

# Drop vertical jump における ハムストリングスの着地前筋活動と着地中の 膝関節外反角度および外反モーメントとの関係

The relationship between pre-landing activation of the hamstring muscles and the knee valgus angle or moment during landing in a drop vertical jump task

生田亮平\*, 石田知也\*, 山中正紀\*, 谷口翔平\*  
上野 亮\*, 越野裕太\*, 寒川美奈\*, 遠山晴一\*

キー・ワード：anterior cruciate ligament injury, motion analysis, electromyography  
膝前十字靭帯損傷, 動作解析, 筋活動

【要旨】 女性の drop vertical jump における膝関節周囲筋の着地前筋活動と膝関節外反角度および外反モーメントとの関係を調査することを目的とした。健康女性 18 名を対象に, drop vertical jump を行わせ, 表面筋電計と三次元動作解析により膝関節周囲筋の着地前活動と膝関節外反角度および外反モーメントを算出した。結果, 大腿二頭筋の着地前筋活動および半腱様筋/大腿二頭筋の着地前筋活動比率と接地後 50ms 時および最大の膝関節外反角度との間に有意な相関を認めた。本研究結果より, ハムストリングスの着地前筋活動パターンは, 着地動作中の膝関節外反運動と関連すると考えられる。

## はじめに

膝前十字靭帯 (以下, ACL) 損傷は, 長期的なスポーツ競技からの離脱<sup>1)</sup>, 変形性膝関節症リスクの増加<sup>2)</sup>, 経済的負担<sup>3)</sup>などの面から最も重篤なスポーツ外傷の一つであるとされ, ACL 損傷予防法の発展が期待されている。ACL 損傷は約 70% が非接触型損傷であり, 他者との明らかな接触がない着地動作やカッティング動作で生じる<sup>4)</sup>。非接触型 ACL 損傷発生率は男性に比べて女性で 2~8 倍高く<sup>5)</sup>, 女性における非接触型 ACL 損傷リスクの検討が広く行われてきた。Hewett ら<sup>6)</sup>は, 前向き研究によって女性スポーツ選手の drop vertical jump (以下, DVJ) における着地動作時の膝関節最大外反角度および最大外反モーメントが ACL 損傷の有意な予測因子であったことを報告した。女性の DVJ における着地動作時の膝関節最大外

反角度および最大外反モーメントの増加は ACL 損傷の重要なリスク因子であり, これらを増加させる要因を明らかにすることは ACL 損傷予防法の発展に繋がると考えられる。

着地動作における膝関節運動の制御には, 反射回路に要する時間や筋活動が観察されてから筋収縮が生じるまでの電気力学的遅延などの理由から, フィードバック制御では不十分であることが報告されている<sup>7,8)</sup>。そのため, 着地動作における膝関節運動の制御には着地前からの筋活動(以下, 前活動)が重要である<sup>9)</sup>。先行研究では, 前方ホップ動作において, 膝関節最大外反角度と膝関節周囲筋の前活動との間に有意な相関があったと報告している<sup>10)</sup>。一方, 片脚着地動作においては, 膝関節周囲筋の前活動と膝関節最大外反角度との間に有意な相関は認められなかったという報告もあり<sup>11)</sup>, 膝関節周囲筋の前活動と膝関節最大外反角度の関係に一致した見解は得られていない。また, ACL 損傷の予測因子である DVJ における着地動

\* 北海道大学大学院保健科学研究所

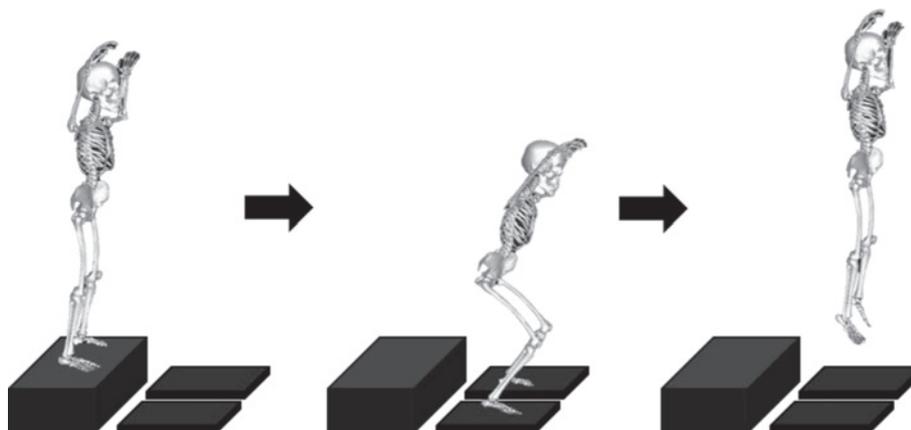


図1 Drop vertical jump  
30cm 台から着地後直ちに最大垂直跳びを行う。



図2 マーカーおよび表面筋電計貼付位置  
反射マーカーは骨盤および下肢の骨指標、右下肢の大腿、下腿などに合計40個貼付した。表面筋電計は大腿直筋、内側広筋、外側広筋、半腱様筋、大腿二頭筋に貼付した。

作時の膝関節最大外反角度および最大外反モーメント<sup>6)</sup>と膝関節周囲筋の前活動の関係を検討した報告はない。DVJにおける着地動作時の膝関節最大外反角度および最大外反モーメントと関連する膝関節周囲筋の前活動の特徴を明らかにすることは、ACL 損傷予防法の発展に貢献できると考えられる。本研究の目的は、女性の DVJ における着地動作時の膝関節周囲筋の前活動と膝関節外反角度および外反モーメントとの関係を調査することである。

## 対象および方法

### 1. 対象

健常女性 18 名 (年齢  $21.6 \pm 0.9$  歳, 身長  $162.5 \pm 6.1$ cm, 体重  $54.3 \pm 7.0$ kg) を対象とした。除外基準は下肢の骨折および ACL 損傷の既往を有する者, 過去 6 カ月以内に下肢および体幹の整形外科的な受診歴または治療歴を有する者とした。尚, ヘルシンキ宣言に則り, 対象には事前に研究の背景や目的, 考えられる危険性などを説明し, 書面による同意を得た。また, 本研究は北海道大学大学院保健科学研究所の倫理委員会の承認を事前に得てから実施した。

### 2. データ計測

動作課題は 30cm 台から着地後直ちに最大垂直跳びを行う DVJ とした(図 1)。動作の計測には, カメラ 6 台 (Hawk camera, Motion analysis, Santa Rosa, CA, USA; 200Hz), 床反力計 2 枚 (Type9286, Kistler, Winterthur, Switzerland; 1000Hz), 表面筋電計 (マルチテレメーター, 日本光電, 東京; 1000Hz) を同期させ EvaRT4.4 (Motion analysis) にて記録した。反射マーカーは骨盤および下肢の骨指標, 右下肢の大腿, 下腿などに合計 40 個貼付した<sup>12)</sup>(図 2)。表面筋電図の導出筋は大腿直筋 (以下, RF), 内側広筋 (以下, VM), 外側広筋 (以下, VL), 半腱様筋 (以下, ST), 大腿二頭筋 (以下, BF) とした (図 2)。はじめに各被験者の最大随意等尺性収縮 (以下, MVIC) 時の筋活動を記録し, その後 DVJ の計測を行った。DVJ は成功 3 試行を記録した。

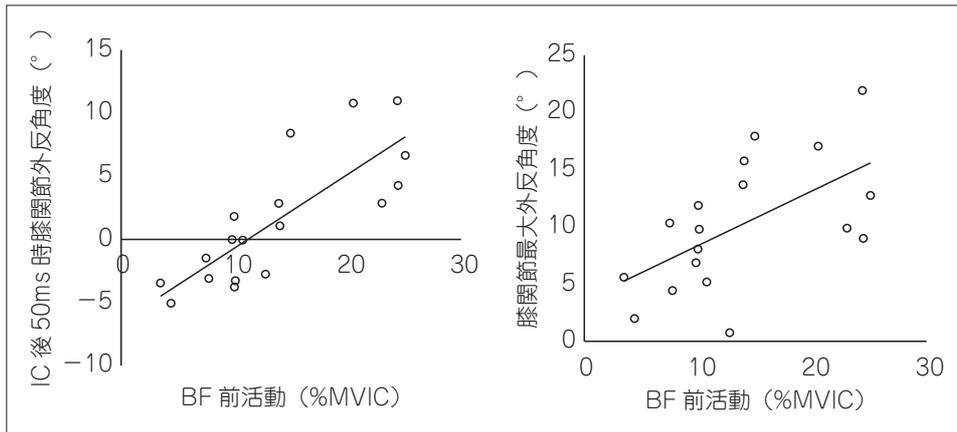


図3 BF前活動と膝関節外反角度

BF前活動とIC後50ms時膝関節外反角度との間に有意な正の相関を認めた ( $R=0.81$ ,  $P<0.01$ ). BF前活動と膝関節最大外反角度との間に有意な正の相関を認めた ( $R=0.59$ ,  $P<0.05$ ).

### 3. データ解析

SIMM6.0.2 (MusculoGraphics, Santa Rosa, CA, USA) を用いて各試行における膝関節屈曲角度, 膝関節外反角度および膝関節屈曲モーメント, 膝関節外反モーメントを算出した. 初期接地 (以下, IC) を床反力計の垂直成分が 10N を超えた時点として定義し, IC から膝関節最大屈曲時までにおける膝関節最大外反角度および最大屈曲モーメント, 最大外反モーメントを求めた. また, IC 後 50ms 時の膝関節屈曲角度, 膝関節外反角度および膝関節屈曲モーメント, 膝関節外反モーメントを求めた. 膝関節角度は静的立位姿勢時の膝関節角度を中間位とし, 屈曲方向ならびに外反方向を正と定義した. 膝関節モーメントは各被験者の身長および体重で標準化した. 筋電位データは band-pass filter (20-500Hz) で処理した後, 全波整流処理を行い, low-pass filter (10Hz) を用いて平滑化した. MVIC 時の筋電位は 50ms の moving window を用いて MVIC 試技中の 50ms 間積分値の最大値を算出した. DVJ における, IC 前 50ms 間の積分値を算出し, MVIC 時における筋電位により標準化した (%MVIC). さらに, 大腿四頭筋およびハムストリングスの外側に対する内側の前活動比率 (VM/VL, ST/BF) を算出した<sup>13)</sup>. ハムストリングス 2 筋 (ST および BF) の平均筋活動 (H) を大腿四頭筋 3 筋 (RF, VM, VL) の平均筋活動 (Q) で除すことにより大腿四頭筋に対するハムストリングスの前活動比率 (H/Q) を算出した.

### 4. 統計学的解析

統計学的解析には, Pearson の積率相関係数を用いて, 各筋の IC 前 50ms 間の筋活動積分値および前活動比率 (VM/VL, ST/BF, H/Q) と, IC 後 50ms 時および最大の膝関節屈曲角度, 外反角度および膝関節屈曲モーメント, 膝関節外反モーメントとの関係をそれぞれ検討した. 解析には IBM SPSS Statistics 22 (IBM, Chicago, IL, USA) を用い, 有意水準は 5% 未満とした. 尚, 各被験者のデータは成功 3 試行の平均値を用いた.

### 結果

BF の前活動と IC 後 50ms 時膝関節外反角度 ( $R=0.81$ ,  $P<0.01$ ) および膝関節最大外反角度 ( $R=0.59$ ,  $P<0.05$ ) との間にそれぞれ有意な正の相関を認めた (図 3). 前活動比率 ST/BF と IC 後 50ms 時膝関節外反角度 ( $R=-0.54$ ,  $P<0.05$ ) および膝関節最大外反角度 ( $R=-0.48$ ,  $P<0.05$ ) との間にそれぞれ有意な負の相関を認めた (図 4). その他に有意な相関は検出されなかった (表 1).

### 考察

本研究の目的は女性の DVJ における着地動作時の膝関節周囲筋の前活動と膝関節外反角度および外反モーメントとの関係を調査することであった. 本研究結果は, BF の前活動と IC 後 50ms 時および最大の膝関節外反角度との間にそれぞれ有意な正の相関を示した. また, 前活動比率 ST/BF と IC 後 50ms 時および最大の膝関節外反角度と

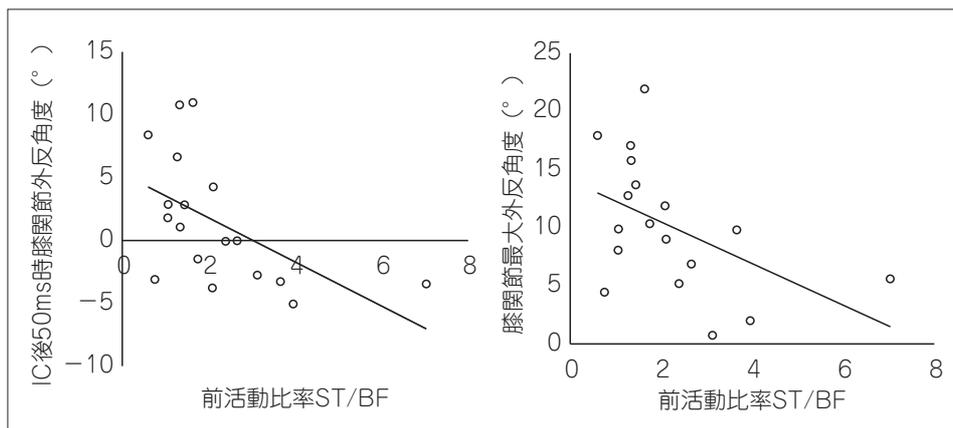


図4 前活動比率 ST/BF と膝関節外反角度  
 前活動比率 ST/BF と IC 後 50ms 時膝関節外反角度との間に有意な負の相関を認めた ( $R = -0.54$ ,  $P < 0.05$ ). 前活動比率 ST/BF と膝関節最大外反角度との間に有意な負の相関を認めた ( $R = -0.48$ ,  $P < 0.05$ ).

表1 Pearson の積率相関係数

前活動	膝関節外反角度		膝関節外反モーメント	
	IC 後 50ms 時	最大値	IC 後 50ms 時	最大値
RF	0.01	0.37	0.34	0.27
VM	0.07	0.17	-0.07	0.19
VL	-0.19	0.06	-0.03	0.31
ST	0.25	0.04	-0.43	-0.12
BF	0.81**	0.59*	-0.07	0.05
VM/VL	0.42	0.32	0.01	-0.23
ST/BF	-0.54**	-0.48*	-0.17	-0.11
H/Q	-0.38	-0.07	-0.29	-0.33

各筋の IC 前 50ms 間の筋活動積分値および前活動比率と、IC 後 50ms 時および最大の膝関節外反角度および外反モーメントとの間における Pearson の積率相関係数. 大腿直筋 (RF), 内側広筋 (VM), 外側広筋 (VL), 半腱様筋 (ST), 大腿二頭筋 (BF), 大腿四頭筋の外側に対する内側の前活動比率 (VM/VL), ハムストリングスの外側に対する内側の前活動比率 (ST/BF), 大腿四頭筋に対するハムストリングスの前活動比率 (H/Q).  
 \* :  $P < 0.05$ , \*\* :  $P < 0.01$ .

の間にそれぞれ有意な負の相関を示した。

女性の DVJ における着地動作時の膝関節最大外反角度は ACL 損傷の有意な予測因子であることが報告されている<sup>6)</sup>. 本研究結果は, DVJ における着地動作時の BF の前活動が大きい女性は膝関節最大外反角度が大きいことを示した. 前方ホップ動作を対象とした先行研究においても BF の前活動と膝関節最大外反角度との間に有意な正の相関があることが報告されている<sup>10)</sup>. 本研究結果はこの先行研究<sup>10)</sup>の結果を支持するものであり, 女性の着地動作時の BF の前活動の増加は膝関節外反が大きな着地動作と関連することが示唆され

た。

ACL 損傷は着地動作における IC 後 50ms 以内に生じ, 膝関節外反位にて受傷していたこと<sup>14)</sup> や着地シミュレーションにおいて着地後早期に最大の ACL 張力が生じたこと<sup>15)</sup>から, 着地後早期の生体力学的特徴, 特に着地後早期の膝関節外反運動は ACL 損傷の受傷メカニズムの一つとして考えられている. しかしながら, 着地後早期の膝関節運動の制御にはフィードバック制御では不十分であり, 着地前からの筋活動が重要であることが示唆されている<sup>7-9)</sup>. 本研究結果は, DVJ における着地動作時の BF の前活動が大きい女性は IC 後 50

ms 時の膝関節外反角度が大きいことを示した。したがって、ACL 損傷が生じるとされる着地後早期の膝関節外反角度の増加には BF の前活動の増加が関連する可能性が考えられる。

BF の作用として、膝関節外反、下腿外旋、脛骨後方並進が知られている<sup>16,17)</sup>。一方、ACL の張力を高める運動として、膝関節外反、下腿内旋、脛骨前方並進が挙げられており<sup>18,19)</sup>、これらを比較すると BF の前活動を減じることは ACL 損傷において膝関節外反以外の点において不利益が生じる可能性がある。先行研究より、前方ホップ動作の着地後において女性は大腿の内側の筋に比べて外側の筋の筋活動が高いことが報告されており<sup>20)</sup>、膝関節周囲筋の内外側の不均衡な筋活動パターンが ACL 損傷リスクと関連する可能性が示唆されている。Zebis ら<sup>21)</sup> は、前向き研究によって女性のカッティング動作において ST の前活動の低下が ACL 損傷を予測することを報告した。本研究結果では、小さな前活動比率 ST/BF が大きな膝関節外反角度と関連することを示した。これらのことから、ACL 損傷予防に向けて、内外側ハムストリングスの不均衡な前活動比率に着目する必要がある可能性が考えられる。

一方、前活動比率 VM/VL と膝関節外反角度との間に有意な相関を認めなかった。ACL 損傷の危険肢位を模倣した動作課題を行った先行研究<sup>13)</sup>において、女性は男性に比べて筋活動比率 VM/VL が有意に低値を示すことが報告されている。膝関節周囲筋の作用として、大腿四頭筋はハムストリングスに比べ膝関節内反・外反作用が小さいことが示されている<sup>16)</sup>。先行研究<sup>13,16)</sup>および本研究結果より、筋活動比率 VM/VL が低値を示す筋活動パターンは、女性において見られる特徴的な筋活動パターンである一方で、着地動作中の膝関節外反角度および膝関節外反モーメントには影響を与えない可能性が考えられる。

本研究結果から膝関節周囲筋の前活動と膝関節外反モーメントとの間に有意な相関は検出されなかった。先行研究においても同様に、膝関節周囲筋の前活動と膝関節最大外反モーメントとの間に有意な相関がないことが報告されている<sup>10)</sup>。一方で、前方ホップ動作において、着地後の内側の大腿四頭筋とハムストリングスの共同的な筋活動と膝関節最大外反モーメントとの間に有意な関連があることが報告されており<sup>20)</sup>、膝関節周囲筋の筋

活動と膝関節外反角度および外反モーメントに関して更なる研究が必要であることが考えられる。

先行研究<sup>22)</sup>において、内側広筋および外側広筋の筋活動と膝関節最大屈曲角度との間に有意な関連があることが報告されている。しかしながら、本研究結果から膝関節周囲筋の前活動と膝関節屈曲角度または膝関節屈曲モーメントとの間に有意な相関は検出されなかった。これは、動作課題の違いによる影響や筋電位データの解析方法の違いによる影響が考えられる。

本研究の限界として、筋活動による検討であるため、実際の動作中にどの程度の筋張力が発揮されたかは不明である。また、本研究では ACL 損傷の予測因子である膝関節外反角度および外反モーメントと膝関節周囲筋の前活動との間の関係を検討したが、脛骨の前後並進運動など ACL 損傷に関連すると考えられるその他の因子との関連は不明である。

## 結 論

BF の前活動および前活動比率 ST/BF と IC 後 50ms 時および最大の膝関節外反角度との間に有意な相関を示した。ハムストリングスの着地前筋活動パターンは、着地動作中の膝関節外反運動と関連することが明らかとなった。

## 文 献

- 1) Barder-Westin, SD, Noyes, FR: Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy* 27(12): 1697-1705, 2011.
- 2) Ajuied, A, Wong, F, Smith, C et al: Anterior cruciate ligament injury and radiologic progression of knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med* 42(9): 2242-2252, 2014.
- 3) Cumps, E, Verhagen, E, Annemans, L et al: Injury rate and socioeconomic costs resulting from sports injuries in Flanders: data derives from sports insurance statistics 2003. *Br J Sports Med* 42(9): 767-772, 2008.
- 4) Boden, BP, Dean, GS, Feagin, JA Jr et al: Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics* 23(6): 573-578, 2000.
- 5) Arendt, EA, Agel, J, Dick, R et al: Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men

- and women. *J Athl Train* 34(2): 86-92, 1999.
- 6) Hewett, TE, Myer, GD, Ford, KR et al.: Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med* 33(4): 492-501, 2005.
  - 7) Dyhre-Poulsen, P, Krogsgaard, MR: Muscular reflexes elicited by electrical stimulation of the anterior cruciate ligament in humans. *J Appl Physiol* 89(6): 2191-2195, 2000.
  - 8) Zhou, S, McKenna, MJ, Lawson, DL et al.: Effects of fatigue and sprint training on electromechanical delay of knee extensor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 72(5-6): 410-416, 1996.
  - 9) Hannah, R, Minshull, C, Smith, SL et al.: Longer electromechanical delay impairs hamstrings explosive force versus quadriceps. *Med Sci Sports Exerc* 46(5): 963-972, 2014.
  - 10) Palmieri-Smith, RM, Wojtys, EM, Ashton-Miller, JA: Association between preparatory muscle activation and peak valgus knee angle. *J Electromyogr Kinesiol* 18(6): 973-979, 2008.
  - 11) Brown, TN, McLean, SG, Palmieri-Smith, RM: Associations between lower limb muscle activation strategies and resultant multi-planar knee kinetics during single leg landings. *J Sci Med Sport* 17(4): 408-413, 2014.
  - 12) Ishida, T, Yamanaka, M, Takeda, N et al.: The effect of changing toe direction on knee kinematics during drop vertical jump: a possible risk factor for anterior cruciate ligament injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* Apr 23(4): 1004-1009, 2015.
  - 13) Myer, GD, Ford, KR, Hewett, TE: The effects of gender on quadriceps muscle activation strategies during a maneuver that mimics a high ACL injury risk position. *J Electromyogr Kinesiol* 15(2): 181-189, 2005.
  - 14) Krosshaug, T, Nakamae, A, Boden, BP et al.: Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med* 35(3): 359-367, 2007.
  - 15) Kiapour, AM, Quatman, CE, Goel, VK et al.: Timing sequence of multi-planar knee kinematics revealed by physiologic cadaveric simulation of landing: implications for ACL injury mechanism. *Clin Biomech* 29(1): 75-82, 2014.
  - 16) Lloyd, DG, Buchanan, TS: Strategies of muscular support of varus and valgus isometric loads at the human knee. *J Biomech* 34(10): 1257-1267, 2001.
  - 17) Li, G, Rudy, TW, Sakane, M et al.: The importance of quadriceps and hamstring muscle loading on knee kinematics and in-situ forces in the ACL. *J Biomech* 32(4): 395-400, 1999.
  - 18) Markolf, KL, Burchfield, DM, Shapiro, MM et al.: Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *J Orthop Res* 13(6): 930-935, 1995.
  - 19) Shin, CS, Chaudhari, AM, Andriacchi, TP: Valgus plus internal rotation moments increase anterior cruciate ligament strain more than either alone. *Med Sci Sports Exerc* 43(8): 1484-1491, 2011.
  - 20) Palmieri-Smith, RM, McLean, SG, Ashton-Miller, JA et al.: Association of quadriceps and hamstrings cocontraction patterns with knee joint loading. *J Athl Train* 44(3): 256-263, 2009.
  - 21) Zebis, MK, Andersen, LL, Bencke, J et al.: Identification of athletes at future risk of anterior cruciate ligament ruptures by neuromuscular screening. *Am J Sports Med* 37(10): 1967-1973, 2009.
  - 22) Walsh, M, Boling, MC, McGrath, M et al.: Lower extremity muscle activation and knee flexion during a jump-landing task. *J Athl Train* 47(4): 406-413, 2012.

---

(受付：2015年7月27日，受理：2015年10月13日)

## The relationship between pre-landing activation of the hamstring muscles and the knee valgus angle or moment during landing in a drop vertical jump task

Ikuta, R. \*, Ishida, T. \*, Yamanaka, M. \*, Taniguchi, S. \*  
Ueno, R. \*, Koshino, Y. \*, Samukawa, M. \*, Tohyama, H. \*

\* Faculty of Health Sciences, Hokkaido University

**Key words:** anterior cruciate ligament injury, motion analysis, electromyography

**[Abstract]** The purpose of the present study was to investigate the relationship between pre-landing activation of knee muscles and the knee valgus angle or moment during a drop vertical jump task. Eighteen healthy female subjects participated in this study. Pre-landing activation of the knee muscles and knee valgus angle and moment during drop vertical jump were analyzed using synchronized surface electromyography and motion analysis system. The results showed that the pre-landing activation of the biceps femoris and the pre-landing activation ratio of semitendinosus/biceps femoris were significantly correlated with knee valgus angle at 50 ms following ground contact and the peak knee valgus angle. The findings of the present study suggest that pre-landing activation of the hamstring muscles influences the knee valgus angle during drop vertical jump.