

■ 原著

機能的ウェアが着地動作に及ぼす影響

The effects of functional wear on the jump landing task

向井公一¹⁾²⁾ 小柳磨毅²⁾ 田中則子²⁾ 木村佳記³⁾ 中江徳彦⁴⁾ 椎木孝幸⁵⁾ 境隆弘⁶⁾

小川卓也⁷⁾

Kouichi Mukai¹⁾²⁾ Maki Koyanagi²⁾ Noriko Tanaka²⁾ Yoshinori Kimura³⁾
Naruhiko Nakae⁴⁾ Takayuki Shiiki⁵⁾ Takahiro Sakai⁶⁾ Takuya Ogawa⁷⁾

1) 四條畷学園大学リハビリテーション学部：大阪府大東市北条 5-11-10 (〒574-0011)

TEL 072-863-5043 E-mail : k-mukai@reha.shijonawate-gakuen.ac.jp

2) 大阪電気通信大学 医療福祉工学部

3) 大阪大学医学部附属病院 リハビリテーション部

4) 関西メディカル病院 リハビリテーション科

5) 行岡病院 リハビリテーション科

6) 大阪保健医療大学 保健医療学部

7) 八尾市立病院 リハビリテーション科

1) Faculty of Rehabilitation, Shijonawate Gakuen University, 5-11-10 Hojo, Daito, Osaka, 574-001, Japan, TEL +81-72-863-5043

2) Graduate School of Biomedical Engineering, Osaka Electro-Communication University

3) Department of Rehabilitation, Osaka University Hospital

4) Department of Rehabilitation, Kansai Medical Hospital

5) Department of Rehabilitation, Yukioka Hospital

6) Department of Rehabilitation Science, Osaka Health Science University

7) Department of Rehabilitation, Yao Municipal Hospital

保健医療学雑誌 8 (1): 30-37, 2017. 受付日 2016 年 8 月 23 日 受理日 2017 年 1 月 11 日

JAHS 8 (1): 30-37, 2017. Submitted Aug. 23, 2016. Accepted Jan. 11, 2017.

ABSTRACT: The purpose of this study was to investigate the effects of functional wear which compression clothing developed having supplementary lines of differing stretch ability (below, FW), specifically in terms of posture control at one leg landing in comparison with simple compression wear (below, CW). Subjects were 22 healthy male and female university students, motion task was the drop Jump landing from 30 cm height. As for the knee joint alignment on the frontal plane, FW was varus position although CW was valgus and neutral position at 40msec and 80msec after landing. As for knee joint moment on the frontal plane, FW showed the varus moment while CW showed the valgus moment at 40msec after landing. While at 80msec after landing, the valgus moment of FW was significantly smaller than that of CW. As a result, FW controlled knee joint valgus alignment and reduced the knee joint valgus moment that could be risk factor of ACL injury. It was thus suggested that FW could contribute to the prevention ACL injury and reoccurrence.

Key words: functional wear, anterior crucial ligament injuries, Knee valgus moment

要旨：本研究の目的は、開発した伸縮性の異なるラインを加えた着圧ウェア (functional wear; FW) が片脚着地動作の姿勢制御に及ぼす影響を調査することである。研究デザインは横断的による 2 条件での比較対照試験である。被験者は健康な大学生男女 22 名である。計測には三次元動作解析装置を使用し、片脚でのジャンプ - 着地を実施した。着地後 40msec 時および 80msec 時には、FW が compression wear (CW) に比べ膝内反位であった。着地後 40msec 時では、CW は外反モーメントを示したのに対して、FW では内反モーメントを示した。FW は着地直後より膝外反、内旋に抗する張力が生じ、膝関節の外反アライメントを制御し、膝関節外反モーメントを減少させたと考えられる。FW を装着することにより危険肢位となる外反アライメントと外反モーメントが抑制されたことから、FW は膝 ACL 損傷や再損傷の予防に貢献できる可能性が示唆された。

キーワード：機能的ウェア、膝前十字靭帯損傷、膝外反モーメント

はじめに

膝前十字靭帯 (以下 ACL) 損傷は、スポーツ競技中に発生する頻度が高く、一旦発生するとその後の競技活動の継続が困難となる¹⁾。そのため、治療として一般的に ACL 再建術が行われるが、術後のリハビリテーションには長期間を要し^{2,3)}、再損傷の発生率も高い^{4,5)}。このため、ACL 損傷と再損傷の予防は極めて重要な課題である。

ACL 損傷の発生機序として、跳躍運動における着地時の危険肢位が指摘されている^{6,7)}。Hewett ら⁸⁾は、ACL を損傷した選手は、着地時の膝外反角が損傷していない選手に比べてより大きかったことを示し、ACL 損傷予防や再損傷予防には膝関節の力学的負荷が増大する膝関節の外反、股関節の内転、体幹の外方傾斜といった危険肢位を回避し、膝関節を保護することが重要としている。

スポーツ選手の関節を保護する方法として、テーピングや装具が使用されている。しかし、テーピングには粘着テープを繰り返し同一部位に貼り付けることによる角質剥離等の皮膚障害の可能性や、緩みが生じて効果が持続しないなどの問題がある。一方、装具の ACL 損傷予防に関する生体力学的効果は不明であり、疫学的調査においても一定の評価がない⁹⁾。また、硬性膝装具はスポーツ現場でルール上、装着が禁止されていることが多く、ACL 損傷予防に対して積極的に推奨されるには至っていない¹⁰⁾。このため、ACL 再建術後のスポーツ復帰を支援するためには、こうした欠点を補う新たな補助具の開発が必要となる。

近年、伸縮性素材を用いて運動パフォーマンスの向上を目的とした着圧ウェアが開発され、スポーツ現場で使用されるようになってきた。また、着圧ウェアが ACL 再建術後患者の着地動作を安定させたとの報告や¹¹⁾、下肢への螺旋形のストラップが動作時の下肢アライメントを変化させた

との報告がある¹²⁾。そこで我々は、ストラップやテーピングから着想した伸縮性の異なるラインを着圧ウェアの下腿部から骨盤部にかけて、三次元的に縫製した機能的ウェア (functional wear; FW) を開発した (Figure 1)。

本研究の目的は、FW の装着が着地動作に与える影響を運動学および運動力学の解析し、跳躍着地時の ACL 損傷に至る危険肢位を回避する可能性を調査することである。

対象と方法

【対象】

対象は、下肢・体幹に疾患の無い大学生 22 名 (男性：8 名 女性：14 名) であり、身体特性は年齢 20.9±0.5 歳、身長 163.7±9.6cm、体重 56.6±9.5kg であった。

【方法】

実験では、着圧ウェア (FW) と、ライン縫製の無い着圧ウェア (compression wear; CW) の 2 種類のウェアを着用させた (Figure 1)。ウェアのサイズは S (身長 162 cm~168 cm, 腹囲 71 cm~77 cm), M (身長 167 cm~173 cm, 腹囲 75 cm~81 cm), L (身長 172 cm~178 cm, 腹囲 79 cm~85 cm) の 3 種類から、被験者の身長と腹囲に合わせて選択した。

運動課題は、30cm 台に片脚立位となり、台上から落下するように着地し、床面で静止するジャンプ - 着地課題 (Drop Jump Landing ; DJL) とした (Figure 2)。台上での立位から着地までの支持脚は利き脚とし、膝関節屈曲位で動作が静止するまでを 1 試行として 5 回の試技を行った。この内、着地後の静止姿勢が 3 秒間保たれ動作の安定した 3 試行を採用し、3 回の平均値を被験者の代表値とした。

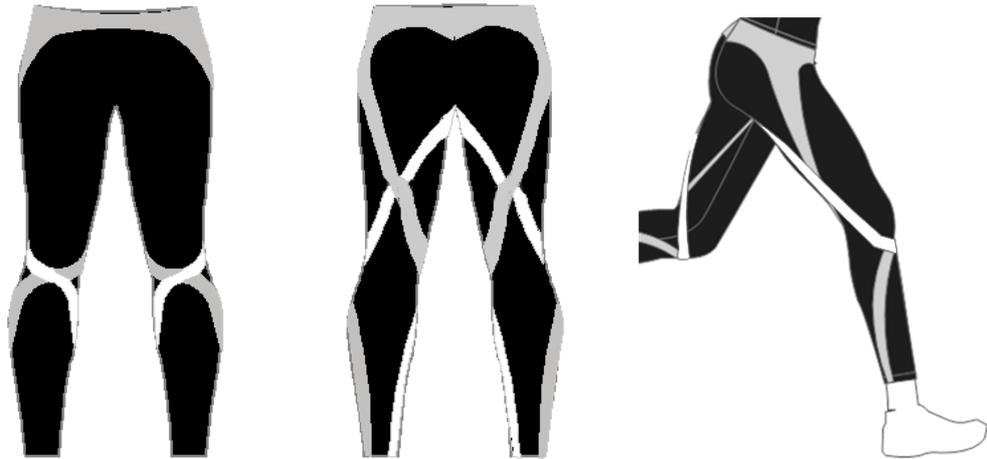


Figure 1. : functional wear (FW)

The Gray -Line of functional ware to reach the front of the hip joint axis from outside the inner thigh through the inner below the knee joint axis from the anterior surface of the tibia. Line of this wear suppresses the knee abduction. Also, the White -line stop to the inside from the outside through the thigh outside below the knee joint axis from the anterior surface of the tibia.

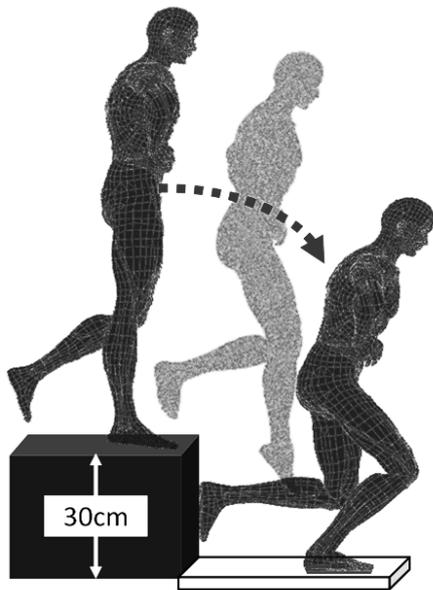


Figure 2. : Task

A single-leg drop jump onto the force plate was performed from a height of 30 cm.

計測は 三次元動作解析装置 (Vicon Nexus; Oxford metrix 社製), 床反力計(OR-6;AMTI 社製)を使用した. サンプル周波数は三次元動作解析装置 200Hz, 床反力計 1000Hz とし, 床反力値 (左右成分 Fx, 垂直成分 Fz), 膝関節角度および各関節モーメントを算出した .

分析時期は着地瞬間, 接地から 40ms 時, 80ms

時とした¹³⁾. また, 床反力垂直成分の最大値 (Fzmax) を接地から床反力垂直成分の最大値までの時間 (Δt) で除した荷重変化率 ($Fzmax/\Delta t$)¹⁴⁾を算出した. この荷重変化率の減少は, 膝関節に対する衝撃力の減少を意味すると言われる.

統計処理は, 2 種類のウェア間の各関節角度および関節モーメント, 床反力, 荷重変化率を比較し, Wilcoxon 順位和検定を用いて, 有意水準は 5%未満とした.

【倫理的配慮】

本研究実施にあたり, 四條畷学園大学倫理委員会の承認を得た (承認番号 24-1). 被験者にはヘルシンキ条約に基づき, 研究の趣旨を十分説明し同意を得た上で実施した.

結果

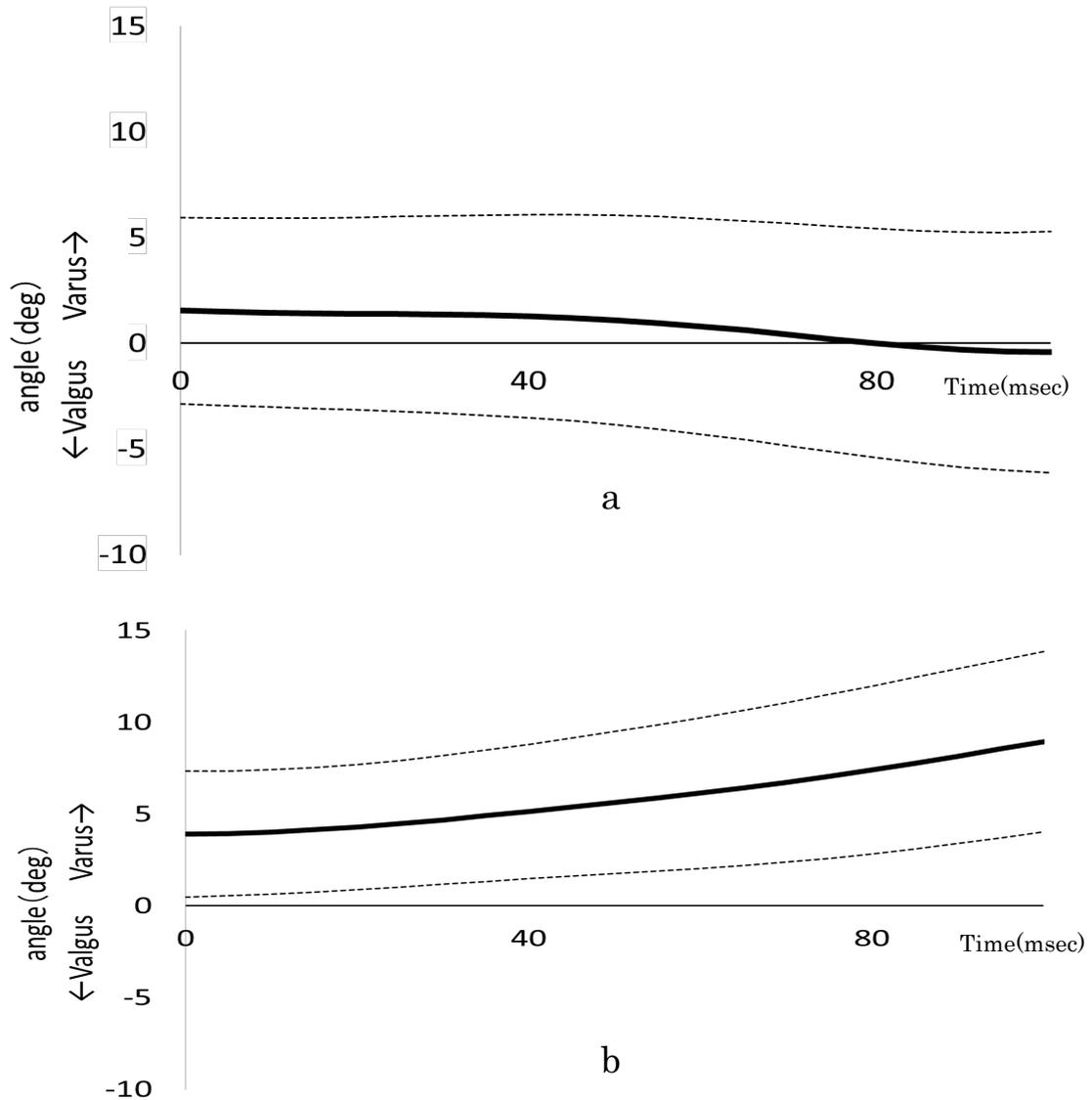
1) 膝関節内外反角度

接地から 80msec までの膝関節内外反角度は, CW は着地後わずかに外反したのに対し, FW では膝関節が内反した (Figure 3). 接地時 (0msec) の内外反角度は CW が $1.5\pm 4.4^\circ$, FW が $3.9\pm 3.4^\circ$ であり両群間に差はなかった. 着地後 40msec 時では CW が $1.3\pm 4.8^\circ$, FW が $5.1\pm 3.7^\circ$, 80msec 時では CW が $0.0\pm 5.4^\circ$, FW が $7.4\pm 4.6^\circ$ となり, FW が CW に比べ内反位であった (Table 1).

2) 床反力値および荷重変化率 ($Fz_{max}/\Delta t$)

接地から 40msec 経過後の Fz は, 2 種類のウェアに有意差はなかったが, FW の Fx は CW に比べ内側への床反力値が有意に大きかった. 80msec 時での Fx および Fz は, ウェア間に有意差は認め

なかった (Table 1). また, 荷重変化率 ($Fz_{max}/\Delta t$) は, CW は 3.1 ± 0.6 (N/msec), FW が 3.3 ± 0.5 (N/msec)であり, 2 種類のウェアに有意な差はなかった.



a : Compression wear(CW) b : Functional wear(FW)

Figure 3. : Knee angle variation

Angular variation of the knee joint of two wears. The solid line represents the average values, the dotted lines indicate the standard deviation.

Table1. : Knee Kinematics at Initial Ground Contact (IC) and 40, 80 Milliseconds After IC

	Time (msec)	CW	FW	p-value
Knee varus-valgus angle(°) ^a	0	1.5±4.4	3.9±3.4	n.s
	40	1.3±4.8	5.1±3.7	*
	80	0.0±5.4	7.4±4.6	*
Knee varus-valgus moment (Nm/kg) ^b	40	-1.0±8.6	6.1±7.1	*
	80	-18.4±9.3	-8.9±9.3	*
Impact force(N/msec) ^c		3.1±0.6	3.3±0.5	n.s
Ground reaction force(Fx) (%BW)	40	-0.2±0.6	-0.5±0.5	*
	80	1.7±0.8	1.7±0.7	n.s
Ground reaction force(Fz) (%BW)	40	20.2±4.6	21.1±4.4	n.s
	80	37.1±4.7	37.0±4.2	n.s

* p<0.05

Mean values ± S.D. of each parameter are presented.

a: Negative values valgus, positive Varus.

b: Negative values valgus moment, positive Varus moment.

c: Variation rate of the vertical ground reaction force.

3) 膝関節内外反モーメント

接地後 40msec における膝関節内外反モーメントは、CW は -1.0 ± 8.6 (Nm/kg), FW が 6.1 ± 7.1 (Nm/kg) であり、FW が CW に比べ有意に外反モーメントが小さかった (Table 1). 接地後 80msec においては、CW が -18.4 ± 9.3 (Nm/kg), FW が -8.9 ± 9.3 (Nm/kg) でありいずれも外反モーメントを示していたが、FW が CW に比べ有意に外反モーメントが小さかった (Table 1).

考察

本研究では、開発した骨盤から下肢を外的に支持する機能的ウェアの装着が、着地肢位における ACL 損傷の危険肢位を回避し得るかを、運動学および運動力学の観点から検討した。

1. 膝外反アライメントの制動

ACL 損傷は、跳躍着地で損傷が頻発し、受傷肢位は膝外反 $5 \sim 20^\circ$ とされ¹⁵⁾、着地動作の膝外反角度が大きいと ACL 損傷のリスクが高いとされている¹⁶⁾。また、受傷時の VTR 解析により、着地から 40msec 後に生じる膝関節の急激な外反と内旋によって、ACL 損傷が発生していたと報告されている¹³⁾。これらの研究結果から ACL 損傷や

再損傷の予防には、着地直後に危険肢位である膝外反を回避することが重要とされている^{17,18)}。

DJL 課題は、ACL 損傷の発生する危険性を予測しようとする評価である¹⁶⁾。身体の変位に伴う重力加速度と身体質量による外部モーメントが、膝外反位をとることで ACL 損傷の危険性が高まる。特に、身体重心が下降している接地から 40msec 後において ACL 損傷が発生していたことから、ACL 損傷予防を考える上では重要となる¹³⁾。今回の実験では、接地時の膝関節は両群ともわずかに内反位であったが、接地後 40msec までの膝関節は、重心の下降とともに CW は外反したのに対し、FW では内反位で接地して重心の下降とともにさらに内反した (Figure 3)。Powers ら¹²⁾は、骨盤から股関節にかけて装着するストラップ (S.E.R.F.StrapTM) が階段降段における股関節の内転・内旋と脛骨外旋、膝外反 (knee in) を減少させることを示した。これはストラップなどの外的支持が重力下での重心の下降動作時に下肢関節アライメントを制動することを示唆している。FW の膝関節外側部から大腿後内側に向かうライン (Figure 1) は、着地直後から生じる股関節内転、内旋により引き伸ばされる。このため運動に抗する張力が生じ、結果として股関節の内

転と内旋の運動を制動し、膝関節を内反方向に誘導したと考えられた。ACL 損傷と膝関節アライメントの関係において、荷重位での膝関節外反は ACL に伸張ストレスを与える¹⁹⁾ことから、ACL 損傷の発生要因とされる¹⁴⁾。今回、我々の開発した FW の装着が接地直後の膝関節アライメントを膝

外反から内反に誘導したことから、ACL 損傷や再損傷予防につながる可能性を示唆するものと考えられた。

2. 外反モーメントの制動

接地から 40msec 時の膝関節モーメントは、FW

が CW に比べて有意に外反モーメントの減少を示した。また、FW は CW に比べ有意に床反力左右成分である F_x (内側) の作用が大きかった。前額面上での床反力ベクトルは、左右分力が大きくなると傾きが増すことから²⁰⁾、FW の着用により接地直後から前額面での床反力ベクトルは、膝関節軸の内側を通過し、 F_x の内方への増大とともに関節軸からの距離 (モーメントアーム) が延長し (Figure 4)、膝関節内反モーメントを発生させたと考えられた^{21~23)}。接地から 80ms 後での膝関節モーメントは、両ウェア間の F_z には差が無かったのに対し、FW は CW に比べ外反モー

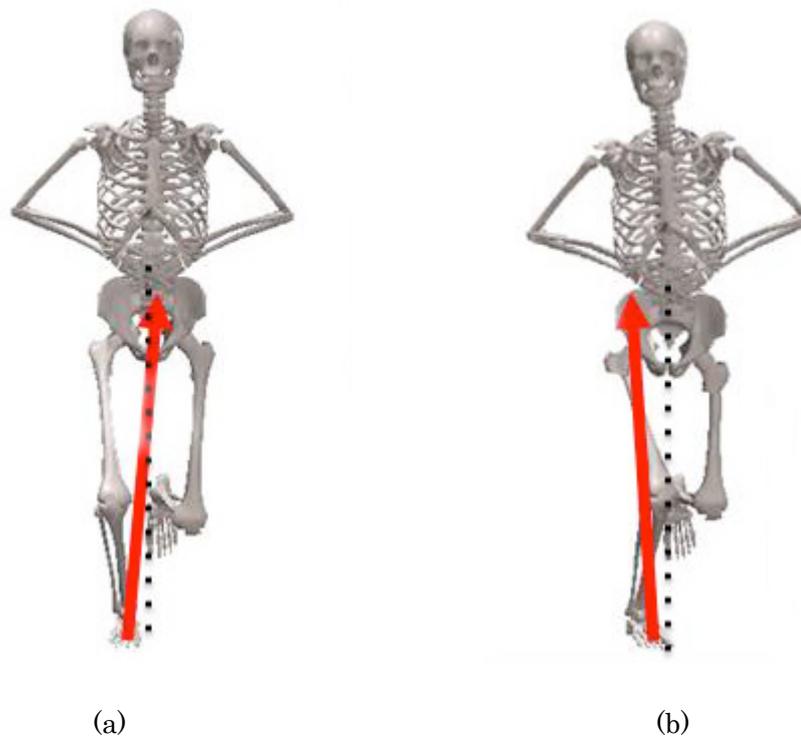


Figure 4. : Relationship of the knee joint alignment and the floor reaction force vector

This simulation image is based on a drop jump measured. The arrow indicates the floor reaction force vector. (a) The resultant ground reaction force vector passes medial to the knee joint center, thereby creating a varus moment at the knee. (b) Shifting the center of mass over the stance limb can create a knee valgus moment (the ground reaction force vector passes lateral with respect to the knee joint center).

ントが半減していた。これは FW の装着により膝アライメントが内反へ誘導されたことが要因と考えられた。さらに、前額面上で体幹が支持脚側に側屈する体重心の位置変化は、床反力ベクトルの傾きと膝外反モーメントを増大させることが知られている²⁴⁾。また、荷重変化率では有意差が

認められなかったが、膝関節内外反モーメントへの影響は、床反力左右成分の影響が強いと考えられるため、ACL 損傷の予防には膝外反モーメントを減少させる結果となったことは意義があると考えられる。Kuster ら²⁵⁾は、ACL 再建術後患者 (12 ヶ月経過) に着圧ウェアを装着させた上でのドロ

ップジャンプの着地後に片脚立位を保持させたところ、床反力の力積と COP の移動総軌跡長が減少し、接地後の片脚立位姿勢が安定したと報告している。これより、開発した FW は、膝アライメントの内反誘導とともに体幹の正中化を促し、身体重心を安定させたことにより外反モーメントを減少させた可能性がある。

3. 予防効果

大見ら²⁶⁾は、トレーニングによる ACL 損傷予防プログラムの実施効果を検証するため、ジャンプトレーニング導入前後の着地動作における下肢アライメントと運動力学解析を行った。その結果、接地時の膝関節の屈曲角度と最大屈曲角度、股関節の屈曲角度が有意に増加し、膝関節伸展および股関節外転モーメントが有意に減少し、ACL 損傷の予防効果を認めたと報告している。Hewett ら^{8,27)}は、トレーニングにより膝外反、体幹側方傾斜が制御されると、ACL 損傷率が減少したと報告している。しかし、これらの先行研究では ACL 損傷の時間因子について検討されていない。我々の結果は、FW の着用により ACL 損傷の発生頻度が高い接地直後において、ACL に力学的負荷を与える膝関節外反運動とモーメントが抑制されることが明らかとなり、開発した FW の ACL 損傷予防に対する効果が期待できると考えられた。

4. 研究の限界と今後の展望

今回の実験では、機能的ウェアが膝関節に及ぼす運動学的および運動力学的作用について検討した。3次元動作解析装置により得られたデータを逆動力学にて膝関節内外反モーメントを算出しているため、FW による作用のみを分離することはできない。このため FW の張力が動作中にどの程度働いているのかについては不明であるため今後のさらなる検討が必要である。また、機能的ウェアの着用により筋活動の変化について筋電図を用いた解析や足部、体幹運動を含めた総合的な解析が必要と考える。

結語

ACL 損傷の予防や再損傷の予防を目的に開発した着圧ウェアに伸縮性の異なるラインを加えた機能的ウェアの有用性を検討した。

機能的ウェアの着用によりジャンプ着地

40msec 後および 80msec 後の膝関節外反アライメントが制動され、外側方向の床反力と共に膝外反モーメントを抑制することが示唆された。

文献

- 1) 岩曾弘志：非接触型膝前十字靭帯損傷の損傷頻度. 臨床スポーツ医学 9：985-990,2002.
- 2) Feller JA, Cooper R, Webster KE: Current Australian trends in rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee* 9:121-126, 2002.
- 3) Delay BS, Smolinski RJ, Wind WM et al : Current practices and opinions in ACL reconstruction and rehabilitation: results of a survey of the American Orthopaedic Society for Sports Medicine. *Am J Knee Surg* 14:85-91, 2001.
- 4) Oates KM., Eenenaam PV, Briggs K, et al: Comparative Injury Rates of Uninjured, Anterior Cruciate Ligament-Deficient and Reconstructed Knees in a Skiing Population. *Am J Sports Med* 27: 606-610, 1999.
- 5) Shelbourne KD, Davis TJ, Klootwyk TE: The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears. A prospective study. *Am J Sports Med* 26: 402-408, 1998.
- 6) 案浦聖凡, 王享弘, 小林晶：スポーツにおける前十字靭帯損傷の受傷機序について. 日本整形外科スポーツ医学会誌 1: 45-52,1996.
- 7) Sheehan FT, Sipprell WH, Boden BP: Dynamic sagittal plane trunk control during anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med* 40: 1068-74 , 2012.
- 8) 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: 492-501, 2005.
- 9) Stanley CJ, Creighton RA, Gross MT et al: Effects of a knee extension constraint

- brace on lower extremity movements after ACL reconstruction. *Clin Orthop Relat Res* 46: 1774-1780, 2011.
- 10) Pietrosimone BG, Grindstaff TL, Linens SW et al: A systematic review of prophylactic braces in the prevention of knee ligament injuries in collegiate football players. *J Athl Train* 43: 409-415, 2008.
 - 11) Doan BK, Kwon YH, Newton RU et al: Evaluation of a lower-body compression garment. *J Sports Sci* 21: 601-10, 2003.
 - 12) Powers CM, Souza RB, Selkowitz D: The effect of femoral strapping on pain response, hip rotation and gluteus maximus activation in persons with patellofemoral pain. *Physiotherapy* 93: S198, 2007.
 - 13) Koga H, Nakamae A, Shima Y .et al: Mechanisms for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Am J Sports Med* 38: 2218-2225, 2010.
 - 14) Simpson KJ, Kanter L: Jump distance of dance landings influencing internal joint forces: I. Axial forces. *Med Sci Sports Exerc* 29: 916-927, 1997.
 - 15) Olsen OE, Myklebust G, Engebretsen L et al: Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: a systematic video analysis. *Am J Sports Med* 32: 1002-1012, 2004.
 - 16) Noyes FR, Barber-Westin SD, Fleckenstein C. et al.: The drop-jump screening test: difference in lower limb control by gender and effect of neuromuscular training in female athletes. *Am J Sports Med* 33: 197-207, 2005.
 - 17) 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* 27: 699-706, 1999.
 - 18) 玉置正彦, 尹成祚, 大見頼一, 他 : 大学女子バスケットボール選手における膝前十字靭帯損傷予防プログラムの実施効果. 東京女子体育大学・東京女子体育短期大学紀要 48: 53-58, 2013.
 - 19) Fleming BC, Renstrom PA, Beynonn BD, et al: The effect of weight bearing and external loading on anterior cruciate ligament strain. *J Biomech* 34: 163-170, 2001.
 - 20) Winter DA(著), 長野明紀, 吉岡伸輔 (翻訳) : バイオメカニクス 人体運動の力学と制御, pp129-130, 有限会社ラウンドフラット, 2011.
 - 21) Donald A. Neumann (著), 嶋田智明 平田総一郎 (翻訳) : 筋骨格系のキネシオロジー, pp581-582, 医歯薬出版, 2005.
 - 22) Hinman RS, Bowles KA, Metcalf BB, et al: Lateral wedge insoles for medial knee osteoarthritis: effects on lower limb frontal plane biomechanics. *Clin Biomech.* 27: 27-33, 2012.
 - 23) 萩野哲也, 津村暢宏, 黒坂 昌弘, 他 : 変形性膝関節症患者の歩行分析 : リハ医学 36. 188-194, 1999.
 - 24) Hunt MA, Birmingham TB, Giffin JR, et al: Associations among knee adduction moment, frontal plane ground reaction force, and lever arm during walking in patients with knee osteoarthritis. *J Biomech* 39: 2213-20, 2006.
 - 25) Kuster MS, Grob K, Kuster M, et al: The benefits of wearing a compression sleeve after ACL reconstruction. *Med Sci Sports Exerc* 31: 368-71, 1999.
 - 26) 大見頼一, 尹成祚, 長妻香織, 他 : 膝前十字靭帯損傷予防プログラムのトレーニング効果～三次元動作解析による片脚着地動作と下肢筋力評価～ : 日本臨床スポーツ医学会誌 20: 56-65, 2012.
 - 27) Hewett TE, Myer GD: The mechanistic connection between the trunk, hip, knee, and anterior cruciate ligament injury. *Exerc Sport Sci Rev* 39: 161-166, 2011.