

非接触型前十字靭帯損傷の受傷メカニズムの解析

課題番号 16500394

平成 16 年度～平成 17 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成 18 年 3 月

研究代表者／福 林 徹

(早稲田大学スポーツ科学学術院)

## はしがき

21世紀に入り医学は治療の時代から予防の時代へ大きく転換しつつある。スポーツ医学も同様であり特にスポーツ外傷・傷害も怪我した選手を治療することから怪我をいかにしたら予防できるかと言う発想の転換に迫られている。その中でも近年スポーツ外傷の代表的疾患としてあげられる膝前十字靭帯損傷（以下 ACL 損傷と呼ぶ）については欧米の諸外国を中心にその取組がなされつつある。ACL 損傷は日本において年間 5 万人ものスポーツ選手が受傷し、2 万件近くの靭帯再建手術が行われ、復帰までに 1 年近くのリハビリテーションを要する疾患であり、スポーツ外傷の中でも、もっとも注目され、また解決を急がれる外傷である。

ここ 20 年間にわたるスポーツ整形外科医、リハビリテーション医の努力により ACL 損傷に対する治療医学はめざましい進歩を遂げた。20 年前は ACL 損傷の正確な診断とそれに対する適切な再建術は皆無と言って良いほどであったが、現在ではトップレベルのアスリートでも適切な手術とリハビリテーションを行えば 1 年以内に受傷前と同じレベルでの競技復帰が可能になった。しかし、ACL 損傷発生の予防という立場から見ると、20 世紀には全くと言ってよいほどこの分野での進歩が見られなかった。最近になりスポーツ医学にも予防医学的概念が導入されるようになってより、ACL 損傷の受傷メカニズムの分析と、それに対する対応が我々の研究グループやノルウェー、米国のグループを中心になされるようになった。

我々および諸外国での疫学的研究により ACL 損傷の過半数は内側側副靭帯や後十字靭帯損傷とは異なり、非接触型の受傷メカニズムであることが明らかにされており、女子が男子に比べ 3 倍以上の頻度であることが判明している。

そこで本研究では、ACL 損傷の好発するジャンプ着地動作を point cluster 法を用いて解析し、ACL 損傷の受傷メカニズムを考察すると共に、女性に好発する ACL 損傷のリスクファクターを検討した。また、近年提唱されている ACL 予防トレーニングの効果を検証した。

## 研究組織

研究代表者：福林 徹（早稲田大学スポーツ科学学術院・教授）  
研究分担者：渡會公治（東京大学大学院総合文化研究科・助教授）  
研究分担者：秋本崇之（東京大学大学院総合文化研究科・助手）  
研究分担者：金森章浩（筑波大学大学院総合科学研究科臨床医学系  
整形外科・講師）  
研究分担者：赤居正美（国立リハビリテーションセンター研究所  
運動機能系障害研究部・部長）  
海外共同研究者：Woo SL（ピッツバーグ大学工学部・教授）

## 研究経費

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	290	0	290
平成 17 年度	70	0	70
総計	360	0	360

## 研究成果発表

### (1)学会誌等

- 1) 永野康治, 井田博史, 赤居正美, 福林徹: 多点皮膚マーカーを用いた片脚着地時の膝 Kinematics の計測. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 Vol.26, 133-137, 2005.
- 2) Y Nagano, H Ida, M Akai, T Fukubayashi: Sex Differences in Kinematics during Landing and Training Effects. British J Sports Med. Vol.39, 398, 2005.
- 3) H Ida, Y Nagano, T Fukubayashi, and M Akai: MEASUREMENT OF IN VIVO MOTION OF KNEE: ASSESSMENT AND APPLICATION OF POINT CLUSTER TECHNIQUE. SICE 2005 Proceedings, page 1255-1258, 2005.

### (2)口頭発表

- 1) 永野康治, 井田博史, 赤居正美, 福林徹: 片脚着地動作の運動学的分析—高精度動作解析を用いた膝の微細運動について—. 第 31 回日本臨床バイオメカニクス学会, 福岡, 11月, 2004.
- 2) Y Nagano, H Ida, M Akai, and T Fukubayashi: GENDER DIFFERENCES ASSOCIATED WITH THE RISK OF NON-CONTACT ACL INJURY -KINEMATICS DURING A SINGLE LIMB DROP LANDING-. International Symposium on Ligaments & Tendons-V, Washington DC, February, 2005.
- 3) Y Nagano, H Ida, M Akai, and T Fukubayashi: SEX DIFFERENCES IN KINEMATICS DURING LANDING AND TRAINING EFFECT. 1st World Congress on Sports Injury Prevention, Oslo, June, 2005.
- 4) 永野康治, 井田博史, 赤居正美, 福林徹: 片脚着地時の膝関節運動における傷害予防トレーニング効果の検証. 第 32 回日本臨床バイオメカニクス学会, 札幌, 10月, 2005.
- 5) Y Nagano, H Ida, M Akai, and T Fukubayashi: THE EFFECTS OF JUMP AND BALANCE TRAINING ON KNEE KINEMATICS DURING SINGLE LEG LANDING. Orthopaedic Research Society 52nd Annual Meeting, Chicago, March, 2006

非接触型前十字靭帯損傷の受傷メカニズムの解析

課題番号 16500394

平成 16 年度～平成 17 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成 18 年 3 月

研究代表者／福 林 徹

(早稲田大学スポーツ科学学術院)



## はしがき

21世紀に入り医学は治療の時代から予防の時代へ大きく転換しつつある。スポーツ医学も同様であり特にスポーツ外傷・傷害も怪我した選手を治療することから怪我をいかにしたら予防できるかという発想の転換に迫られている。その中でも近年スポーツ外傷の代表的疾患としてあげられる膝前十字靭帯損傷（以下 ACL 損傷と呼ぶ）については欧米の諸外国を中心にその取組がなされつつある。ACL 損傷は日本において年間 5 万人ものスポーツ選手が受傷し、2 万件近くの靭帯再建手術が行われ、復帰までに 1 年近くのリハビリテーションを要する疾患であり、スポーツ外傷の中でも、もっとも注目され、また解決を急がれる外傷である。

ここ 20 年間にわたるスポーツ整形外科医、リハビリテーション医の努力により ACL 損傷に対する治療医学はめざましい進歩を遂げた。20 年前は ACL 損傷の正確な診断とそれに対する適切な再建術は皆無と言って良いほどであったが、現在ではトップレベルのアスリートでも適切な手術とリハビリテーションを行えば 1 年以内に受傷前と同じレベルでの競技復帰が可能になった。しかし、ACL 損傷発生の予防という立場から見ると、20 世紀には全くと言ってよいほどこの分野での進歩が見られなかった。最近になりスポーツ医学にも予防医学的概念が導入されるようになってより、ACL 損傷の受傷メカニズムの分析と、それに対する対応が我々の研究グループやノルウェー、米国のグループを中心になされるようになった。

我々および諸外国での疫学的研究により ACL 損傷の過半数は内側側副靭帯や後十字靭帯損傷とは異なり、非接触型の受傷メカニズムであることが明らかにされており、女子が男子に比べ 3 倍以上の頻度であることが判明している。

そこで本研究では、ACL 損傷の好発するジャンプ着地動作を point cluster 法を用いて解析し、ACL 損傷の受傷メカニズムを考察すると共に、女性に好発する ACL 損傷のリスクファクターを検討した。また、近年提唱されている ACL 予防トレーニングの効果を検証した。

## 研究組織

- 研究代表者：福林 徹（早稲田大学スポーツ科学学術院・教授）  
研究分担者：渡會公治（東京大学大学院総合文化研究科・助教授）  
研究分担者：秋本崇之（東京大学大学院総合文化研究科・助手）  
研究分担者：金森章浩（筑波大学大学院総合科学研究科臨床医学系  
整形外科・講師）  
研究分担者：赤居正美（国立リハビリテーションセンター研究所  
運動機能系障害研究部・部長）  
海外共同研究者：Woo SL（ピッツバーグ大学工学部・教授）

## 研究経費

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	290	0	290
平成 17 年度	70	0	70
総計	360	0	360

## 研究成果発表

### (1)学会誌等

- 1) 永野康治, 井田博史, 赤居正美, 福林徹: 多点皮膚マーカを用いた片脚着地時の膝 Kinematics の計測. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 Vol.26, 133-137, 2005.
- 2) Y Nagano, H Ida, M Akai, T Fukubayashi: Sex Differences in Kinematics during Landing and Training Effects. British J Sports Med. Vol.39, 398, 2005.
- 3) H Ida, Y Nagano, T Fukubayashi, and M Akai: MEASUREMENT OF IN VIVO MOTION OF KNEE: ASSESSMENT AND APPLICATION OF POINT CLUSTER TECHNIQUE. SICE 2005 Proceedings, page 1255-1258, 2005.

### (2)口頭発表

- 1) 永野康治, 井田博史, 赤居正美, 福林徹: 片脚着地動作の運動学的分析—高精度動作解析を用いた膝の微細運動について—. 第 31 回日本臨床バイオメカニクス学会, 福岡, 11月, 2004.
- 2) Y Nagano, H Ida, M Akai, and T Fukubayashi: GENDER DIFFERENCES ASSOCIATED WITH THE RISK OF NON-CONTACT ACL INJURY -KINEMATICS DURING A SINGLE LIMB DROP LANDING-. International Symposium on Ligaments & Tendons-V, Washington DC, February, 2005.
- 3) Y Nagano, H Ida, M Akai, and T Fukubayashi: SEX DIFFERENCES IN KINEMATICS DURING LANDING AND TRAINING EFFECT. 1st World Congress on Sports Injury Prevention, Oslo, June, 2005.
- 4) 永野康治, 井田博史, 赤居正美, 福林徹: 片脚着地時の膝関節運動における傷害予防トレーニング効果の検証. 第 32 回日本臨床バイオメカニクス学会, 札幌, 10月, 2005.
- 5) Y Nagano, H Ida, M Akai, and T Fukubayashi: THE EFFECTS OF JUMP AND BALANCE TRAINING ON KNEE KINEMATICS DURING SINGLE LEG LANDING. Orthopaedic Research Society 52nd Annual Meeting, Chicago, March, 2006



## 第一章 片脚着地時における性差について

I 目的	.....P5
II 対象と方法	.....P6
III 結果	.....P9
IV 考察	.....P13

## I 目的

スポーツ科学分野において、膝前十字靭帯(ACL)損傷のメカニズムやリスクファクターに関する研究は数多くみられる。ACL 損傷の特徴として、まず、スポーツ活動中に好発する傷害の 1 つであり、その多くは非接触型の受傷であることが知られている(1, 8, 20)。また、ACL 損傷の頻度は男性より女性で 2~8 倍多いこと(1, 3, 4, 20, 32, 36)も ACL 損傷の特徴のひとつである。

質問紙やビデオ解析の研究によると、急激なストップやカッティング、着地動作時の足底接地時に ACL 損傷は発生する(8, 31, 37, 38, 40)。この際の膝関節の肢位は、軽度屈曲位、外反、脛骨内旋もしくは脛骨外旋であったと Olsen らは報告している(38)。

動作解析などの研究によると、着地やカッティング時の膝関節肢位のうち、膝外反力の増加は ACL 損傷の危険性を増加させ(11, 18, 19, 22, 27, 29)、膝屈曲角度の減少も ACL 損傷と関連があるとしている(14, 15, 24, 27, 29)。しかし、ACL 損傷の受傷肢位で脛骨の回旋の関連が示唆されているにもかかわらず、脛骨の回旋と屈曲、外反との関連は報告されていない。

そこで、本研究の目的は片脚着地時の三次元膝動作解析を行い、ACL 損傷のメカニズムを検討すること、および、膝関節運動、筋活動を男女間で比較し、ACL 損傷のリスクファクターを検討することである。

## II 対象と方法

男性 18 名(19.8±4.6 歳; 平均±標準偏差), 女性 19 名(19.4±0.9 歳)を対象とした。対象者は男性 10 名, 女性 11 名がバスケットボール選手, 男性 8 名, 女性 8 名がテニス選手であった。

動作の計測は 30cm の台上からの片脚着地を行った(Figure1)。片脚着地は台上に右脚にて片脚立位をとった後, 重心を前方に偏位させていき, 30cm 前方に上方に飛び上がることなく着地する。着地時は足部を進行方向に対して平行に接地し, 着地後安定するまで片脚着地姿勢を維持する。計測は動作に慣れるまで練習を行った後, 3 回成功するまで行った。三次元座標データの収集は VICON 370 (Oxford Metrics Inc., Oxford, UK) 7 台を用い(Figure2), サンプル周波数は 200Hz にて行った。同時に床反力計を用い着地時の床反力をサンプリング周波数 1000Hz にて測定した。

被験者の右下肢には反射マーカ(直径 9mm)を 24 個貼布した(大腿部 10 個, 下腿部 6 個, 大転子, 大腿骨内側顆・外側顆, 脛骨高原内側・外側, 内果, 外果, 第五中足骨底)(Figure1)。これらのマーカは Point Cluster Technique (PCT) (2)での計算に用いられる。PCT では大腿部と下腿部のマーカよりそれぞれの慣性主軸を求めることにより, 膝関節の角度を算出するため, 各皮膚マーカのノイズが相殺されやすいという特徴を持つ。我々は PCT のプログラムを Andriacchi ら(2)を参考に作成した。また, 表面筋電図を大腿直筋, 大腿二頭筋, 半膜様筋よりサンプリング周波数 1000Hz にて記録した。

三次元マーカ座標より PCT を用い, 膝屈曲/伸展角度, 外反/内反角度, 脛骨内旋/外旋角度, 脛骨前方/後方偏位量を算出した。同時に床反力垂直成分が最大値をとるまでの時間を算出した。膝屈曲角度は接地時および床反力垂直成分が最大値をとった際の角度を算出した。外反/内反角度, 脛骨内旋/外旋角度および脛骨前方偏位データより足部接地時の肢位, および接地より床反力垂直成分が最大値をとるまでの各変位量を算出した。

表面筋電図データは RMS を求め, 随意最大収縮時(MVC)の値で正規化した(%MVC)。大腿二頭筋, 半膜様筋のデータは平均し, ハムストリングスの筋放電量とした。また, 大腿直筋に対するハムストリングスの筋放電量(hamstrings/quadriceps ratio; HQR)を求めた。%MVC および HQR は接地前 50ms, 接地後 50ms 間の平均値を求めた。

統計処理は動作データ, 床反力データの男女比較にスチューデントの T 検定,

筋電図データの男女比較にマンホイットニーの U 検定を用いた。有意水準は 0.05 とした。

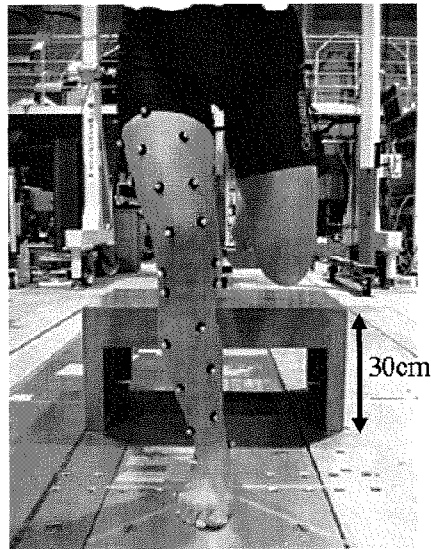


Figure1 Landing position and arrangement of makers

Subjects performed a single limb landing from a 30cm platform. Twenty four reflective markers of 9 mm diameter were secured to the limb.

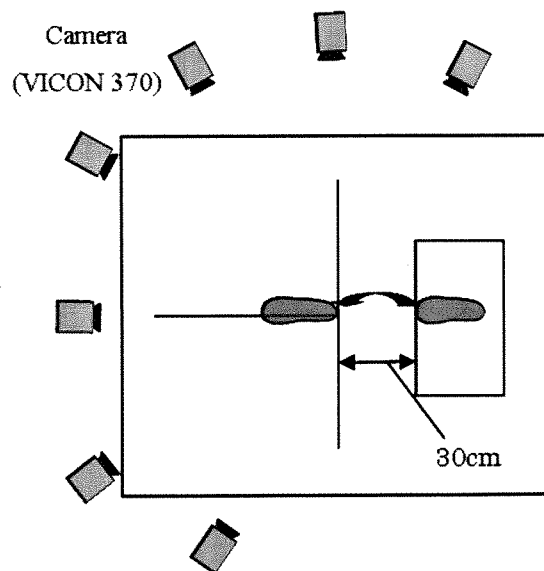


Figure2 Experiment setup and test task

Subjects landed with their right foot 30cm away from the platform. A seven camera VICON 370 motion analysis system was used.

### III 結果

接地時の膝関節屈曲角度および内/外旋，内/外反，前/後変位量を Table1 に示す。接地の肢位は膝軽度屈曲，内反，脛骨外旋，脛骨前方偏位をとる傾向がみられた。接地時の肢位の男女間に有意差はみられなかった。接地より 60ms までの各データの時系列変化を Figure3 に，膝関節屈曲角度および内/外旋，内/外反，前/後変位量を Table2 に示す。接地後から床反力垂直成分が最大値を取るまでの間，膝関節屈曲，脛骨内旋角度は増加する傾向が得られたが，外反/内反角度は一度内反した後に外反する傾向が得られた。脛骨前方偏位は一度増加した後減少し，接地時の状態に戻る傾向が得られた。膝屈曲，内反，外反の各角度変位量，および脛骨前方偏位量には有意な差はみられなかったが，脛骨内旋変位量は男性に比べ女性で有意に大きい値を示した ( $p=0.04$ )。

接地前後の大腿直筋，ハムストリングスの活動量を Figure4, HQR を Figure5 に示す。接地前 50ms の筋活動はハムストリングスに有意な差はみられなかったが，大腿直筋の筋活動量が男性に比べ女性で有意に大きい値を示した ( $p=0.001$ )。接地後 50ms の筋活動ではハムストリングス，大腿直筋ともに有意な差はみられなかった。HQR は接地前 50ms で女性が有意に小さな値を示した ( $p=0.001$ ) が，接地後 50ms においては有意な差はみられなかった。

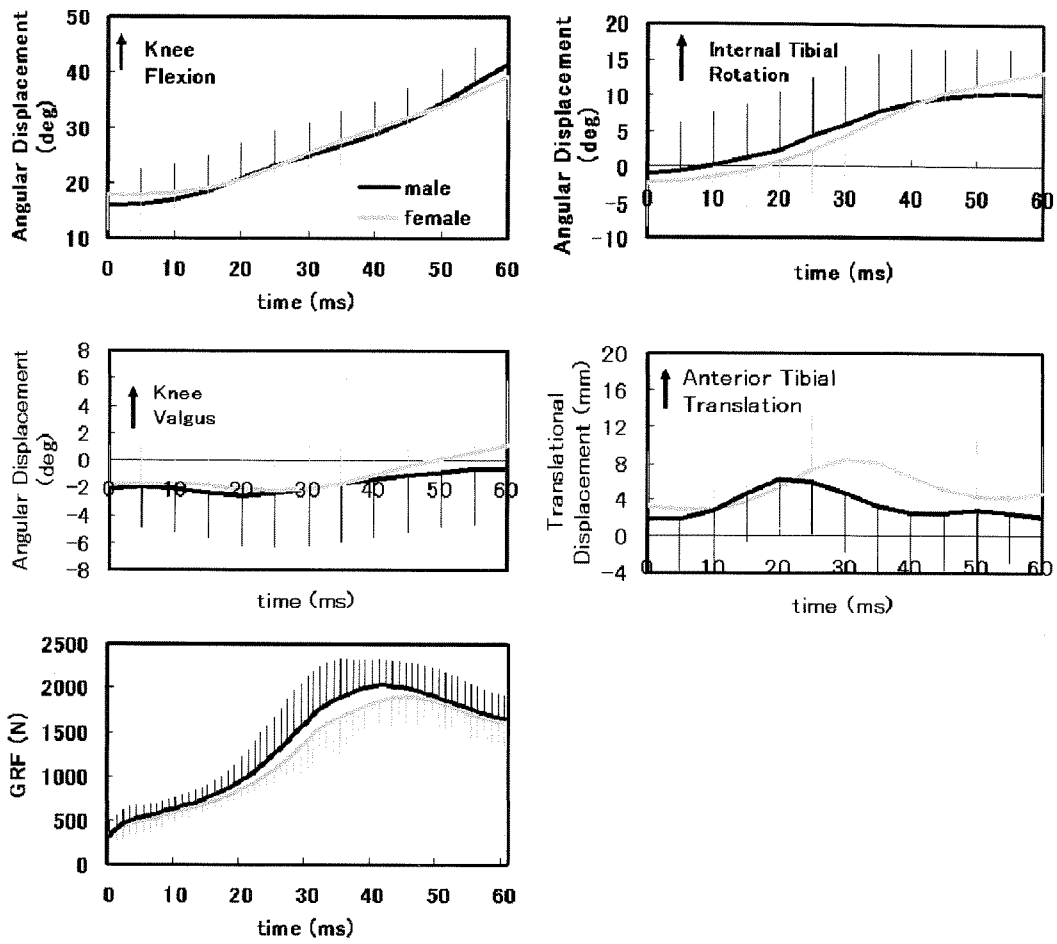


Figure3 Gender-based comparisons of joint motion and GRF data  
(Mean and SD).

Data are presented for Knee Flexion (a), Internal Tibial Rotation (b), Knee Valgus (c), Anterior Tibial Translation (d), and GRF (e).

Table1 Gender-based comparisons of knee motion at foot contact

(Mean (SE))

	Position at foot contact			
	Flexion (deg)	External tibial rot. (deg)	Varus (deg)	Ant. Translation (mm)
Males	15.9 (1.5)	1.2 (1.4)	2.0 (0.7)	2.0 (1.2)
Females	18.0 (1.5)	2.2 (1.4)	1.8 (0.6)	3.2 (1.3)

Table2 Gender-based comparisons of knee motion at landing (Mean (SE))

Degree or displacement during the landing

	Flexion	Internal tibial	Varus	Valgus	Ant.
	(deg)	rot. (deg)	(deg)	(deg)	Translation (mm)
Males	27.8 (1.7)	9.4 (0.9)   *	1.4 (0.3)	1.7 (0.3)	5.9 (0.5)
Females	31.2 (1.5)	12.6 (1.2)	1.6 (0.3)	2.3 (0.3)	7.5(0.9)

\*:  $p < 0.05$  between males and females



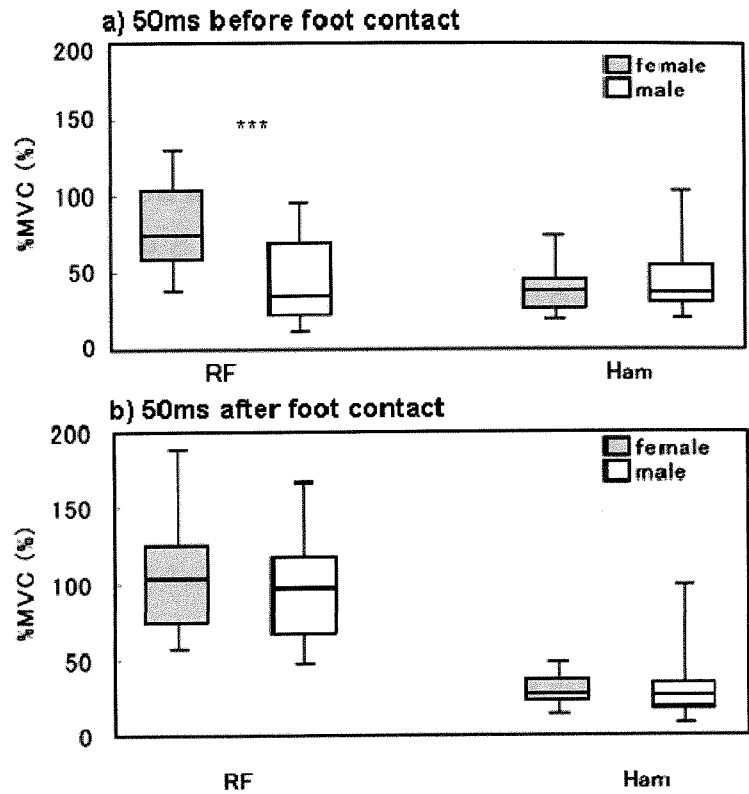


Figure4 %MVC of the rectus femoris (RF) and the hamstrings (Ham) for the 50ms before foot contact (a), and for the 50ms after foot contact (b)  
Boxes denote the middle 50% of the range and the median. The whiskers show the extent of the rest of the data.

\*\*\* p < 0.001 between males and females

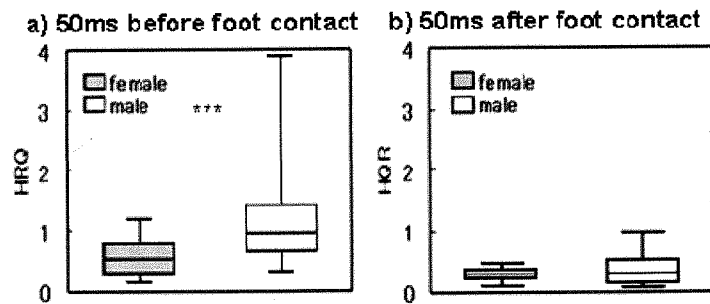


Figure5 Ham/Quad-ratio (HQR) before foot contact (a), and after foot contact (b)

Boxes denote the middle 50% of the range and the median. The whiskers show the extent of the rest of data.

\*\*\* p < 0.001 between males and females.

#### IV 考察

片脚着地は ACL 損傷が好発する動作の 1 つであり、その詳細な膝関節運動の解析や、その性差を検討することは ACL 損傷のメカニズムを解明する上で重要だと考えられる。ACL 損傷のメカニズムを検討する上で、問題となるのが、着地やカッティング上のどの時点で損傷が起こるかという点である。Celluli ら(10)によると、片脚着地動作において ACL にかかる張力の最大値と床反力垂直成分が最大値をとる時間がほぼ同時期であると報告している。つまり、接地後から床反力垂直成分が最大値をとる間の、膝関節運動が重要であるといえる。本結果をみると、床反力垂直成分が最大値をとった際の膝関節屈曲角度は約 30 度であり、この間に脛骨が前方に偏位している。ACL 損傷危険肢位が膝関節屈曲 30 度以下とされていることを考えると、接地からこの時間までの膝関節運動が ACL 損傷に関連していると考えられる。

本結果では接地後、一度内反した後外反し、同時に脛骨が内旋する傾向が得られた。特に脛骨内旋変位量が男性に比べ女性で大きいという結果が得られた。脛骨の内旋は ACL の張力を増加させ(5, 6)、近年の屍体膝を用いた研究でも、膝外反を伴う脛骨の内旋が ACL にかかる力を増加させると報告されている(25)。よって、片脚着地時における脛骨内旋の増加は ACL にかかる張力を増加させ、ACL 損傷のリスクファクターの 1 つであると考えられる。これらの結果は、他の PCT を用いた報告と一致する(12, 17)。

膝外反に関しては、両脚着地時の外反角度、モーメントの増加が ACL 損傷のリスクファクターであると報告されている(18, 22, 27, 30)。しかし、本結果では外反変位量は約 2 度と小さな値を示し、男女差もみられなかった。その理由としては、片脚着地では両脚ほど膝が外反しないこと、角度算出が接地から床反力の最大までの間であったこと、および膝外反と捉えられている膝が内側に入る現象に対する脛骨回旋の割合が大きかったことが考えられる。

筋活動については、接地前の大腿直筋の活動が女性に大きく、HQR が女性で小さいという結果が得られた。大腿四頭筋は脛骨の前方引き出し力を生み出し ACL への張力を増加させる(16)。逆にハムストリングスは大腿四頭筋に抗し脛骨の前方偏位を制御する。筋活動のタイミングについては、筋活動の後、筋が収縮し始めるまでに約 50ms の遅延が生じること、および末梢に刺激が加わってから反射性の筋活動が生じるまで 50ms 以上かかること(7)を考慮すると、接地前の筋活動が接地後の膝関節の制御に重要であると考えられる。つまり、接

地前の筋活動において、女性が男性に比べ大腿直筋の筋活動が大きく、HQRが小さいということは、接地後に ACL に大きな張力がかかる可能性がある。こうした筋活動の傾向も ACL 損傷のリスクファクターの 1 つであると考えられる。

## 第二章 片脚着地における膝前十字靭帯損傷予防トレーニングの効果について

I 目的	P16
II 対象と方法	P17
III 結果	P23
IV 考察	P27

## I 目的

近年、スポーツ医学分野で注目されているのが ACL 損傷の予防である。とくに神経筋協調トレーニングや固有受容器に対するトレーニングの結果、ACL 損傷を減少させたという報告が散見される(9, 21, 26, 28, 36)。これらのトレーニングは主にジャンプなどと中心とするプライオメトリックトレーニングと、バランストレーニングにより構成される。ジャンプ、バランストレーニングの結果、着地時の外反モーメントが減少し(23, 35)、筋活動に変化がみられる(13)といった報告もみられる。

予防トレーニングの主な目的としては、ACL 損傷の危険性の高い肢位、動作を避ける動作を学習することである。しかしながら、予防トレーニングが動作にどのような変化をもたらすかを検討した研究はほとんどみられない。そこで本研究の目的は ACL 損傷予防トレーニングとして推奨されているジャンプ、バランストレーニングが着地時膝関節運動、および筋活動にどのような変化をもたらすかを検討することである。

## II 対象と方法

大学女子バスケットボール選手 8 名 ( $19.4 \pm 0.7$  歳) を対象とした。対象者は片脚着地の計測を計 3 回行った (Pre1; トレーニング前, 1 回目の計測, Pre2; トレーニング前, 2 回目の計測, 1 回目より 5 週間以上後, Post; トレーニング後, 1 週間以内)。片脚着地の規定, およびデータの収集, 算出方法は第一章の方法と同様に行った。

ACL 損傷予防プログラムは先行研究(23, 33, 34, 36)を参考に, 約 20 分間のジャンプおよびバランストレーニングを中心としたものを作成し, 週 3 回, 5 週間にわたり実施した (Table3)。前半 3 週間と後半 2 週間でトレーニング強度を上げ, 着地動作の習得, バランス能力の向上を目的とした。トレーニング中はトレーナーが以下の点を注意し, 常に選手にフィードバックを行いながら実施した。1) 股関節, 膝関節, 足関節を深く曲げ柔らかく着地する。2) 体幹を前傾させ母指球に体重を乗せるようにする。3) 膝とつま先の方向を一致させ, 膝が内側に入る動きを避ける。

角度, 変位データは Pre1, Pre2, Post の 3 群間で一元配置分散分析を行い, 有意差が認められた項目について Bonferroni 法を用い一元配置分散分析を行った。表面筋電図データについては 3 群間で Friedman 検定を行い, 有意差が認められた項目について Wilcoxon の順位和検定を行った。Pre1, Pre2 間の比較にてコントロール期間の効果を検討し, Pre2, Post 間の比較にてトレーニング期間の効果を検討した。有意水準は 0.05 とした。

Table3 Jump and balance training

Exercise	Time or Repetitions
<i>Phase I : Technique</i>	
1. Squat jumps <sup>a</sup>	20sec
2. 180° jumps <sup>a</sup>	20sec
3. Single leg balance <sup>a</sup>	20sec
4. Hop jump (both leg)	20sec
5. Broad jump and hold <sup>b</sup>	28m
6. Crossover hop, hop, hop, stick <sup>b</sup>	28m
<i>Phase II :Performance</i>	
1. Squat jumps <sup>a</sup>	20sec
2. Scissors jumps <sup>c</sup>	20sec
3. Single leg balance and pass <sup>d</sup>	20sec
4. Hop jump (single leg)	20sec
5. Single-leg hop and hold <sup>a</sup>	14m/leg
6. Crossover hop, hop, hop, stick <sup>b</sup>	28m

**Squat jumps:** Drop into deep knee, hip, and ankle flexion and then take off into a maximal vertical jump. On landing, immediately return to the starting position and repeat the initial jump (Figure6).

**180° jumps :** Initiates a 2-footed jump with a direct vertical motion combined with a 180° rotation in midair, keeping arms away from the body to help maintain balance. When landing, immediately reverses this jump to the opposite direction (Figure7).

**Single-leg balance (and pass):** This drill is performed on a balance device that provides an unstable surface. Begin by stanging on one foot on the device. After the subject has improved, the training drills can incorporate ball catches and passes (Figure8).

**Hop jumps:** Hop to the side (forward) on a balance board, jump off in the opposite side, and hop on the board repeatedly (Figure9).

**Broad jump and hold:** Begin by swinging arms forward and jumping horizontally and vertically at approximately a 45° angle to achieve a maximum

horizontal distance. The athlete lands with her knees flexed to approximately 90° (Figure10).

**Crossover hop, hop, hop, stick:** Start on a single limb and jump at a diagonal across the body landing on the opposite limb with the foot pointing straight ahead and immediately redirect the jump in the opposite diagonal direction (Figure11).

**Scissors jumps:** Start in a stride position with one foot well in front of other. Jump up, alternating foot positions in midair (Figure12).

**Single-leg hop and hold:** Initiate the jump by swinging the arms forward while simultaneously extending at the hips and knees. The jump should carry the athlete up at an angle of approximately 45° and attain maximal distance for a single-leg landing. The subject is instructed to land on the jumping leg in deep knee flexion (Figure13).

---

<sup>a</sup> was referred to (34). <sup>b</sup> was referred to (33). <sup>c</sup> was referred to (23). <sup>d</sup> was referred to (36).





Figure6 Squat jumps



Figure7 180° jumps



Figure8 Single leg balance (and pass)



Figure9 Hop jumps



Figure10 Broad jump and hold



Figure11 Crossover hop, hop, hop, stick



Figure12 Scissors jumps



Figure13 Single-leg hop and hold

### III 結果

接地より 60ms までの膝屈曲角度に対する膝内/外旋，内/外反，前後偏位の変化を Figure14 に，接地時の膝関節肢位を Table4 に，膝関節屈曲角度および膝内/外旋，内/外反，前後偏位の変化量を Table5 に示す．膝屈曲，外反/内反，脛骨内旋，脛骨前方偏位の変位は実験 1 と同様の傾向を示した．接地時の肢位は膝屈曲角度が Post で Pre2 にくらべ有意に大きい値を示した( $p=0.004$ )．接地から床反力最大時までの膝内反，外反，脛骨内旋の各角度変位量，および脛骨前方偏位量には有意な差はみられなかったが，床反力最大時の膝屈曲角度は Pre2 に比べ Post で有意に大きい値を示した( $p=0.001$ )．床反力が最大値をとるまでの時間は Pre1 に比べ Pre2 で有意に早い値を示した( $p<0.01$ )．

接地前後の大腿直筋，ハムストリングスの活動量を Figure15，HQR を Figure16 に示す．接地前 50ms の筋活動は大腿直筋に有意な差はみられなかったが，ハムストリングスの筋活動量が Pre2 に比べ Post で有意に大きい値を示した( $p=0.036$ )．接地後 50ms の筋活動ではハムストリングス，大腿直筋ともに有意な差はみられなかった．HQR は接地前 50ms，接地後 50ms ともに有意な差はみられなかった．

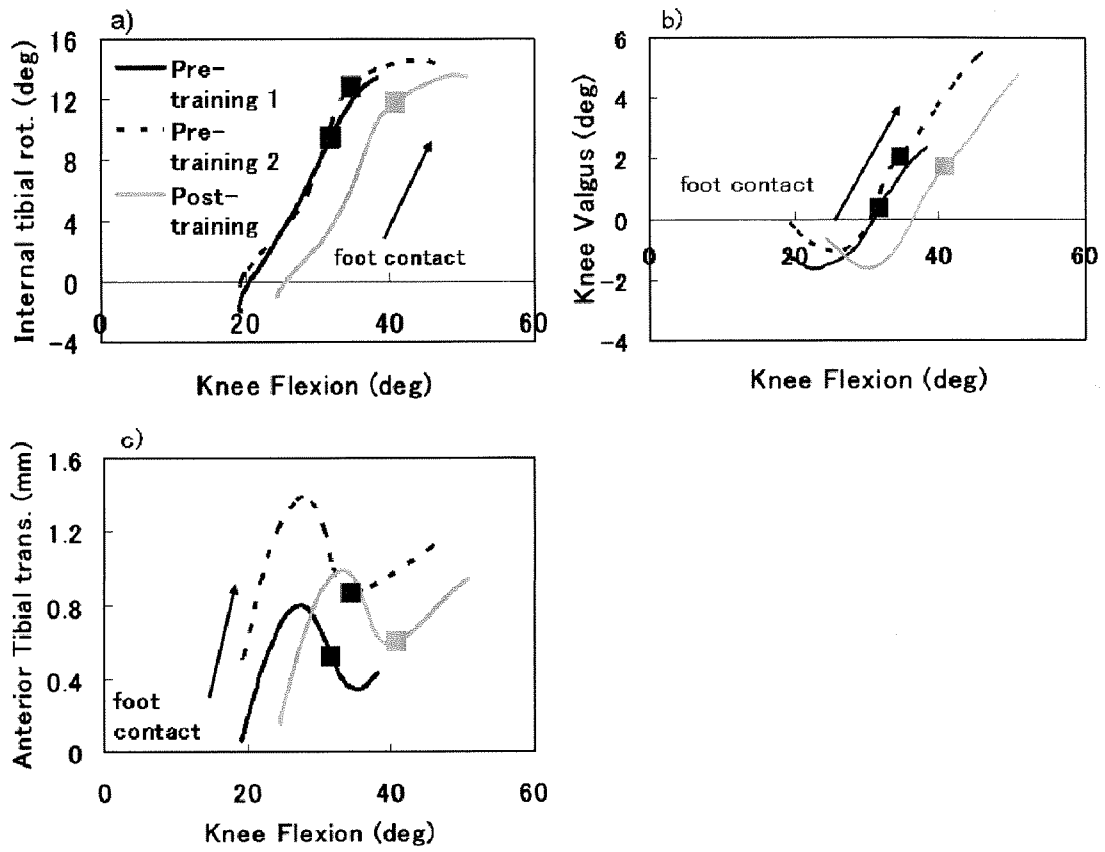


Figure 14 Mean joint motion versus knee flexion, demonstrated during the single limb landing for pre-training 1, pre-training 2, post-training. Data are presented for internal tibial rotation (a), knee valgus (b) and anterior tibial translation (c). Dots show the average time of peak GRF.

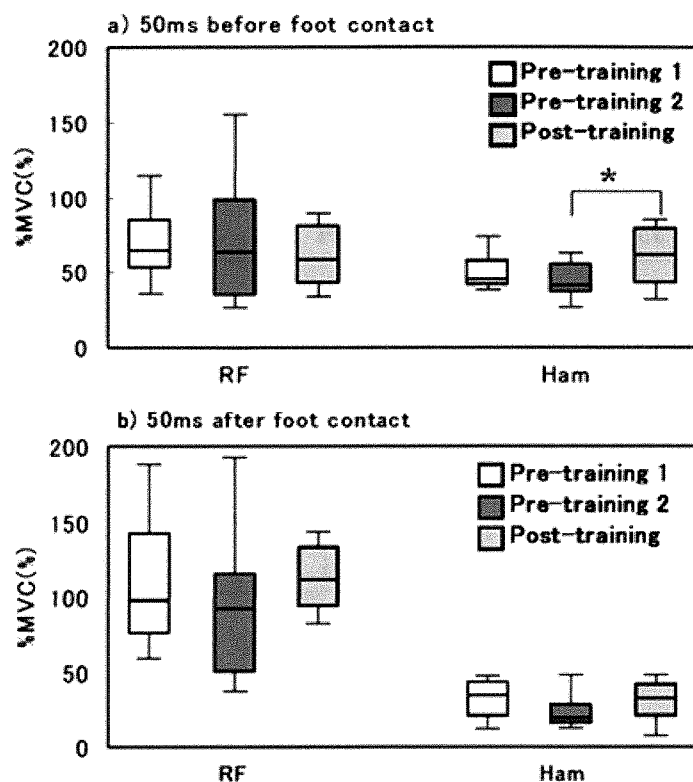


Figure 15 %MVC of the rectus femoris (RF) and the hamstrings (Ham) for the 50ms before foot contact (a), and for the 50ms after foot contact (b)

Boxes denote the middle 50% of the range and the median. The whiskers show the extent of the rest of the data.

\*  $p < 0.05$  from the previous test

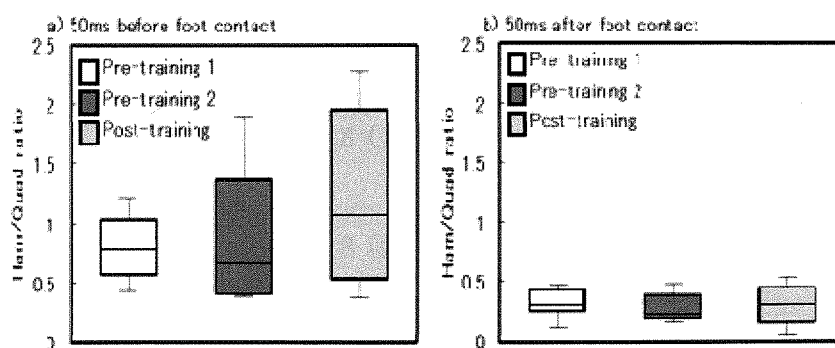


Fig. 3-11 Ham/Quad-ratio (HQR) before foot contact (a), and after foot contact (b)

Boxes denote the middle 50% of the range and the median. The whiskers show the extent of the rest of data.

Table4 Position at foot contact Pre-training 1, Pre-training 2  
and Post-training (Mean and SE)

	Position at foot contact			
	Flexion (deg)	External tibial rot. (deg)	Varus (deg)	Ant. Translation (mm)
Pre-training 1	19.5 (2.4)	1.9 (2.2)	1.3 (0.9)	0.9 (2.0)
Pre-training 2	19.3 (2.5)	0.3 (2.5)	0.1 (1.2)	5.0 (1.4)
Post-training	24.4 (2.1)	1.1 (2.0)	0.6 (1.1)	1.6 (1.8)

\*:  $p < 0.05$  \*\*:  $p < 0.01$

Table5 Degree or angular displacement during the landing Pre-training 1,  
Pre-training 2 and Post-training (Mean and SE)

	Degree or displacement during the landing				
	Flexion (deg)	Internal tibirot. (deg)	Varus (deg)	Valgus (deg)	Ant. Translation (mm)
Pre-training 1	31.6 (2.5)	12.3 (1.4)	1.4 (0.3)	2.8 (0.6)	9.3 (1.2)
Pre-training 2	34.3 (2.5)	13.8 (1.8)	1.3 (0.3)	3.7 (0.7)	9.2 (1.5)
Post-training	40.2 (1.9)	13.3 (2.0)	1.3 (0.4)	4.1 (0.6)	9.1 (1.3)

\*\*\*:  $p < 0.001$

#### IV 考察

本研究で採用したジャンプトレーニングやバランストレーニングを ACL 損傷予防プログラムに取り入れたものは近年散見され(21, 28, 36, 39), いずれも ACL 損傷の受傷率が低下したと報告されている。ただし, いずれも傷害発生率の調査が主であり, トレーニングによって変化する要因について調査したものは多くない。

ACL 損傷予防トレーニングにより, 片脚着地時の膝関節屈曲角度の増加がみられた。ACL 損傷時の膝屈曲肢位は屈曲角度 30 度以下で, その際に外反力や, 脛骨に回旋力が加わった際の損傷が多いとされている(8, 38, 40)。また, 本結果より片脚着地時にかかる脛骨回旋力は内旋力であることがわかる。Wojtys ら(42)によると, 脛骨の内旋方向への外乱に対して, 筋収縮を行うことにより内旋変位量を抑えることができるが, 内旋方向への弛緩性は男性に比べ女性で大きいと報告している。つまり, 元来内旋方向への弛緩性の大きい女性は, ACL 損傷を予防するために, 脛骨内旋運動を制動するか, 危険な軽度屈曲位での動作を避けることが必要だと考えられる。今回のトレーニングでは, 膝屈曲角度を増加させることにより, 危険な屈曲角度における脛骨内旋運動を避ける動作を習得したと考えられる。

もう 1 点, ACL 損傷予防トレーニングによる効果は, ハムストリングスの接地前活動の増加である。ハムストリングス筋活動増加の要因については, トレーニングの中で膝関節を多く屈曲させる, および体幹の前傾を増加させるよう指導を行ったため, 片脚着地を行う上でハムストリングスの活動を増加させた動作を習得したためだと考えられる。また, 膝関節の制動には大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮が重要とされる(41)が, 着地時において HQR は 1 以下であり, 大腿四頭筋に比べハムストリングスの筋活動が低いことがうかがえる。本トレーニングにおいて, 着地時の膝関節のコントロールや, バランスボード上で膝関節をコントロールするために同時収縮が必要となり, 筋活動の低かったハムストリングスの筋活動を増加させ, 同時収縮を高められたと考えられる。筋活動のタイミングについては, 着地後 50ms 以内に床反力が最大値をとり, 膝関節が各方向に変位することから, 着地時の膝のコントロールには接地前の予備的筋活動が必要だと予想される。そのため, 接地前の筋活動が増加したと考えられる。



### 第三章 結語

- ・片脚着地時の ACL 損傷メカニズムとして，軽度屈曲位での膝外反，脛骨内旋運動が示唆された．
- ・女性における脛骨内旋量の増大，および大腿四頭筋筋活動の増加が ACL 損傷のリスクファクターとして推定された．
- ・ACL 損傷予防トレーニングにより，片脚着地時の膝屈曲角度，ハムストリングス接地前活動が増加した．
- ・ACL 損傷予防トレーニングにより，ACL 損傷の危険性の高い肢位を避ける動作を習得したと示唆された．

#### 第四章 謝辞

本研究においてジャンプ着地実験を中心となって遂行してくれました早稲田大学大学院人間科学研究科大学院生永野康治君，および Point Cluster 法のプログラム開発に御尽力いただいた国立リハビリテーションセンター井田博文研究員に深謝いたします。また積極的に被検者となり研究に協力してくれました早稲田大学ソフトテニス部，女子バスケットボール部諸兄に感謝致します。

## 参考文献

1. Agel, J., E. A. Arendt, and B. Bershadsky. Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review. *Am J Sports Med.* 33:524-530, 2005.
2. Andriacchi, T. P., E. J. Alexander, M. K. Toney, C. Dyrby, and J. Sum. A point cluster method for in vivo motion analysis: applied to a study of knee kinematics. *J Biomech Eng.* 120:743-749, 1998.
3. Arendt, E. and R. Dick. Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med.* 23:694-701, 1995.
4. Arendt, E. A. Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men and women. *J Athl Train.* 34:86-92, 1999.
5. Arms, S. W., M. H. Pope, R. J. Johnson, R. A. Fischer, I. Arvidsson, and E. Eriksson. The biomechanics of anterior cruciate ligament rehabilitation and reconstruction. *Am J Sports Med.* 12:8-18, 1984.
6. Berns, G. S., M. L. Hull, and H. A. Patterson. Strain in the anteromedial bundle of the anterior cruciate ligament under combination loading. *J Orthop Res.* 10:167-176, 1992.
7. Bigland-Ritchie, B., R. Johansson, O. C. Lippold, and J. J. Woods. Contractile speed and EMG changes during fatigue of sustained maximal voluntary contractions. *J Neurophysiol.* 50:313-324, 1983.
8. Boden, B. P., G. S. Dean, J. A. Feagin, Jr., and W. E. Garrett, Jr. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics.* 23:573-578, 2000.
9. Caraffa, A., G. Cerulli, M. Proietti, G. Aisa, and A. Rizzo. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in soccer. A prospective controlled study of proprioceptive training. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 4:19-21, 1996.
10. Cerulli, G., D. L. Benoit, M. Lamontagne, A. Caraffa, and A. Liti. In vivo anterior cruciate ligament strain behaviour during a rapid deceleration movement: case report. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 11:307-311, 2003.

11. Chappell, J. D., B. Yu, D. T. Kirkendall, and W. E. Garrett. A comparison of knee kinetics between male and female recreational athletes in stop-jump tasks. *Am J Sports Med.* 30:261-267, 2002.
12. Chaudhari, A. M., C. O. Dyrby, and T. P. Andriacchi. Kinematic factors associated with risk of non-contact ACL injuries during single-limb landing. *50th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society*:Poster No: 1293, 2004.
13. Chimera, N. J., K. A. Swanik, C. B. Swanik, and S. J. Straub. Effects of plyometric training on muscle-activation strategies and performance in female athletes. *J Athl Train.* 39:24-31, 2004.
14. Colby, S., A. Francisco, B. Yu, D. Kirkendall, M. Finch, and W. Garrett, Jr. Electromyographic and kinematic analysis of cutting maneuvers. Implications for anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 28:234-240, 2000.
15. Decker, M. J., M. R. Torry, D. J. Wyland, W. I. Sterett, and J. Richard Steadman. Gender differences in lower extremity kinematics, kinetics and energy absorption during landing. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 18:662-669, 2003.
16. DeMorat, G., P. Weinhold, T. Blackburn, S. Chudik, and W. Garrett. Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 32:477-483, 2004.
17. Dyrby, C. O. and T. P. Andriacchi. Secondary motions of the knee during weight bearing and non-weight bearing activities. *J Orthop Res.* 22:794-800, 2004.
18. Ford, K. R., G. D. Myer, and T. E. Hewett. Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Med Sci Sports Exerc.* 35:1745-1750, 2003.
19. Ford, K. R., G. D. Myer, H. E. Toms, and T. E. Hewett. Gender Differences in the Kinematics of Unanticipated Cutting in Young Athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 37:124-129, 2005.
20. Griffin, L. Y., J. Agel, M. J. Albohm, E. A. Arendt, R. W. Dick, W. E. Garrett, J. G. Garrick, T. E. Hewett, L. Huston, M. L. Ireland, R. J.

- Johnson, W. B. Kibler, S. Lephart, J. L. Lewis, T. N. Lindenfeld, B. R. Mandelbaum, P. Marchak, C. C. Teitz, and E. M. Wojtys. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: risk factors and prevention strategies. *J Am Acad Orthop Surg.* 8:141-150, 2000.
21. Hewett, T. E., T. N. Lindenfeld, J. V. Riccobene, and F. R. Noyes. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes. A prospective study. *Am J Sports Med.* 27:699-706, 1999.
  22. Hewett, T. E., G. D. Myer, K. R. Ford, R. S. Heidt, Jr., A. J. Colosimo, S. G. McLean, A. J. van den Bogert, M. V. Paterno, and P. Succop. Biomechanical Measures of Neuromuscular Control and Valgus Loading of the Knee Predict Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Female Athletes. *Am J Sports Med.* 33:492-501, 2005.
  23. Hewett, T. E., A. L. Stroupe, T. A. Nance, and F. R. Noyes. Plyometric training in female athletes. Decreased impact forces and increased hamstring torques. *Am J Sports Med.* 24:765-773, 1996.
  24. Huston, L. J., B. Vibert, J. A. Ashton-Miller, and E. M. Wojtys. Gender differences in knee angle when landing from a drop-jump. *Am J Knee Surg.* 14:215-219; discussion 219-220, 2001.
  25. Kanamori, A., J. Zeminski, T. W. Rudy, G. Li, F. H. Fu, and S. L. Woo. The effect of axial tibial torque on the function of the anterior cruciate ligament: a biomechanical study of a simulated pivot shift test. *Arthroscopy.* 18:394-398, 2002.
  26. Krosshaug, T., T. E. Andersen, O. E. Olsen, G. Myklebust, and R. Bahr. Research approaches to describe the mechanisms of injuries in sport: limitations and possibilities. *Br J Sports Med.* 39:330-339, 2005.
  27. Malinzak, R. A., S. M. Colby, D. T. Kirkendall, B. Yu, and W. E. Garrett. A comparison of knee joint motion patterns between men and women in selected athletic tasks. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 16:438-445, 2001.
  28. Mandelbaum, B. R., H. J. Silvers, D. S. Watanabe, J. F. Knarr, S. D. Thomas, L. Y. Griffin, D. T. Kirkendall, and W. Garrett, Jr. Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing

- anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-year follow-up. *Am J Sports Med.* 33:1003-1010, 2005.
29. McLean, S. G., S. W. Lipfert, and A. J. van den Bogert. Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting. *Med Sci Sports Exerc.* 36:1008-1016, 2004.
  30. McLean, S. G., R. J. Neal, P. T. Myers, and M. R. Walters. Knee joint kinematics during the sidestep cutting maneuver: potential for injury in women. *Med Sci Sports Exerc.* 31:959-968, 1999.
  31. McNair, P. J., R. N. Marshall, and J. A. Matheson. Important features associated with acute anterior cruciate ligament injury. *N Z Med J.* 103:537-539, 1990.
  32. Miyasaka, K. C., D. M. Daniel, and M. L. Stone. The incidence of knee ligament injuries in the general population. *Am J Knee Surg.* 4:3-8, 1991.
  33. Myer, G. D., K. R. Ford, and T. E. Hewett. Methodological approaches and rationale for training to prevent anterior cruciate ligament injuries in female athletes. *Scand J Med Sci Sports.* 14:275-285, 2004.
  34. Myer, G. D., K. R. Ford, and T. E. Hewett. Rationale and Clinical Techniques for Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention Among Female Athletes. *J Athl Train.* 39:352-364, 2004.
  35. Myer, G. D., K. R. Ford, J. P. Palumbo, and T. E. Hewett. Neuromuscular training improves performance and lower-extremity biomechanics in female athletes. *J Strength Cond Res.* 19:51-60, 2005.
  36. Myklebust, G., L. Engebretsen, I. H. Braekken, A. Skjolberg, O. E. Olsen, and R. Bahr. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players: a prospective intervention study over three seasons. *Clin J Sport Med.* 13:71-78, 2003.
  37. Myklebust, G., S. Maehlum, I. Holm, and R. Bahr. A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. *Scand J Med Sci Sports.* 8:149-153, 1998.
  38. Olsen, O. E., G. Myklebust, L. Engebretsen, and R. Bahr. Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a

- systematic video analysis. *Am J Sports Med.* 32:1002-1012, 2004.
39. Olsen, O. E., G. Myklebust, L. Engebretsen, I. Holme, and R. Bahr. Exercises to prevent lower limb injuries in youth sports: cluster randomised controlled trial. *Bmj.* 330:449, 2005.
40. Teitz, C. C. Video analysis of ACL injuries. In: *Prevention of noncontact ACL injuries*. L. Y. Griffin (Ed.) Rosemont, IL: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2001, pp. 87-92.
41. Wojtys, E. M., J. A. Ashton-Miller, and L. J. Huston. A gender-related difference in the contribution of the knee musculature to sagittal-plane shear stiffness in subjects with similar knee laxity. *J Bone Joint Surg Am.* 84-A:10-16, 2002.
42. Wojtys, E. M., L. J. Huston, H. J. Schock, J. P. Boylan, and J. A. Ashton-Miller. Gender differences in muscular protection of the knee in torsion in size-matched athletes. *J Bone Joint Surg Am.* 85-A:782-789, 2003.