

女子トップアスリートの ACL 損傷の受傷要因の解明—疲労がジャンプ着地 動作の姿勢制御能力に与える影響—

Investigation of anterior cruciate ligament injury in female athletes
—Effect of fatigue on postural control during jump landing—

神谷阿久里*1, 原 邦夫*1, 吉田昌平*2, 藤井雄太*3
渥美 覚*1, 菅 寛之*4, 新井祐志*5, 久保俊一*3

キー・ワード : anterior cruciate ligament injury, fatigue, postural control
ACL 損傷, 疲労, 姿勢制御能力

〔要旨〕 着地前からの姿勢制御能力が十分備わっていると考えられるトップアスリートでも疲労が原因で姿勢制御能力が低下することで着地時に不良姿勢をとり、非接触型の前十字靭帯 (ACL) 損傷を受傷する可能性に着目した。対象は本邦のプロ女子サッカー選手 23 名とした。drop vertical jump (DVJ) を動作課題とし、前額面と矢状面からデジタルカメラでハイスピード撮影を行った。まず負荷前に DVJ を 3 試技行い、次に自転車エルゴメーターで全力ペダリングを 8 回行い、疲労を誘発した。その後 DVJ を 3 試技行った。負荷前後には血中乳酸測定を行い、疲労の評価とした。負荷前後の膝関節外反・股関節屈曲・膝関節屈曲・足関節背屈角度を 3 試技の平均値と比較した。また、負荷前後の着地時の姿勢も観察した。全ての選手で乳酸値は有意に上昇していた。右膝関節外反角度は有意に上昇し、股関節屈曲・足関節背屈角度は有意に減少していた。膝関節屈曲角度に有意差はなかった。また、着地時不良姿勢となった選手は、負荷前では 18%、負荷後には 78% となった。全身的な負荷運動により筋疲労が生じ、不良姿勢をとったと考えられ、非接触型の ACL 損傷を予防するには、姿勢制御を可能にするための筋持久力の向上も重要である。

はじめに

ACL 損傷は女性に多く発生し、その頻度は男性の 4.6 倍とされている¹⁾。一旦損傷すると、競技からの離脱が半年以上と長期間にわたることから、女子アスリートにとって予防対策が重要となるスポーツ外傷の一つである。ACL 損傷の受傷機転の

約 7 割は非接触型であり、着地時の膝外反位や後方重心などがリスクファクターとされている^{2,3)}。これらの不良な着地姿勢を防ぐ方法として、国際サッカー連盟 (FIFA) 作成の FIFA11+ などの外傷予防プログラムが挙げられ、ACL 損傷の予防効果について報告されている⁴⁾。一方近年では、詳細な画像解析から、ACL 損傷は、着地後 40ms 以内と超早期に生じていることが報告されている⁵⁾。着地時に刺激を受け取ってから身体が反応できる時間を考慮すると、着地した瞬間に生じた受傷肢位を瞬時に修正することは困難であり、その予防には着地前からこれらの姿勢を回避する予測的姿勢制御能力が必要と考えられている⁶⁾。競技レベルが低い選手だけでなく、競技レベルが高く、姿勢制

*1 京都鞍馬口医療センター整形外科

*2 京都地域医療学際研究所がくさい病院リハビリテーション部

*3 京都府立医科大学大学院医学研究科運動器機能再生外科学

*4 京都地域医療学際研究所がくさい病院整形外科

*5 京都府立医科大学大学院医学研究科スポーツ・障がい者スポーツ医学

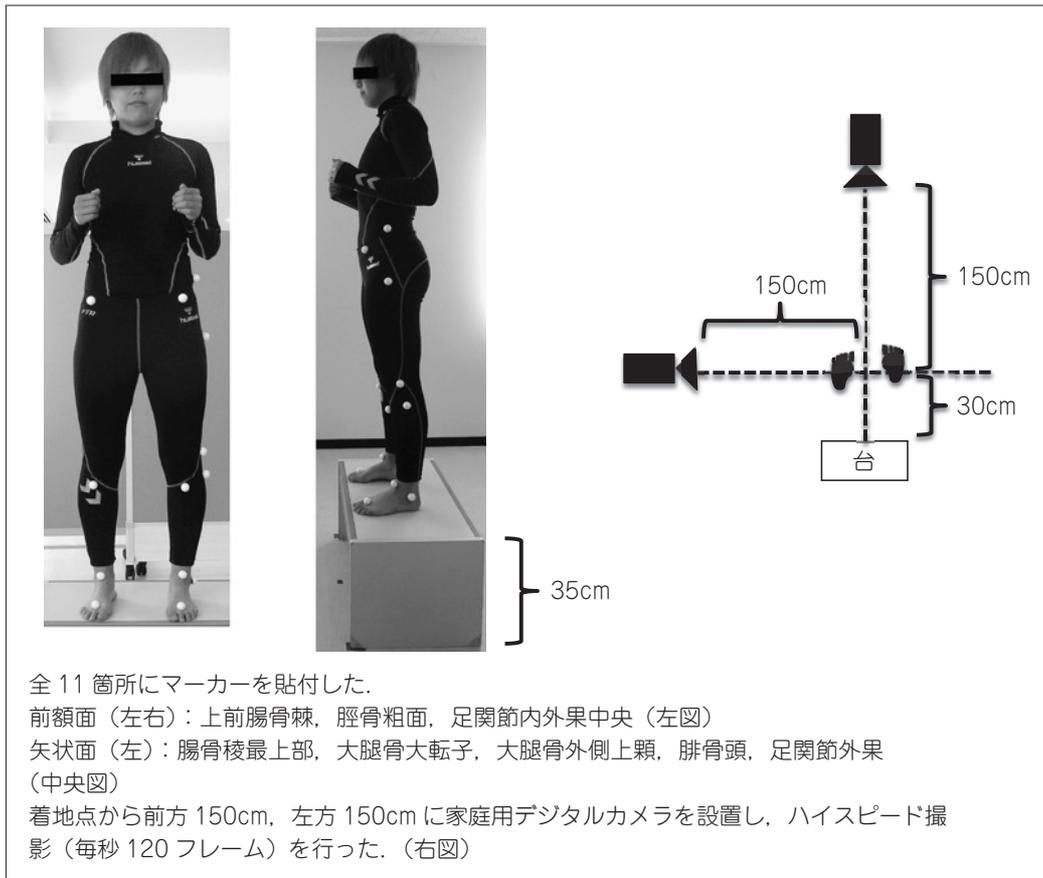


図 1

御能力が十分に備わっていると考えられるトップアスリートであっても ACL 損傷を受傷する⁷⁾。また，ACL 損傷は疲労の蓄積した局面で受傷することが多いとの報告がある^{8,9)}。以上の背景から，今回われわれは，実際の練習や競技の際のように高度に疲労した状態で着地時に不良姿勢をとり非接触型の ACL 損傷につながる可能性があるかと仮説を立てた。本研究では，本邦の女子プロサッカー選手を対象として，疲労とジャンプ着地時の姿勢制御能力の関連を明らかにすることを目的とした。

対象および方法

1. 対象

なでしこリーグ所属の女子サッカー 1 チームの登録選手で膝のスポーツ障害や外傷により不安定性や疼痛などの機能障害のみられない 23 名を対象とした。平均年齢 23.5 ± 2.9 歳，身長 161.7 ± 5.6 cm，体重 54.8 ± 5.3kg (平均 ± 標準偏差) であった。

2. 方法

a. 動作課題

35cm 台から 30cm 前方を目指して着地後すぐに最大垂直跳びを行い着地する drop vertical jump (以下 DVJ) を動作課題とした¹⁰⁻¹²⁾。被検者の左右の上前腸骨棘，脛骨粗面，足関節内外果中央の直上と，左側の腸骨稜最上部，大腿骨大転子，大腿骨外側上顆，腓骨頭，足関節外果の直上に体表マーカ―を計 11 箇貼付した。着地点から前方 150cm，左方 150cm に家庭用デジタルカメラを設置し，毎秒 120 フレームでハイスピード撮影を行って，前額面と矢状面から評価した（図 1）。ウォーミングアップは行ったが，DVJ の動作課題前に ACL 損傷リスクの高い肢位に関する知識の提供や練習は一切行わなかった。

b. 疲労誘発運動と姿勢制御能力の解析プロトコール（図 2）

安静時の乳酸値をラクトート分析装置（ラクトート・プロTM2 LT-1730）で測定してから，DVJ を 3 試技実施した。疲労を誘発するために，あらかじめ自転車エルゴメーター（パワーマック

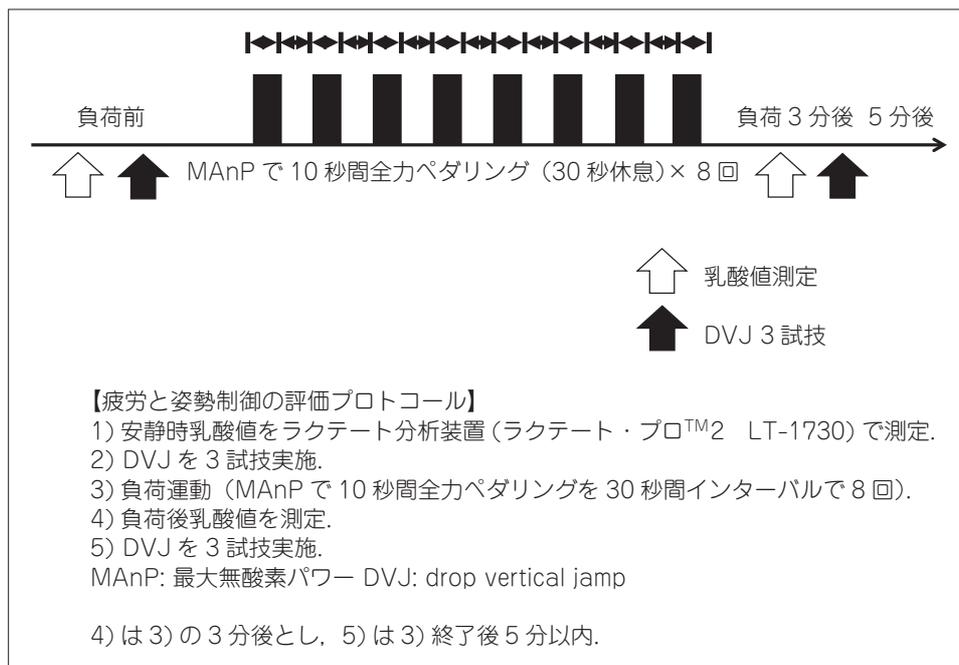


図 2

ス VII®) で中村らの方法に従って算出した最大無酸素パワー (MAnP) で^{13,14)}, 10 秒間全力ペダリングを 30 秒間インターバルで 8 回実施した. 負荷 3 分後に乳酸値を測定し, 5 分以内に DVJ を 3 試技実施した. DVJ での垂直跳び前の着地動作を初回着地動作, 垂直跳び後を最終着地動作として評価した.

c. 疲労と姿勢制御能力評価

運動負荷前後の血中乳酸値を測定した. 乳酸の不可逆的増加の境界点が 4mmol¹⁶⁾以上とされており, この値を基準に疲労を評価した.

初回着地時の撮影動画を Quicktime Player に取り込んだ後, コマ送りし, 接地の画面を選択した. 冠状面では, 上前腸骨棘と脛骨粗面を結んだ線を大腿軸とし, 脛骨粗面と足関節内外果中央を結んだ線を下腿軸として, これらの外側のなす角をフリーソフト image J¹⁵⁾を用いて計測した. 180 度からその角度を減じた値を A 角とし, A 角が 0 度を超えるものを膝外反位, 0 度未満を膝内反位と定義した. 矢状面では股関節屈曲角度, 膝関節屈曲角度および足関節背屈角度を評価した (図 3). 角度の計測はすべて 1 名の検者が行った. また, 最終着地時に, 踵からつま先まで接地した状態を良好姿勢, つま先浮き, 後ずさり, 後方転倒した状態を不良姿勢と本研究で定義した. 観察は 2 名の検者で行った.

本研究を実施するにあたり, 事前に内容を選手個人に説明し, 同意を得た. また本研究に関して京都地域医療学際研究所がくさい病院の倫理委員会の承認を得た.

d. 統計解析

負荷前後の血中乳酸値, A 角, 股関節屈曲角度, 膝関節屈曲角度および足関節背屈角度の比較検定に Wilcoxon signed-ranks test を用いた. A 角では負荷前の 3 回の DVJ で得られた角度から平均値を算出し, 負荷後の 3 回の平均値と比較した. 股関節屈曲角度, 膝関節屈曲角度および足関節背屈角度では負荷前の 3 回の DVJ で得られた角度の平均値を算出し, 負荷後の平均値と比較した.

■ 結 果

1. 負荷前後の血中乳酸値

負荷後の乳酸値は負荷前と比較して有意に上昇し, すべての選手で 4mmol/L 以上に上昇していた (負荷前 2.8 ± 2.0 mmol/L, 負荷後 14.7 ± 3.5 mmol/L) (図 4).

2. 初回着地時の関節角度

右膝の A 角は負荷前と比べて負荷後に有意に上昇した (負荷前 -5.7 ± 7.0 度, 負荷後 -3.6 ± 6.5 度, p 値 0.002) (図 5). 左膝の A 角は有意差を認めなかった (負荷前 -8.8 ± 7.8 度, 負荷後 -7.8 ± 7.0 度, p 値 0.3) (図 6). 膝関節屈曲角度は, 負荷前後

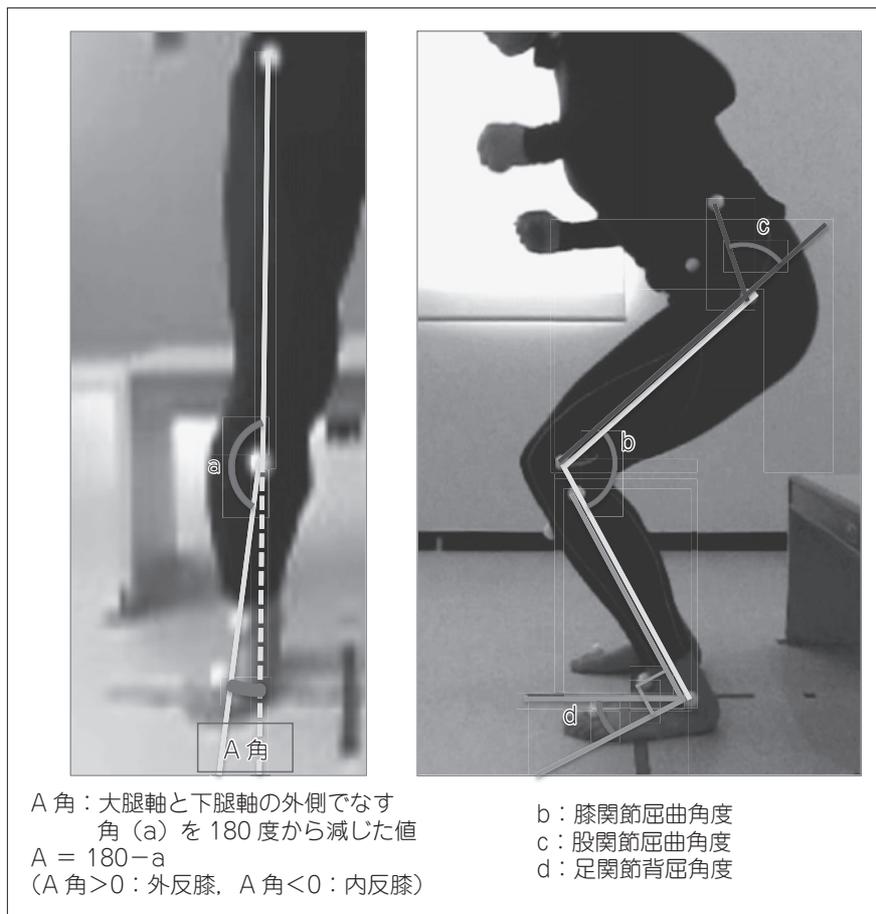


図 3

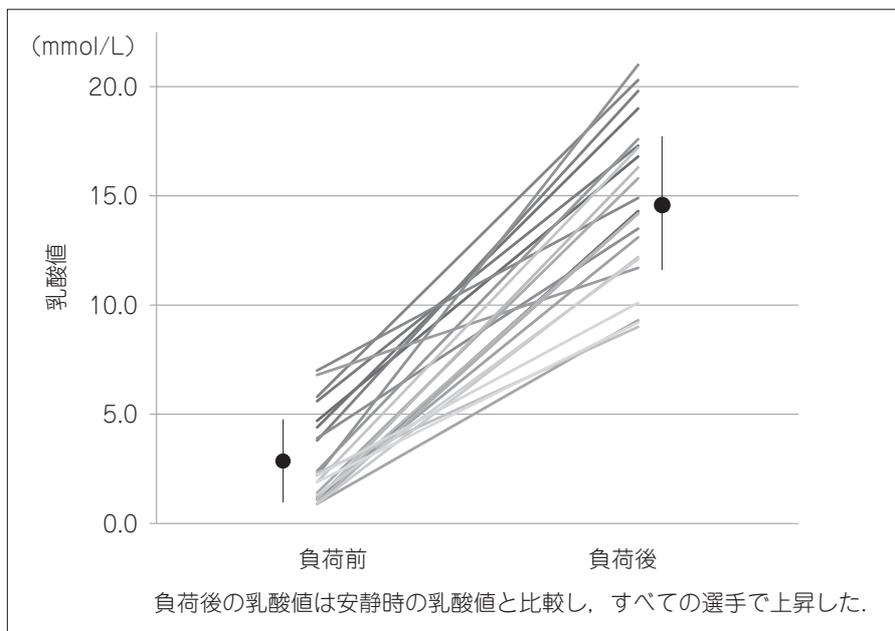


図 4

で有意差を認めなかったが、股関節屈曲角度および足関節背屈角度は有意に減少した（負荷前膝屈

曲角度 50.7 ± 5.8 度，負荷後膝屈曲角度 49.9 ± 6.0 度， p 値 0.2，負荷前股関節屈曲角度 32.4 ± 8.0 度，

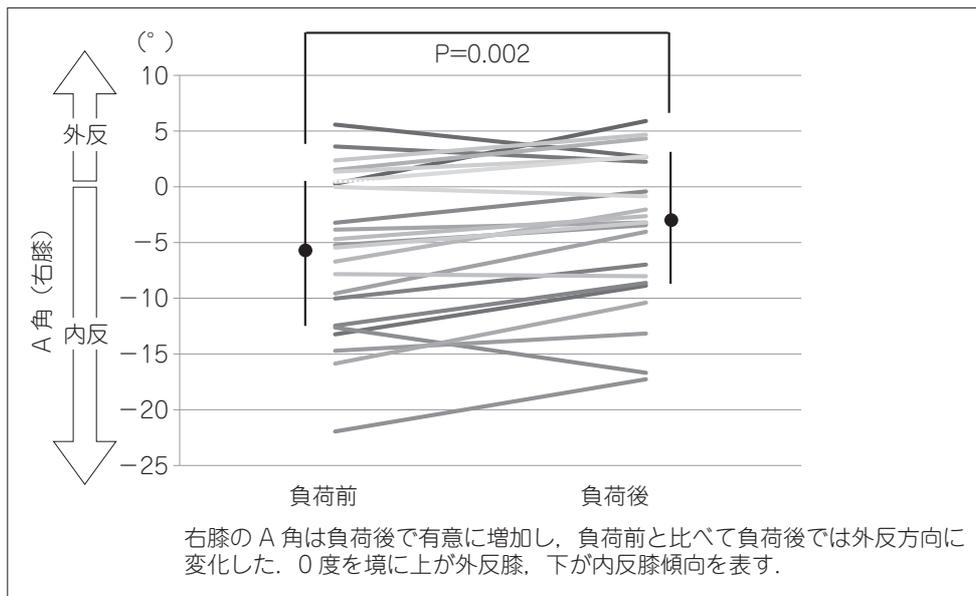


図5

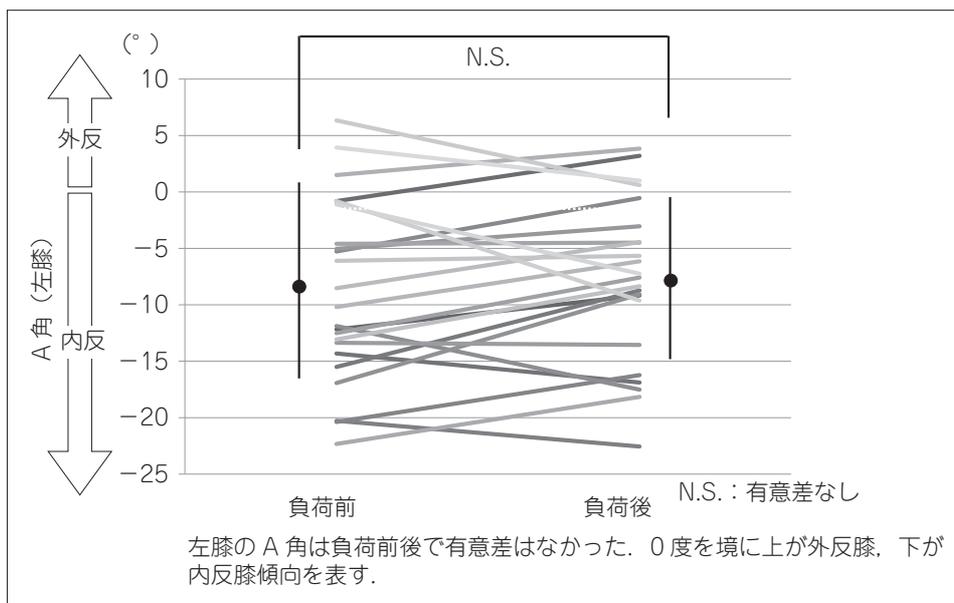


図6

負荷後股関節屈曲角度 27.1 ± 7.8 度, p 値 0.004, 負荷前足関節背屈角度 17.9 ± 4.8 度, 負荷後足関節背屈角度 16.2 ± 4.3 度, p 値 0.02 (図7~9)。

3. 最終着地時の姿勢

負荷前の着地時では、良好姿勢であった選手は19名、不良姿勢であった選手は4名(つま先浮き3名、後ずさり1名、後方転倒0名)であった。負荷後では、良好姿勢であった選手は5名、不良姿勢となった選手は18名(つま先浮き5名、後ずさり9名、後方転倒4名)であった。これらの姿勢評価は2名の検者ですべて一致していた。不良姿

勢となった選手は、負荷前で18%であったが、負荷後に78%と増加した。

■ 考 察

女子プロサッカー選手に下肢に高度な疲労を誘発する運動を負荷してからDVJを行ったところ、負荷前と比べて前額面において片膝が着地時に外反位に変化し、矢状面では姿勢が悪化した。運動能力が高く姿勢制御能力の優れたトップアスリートであっても、下肢多関節周囲筋が疲労することでACL損傷のリスクが高まることが明らかと

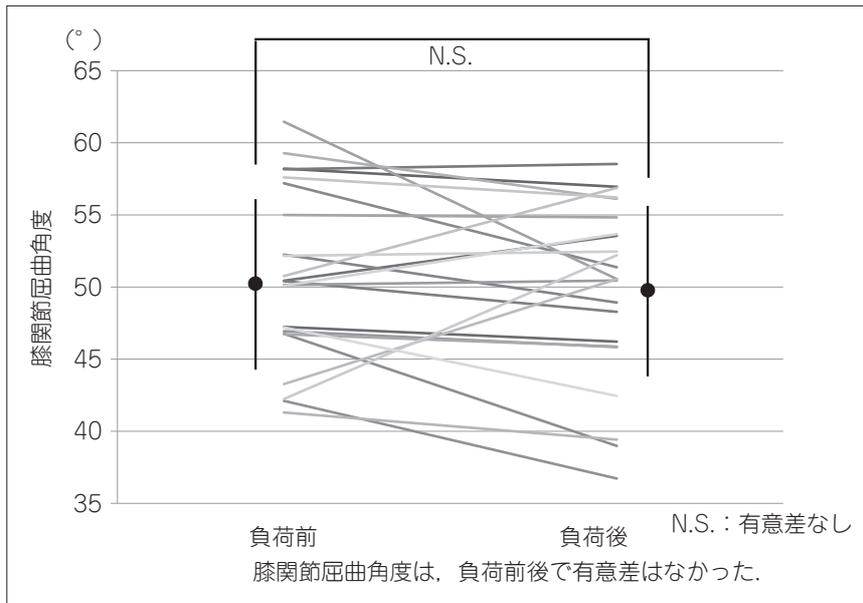


図 7

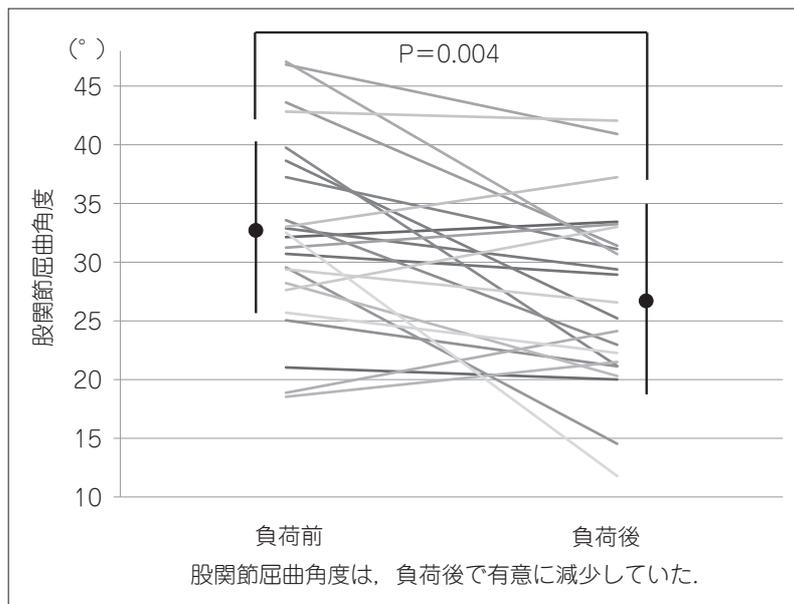


図 8

なった。

本研究では、対象が均一なトップアスリートの母集団となるように国内女子サッカートップリーグに所属する一つのチーム全員に対して測定および評価を行った。被検者に対して ACL 損傷のリスクの高い肢位を説明せず、DVJ の予行演習を一切させず、まず、負荷をかけない状態で DVJ を行わせて、姿勢制御能力を評価した。その結果、前額面では右膝で 23 名中 16 名、左膝で 20 名が内反

位で着地でき、矢状面では後方へ転倒した被検者はいなかった。このことから今回の対象群は、疲労がなければ着地前後で ACL 損傷のリスクを回避できる姿勢制御能力の高い集団と考えた。次に、実際の試合および練習時のように疲労が蓄積した状態を再現する目的で、自転車エルゴメーターを用いて各被検者に最大努力の下肢多関節協調運動負荷を加えた。負荷強度の基準は、ACL 再建術後のリハビリ期間に身体能力の回復を評価するため

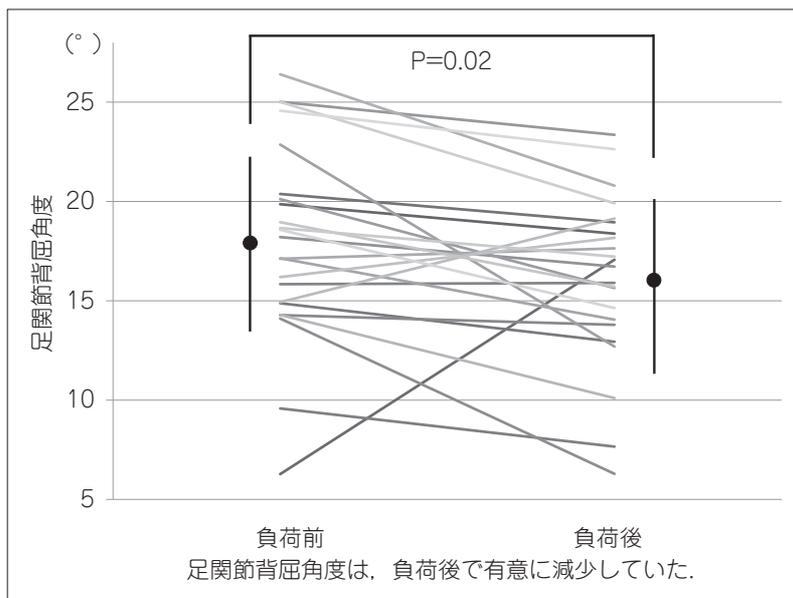


図 9

に吉田らが考案した Prediction of Instantaneous power and Agility performances used by pedaling test の測定値から各被検者の最大負荷強度を算定して決定した^{13,14)}。この運動負荷後に DVJ を行い、負荷前との姿勢制御能力を比較検討した。このプロトコールは、われわれが独自に考案した、筋疲労下でのジャンプ着地動作課題に対する姿勢制御能力の評価法である。この結果、負荷後の着地姿勢では前額面で右膝が有意に外反位に変化していた。矢状面評価では股関節の屈曲角度および足関節の背屈角度が有意に減少し、78%の被検者で後方転倒など後方への姿勢不良がみられた。その要因として下肢多関節周囲筋の筋疲労が影響していると推察した。また、今回疲労度の評価を血中乳酸値の測定により評価した。このことは自覚的疲労度とは視点の異なる疲労の客観的評価となると考えた。乳酸は運動強度の増加に伴い骨格筋で産生され、細胞外から血中へ放出されるが、肺でのガス交換により CO₂として体外に排出される。これにより血中濃度は定常状態となるが、非常に高度な負荷が加わるとガス交換による緩衝では追いつかず、不可逆的に増加する。その境界は 4mmol¹⁶⁾とされる^{17,18)}。今回、運動負荷後に血中の乳酸値が全例で顕著に上昇していたことから、自転車エルゴメーターを用いた至適運動負荷により下肢の多関節協調運動の高度な疲労が誘発され、前額面および矢状面で ACL 損傷のリスクの高い姿勢となったと考えた。この運動負荷は股関節お

よび膝関節伸筋力と相関することが明らかとされており¹³⁾、下肢多関節周囲筋の中でも、これらの筋群の筋疲労が影響を与えた可能性があると考えた。

ジャンプ着地動作で非接触型 ACL 損傷の不良肢位を回避するためには、着地より前に予測的な姿勢制御を行うとともに、着地時に良好な姿勢を維持する必要がある。今回の結果から、トップアスリートでも、血中乳酸値が高まるような下肢多関節周囲筋の高度な疲労が生じれば、姿勢制御能力の低下とともに ACL 損傷のリスクが高まることが明らかとなった。トップアスリートにおいて ACL 損傷を回避するためには、予測を超えるような筋疲労に直面しても姿勢制御を可能にするための下肢の多関節周囲筋の持久力の向上が重要であると考えた。

本研究には限界点がある。有意差が出なかった項目のサンプルサイズに関して、G-power³⁾を用いた検定力分析を行った。今回使用した対応のある t-検定 (Wilcoxon signed-ranks test) において、有意水準 0.05, 検定力 0.80, 効果量 0.5 とした場合の必要サンプルサイズは 35 であり、1 チームを対象とした本研究では十分なサンプルサイズに達していなかったと考えられる。今後は複数チームによる大きいサンプルサイズでの検討が望ましい。評価では 1 名の検者のため検者間誤差の検討ができていない。測定方法に関して、矢状面の撮影を左側からしか実施していないことから右下肢の影

響が不明である。また、2次元での分析のため、関節の回旋運動を含めた評価ができていない。さらに、筋電図計や筋力測定など行っておらず、下肢のどの筋肉の疲労の影響が大きいかわからない。前額面での評価で右膝のみに有意差がみられた要因をあきらかにするため、今後、床反力計や重心動揺性に関する解析が必要である。

まとめ

負荷のない状態では姿勢制御能力を有する女子プロサッカー選手でも、下肢に運動負荷を加えて高度な疲労を誘発すれば、ジャンプ着地動作で、前額面で膝は有意に外反し、後方への姿勢不良を呈することが明らかとなった。女子トップアスリートにおいても、疲労によって姿勢制御能力が低下し、ACL 損傷のリスクが高まる可能性を示した。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- Agel J, Arendt EA, Bershadsky B. Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review. *Am J Sports Med.* 2005; 33: 524-530.
- 山本大造. 3章. In: 蒲田和芳, 片寄正樹(編). ACL 損傷予防プログラムの科学的基礎. 第1版. 東京: ナップ; 101-106, 2008.
- Hewett TE, Torg JS, Boden BP. Video analysis of trunk and knee motion during non-contact anterior cruciate ligament injury in female athletes: lateral trunk and knee abduction motion are combined components of the injury mechanism. *Br J Sports Med.* 2009; 43: 417-422.
- AI Attar WS, Soomro N, Pappas E, et al. How Effective are F-MARC Injury Prevention Programs for Soccer Players? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* 2016; 46: 205-217.
- Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *Am J Sports Med.* 2010; 38: 2218-2225.
- 小笠原一生, 古賀英之, 中前敦雄. ビデオ解析による非接触型前十字靭帯および内側側副靭帯損傷時の膝モーメント指定と受傷メカニズムの物理的考察. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2013; 21: 131-141.
- Junge A, Dvorak J. Injuries in female football players in top-level international tournaments. *Br J Sports Med.* 2007; 41: i3-i7.
- Hawkins RD, Hulse MA, Wilkinson C, et al. The association football medical research programme: an audit of injuries in professional football. *Br J Sports Med.* 2001; 35: 43-47.
- Hawkins RD, Fuller CW. A prospective epidemiological study of injuries in four English professional football clubs. *Br J Sports Med.* 1999; 33: 196-203.
- Myer GD, Ford KR, Hewett TE. New method to identify athletes at high risk of ACL injury using clinic-based measurements and freeware computer analysis. *Br J Sports Med.* 2011; 45: 238-244.
- Hewett TE, Myer GD, Ford KR, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med.* 2005; 33: 492-501.
- Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, et al. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes. A prospective study. *Am J Sports Med.* 1999; 27: 699-706.
- 吉田昌平, 原 邦夫. 膝前十字靭帯再建術後のアスレティックリハビリテーション: 自転車エルゴメーターにおける負荷別発揮能力の評価とトレーニングへの応用. *関節鏡.* 2008; 33: 10.
- 中村好男, 武藤芳照, 宮下充正. 最大無酸素パワーの自転車エルゴメーターによる測定法. *J. J. Sports Sci.* 1984; 3: 834-839.
- Rasband W.S., ImageJ U.S.National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2018.
- Jacobs I, Sjodin B, Kaiser P, et al. Onset of blood lactate accumulation after prolonged exercise. *Acta Physiol. Scand.* 1981; 112: 215-217.
- 守田武志, 里見 潤, 舌 正史, 他. Anaerobic Threshold (AT), Respiratory Compensation Point (RCP) を基準にした運動強度の乳酸・換気応答と持続的トレーニングへの適用. *日本臨床スポーツ医学会誌.* 2002; 14: 1039-1043.

- 18) Wasserman K, Whipp BJ, Koyl SN, et al. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol*. 1973; 35: 236-243.
- 19) Faul F, Erdfelder E, Buchner A, et al. Statistical power analyses using G*Power 3.1: tests for corre-

lation and regression analyses. *Behav Res Methods*. 2009; 41: 1149-1160.

(受付：2018年4月19日，受理：2019年6月28日)

Investigation of anterior cruciate ligament injury in female athletes —Effect of fatigue on postural control during jump landing—

Kamitani, A.^{*1}, Hara, K.^{*1}, Yoshida, S.^{*2}, Fujii, Y.^{*3}
Atsumi, S.^{*1}, Kan, H.^{*4}, Arai, Y.^{*5}, Kubo, T.^{*3}

^{*1} Department of Orthopaedics, Japan Community Health care Organization Kyoto Kuramaguchi Medical Center, Kyoto, Japan

^{*2} Department of Rehabilitation, Kyoto Interdisciplinary Institute Hospital of Community Medicine, Kyoto, Japan

^{*3} Department of Orthopaedics, Graduate School of Medical Science, Kyoto Prefectural University of Medicine, Kyoto, Japan

^{*4} Department of Orthopaedics, Kyoto Interdisciplinary Institute Hospital of Community Medicine, Kyoto, Japan

^{*5} Department of Sports and Para-Sport Medicine, Graduate School of Medical Science, Kyoto Prefectural University of Medicine, Kyoto, Japan

Key words: anterior cruciate ligament injury, fatigue, postural control

[Abstract] Background: Elite athletes usually show stable postural control, but they sometimes cannot control their posture after high-load training; and consequently, some experience anterior cruciate ligament injury. We investigated the effect of fatigue on the risk of such injuries.

Method: The subjects, 23 elite female football players, performed drop vertical jumps (DVJ), which were documented by video footage taken from the front and the left side. They first performed 3×DVJ, then pedaled an ergometer 8 times with full force for 10 sec each, and then repeated 3×DVJ. We measured and compared their pre- and post-pedaling blood lactate levels, and their pre- and post-pedaling DVJ knee abduction angle, hip flexion angle, knee flexion angle, and ankle dorsiflexion angle.

Results: The blood lactate and right knee abduction angle significantly increased, while the hip flexion angle and ankle dorsiflexion angle significantly decreased between the two measurements. There were no significant differences in the knee flexion angle. The number of athletes who could not maintain a good posture increased from 18% before pedaling to 78% after pedaling.

Conclusion: Elite athletes may lose postural control after repeated physical exercise involving high-load motion. We recommend such athletes to enhance their muscular endurance.