のひとつであることから、1980 年代から内旋可動域に関する研究が行われていた。一方、ACL は脛骨の前方変位の制動要素でもあることから、同時期から脛骨の前方移動量と ACL 損傷との関連に関する研究が進められており、その徒手的な評価方法として ADT や LT が考案され、測定装置として KT-1000/2000 が開発された。また両者の関連性は、多くの研究によって確認されている。そして今日に至って、膝関節の前方弛緩性は、ACL 損傷のリスクファクターの一つとして認識されている。しかしながら、内旋、あるいは回旋弛緩性については、PST が徒手的な評価方法として考案された (Bach et al. 1988, Noyes et al. 1991) ものの、gold standard と認識される定量的な測定方法や測定装置が開発されないままであった。

1990年代には動作解析技術の進歩により、ACL 損傷予防に関する研究は解剖学的因子などの static な要素の分析から、受傷肢位や危険動作の dynamic な分析へと関心の中心が移っていった。着地動作、繰り返し動作、ジャンプ動作時の下肢関節の運動に対する動作解析では、特に膝関節の前額面内での運動に性差が存在し、ACL 損傷との関連が指摘されている。しかしここでも、膝関節の回旋動作を画像から定量化することが困難であったこともあり、ACL 損傷との関連に関する研究は進まなかった。

1990年代中盤には、ACL 再建術の選択肢のひとつとして解剖学的二重束再建術 (Muneta 2015) が行われるようになってきた。これに前後し、膝関節の回旋可動域に関する研究が散見されるようになった。解剖学的二重束再建術は、従前の一重束再建術に比して膝関節の安定性、特に回旋安定性に優れている (Yasuda et al. 2006, Muneta et al. 2007, Kondo et al. 2008, Ibrahim et al. 2009, Aglietti et al. 2010) とされたため、術後の臨床成績として膝関節の回旋安定性の評価が必要とされるようになったためである。しかし、それらの研究の多くは評価に PST を用いていたり、定量的な評価であってもラボテスト的な性格の強い測定手法であったりしたため、健常者を対象とした ACL 損傷の予防を目的としたメディカルチェック等へ応用することは困難であると思われた。

一般に、アスリートを対象としたメディカルチェックには、経済性、大量性、即時性、簡便性等が求められるため、ラボテスト的な測定手法は適用しがたいと言わざるを得ない。この点において、本研究課題で用いた RotorMeter II は上記の条件を満たしていると思われ、臨床現場およびスポーツ現場でのメディカルチェックでの運用に適した膝関節の回旋可動域測定装置であると思われた。

本研究課題では、測定条件として膝関節屈曲角度を 90°、負荷トルクを 5.0Nm に設定したが、対象群において内旋可動域、外旋可動域、および総回旋可動域の全てで、研究課題 2 における同条件下での可動域に比して小さい値を示した。これは、サッカー選手の膝関節の回旋可動域が一般人に比して小さかったとする Muaidi et al. (2009) の報告を支持するものであり、各対象者群のスポーツ活動の頻度および強度の差によるものと

思われた。本研究課題においては、対象者は全て測定時には1回2時間以上、週に4日以上以上のスポーツ活動を行っており、レベルとしては競技性の高いレベルであった。これに対して、研究課題2における対象者は、日常的なスポーツ活動を行っていなかった。膝関節は周囲の筋群が動的な安定機構として作用する(Griffin et al. 2000)とされるが、同時に静的な安定機構としても作用するものと思われる。本研究課題における対象者は頻度、強度共に高いレベルでのスポーツ活動を行っていたため、膝関節周囲筋群の発達が促され、膝関節の静的な安定性が向上した結果、研究課題2における対象者よりも小さい可動域を示したものと思われる。

本研究課題で対象となったACL群は、損傷側は片側のみであり、測定対象となった非損傷側の下肢および下肢帯には重篤な外傷経験は無かった。本研究では、研究課題2にて膝関節の回旋可動域には左右差が存在しないことを確認しており、また同様の報告(Lorbach 2009b, Almquist et al. 2012)がみられる。これらから、本研究課題における測定対象側の膝関節の回旋可動域は非対象側、すなわち非接触型ACL損傷の受傷側の可動域を表しているものと思われる。

本研究課題で用いた測定装置RotorMeter IIは、測定時の荷重条件は非荷重であった。スポーツ活動中のACL損傷は着地動作や切り返し動作、ストップ動作に発生するとされ(Boden et al. 2000, Olsen et al. 2004, Krosshaug et al. 2007)、これらの動作は全て荷重位で行われる。ここから、荷重様式の差異が膝関節の回旋可動域の特性に与える影響は、今後精査される必要があるものと思われる。

またRotorMeter IIは総重量が約300kgを超え、外形寸法も決して小さくない。このため、同一の医療施設、スポーツ施設あるいは研究施設内での移動は可能であるものの、施設間での移動にはトラックまたは大型バンを使用する必要があった。

このため、測定装置に対してさらに改変を加え、荷重位をシミュレートしての測定を可能にすると共に、小型軽量化を図る必要があるものと思われた。

## 第5節 結語

本研究課題は、ACL 損傷者の膝関節の回旋可動域の特性を明らかにすること、また ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標としての膝関節の回旋可動域の有用性を、回旋方向別に確認することを目的とした。測定装置として RotorMeter II を用い、ACL 損傷者 13 名 (ACL 群)、健常者 13 名 (対照群) を対象として測定を実施した。対象者は全て成人女性アスリートであり、測定対象側は ACL 群にあっては非損傷側、対照群にあっては両側とし、対照群の測定結果は両側の平均値を採用した。測定条件は、膝関節屈曲角度 90°、負荷トルク 5.0Nm とした。また、全ての対象者に東大式 GJLT を実施した。結果は、以下に記すものであった。

膝関節の回旋可動域は、内旋可動域は ACL 群が  $37.8 \pm 6.13^\circ$ 、対照群が  $31.3 \pm 6.16^\circ$  で、ACL 群が対照群に比して有意に大きい値を示した。外旋可動域は ACL 群が  $50.6 \pm 10.96^\circ$ 、対照群が  $50.8 \pm 8.52^\circ$  であり、総回旋可動域は ACL 群が  $88.4 \pm 14.41^\circ$ 、対照群が  $82.1 \pm 12.71^\circ$  で、外旋可動域および総回旋可動域に有意差は見られなかった。

GJLT スコアは、ACL 群が  $4.3 \pm 1.43$ 、対照群が  $2.7 \pm 1.39$  で、ACL 群が対照群に比して有意に大きい値を示した。

これらの結果から、ACL 損傷者は膝関節の内旋可動域が大きく、また全身の関節弛緩性を有すること、膝関節の内旋可動域が ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標としての有用性を有する可能性が示唆された。

## 注

Anterolateral Ligament については適切な和名が無いため、Halewood and Amis (2015) による表記をそのまま用いた。

## 第 5 章

### 総合討論

#### 第 1 節 本研究の目的

本研究の目的は、臨床現場およびスポーツ現場での適用が可能な膝関節の回旋可動域の測定装置を考案すること、諸条件下での測定を行い膝関節の回旋可動域の特性を明らかにすると共に、ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標としての有用性を検討すること、さらに膝関節の回旋可動域と ACL 損傷との関連を明らかにすることであった。

#### 第 2 節 本研究のまとめ

研究課題 1 においては、臨床現場およびスポーツ現場での適用が可能であると思われる膝関節の回旋可動域の測定装置を開発し、その統計学的な信頼性と妥当性を検証することを目的とした。測定装置 RotorMeter を製作し、健常な一般成人女性 14 名を対象として、2 名の検者が 2 回測定して検者間および検者内信頼性を求めた。また、同じ対象者に対して 3 次元 DLT 法による可動域測定を同時に実施し、RotorMeter による測定結果との相関を求めた。測定側は右側とした。

8.0Nm の負荷トルクによる可動域は、内旋  $43.9^{\circ}\sim 46.8^{\circ}$ 、外旋  $53.6^{\circ}\sim 56.1^{\circ}$  であり、両者の和である総回旋可動域は  $97.7^{\circ}\sim 102.9^{\circ}$  であった。検者内信頼性は  $ICC(1,1) = 0.712\sim 0.872$ 、検者間信頼性は  $ICC(2,2) = 0.737\sim 0.824$  であり、RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域の測定方法の統計学的信頼性が確認された。3 次元 DLT 法および RotorMeter による測定結果の両者には有意な正の相関関係が確認され、RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域の測定方法の統計学的妥当性が確認された。また、RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域測定においては、その測定結果に測定装置と皮膚面との間のずれ、足部および足関節の諸関節の運動、軟部組織の変形による影響が包含されるものと思われた。

研究課題 2 においては、膝関節の回旋可動域の特性を明らかにすること、また ACL 損



傷に対するリスクスクリーニング指標としての有用性の有無を検討することを目的とした。測定装置として RotorMeter II を製作し、健常な一般成人男性 12 名および一般成人女性 11 名を対象として、2 名の検者による測定を 1 回ずつ実施した。測定側は両側とした。測定条件は、膝関節屈曲角度を 30°, 60°, 90°の 3 条件、負荷トルクを 2.5Nm, 5.0Nm, 7.5Nm の 3 条件とした。

全ての測定条件下で、女性は男性に比して有意に大きい回旋可動域を示し、また男女とも左右差は見られなかった。検者間信頼性においては、負荷トルクが 2.5Nm の場合、また膝関節屈曲角度が 30°の場合で良好と判定されないケースが散見された。

これらの結果から、RotorMeter II によって測定された膝関節の回旋可動域が、ACL 損傷リスクに対するスクリーニング指標として有用である可能性が示唆された。また、RotorMeter II を用いた膝関節の回旋可動域の測定においては、測定条件として膝関節 90°屈曲位、および負荷トルク 5.0Nm が望ましいことが示唆された。

研究課題 3 においては、ACL 損傷者の膝関節の回旋可動域の特性を明らかにすること、また ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標としての膝関節の回旋可動域の有用性を、回旋方向別に確認することを目的とした。RotorMeter II を用い、ACL 片側損傷者 13 名 (ACL 群)、健常者 (対照群) 13 名を対象として測定を実施した。対象者は全て成人女性アスリートであり、測定対象側は ACL 群にあっては非損傷側、対照群にあっては両側とし、対照群の測定結果は両側の平均値を採用した。測定条件は、膝関節屈曲角度 90°, 負荷トルク 5.0Nm とした。また、全ての対象者に対して東大式全身関節弛緩性テスト (general joint laxity test, GJLT) を実施した。

膝関節の回旋可動域は、内旋可動域は ACL 群が  $37.8 \pm 6.13^\circ$ 、対照群が  $31.3 \pm 6.16^\circ$  で、ACL 群が対照群に比して有意に大きい値を示した。外旋可動域は ACL 群が  $50.6 \pm 10.96^\circ$ 、対照群が  $50.8 \pm 8.52^\circ$  であり、総回旋可動域は ACL 群が  $88.4 \pm 14.41^\circ$ 、対照群が  $82.1 \pm 12.71^\circ$  で、外旋可動域および総回旋可動域に有意差は見られなかった。GJLT スコアは、ACL 群が  $4.3 \pm 1.43$ 、対照群が  $2.7 \pm 1.39$  で、ACL 群が対照群に比して有意に大きい値を示した。

これらの結果から、本研究で対象とした ACL 損傷者は、膝関節の内旋可動域が大きく、また全身関節弛緩性を有すること、膝関節の内旋可動域が ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標としての有用性を有する可能性が示唆された。

膝関節の回旋可動域と ACL 損傷との関連に関する研究は見られないため、本研究の結果は新たな知見であり、ACL 損傷の予防をはじめとするアスレティックトレーニング分野においての有用な情報となり得るものと思われる。

### 第 3 節 本研究の限界

本研究の限界として、対象者、測定方法、および研究デザインに起因する限界が存在するものと思われる。

#### 3-1. 対象者に起因する限界

本研究では、全ての研究課題において大学生を対象とした。ACL 損傷はより幅広い年齢層で発生しているため、高校生以下の年代、あるいは大学生よりも高い年代の対象者に本研究の結果を適用するには、さらに検討を要するものと思われる。また、研究課題 3 では男性の ACL 損傷者は対象とされなかったことから、男性を対象とした研究が望まれる。

本研究では、女性の対象者における測定時の性周期は統一されていなかった。性周期あるいは性ホルモンが膝関節の弛緩性に影響を与えるという報告があることから、女性対象者における測定時の性周期を統一した上での、さらなる検討が必要であると思われる。

#### 3-2. 測定方法に起因する限界

本研究では、RotorMeter, また RotorMeter II による非侵襲的な測定方法を採用した。このため、本研究における測定結果には、膝関節、すなわち脛骨―大腿骨間の回旋の他、足関節周囲および足部の諸関節の運動、大腿部および下腿部、足部の軟部組織の変形、

あるいは測定装置と皮膚面の間のずれによる影響が包含されるものと思われる。このため、MRI 等を用いて純粋な脛骨－大腿骨間の回旋量を測定し、本研究の結果との相関関係を検討する必要があるものと思われる。

ACL 損傷はスポーツ活動中の着地動作、繰り返し動作、ストップ動作で好発するとされるが、これらはいずれも荷重位で行われる動作である。しかしながら本研究は、いずれも非荷重位で測定が行われたため、実際の ACL 損傷の発生局面での膝関節の回旋と本研究の結果との関連は明らかではない。よって、測定装置の改変によって、荷重位、あるいは荷重位をシミュレーションした肢位での測定を実施する必要があるものと思われる。

### 3-3. 研究デザインに起因する限界

本研究の研究課題 3 は、後ろ向き研究としてデザインされたものであった。このため、研究課題 3 で得られた膝関節の回旋可動域と ACL 損傷との関連性に、バイアスが介在している可能性が危惧される。このため今後、前向きにデザインされた研究を行うことで、研究成果の信頼性をさらに向上させることが求められる。

## 第 4 節 今後の展望

ACL 再建膝において、回旋可動域の制限に起因するランニング時、あるいはジャンプ着地時の膝関節の異常回旋が報告されている。このため、ACL 再建術後のアスレティックリハビリテーションでの経過観察において、回旋可動域を経時的に評価する必要があることが示唆される。また、ACL 損傷膝に対して施行されるテーピングには、膝関節あるいは下腿の回旋を制限するスパイラルテープと呼ばれるテープが用いられるが、その効果を定量的に検証した報告は見られない。このように、膝関節の回旋可動域の測定と評価は、ACL 損傷の予防のみならず、ACL 再建術後の経過観察や再発予防策においてもその有用性があるものと思われる。本研究で開発された測定方法は、膝関節の回旋弛緩性の評価方法として一定の成果を得たが、上記のようにアスレティックトレーニング

分野で広く活用されることが期待できる。

しかし、本研究で用いた RotorMeter II は重量、外形寸法共に決して小さくなく、運搬・移動上の利便性に欠けるものであった。今後は測定装置の軽量小型化を図り、多様な測定現場での運用を容易にすることが求められよう。

## 第 6 章

### 結論

本研究の目的は、ACL 損傷のリスクスクリーニング指標としての膝関節の回旋可動域の有用性を検討することであった。本研究で得られた結果を、以下に記す。

1. RotorMeter を用いた膝関節の回旋可動域の測定方法の、統計学的信頼性と妥当性が確認された。
2. RotorMeter II によって測定された膝関節の回旋可動域には性差が存在することから、ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標として有用である可能性が示唆された。また、RotorMeter II を用いた膝関節の回旋可動域の測定においては、測定条件として膝関節 90°屈曲位、および負荷トルク 5.0Nm が望ましいことが示唆された。
3. ACL 損傷者は膝関節の内旋可動域が健常者に比して大きいことから、膝関節の内旋可動域が ACL 損傷に対するリスクスクリーニング指標としての有用性を有することが示唆された。

上記の結果は、膝関節の回旋可動域と ACL 損傷との関連に関する新たな知見であり、ACL 損傷の予防においての有用な情報となり得るものと思われる。

## 付記

本研究において、開示すべき利益相反は存在しない。また本研究の一部は、下記の通り発表された。

### 【学術論文】

1. Seiya Masegi, Hitoshi Shiraki, Shumpei Miyakawa (2018). Knee Rotation in Relation to Laterality, Sex, Applied Torque, and Knee Angle. Journal of Sports Science, Vol.6, No.3: 209-217
2. 柵木聖也, 金森章浩, 白木仁, 宮川俊平 (2016). 回転円盤型下腿回旋測定器“RotorMeter”を用いた下腿の回旋可動域の測定. 日本臨床スポーツ医学会誌, 24 巻 2 号, 261-268
3. 柵木聖也, 石倉孝樹, 石関友也, 宮川俊平 (2014). 回転円盤型角度計測器“RotorMeter”を用いた膝関節の回旋可動域の測定方法の信頼性と妥当性の検討. 新潟医療福祉学会誌, 13 巻 2 号, 8-14

### 【学会発表】

1. Seiya Masegi, Shumpei Miyakawa (2017). Knee Rotation Related to Gender, Knee Angle and Applied Torque. 22nd Annual ECSS Congress (Essen, Germany)
2. Seiya Masegi, Shumpei Miyakawa (2017). Knee Rotation Related to Knee Angle and Applied Torque. 2017 ACSM Annual Meeting (Denver, USA)
3. Seiya Masegi, Akihiro Kanamori, Hitoshi Shiraki, Shumpei Miyakawa (2016). Evaluation of Reliability and Validity of A New Device to Measure Knee Rotation. 2016 ACSM Annual Meeting (Boston, USA)
4. 柵木聖也, 宮川俊平, 白木仁, 金森章浩 (2015). 下腿の回旋可動域に左右差および性差は存在するか. 第 26 回日本臨床スポーツ医学会学術集会 (兵庫県神戸市)

5. 柵木聖也, 宮川俊平, 白木仁, 金森章浩 (2014). 回転円盤型下腿回旋測定器 "RotorMeter"を用いた膝関節の回旋可動域の測定. 第 25 回日本臨床スポーツ医学会学術集会 (東京都北区)
6. 柵木聖也, 石関友也 (2013). 回転円盤型計測器を用いた下腿部の回旋方向可動域の計測. 日本アスレティックトレーニング学会第 2 回学術集会 (千葉県勝浦市)
7. 柵木聖也 (2012). 回転円盤型計測器を用いた膝関節回旋方向可動域計測の信頼性と妥当性の検討. 第 67 回日本体力医学会大会 (岐阜県岐阜市)
8. 柵木聖也 (2011). 回転円盤型計測器を用いた膝関節回旋可動域の測定. 第 66 回日本体力医学会大会 (山口県山口市)

## 引用文献

- Agel, J., Arendt, E. A., & Bershadsky, B. (2005). Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: A 13-year review. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(4), 524-531. doi:10.1177/0363546504269937
- Aglietti, P., Giron, F., Losco, M., Cuomo, P., Ciardullo, A., & Mondanelli, N. (2010). Comparison between single- and double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective, randomized, single-blinded clinical trial. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(1), 25-34. doi:10.1177/0363546509347096
- Ahrens, P., Kirchhoff, C., Fischer, F., Heinrich, P., Eisenhart-Rothe, R. v., Hinterwimmer, S., . . . Lorenz, S. G. F. (2011). A novel tool for objective assessment of femorotibial rotation: A cadaver study. *International Orthopaedics*, 35(11), 1611-1620. doi:10.1007/s00264-010-1159-5
- Almquist, P. O., Arnbjörnsson, A., Zätterström, R., Ryd, L., Ekdahl, C., & Fridén, T. (2002). Evaluation of an external device measuring knee joint rotation: An in vivo study with simultaneous roentgen stereometric analysis. *Journal of Orthopaedic Research*, 20(3), 427-432. doi:10.1016/S0736-0266(01)00148-6
- Almquist, P. O., Ekdahl, C., Isberg, P., & Fridén, T. (2012). Knee rotation in healthy individuals related to age and gender. *Journal of Orthopaedic Research*, 31(1), 23-28.
- Anderson, A. F., Lipscomb, A. B., Liudahl, K. J., & Addlestone, R. B. (1987). Analysis of the intercondylar notch by computed tomography. *The American Journal of Sports Medicine*, 15(6), 547-552.
- Anderson, A. F., Dome, D. C., Gautam, S., Awh, M. H., & Rennirt, G. W. (2001). Correlation of anthropometric measurements, strength, anterior cruciate ligament size, and intercondylar notch characteristics to sex differences in anterior cruciate ligament tear rates. *The American Journal of Sports Medicine*, 29(1), 58-66. doi:10.1177/03635465010290011501
- Andriacchi, T. P., & Birac, D. (1993). Functional testing in the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 288, 40-47.
- Andriacchi, T. P., Alexander, E. J., Toney, M. K., Dyrby, C., & Sum, J. (1998). A point cluster method for in vivo motion analysis: Applied to a study of knee kinematics. *Journal of Biomechanical Engineering*, 120(6), 743-749.
- Arendt, E. A., Agel, J., & Dick, R. (1999). Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men and women. *Journal of Athletic Training*, 34(2), 86-92.
- Arnold, J. A., Coker, T. P., Heaton, L. M., Park, J. P., & Harris, W. D. (1979). Natural history of anterior cruciate tears. *The American Journal of Sports Medicine*, 7(6), 305-313.



- Bach Jr, B. R., Warren, R. F., & Wickiewicz, T. L. (1988). The pivot shift phenomenon: Results and description of a modified clinical test for anterior cruciate ligament insufficiency. *The American Journal of Sports Medicine*, 16(6), 571-576.
- Barrack, R., Skinner, H., Brunet, M., & Cook, S. (1983). Joint laxity and proprioception in the knee. *The Physician and Sportsmedicine*, 11(6), 130-135.
- Beckett, M. E., Massie, D. L., Bowers, K. D., & Stoll, D. A. (1992). Incidence of hyperpronation in the ACL injured knee: A clinical perspective. *Journal of Athletic Training*, 27(1), 58-62.
- Beighton, P., Solomon, L., & Soskolne, C. L. (1973). Articular mobility in an african population. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 32(5), 413-418.
- Belanger, M. J., Moore, D. C., Joseph J. Crisco III, Fadale, P. D., Hulstyn, M. J., & Ehrlich, M. G. (2004). Knee laxity does not vary with the menstrual cycle, before or after exercise. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(5), 1150-1157.  
doi:10.1177/0363546503261360
- Bell, R. D., Shultz, S. J., Wideman, L., & Henrich, V. C. (2012). Collagen gene variants previously associated with anterior cruciate ligament injury risk are also associated with joint laxity. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 4(4), 312-318.  
doi:10.1177/1941738112446684
- Benjaminse, A., Gokeler, A., & van der Schans, C. P. (2006). Clinical diagnosis of an anterior cruciate ligament rupture: A meta-analysis. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 36(5), 267-288.
- Bignozzi, S., Zaffagnini, S., Lopomo, N., Fu, F. H., Irrgang, J. J., & Marcacci, M. (2010). Clinical relevance of static and dynamic tests after anatomical double-bundle ACL reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 18(1), 37-42.  
doi:10.1007/s00167-009-0853-6
- Bizzini, M., Junge, A., & Dvorak, J. (2013). Implementation of the FIFA 11+ football warm up program: How to approach and convince the football associations to invest in prevention. *British Journal of Sports Medicine*, 47(12), 803-806.  
doi:10.1136/bjsports-2012-092124 [doi]
- Boden, B. P., Dean, G. S., Feagin, J. A., & Garrett, W. E. (2000). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics*, 23(6), 573-578.
- Bradley, J. P., Klimkiewicz, J. J., Rytel, M. J., & Powell, J. W. (2002). Anterior cruciate ligament injuries in the national football league: Epidemiology and current treatment trends among team physicians. *Arthroscopy*, 18(5), 502-509.
- Brandon, M. L., Haynes, P. T., Bonamo, J. R., Flynn, M. I., Barrett, G. R., & Sherman, M. F. (2006). The association between posterior-inferior tibial slope and anterior cruciate ligament insufficiency. *Arthroscopy*, 22(8), 894-899.

- Bråten, M., Terjesen, T., & Rossvoll, I. (1992). Femoral anteversion in normal adults. ultrasound measurements in 50 men and 50 women. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 63(1), 29-32. doi:10.3109/17453679209154844
- Bull, A. M. J., & Amis, A. A. (1998). The pivot-shift phenomenon: A clinical and biomechanical perspective. *The Knee*, 5(3), 141-158. doi:10.1016/S0968-0160(97)10027-8
- Butler, D., Noyes, F., & Grood, E. (1980). Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 62(2), 259-270.
- Caraffa, A., Cerulli, G., Proietti, M., Aisa, G., & Rizzo, A. (1996). Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 4(1), 19-21. doi:10.1007/BF01565992
- Cerulli, G., Benoit, D. L., Lamontagne, M., Caraffa, A., & Liti, A. (2003). In vivo anterior cruciate ligament strain behaviour during a rapid deceleration movement: Case report. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 11(5), 307-311. doi:10.1007/s00167-003-0403-6
- Chandrashekar, N., Slauterbeck, J., & Hashemi, J. (2005). Sex-based differences in the anthropometric characteristics of the anterior cruciate ligament and its relation to intercondylar notch geometry: A cadaveric study. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(10), 1492-1498. doi:10.1177/0363546504274149
- Chao, E. Y., Neluheni, E. V., Hsu, R. W., & Paley, D. (1994). Biomechanics of malalignment. *The Orthopedic Clinics of North America*, 25(3), 379-386.
- Chappell, J. D., Yu, B., Kirkendall, D. T., & Garrett, W. E. (2002). A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *The American Journal of Sports Medicine*, 30(2), 261-267. doi:10.1177/03635465020300021901
- Chappell, J. D., Herman, D. C., Knight, B. S., Kirkendall, D. T., Garrett, W. E., & Yu, B. (2005). Effect of fatigue on knee kinetics and kinematics in stop-jump tasks. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(7), 1022-1029. doi:10.1177/0363546504273047
- Chappell, J. D., Creighton, R. A., Giuliani, C., Yu, B., & Garrett, W. E. (2007). Kinematics and electromyography of landing preparation in vertical stop-jump: Risks for noncontact anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(2), 235-241. doi:10.1177/0363546506294077
- Charlton, W. P. H., John, T. A. S., Ciccotti, M. G., Harrison, N., & Schweitzer, M. (2002). Differences in femoral notch anatomy between men and women: A magnetic resonance imaging study. *The American Journal of Sports Medicine*, 30(3), 329-333. doi:10.1177/03635465020300030501

- Chouliaras, V., Ristanis, S., Moraiti, C., Stergiou, N., & Georgoulis, A. D. (2007). Effectiveness of reconstruction of the anterior cruciate ligament with quadrupled hamstrings and bone-patellar tendon-bone autografts. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(2), 189. doi:10.1177/0363546506296040
- Covey, D. C., Sapega, A. A., & Riffenburgh, R. H. (2008). The effects of sequential sectioning of defined posterior cruciate ligament fiber regions on translational knee motion. *The American Journal of Sports Medicine*, 36(3), 480-486. doi:10.1177/0363546507311097
- Daniel, D. M., Malcom, L. L., Losse, G., Stone, M. L., Sachs, R., & Burks, R. (1985). Instrumented measurement of anterior laxity of the knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery.American Volume*, 67(5), 720-726.
- Davis, T. J., Shelbourne, K. D., & Klotwyk, T. E. (1999). Correlation of the intercondylar notch width of the femur to the width of the anterior and posterior cruciate ligaments. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 7(4), 209-214. doi:10.1007/s001670050150
- Decker, M. J., Torry, M. R., Wyland, D. J., Sterett, W. I., & Richard Steadman, J. (2003). Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clinical Biomechanics*, 18(7), 662-669. doi:10.1016/S0268-0033(03)00090-1
- Deie, M., Sakamaki, Y., Sumen, Y., Urabe, Y., & Ikuta, Y. (2002). Anterior knee laxity in young women varies with their menstrual cycle. *International Orthopaedics*, 26(3), 154-156. doi:10.1007/s00264-001-0326-0
- Dejour, H., & Bonnin, M. (1994). Tibial translation after anterior cruciate ligament rupture. two radiological tests compared. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 76(5), 745-749.
- Delay, B. S., Smolinski, R. J., Wind, W. M., & Bowman, D. S. (2001). Current practices and opinions in ACL reconstruction and rehabilitation: Results of a survey of the American orthopaedic society for sports medicine. *The American Journal of Knee Surgery*, 14(2), 85-91.
- Dragoo, J. L., Lee, R. S., Benhaim, P., Gerald A. M. Finerman, & Hame, S. L. (2003). Relaxin receptors in the human female anterior cruciate ligament. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(4), 577-584. doi:10.1177/03635465030310041701
- Fagenbaum, R., & Darling, W. G. (2003). Jump landing strategies in male and female college athletes and the implications of such strategies for anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(2), 233-240. doi:10.1177/03635465030310021301
- Feagin, J. A., Jr, & Lambert, K. L. (1985). Mechanism of injury and pathology of anterior cruciate ligament injuries. *The Orthopedic Clinics of North America*, 16(1), 41-45.

- Feller, J. A., Cooper, R., & Webster, K. E. (2002). Current Australian trends in rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *The Knee*, 9(2), 121-126. doi:10.1016/S0968-0160(02)00009-1
- Fleming, B. C., Renstrom, P. A., Beynnon, B. D., Engstrom, B., Peura, G. D., Badger, G. J., & Johnson, R. J. (2001). The effect of weightbearing and external loading on anterior cruciate ligament strain. *Journal of Biomechanics*, 34(2), 163-170. doi:10.1016/S0021-9290(00)00154-8
- Flynn, R. K., Pedersen, C. L., Birmingham, T. B., Kirkley, A., Jackowski, D., & Fowler, P. J. (2005). The familial predisposition toward tearing the anterior cruciate ligament: A case control study. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(1), 23-28. doi:10.1177/0363546504265678
- Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2003). Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(10), 1745-1750. doi:10.1249/01.MSS.0000089346.85744.D9
- Ford, K. R., Myer, G. D., Toms, H. E., & Hewett, T. E. (2005). Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(1), 124-129. doi:10.1249/01.MSS.0000150087.95953.C3
- Gilchrist, J., Mandelbaum, B. R., Melancon, H., Ryan, G. W., Silvers, H. J., Griffin, L. Y., . . . Dvorak, J. (2008). A randomized controlled trial to prevent noncontact anterior cruciate ligament injury in female collegiate soccer players. *The American Journal of Sports Medicine*, 36(8), 1476-1483. doi:10.1177/0363546508318188
- Goshima, K., Kitaoka, K., Nakase, J., & Tsuchiya, H. (2014). Familial predisposition to anterior cruciate ligament injury. *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 1(2), 62-66. doi:10.1016/j.asmart.2014.02.002
- Graham, R., Jammes, Y., Delpierre, S., Grimaud, C., & Roussos, C. (1986). The effects of ischemia, lactic acid and hypertonic sodium chloride on phrenic afferent discharge during spontaneous diaphragmatic contraction. *Neuroscience Letters*, 67(3), 257-262. doi:10.1016/0304-3940(86)90318-6
- Griffin, L. Y., Agel, J., Albohm, M. J., Arendt, E. A., Dick, R. W., Garrett, W. E., . . . Ireland, M. L. (2000). Noncontact anterior cruciate ligament injuries: Risk factors and prevention strategies. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 8(3), 141-150.
- Gwinn, D. E., Wilckens, J. H., McDevitt, E. R., Ross, G., & Kao, T. (2000). The relative incidence of anterior cruciate ligament injury in men and women at the united states naval academy. *The American Journal of Sports Medicine*, 28(1), 98-102. doi:10.1177/03635465000280012901
- Halewood, C., & Amis, A. A. (2015). Clinically relevant biomechanics of the knee capsule and ligaments. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 23(10), 2789-2796. doi:10.1007/s00167-015-3594-8

- Hamlet, W. P., Liu, S. H., Panossian, V., & Finerman, G. A. (1997). Primary immunolocalization of androgen target cells in the human anterior cruciate ligament. *Journal of Orthopaedic Research*, 15(5), 657-663. doi:10.1002/jor.1100150505
- Harmon, K. G., & Dick, R. (1998). The relationship of skill level to anterior cruciate ligament injury. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 8(4), 260-265.
- Harner, C. D., Paulos, L. E., Greenwald, A. E., Rosenberg, T. D., & Cooley, V. C. (1994). Detailed analysis of patients with bilateral anterior cruciate ligament injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 22(1), 37-43.
- Haughom, B. D., Souza, R., Schairer, W. W., Li, X., & Ma, C. B. (2012). Evaluating rotational kinematics of the knee in ACL-ruptured and healthy patients using 3.0 tesla magnetic resonance imaging. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 20(4), 663-670.
- Heijne, A., Fleming, B. C., Renstrom, P. A., Peura, G. D., Beynnon, B. D., & Werner, S. (2004). Strain on the anterior cruciate ligament during closed kinetic chain exercises. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(6), 935-941. doi:10.1249/01.MSS.0000128185.55587.A3
- Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2004). Decrease in neuromuscular control about the knee with maturation in female athletes. *The Journal of Bone and Joint Surgery, American Volume*, 86(8), 1601-1608.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt Jr, R. S., Colosimo, A. J., McLean, S. G., . . . Succop, P. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(4), 492-501.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2006). Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 1, mechanisms and risk factors. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(2), 299-311. doi:10.1177/0363546505284183
- Hewett, T. E., Zazulak, B. T., & Myer, G. D. (2007). Effects of the menstrual cycle on anterior cruciate ligament injury risk: A systematic review. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(4), 659-668. doi:10.1177/0363546506295699
- Highgenboten, C. L., Jackson, A., & Meske, N. B. (1989). Genucom, KT-1000, and Stryker knee laxity measuring device comparisons: Device reproducibility and interdevice comparison in asymptomatic subjects. *The American Journal of Sports Medicine*, 17(6), 743-746.
- Hootman, J. M., Dick, R., & Agel, J. (2007). Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: Summary and recommendations for injury prevention initiatives. *Journal of Athletic Training*, 42(2), 311-319.

- Horton, M. G., & Hall, T. L. (1989). Quadriceps femoris muscle angle: Normal values and relationships with gender and selected skeletal measures. *Physical Therapy*, 69(11), 897-901.
- Hoshino, Y., Kuroda, R., Nagamune, K., Yagi, M., Mizuno, K., Yamaguchi, M., . . . Kurosaka, M. (2007). In vivo measurement of the pivot-shift test in the anterior cruciate ligament - deficient knee using an electromagnetic device. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(7), 1098-1104. doi:10.1177/0363546507299447
- Hoshino, Y., Araujo, P., Irrgang, J. J., Fu, F. H., & Musahl, V. (2012). An image analysis method to quantify the lateral pivot shift test. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 20(4), 703-707. doi:10.1007/s00167-011-1845-x
- Hoshino, Y., Araujo, P., Ahldén, M., Samuelsson, K., Muller, B., Hofbauer, M., . . . Sahlgrenska Academy. (2013). Quantitative evaluation of the pivot shift by image analysis using the iPad. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 21(4), 975-980. doi:10.1007/s00167-013-2396-0
- Houck, J. R., Duncan, A., & Haven, K. E. D. (2006). Comparison of frontal plane trunk kinematics and hip and knee moments during anticipated and unanticipated walking and side step cutting tasks. *Gait & Posture*, 24(3), 314-322. doi:10.1016/j.gaitpost.2005.10.005
- Huston, L. J., & Wojtys, E. M. (1996). Neuromuscular performance characteristics in elite female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(4), 427-436.
- Huston, L. J., Vibert, B., Ashton-Miller, J. A., & Wojtys, E. M. (2001). Gender differences in knee angle when landing from a drop-jump. *The American Journal of Knee Surgery*, 14(4), 215-220.
- Hutchinson, M. R., & Ireland, M. L. (1995). Knee injuries in female athletes. *Sports Medicine*, 19(4), 288-302.
- Ibrahim, S. A. R., Hamido, F., Al Misfer, A. K., Mahgoob, A., Ghafar, S. A., & Alhran, H. (2009). Anterior cruciate ligament reconstruction using autologous hamstring double bundle graft compared with single bundle procedures. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 91(10), 1310-1315. doi:10.1302/0301-620X.91B10.21886
- Ireland, M. L. (1999). Anterior cruciate ligament injury in female athletes: Epidemiology. *Journal of Athletic Training*, 34(2), 150-154.
- Ireland, M. L., Ballantyne, B. T., Little, K., & McClay, I. S. (2001). A radiographic analysis of the relationship between the size and shape of the intercondylar notch and anterior cruciate ligament injury. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 9(4), 200-205. doi:10.1007/s001670100197
- Ireland, M. L. (2002). The female ACL: Why is it more prone to injury? *The Orthopedic Clinics of North America*, 33(4), 637-651.

- Irmischer, B. S., Harris, C., Pfeiffer, R. P., DeBeliso, M. A., Adams, K. J., & Shea, K. G. (2004). Effects of a knee ligament injury prevention exercise program on impact forces in women. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(4), 703-707.
- Ishii, Y., Terajima, K., Terashima, S., & Koga, Y. (1997). Three-dimensional kinematics of the human knee with intracortical pin fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 343, 144-150.
- Jansson, A., Saartok, T., Werner, S., & Renstrom, P. (2004). General joint laxity in 1845 swedish school children of different ages: Age- and gender-specific distributions. *Acta Paediatrica*, 93(9), 1202-1206. doi:10.1080/08035250410023971
- Jiang, C. C., Yip, K. M., & Liu, T. K. (1994). Posterior slope angle of the medial tibial plateau. *Journal of the Formosan Medical Association*, 93(6), 509-512.
- Jorn, L. P., Fridén, T., Ryd, L., & Lindstrand, A. (1998). Simultaneous measurements of sagittal knee laxity with an external device and radiostereometric analysis. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 80(1), 169-172. doi:10.1302/0301-620X.80B1.7811
- Kanamori, A., Woo, S. L., Ma, C. B., Zeminski, J., Rudy, T. W., Li, G., & Livesay, G. A. (2000). The forces in the anterior cruciate ligament and knee kinematics during a simulated pivot shift test: A human cadaveric study using robotic technology. *Arthroscopy*, 16(6), 633-639.
- Kapandji, A. I. (2010). 膝伸展位の回旋安定性, カパンジー 機能解剖学. 医歯薬出版, 東京, , 130-135.
- Karageanes, S. J., Blackburn, K., & Vangelos, Z. A. (2000). The association of the menstrual cycle with the laxity of the anterior cruciate ligament in adolescent female athletes. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 10(3), 162-168.
- Kennedy, J. C., Weinberg, H. W., & Wilson, A. S. (1974). The anatomy and function of the anterior cruciate ligament: As determined by clinical and morphological studies. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 56(2), 223-235.
- Kernozek, T. W., Torry, M. R., VAN Hoof, H., Cowley, H., & Tanner, S. (2005). Gender differences in frontal and sagittal plane biomechanics during drop landings. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(6), 1003-1012.
- Khasigian, H. A., Evanski, P. M., & Waugh, T. R. (1978). Body type and rotational laxity of the knee. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 130, 228-232.
- Kim, H. Y., Kim, K. J., Yang, D. S., Jeung, S. W., Choi, H. G., & Choy, W. S. (2015). Screw-home movement of the tibiofemoral joint during normal gait: Three-dimensional analysis. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 7(3), 303-309. doi:10.4055/cios.2015.7.3.303
- Koga, H., Nakamae, A., Shima, Y., Iwasa, J., Myklebust, G., Engebretsen, L., . . . Krosshaug, T. (2010). Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament

- injuries: Knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(11), 2218-2225. doi:10.1177/0363546510373570
- Koga, H., Bahr, R., Myklebust, G., Engebretsen, L., Grund, T., & Krosshaug, T. (2011). Estimating anterior tibial translation from model-based image-matching of a noncontact anterior cruciate ligament injury in professional football: A case report. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 21(3), 271-274.
- Kondo, E., Yasuda, K., Azuma, H., Tanabe, Y., & Yagi, T. (2008). Prospective clinical comparisons of anatomic double-bundle versus single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction procedures in 328 consecutive patients. *The American Journal of Sports Medicine*, 36(9), 1675-1687. doi:10.1177/0363546508317123
- Konig, D. P., Rutt, J., Kumm, D., & Breidenbach, E. (1998). Diagnosis of anterior knee instability. comparison between the Lachman test, the KT-1,000 arthrometer and the ultrasound Lachman test. *Der Unfallchirurg*, 101(3), 209-213.
- Krosshaug, T., & Bahr, R. (2005). A model-based image-matching technique for three-dimensional reconstruction of human motion from uncalibrated video sequences. *Journal of Biomechanics*, 38(4), 919-929. doi:10.1016/j.jbiomech.2004.04.033
- Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B. P., Engebretsen, L., Smith, G., Slauterbeck, J. R., . . . Bahr, R. (2007). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: Video analysis of 39 cases. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(3), 359-367.
- Kuroda, R., Hoshino, Y., Kubo, S., Araki, D., Oka, S., Nagamune, K., & Kurosaka, M. (2012). Similarities and differences of diagnostic manual tests for anterior cruciate ligament insufficiency: A global survey and kinematics assessment. *The American Journal of Sports Medicine*, 40(1), 91-99.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- LaPrade, R. F., & Burnett, Q. M. (1994). Femoral intercondylar notch stenosis and correlation to anterior cruciate ligament injuries: A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 22(2), 198-203.
- Lephart, S. M., Ferris, C. M., Riemann, B. L., Myers, J. B., & Fu, F. H. (2002). Gender differences in strength and lower extremity kinematics during landing. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 401, 162-169.
- Li, G., DeFrate, L. E., Rubash, H. E., & Gill, T. J. (2005). In vivo kinematics of the ACL during weight-bearing knee flexion. *Journal of Orthopaedic Research*, 23(2), 340-344. doi:10.1016/j.orthres.2004.08.006
- Liederbach, M., Dilgen, F. E., & Rose, D. J. (2008). Incidence of anterior cruciate ligament injuries among elite ballet and modern dancers: A 5-year prospective



- study. *The American Journal of Sports Medicine*, 36(9), 1779-1788.  
doi:10.1177/0363546508323644
- Lipps, D. B., Wojtys, E. M., & Ashton-Miller, J. A. (2013). Anterior cruciate ligament fatigue failures in knees subjected to repeated simulated pivot landings. *The American Journal of Sports Medicine*, 41(5), 1058-1066.  
doi:10.1177/0363546513477836
- Liu, S. H., Al - Shaikh, R., Panossian, V., Yang, R., Nelson, S. D., Soleiman, N., . . . Lane, J. M. (1996). Primary immunolocalization of estrogen and progesterone target cells in the human anterior cruciate ligament. *Journal of Orthopaedic Research*, 14(4), 526-533.
- Liu, S. H., Al-Shaikh, R. A., Panossian, V., Finerman, G. A., & Lane, J. M. (1997). Estrogen affects the cellular metabolism of the anterior cruciate ligament: A potential explanation for female athletic injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 25(5), 704-709.
- Livingston, L. A., & Mandigo, J. L. (1999). Bilateral Q angle asymmetry and anterior knee pain syndrome. *Clinical Biomechanics*, 14(1), 7-13. doi:10.1016/S0268-0033(98)00045-X
- Loës, M., Dahlstedt, L. J., & Thomée, R. (2000). A 7-year study on risks and costs of knee injuries in male and female youth participants in 12 sports. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 10(2), 90-97. doi:10.1034/j.1600-0838.2000.010002090.x
- Lopomo, N., Signorelli, C., Bonanzinga, T., Marcheggiani Muccioli, G. M., Visani, A., & Zaffagnini, S. (2012). Quantitative assessment of pivot-shift using inertial sensors. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 20(4), 713-717.  
doi:10.1007/s00167-011-1865-6
- Lorbach, O., Wilmes, P., Maas, S., Zerbe, T., Busch, L., Kohn, D., & Seil, R. (2009a). A non-invasive device to objectively measure tibial rotation: Verification of the device. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 17(7), 756-762.  
doi:10.1007/s00167-009-0756-6
- Lorbach, O., Wilmes, P., Theisen, D., Brockmeyer, M., Maas, S., Kohn, D., & Seil, R. (2009b). Reliability testing of a new device to measure tibial rotation. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 17(8), 920-926. doi:10.1007/s00167-009-0772-6
- Loudon, J. K., Jenkins, W., & Loudon, K. L. (1996). The relationship between static posture and ACL injury in female athletes. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 24(2), 91-97.
- Lund-Hanssen, H., Gannon, J., Engebretsen, L., Holen, K. J., Anda, S., & Vatten, L. (1994). Intercondylar notch width and the risk for anterior cruciate ligament rupture. A case-control study in 46 female handball players. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 65(5), 529-532. doi:10.3109/17453679409000907

- Malinzak, R. A., Colby, S. M., Kirkendall, D. T., Yu, B., & Garrett, W. E. (2001). A comparison of knee joint motion patterns between men and women in selected athletic tasks. *Clinical Biomechanics*, 16(5), 438-445. doi:10.1016/S0268-0033(01)00019-5
- Mandelbaum, B. R., Silvers, H. J., Watanabe, D. S., Knarr, J. F., Thomas, S. D., Griffin, L. Y., . . . Garrett, W. (2005). Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(7), 1003-1010. doi:10.1177/0363546504272261
- Markolf, K. L., Graff-Radford, A., & Amstutz, H. C. (1978). In vivo knee stability. A quantitative assessment using an instrumented clinical testing apparatus. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 60(5), 664-674.
- Markolf, K. L., Gorek, J. F., Kabo, J. M., & Shapiro, M. S. (1990). Direct measurement of resultant forces in the anterior cruciate ligament. an in vitro study performed with a new experimental technique. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 72(4), 557-567.
- Markolf, K. L., Burchfield, D. M., Shapiro, M. M., Shepard, M. F., Finerman, G. A., & Slaughterbeck, J. L. (1995). Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *Journal of Orthopaedic Research*, 13(6), 930-935.
- Matsumoto, H., & Seedhom, B. (1993). Rotation of the tibia in the normal and ligament-deficient knee. A study using biplanar photography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 207(3), 175-184.
- McLean, S. G., Lipfert, S. W., & van den Bogert, A. J. (2004). Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(6), 1008-1016. doi:10.1249/01.MSS.0000128180.51443.83
- McLean, S. G., Huang, X., & van den Bogert, A. J. (2005). Association between lower extremity posture at contact and peak knee valgus moment during sidestepping: Implications for ACL injury. *Clinical Biomechanics*, 20(8), 863-870. doi:10.1016/j.clinbiomech.2005.05.007
- McLean, S. G., Fellin, R. E., Felin, R. E., Suedekum, N., Calabrese, G., Passerallo, A., & Joy, S. (2007). Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 502-514. doi:10.1249/mss.0b013e3180d47f0
- McNair, P., Marshall, R., & Matheson, J. (1990). Important features associated with acute anterior cruciate ligament injury. *The New Zealand Medical Journal*, 103(901), 537-539.
- Meister, K., Talley, M. C., Horodyski, M. B., Indelicato, P. A., Hartzel, J. S., & Batts, J. (1998). Caudal slope of the tibia and its relationship to noncontact injuries to the ACL. *The American Journal of Knee Surgery*, 11(4), 217-219.

- Mensch, J. S., & Amstutz, H. C. (1975). Knee morphology as a guide to knee replacement. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 112, 231-241.
- Messina, D. F., Farney, W. C., & DeLee, J. C. (1999). The incidence of injury in Texas high school basketball. *The American Journal of Sports Medicine*, 27(3), 294-299.
- Meyer, E. G., & Haut, R. C. (2008). Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibiofemoral compression. *Journal of Biomechanics*, 41(16), 3377-3383. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.09.023
- Miller, N. R., Shapiro, R., & McLaughlin, T. M. (1980). A technique for obtaining spatial kinematic parameters of segments of biomechanical systems from cinematographic data. *Journal of Biomechanics*, 13(7), 535-547.
- Mossberg, K. A., & Smith, L. K. (1983). Axial rotation of the knee in women. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 4(4), 236-240.
- Muaidi, Q. I., Nicholson, L. L., & Refshauge, K. M. (2009). Do elite athletes exhibit enhanced proprioceptive acuity, range and strength of knee rotation compared with non-athletes? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 19(1), 103-112. doi:10.1111/j.1600-0838.2008.00783.x
- Muneta, T., Takakuda, K., & Yamamoto, H. (1997). Intercondylar notch width and its relation to the configuration and cross-sectional area of the anterior cruciate ligament: A cadaveric knee study. *The American Journal of Sports Medicine*, 25(1), 69-72.
- Muneta, T., Koga, H., Mochizuki, T., Ju, Y., Hara, K., Nimura, A., . . . Sekiya, I. (2007). A prospective randomized study of 4-strand semitendinosus tendon anterior cruciate ligament reconstruction comparing single-bundle and double-bundle techniques. *Arthroscopy : The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 23(6), 618.
- Muneta, T. (2015). Twenty-year experience of a double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 7(2), 143-151. doi:10.4055/cios.2015.7.2.143
- Musahl, V., Bell, K. M., Tsai, A. G., Costic, R. S., Allaire, R., Zantop, T., . . . Fu, F. H. (2007). Development of a simple device for measurement of rotational knee laxity. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 15(8), 1009-1012. doi:10.1007/s00167-007-0317-9
- Myer, G. D., Ford, K. R., Paterno, M. V., Nick, T. G., & Hewett, T. E. (2008). The effects of generalized joint laxity on risk of anterior cruciate ligament injury in young female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 36(6), 1073-1080. doi:10.1177/0363546507313572
- Myklebust, G., Maehlum, S., Engebretsen, L., Strand, T., & Solheim, E. (1997). Registration of cruciate ligament injuries in Norwegian top level team handball. A

- prospective study covering two seasons. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 7(5), 289-292. doi:10.1111/j.1600-0838.1997.tb00155.x
- Myklebust, G., Maehlum, S., Holm, I., & Bahr, R. (1998). A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 8(3), 149-153. doi:10.1111/j.1600-0838.1998.tb00185.x
- Myklebust, G., Engebretsen, L., Brækken, I. H., Skjølberg, A., Olsen, O., & Bahr, R. (2003). Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players: A prospective intervention study over three seasons. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 13(2), 71-78.
- Myklebust, G., Engebretsen, L., Braekken, I. H., Skjølberg, A., Olsen, O., & Bahr, R. (2007). Prevention of noncontact anterior cruciate ligament injuries in elite and adolescent female team handball athletes. *Instructional Course Lectures*, 56, 407-418.
- Nagano, Y., Ida, H., Akai, M., & Fukubayashi, T. (2007). Gender differences in knee kinematics and muscle activity during single limb drop landing. *The Knee*, 14(3), 218-223. doi:10.1016/j.knee.2006.11.008
- Nawata, K., Teshima, R., Morio, Y., Hagino, H., Enokida, M., & Yamamoto, K. (1999). Anterior-posterior knee laxity increased by exercise - quantitative evaluation of physiologic changes. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 70(3), 261-264. doi:10.3109/17453679908997803
- Neumann, D. A. (2012). 膝関節, 筋骨格系のキネシオロジー. 医歯薬出版, 東京, 567-628.
- Nguyen, A., & Shultz, S. J. (2007). Sex differences in clinical measures of lower extremity alignment. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 37(7), 389-398.
- Noyes, F. R., Grood, E. S., Cummings, J. F., & Wroble, R. R. (1991). An analysis of the pivot shift phenomenon: The knee motions and subluxations induced by different examiners. *The American Journal of Sports Medicine*, 19(2), 148-155.
- Olsen, O. E., Myklebust, G., Engebretsen, L., Holme, I., & Bahr, R. (2003). Relationship between floor type and risk of ACL injury in team handball. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13(5), 299-304. doi:10.1034/j.1600-0838.2003.00329.x
- Olsen, O., Myklebust, G., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004). Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: A systematic video analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(4), 1002-1012. doi:10.1177/0363546503261724
- Olsen, O., Myklebust, G., Engebretsen, L., Holme, I., & Bahr, R. (2005). Exercises to prevent lower limb injuries in youth sports: Cluster randomised controlled trial. *British Medical Journal*, 330(7489), 449-452. doi:10.1136/bmj.38330.632801.8F

- Omi, Y., Sugimoto, D., Kuriyama, S., Kurihara, T., Miyamoto, K., Yun, S., . . . Hirose, N. (2018). Effect of hip-focused injury prevention training for anterior cruciate ligament injury reduction in female basketball players: A 12-year prospective intervention study. *The American Journal of Sports Medicine*, 46(4), 852-861. doi:10.1177/0363546517749474
- Pantano, K. J., White, S. C., Gilchrist, L. A., & Leddy, J. (2005). Differences in peak knee valgus angles between individuals with high and low Q-angles during a single limb squat. *Clinical Biomechanics*, 20(9), 966-972. doi:10.1016/j.clinbiomech.2005.05.008
- Park, S. E., DeFrate, L. E., Suggs, J. F., Gill, T. J., Rubash, H. E., & Li, G. (2005). The change in length of the medial and lateral collateral ligaments during in vivo knee flexion. *The Knee*, 12(5), 377-382. doi:10.1016/j.knee.2004.12.011
- Parkkari, J., Pasanen, K., Mattila, V. M., Kannus, P., & Rimpelä, A. (2008). The risk for a cruciate ligament injury of the knee in adolescents and young adults: A population-based cohort study of 46 500 people with a 9 year follow-up. *British Journal of Sports Medicine*, 42(6), 422-426. doi:10.1136/bjism.2008.046185
- Pfeiffer, R. P., Shea, K. G., Roberts, D., Grandstrand, S., & Bond, L. (2006). Lack of effect of a knee ligament injury prevention program on the incidence of noncontact anterior cruciate ligament injury. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 88(8), 1769-1774. doi:10.2106/JBJS.E.00616
- Pfeiffer, T. R., Kanakamedala, A. C., Herbst, E., Nagai, K., Murphy, C., Burnham, J. M., . . . Musahl, V. (2018). Female sex is associated with greater rotatory knee laxity in collegiate athletes. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26(5), 1319-1325. doi:10.1007/s00167-017-4684-6
- Pollard, C. D., Davis, I. M., & Hamill, J. (2004). Influence of gender on hip and knee mechanics during a randomly cued cutting maneuver. *Clinical Biomechanics*, 19(10), 1022-1031. doi:10.1016/j.clinbiomech.2004.07.007
- Posthumus, M., September, A. V., Keegan, M., O'Cuinneagain, D., Van der Merwe, W., Schwellnus, M. P., & Collins, M. (2009). Genetic risk factors for anterior cruciate ligament ruptures: COL1A1 gene variant. *British Journal of Sports Medicine*, 43(5), 352-356. doi:10.1136/bjism.2008.056150
- Posthumus, M., September, A. V., Schwellnus, M. P., & Collins, M. (2010a). The COL5A1 gene and musculoskeletal soft-tissue injuries. *South African Journal of Sports Medicine*, 22(2), 38-41.
- Posthumus, M., September, A. V., O'Cuinneagain, D., van der Merwe, W., Schwellnus, M. P., & Collins, M. (2010b). The association between the COL12A1 gene and anterior cruciate ligament ruptures. *British Journal of Sports Medicine*, 44(16), 1160-1165. doi:10.1136/bjism.2009.060756
- Posthumus, M., Collins, M., van der Merwe, L., O'Cuinneagain, D., van der Merwe, W., Ribbans, W. J., . . . Raleigh, S. M. (2012). Matrix metalloproteinase genes on

- chromosome 11q22 and the risk of anterior cruciate ligament (ACL) rupture. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22(4), 523-533. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01270.x
- Ramesh, R., Von Arx, O., Azzopardi, T., & Schranz, P. J. (2005). The risk of anterior cruciate ligament rupture with generalised joint laxity. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 87(6), 800-803. doi:10.1302/0301-620X.87B6.15833
- Riemann, B. L., & Lephart, S. M. (2002a). The sensorimotor system, part I: The physiologic basis of functional joint stability. *Journal of Athletic Training*, 37(1), 71-79.
- Riemann, B. L., & Lephart, S. M. (2002b). The sensorimotor system, part II: The role of proprioception in motor control and functional joint stability. *Journal of Athletic Training*, 37(1), 80-84.
- Ristanis, S., Stergiou, N., Patras, K., Tsepis, E., Moraiti, C., & Georgoulis, A. D. (2006). Follow-up evaluation 2 years after ACL reconstruction with bone-patellar tendon-bone graft shows that excessive tibial rotation persists. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 16(2), 111-116.
- Rosene, J. M., & Fogarty, T. D. (1999). Anterior tibial translation in collegiate athletes with normal anterior cruciate ligament integrity. *Journal of Athletic Training*, 34(2), 93-98.
- Rozzi, S. L., Lephart, S. M., Gear, W. S., & Fu, F. H. (1999). Knee joint laxity and neuromuscular characteristics of male and female soccer and basketball players. *The American Journal of Sports Medicine*, 27(3), 312-319. doi:10.1177/03635465990270030801
- Sakane, M., Fox, R. J., Woo, S. L., Livesay, G. A., Li, G., & Fu, F. H. (1997). In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads. *Journal of Orthopaedic Research*, 15(2), 285-293. doi:10.1002/jor.1100150219
- Salci, Y., Kentel, B. B., Heycan, C., Akin, S., & Korkusuz, F. (2004). Comparison of landing maneuvers between male and female college volleyball players. *Clinical Biomechanics*, 19(6), 622-628. doi:10.1016/j.clinbiomech.2004.03.006
- Sanders, T. L., Maradit Kremers, H., Bryan, A. J., Larson, D. R., Dahm, D. L., Levy, B. A., . . . Krych, A. J. (2016). Incidence of anterior cruciate ligament tears and reconstruction: A 21-year population-based study. *The American Journal of Sports Medicine*, 44(6), 1502-1507. doi:10.1177/0363546516629944
- Schickendantz, M. S., & Weiker, G. G. (1993). The predictive value of radiographs in the evaluation of unilateral and bilateral anterior cruciate ligament injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 21(1), 110-113.

- Shelbourne, K. D., Davis, T. J., & Klotwyk, T. E. (1998). The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears. *The American Journal of Sports Medicine*, 26(3), 402-408.
- Shelbourne, K. D., Gray, T., & Benner, R. W. (2007). Intercondylar notch width measurement differences between African American and white men and women with intact anterior cruciate ligament knees. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(8), 1304-1307. doi:10.1177/0363546507300060
- Shoemaker, S. C., & Markolf, K. L. (1982). In vivo rotatory knee stability. ligamentous and muscular contributions. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 64(2), 208-216.
- Shultz, S. J., Sander, T. C., Kirk, S. E., & Perrin, D. H. (2005). Sex differences in knee joint laxity change across the female menstrual cycle. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 45(4), 594-603.
- Shultz, S. J., Shimokochi, Y., Nguyen, A., Schmitz, R. J., Beynnon, B. D., & Perrin, D. H. (2007a). Measurement of varus–valgus and internal–external rotational knee laxities in vivo - part I: Assessment of measurement reliability and bilateral asymmetry. *Journal of Orthopaedic Research*, 25(8), 981-988. doi:10.1002/jor.20397
- Shultz, S. J., Shimokochi, Y., Nguyen, A., Schmitz, R. J., Beynnon, B. D., & Perrin, D. H. (2007b). Measurement of varus–valgus and internal–external rotational knee laxities in vivo - part II: Relationship with anterior–posterior and general joint laxity in males and females. *Journal of Orthopaedic Research*, 25(8), 989-996. doi:10.1002/jor.20398
- Sigward, S. M., & Powers, C. M. (2006). The influence of gender on knee kinematics, kinetics and muscle activation patterns during side-step cutting. *Clinical Biomechanics*, 21(1), 41-48. doi:10.1016/j.clinbiomech.2005.08.001
- Silvers-Granelli, H., Mandelbaum, B., Adeniji, O., Insler, S., Bizzini, M., Pohlig, R., . . . Dvorak, J. (2015). Efficacy of the FIFA 11 injury prevention program in the collegiate male soccer player. *The American Journal of Sports Medicine*, 43(11), 2628-2637.
- Silvers-Granelli, H. J., Bizzini, M., Arundale, A., Mandelbaum, B. R., & Snyder-Mackler, L. (2017). Does the FIFA 11+ Injury prevention program reduce the incidence of ACL injury in male soccer players? *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 475(10), 2447-2455.
- Slauterbeck, J., Clevenger, C., Lundberg, W., & Burchfield, D. M. (1999). Estrogen level alters the failure load of the rabbit anterior cruciate ligament. *Journal of Orthopaedic Research*, 17(3), 405-408. doi:10.1002/jor.1100170316
- Slocum, D. B., James, S. L., Larson, R. L., & Singer, K. M. (1976). Clinical test for anterolateral rotary instability of the knee. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (118), 63-69.

- Smith, J., Szczerba, J. E., Arnold, B. L., Perrin, D. H., & Martin, D. E. (1997). Role of hyperpronation as a possible risk factor for anterior cruciate ligament injuries. *Journal of Athletic Training*, 32(1), 25-28.
- Souryal, T. O., Moore, H. A., & Evans, J. P. (1988). Bilaterality in anterior cruciate ligament injuries: Associated intercondylar notch stenosis. *The American Journal of Sports Medicine*, 16(5), 449-454.
- Staeubli, H., Adam, O., Becker, W., & Burgkart, R. (1999). Anterior cruciate ligament and intercondylar notch in the coronal oblique plane: Anatomy complemented by magnetic resonance imaging in cruciate ligament - intact knees. *Arthroscopy*, 15(4), 349-359.
- Steffen, K., Myklebust, G., Olsen, O. E., Holme, I., & Bahr, R. (2008). Preventing injuries in female youth football - a cluster-randomized controlled trial. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(5), 605-614. doi:10.1111/j.1600-0838.2007.00703.x
- Stijak, L., Herzog, R. F., & Schai, P. (2008). Is there an influence of the tibial slope of the lateral condyle on the ACL lesion?: A case-control study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 16(2), 112-117. doi:10.1007/s00167-007-0438-1
- Strickland, S. M., Belknap, T. W., Turner, S. A., Wright, T. M., & Hannafin, J. A. (2003). Lack of hormonal influences on mechanical properties of sheep knee ligaments. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(2), 210-215. doi:10.1177/03635465030310020901
- Swanik, C. B., Covassin, T., Stearne, D. J., & Schatz, P. (2007). The relationship between neurocognitive function and noncontact anterior cruciate ligament injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(6), 943-948. doi:10.1177/0363546507299532
- Takahashi, S., & Okuwaki, T. (2017). Epidemiological survey of anterior cruciate ligament injury in Japanese junior high school and high school athletes: Cross-sectional study. *Research in Sports Medicine (Print)*, 25(3), 266-276.
- Tashman, S., Collon, D., Anderson, K., Kolowich, P., & Anderst, W. (2004). Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament reconstruction. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(4), 975-983. doi:10.1177/0363546503261709
- Teitz, C. C., Lind, B. K., & Sacks, B. M. (1997). Symmetry of the femoral notch width index. *The American Journal of Sports Medicine*, 25(5), 687-690.
- Thorborg, K., Krommes, K. K., Esteve, E., Clausen, M. B., Bartels, E. M., & Rathleff, M. S. (2017). Effect of specific exercise-based football injury prevention programmes on the overall injury rate in football: A systematic review and meta-analysis of the FIFA 11 and 11+ programmes. *British Journal of Sports Medicine*, 51(7), 562-571. doi:10.1136/bjsports-2016-097066



- Todd, G., Butler, J. E., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2005). Hyperthermia: A failure of the motor cortex and the muscle. *The Journal of Physiology*, 563(2), 621-631. doi:10.1113/jphysiol.2004.077115
- Trojian, T. H., & Collins, S. (2006). The anterior cruciate ligament tear rate varies by race in professional women's basketball. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(6), 895-898. doi:10.1177/0363546505284384
- Tsai, A. G., Musahl, V., Steckel, H., Bell, K. M., Zantop, T., Irrgang, J. J., & Fu, F. H. (2008). Rotational knee laxity: Reliability of a simple measurement device in vivo. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 9(1), 35-43. doi:10.1186/1471-2474-9-35
- Uhorchak, J. M., Scoville, C. R., Williams, G. N., Arciero, R. A., St Pierre, P., & Taylor, D. C. (2003). Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: A prospective four-year evaluation of 859 west point cadets. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(6), 831-842.
- Utturkar, G. M., Irribarra, L. A., Taylor, K. A., Spritzer, C. E., Taylor, D. C., Garrett, W. E., & DeFrate, L. E. (2013). The effects of a valgus collapse knee position on in vivo ACL elongation. *Annals of Biomedical Engineering*, 41(1), 123-130. doi:10.1007/s10439-012-0629-x
- van Mechelen, W., Hlobil, H., & Kemper, H. C. (1992). Incidence, severity, aetiology and prevention of sports injuries. A review of concepts. *Sports Medicine*, 14(2), 82-99.
- Warren, D. Y., Liu, S. H., Hatch, J. D., Panossian, V., & Finerman, G. A. (1999). Effect of estrogen on cellular metabolism of the human anterior cruciate ligament. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 366, 229-238.
- Warren, D. Y., Panossian, V., Hatch, J. D., Liu, S. H., & Finerman, G. A. (2001). Combined effects of estrogen and progesterone on the anterior cruciate ligament. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 383, 268-281.
- Weesner, C. L., Albohm, M. J., & Ritter, M. A. (1986). A comparison of anterior and posterior cruciate ligament laxity between female and male basketball players. *The Physician and Sportsmedicine*, 14(5), 149-154.
- Wojtys, E. M., Huston, L. J., Lindenfeld, T. N., Hewett, T. E., & Greenfield, M. L. V. H. (1998). Association between the menstrual cycle and anterior cruciate ligament injuries in female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 26(5), 614-619. doi:10.1177/03635465980260050301
- Woo, S. L., Hollis, J. M., Adams, D. J., Lyon, R. M., & Takai, S. (1991). Tensile properties of the human femur-anterior cruciate ligament-tibia complex: The effects of specimen age and orientation. *The American Journal of Sports Medicine*, 19(3), 217-225.
- Woodford-Rogers, B., Cyphert, L., & Denegar, C. R. (1994). Risk factors for anterior cruciate ligament injury in high school and college athletes. *Journal of Athletic Training*, 29(4), 343-346.

- Woodland, L. H., & Francis, R. S. (1992). Parameters and comparisons of the quadriceps angle of college-aged men and women in the supine and standing positions. *The American Journal of Sports Medicine*, 20(2), 208-211.
- Yasuda, K., Erickson, A. R., Beynnon, B. D., Johnson, R. J., & Pope, M. H. (1993). Dynamic elongation behavior in the medical collateral and anterior cruciate ligaments during lateral impact loading. *Journal of Orthopaedic Research*, 11(2), 190-198.
- Yasuda, K., Kondo, E., Ichiyama, H., Tanabe, Y., & Tohyama, H. (2006). Clinical evaluation of anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction procedure using hamstring tendon grafts: Comparisons among 3 different procedures. *The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 22(3), 240.
- Yoshioka, Y., & Cooke, T. D. V. (1987). Femoral anteversion: Assessment based on function axes. *Journal of Orthopaedic Research*, 5(1), 86-91.
- Yu, B., McClure, S. B., Onate, J. A., Guskiewicz, K. M., Kirkendall, D. T., & Garrett, W. E. (2005). Age and gender effects on lower extremity kinematics of youth soccer players in a stop-jump task. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(9), 1356-1364. doi:10.1177/0363546504273049
- Yu, B., Lin, C., & Garrett, W. E. (2006). Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clinical Biomechanics*, 21(3), 297-305. doi:10.1016/j.clinbiomech.2005.11.003
- Zarins, B., Rowe, C. R., Harris, B. A., & Watkins, M. P. (1983). Rotational motion of the knee. *The American Journal of Sports Medicine*, 11(3), 152-156.
- Zazulak, B. T., Hewett, T. E., Reeves, N. P., Goldberg, B., & Cholewicki, J. (2007a). The effects of core proprioception on knee injury: A prospective biomechanical-epidemiological study. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(3), 368-373. doi:10.1177/0363546506297909
- Zazulak, B. T., Hewett, T. E., Reeves, N. P., Goldberg, B., & Cholewicki, J. (2007b). Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: Prospective biomechanical-epidemiologic study. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(7), 1123-1130. doi:10.1177/0363546507301585
- 中嶋寛之, 黒澤尚, 福林徹, 増島篤, 入江一憲, 村瀬研一, 大久保夫美子, 横江清司. (1984). 女子体操選手における前十字靱帯損傷. *整形・災害外科*, 27(5), 609-613.
- 川野圭朗, 小橋昌司, 津森洋平, 柴沼均, 今脇節朗, 八木正義, ... 畑豊. (2008). 複合慣性センサを用いた周波数解析による膝不安定性定量化システム. *電子情報通信学会技術研究報告*, 107(461), 457-462.
- 石田高康, 深堀雄蔵, 緒方公介, 張敬範, & 野見山宏. (1993). MRI を用いた膝後十字靱帯緊張パターンの測定. *整形外科と災害外科*, 42(3), 1375-1378.

- 竹田直, 渡邊裕, & 鳥居俊. (1997). 女子バスケットボール選手の膝関節動揺性と全身関節弛緩性との関連性. 体力科学, 46(3), 273-278. doi:10.7600/jspfsm1949.46.273
- 米本恭, 石神重, & 近藤徹. (1995). 関節可動域表示ならびに測定法. リハビリテーション医学, 32(4), 207-217. doi:10.2490/jjrm1963.32.207
- 藤田恒太郎, & 寺田春水. (1978). 下肢の骨格, 生体観察. 南山堂, 東京, , 43-48.

## 謝辞

本稿を終えるにあたり，終始，懇切丁寧なご指導を賜りました指導教官の筑波大学体育系 宮川俊平先生に，深く御礼申し上げます．また，折に触れて示唆に溢れるアドバイスを頂戴しました筑波大学体育系 白木仁先生に，深く御礼申し上げます．加えて，予備審査および本審査における審査員の労をおとりいただいた筑波大学医学医療系 金森章浩先生，筑波大学体育系 足立和隆先生，ならびに竹村雅裕先生，海外学会での発表や参考論文の執筆にご協力いただいた筑波大学医学医療系 Thomas Mayers 先生に，深く御礼申し上げます．

測定装置 RotorMeter II の設計製作にあたりましては，株式会社今井工業所の荒井徳二郎様，飯田幸夫様，櫻庭亨様，中井康哲様，坂井技研の坂井昶様に多大なるご助言ご協力を賜りました．深く御礼申し上げます．

測定データの採取にあたりましては，新潟医療福祉大学健康スポーツ学科の石倉孝樹君，石関友也君，西潟洸太君，郷津樹君，坂美沙希君，伊藤美音君，筑波大学体育専門学群の武者桜子君，そして測定対象者をお願いした両大学の学生諸君に多大なるご協力をいただきました．深く御礼申し上げます．

研究活動を継続するにあたり，遠くからいつも励ましてくれた亡父，母，故高橋健先生，兄，弟に深く感謝いたします．

そして，ずっと支えてくれた妻景子，長男一秀に，心より感謝いたします．

皆様，本当にありがとうございました．