

ACL 損傷の予防に向けて開発した Elastomeric Strap の Knee-in 制動効果—二次元画像による着地動作の解析—

Knee-in posture was controlled by Elastomeric Strap developed for the prevention of anterior cruciate ligament injury.

—Analysis of landing motion using two-dimensional images—

三浦大祐*1, 小柳磨毅*2,3, 向井公一*4, 成 俊彌*2
森下 聖*3,5, 境 隆弘*6, 越野八重美*2,3, 中野和彦*7

キー・ワード : Elastomeric Strap, knee-in posture, prevention of anterior cruciate ligament injury
Elastomeric Strap, knee-in posture, ACL 損傷予防

【要旨】 (目的) 前十字靭帯 (anterior cruciate ligament : ACL) 損傷の予防に向け、弾性素材を用いて開発した Elastomeric Strap (ES) の、着地動作における knee-in の制動効果を検証する。(方法) 体幹・下肢に疾患が無く knee-in を呈する女子大学生 28 名 (平均年齢 19.9 ± 0.8 歳) を対象とした。Compression wear の上から大殿筋と縫工筋の走行に近似させたラインの ES (ES+) とラインなしの Compression wear (ES-) をランダムに装着させ、30cm 台からの片脚着地動作を実施した。ハイスピードカメラを用いて前額面から撮影し、接地前後の 40ms ごとに静止画を抽出した。静止画から上前腸骨棘と膝蓋骨中心を結んだ延長線と母趾中央部の距離を測定し、3 回の平均値を膝内側移動量とした。(結果) ES+/ES- の膝内側移動量 (cm) は、接地前 40ms ($-0.3 \pm 2.4/3.1 \pm 2.7$), 接地時 ($-0.2 \pm 2.7/3.4 \pm 2.3$), 接地後 40ms ($-1.0 \pm 2.6/3.0 \pm 2.7$), 接地後 80ms ($1.1 \pm 3.7/5.0 \pm 3.1$) であり、全ての時間で ES+ が有意に低値を示した。(結語) 骨盤帯から大殿筋と縫工筋の走行に近似させた ES は、片脚着地前後の knee-in を制動した。

はじめに

非接触型の前十字靭帯 (anterior cruciate ligament : ACL) 損傷は、ジャンプからの着地の際に膝が内側に移動 (knee-in) して受傷することが多い。knee-in 姿勢は膝関節の外反モーメントを増加させ、ACL 損傷の危険因子とされている^{1,2)}。また、

ACL 損傷は着地動作の接地後 40ms~80ms に発生するとされており、予防には接地前からの予測制御 (フィードフォワード) が重要とされる^{3,4)}。

ACL 損傷の予防策として様々なトレーニングが実施され一定の効果が示されているが^{5,6)}、完全な予防には至っていない。また外的支持を用いた予防として、テーピングがドロップジャンプにおける接地時の膝外反角度を減少させたとの報告がある⁷⁾。しかし、テーピングは角質剥離による皮膚障害⁸⁾や、緩みが生じて効果が持続しない⁹⁾などの問題が指摘されている。近年、下肢から骨盤に着用する伸縮性のある素材からなる螺旋形のストラップが、片脚スクワット時の knee-in を制動したとの報告がある¹⁰⁾。しかし、これらのストラップ

*1 神戸大学医学部附属病院リハビリテーション部

*2 大阪電気通信大学医療健康科学部理学療法学科

*3 大阪電気通信大学大学院医療福祉工学専攻

*4 四條畷学園大学リハビリテーション学部

*5 武部整形外科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リハビリテーション学科

*7 西岡第一病院整形外科

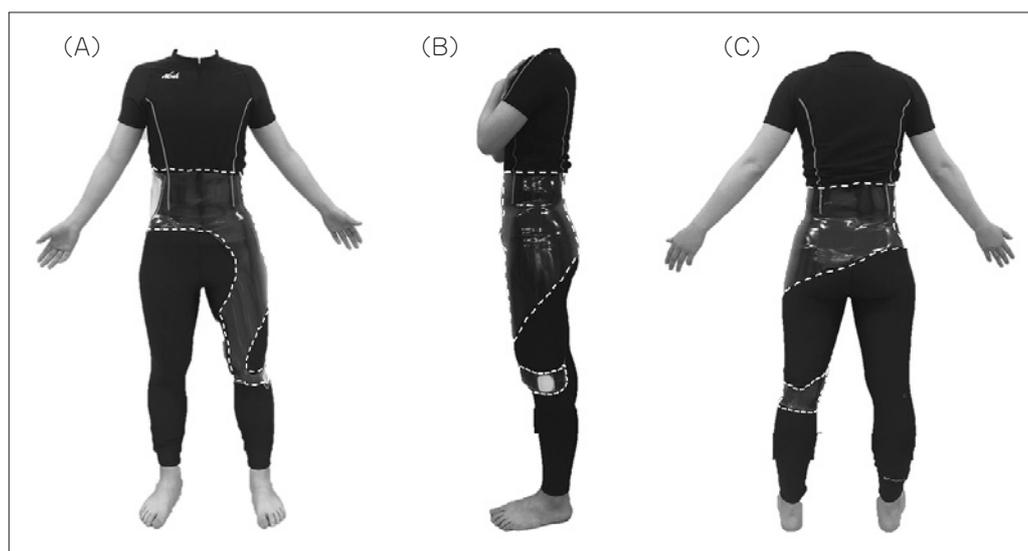


図1 Elastomeric Strap (ES)
(A) 前面 (B) 側面 (C) 後面
ESのライン走行は、大殿筋と縫工筋の解剖学的走行に近似させた。

がACL損傷に頻発する着地動作におけるknee-inを制動したとする報告は見られない。こうしたストラップの課題として素材の伸張性と弾性が不十分であり、下肢の関節運動に伴って緩みが生じることから一定の張力を維持できない可能性がある。

そこで我々は高い伸張性と弾性を有するスチレン系エラストマー (Thermoplastic Styrenic Elastomer: TPS) を素材として、大殿筋と縫工筋の解剖学的な走行に近似させたElastomeric Strap: ESを開発した。

本研究の目的は、開発したESの着地動作におけるknee-inの制動効果を、二次元画像を用いて検証することとした。本研究の仮説は、「ESを着用することで着地動作時のknee-inを制動する」とした。

対 象

対象は体幹と下肢に疾患の既往が無く、目視による着地動作のスクリーニングテストにおいてknee-inを呈した女子大学生28名 (バスケットボール部員2名、日常的な運動を実施していない被験者26名)とした。対象者の身体特性は、年齢 19.9 ± 0.8 歳、身長 159.3 ± 4.5 cm、体重 51.0 ± 4.0 kgであった。対象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。本研究は大阪電気通信大学倫理委員会の承認を得て実施した

(承認番号: 生倫認18-006号)。

方 法

1. Elastomeric Strap

ESは伸張性と弾性を有するTPSシート (硬度 15° 、厚さ2mm、大きさ $100\text{cm} \times 50\text{cm}$ タナック社製) から、骨盤帯 (高さ20cm) と連続するライン (幅18cm) を切り出して作成した (図1)。ラインの走行は運動学的にknee-inの制動効果があるとされる¹¹⁻¹³⁾、大殿筋と縫工筋に近似させた。

ESは、ラインのない着圧ウェア (Compression Wear: CW) 上から、立位の股関節外旋位で、螺旋走行するライン部分を臀部から下腿前面に向かって、約200%伸張して装着した。

2. 運動課題

30cm台からの片脚着地 (Single Leg Drop Landing: SDL) を、ラインのないCWの上からESを装着した (ES+) と比較対照としたCWのみ (ES-) の2条件で、ランダムに実施した。台上から片脚で落下し、着地後は出来る限り静止するように指示した。両手は腸骨稜を把持し、着地時の姿勢安定に上肢を用いないように統制した。視線と着地時の足部の向きに関しては指示をせず、着地後に足をずらして支持基底面を移動させた試技は失敗とした。練習試技を2~3回実施した。計測は成功したSDLを5回行い、2回目~4回目の3回をデータとして採用し、その平均を被験者の代

表値とした。

3. 測定方法

デジタルビデオカメラ (CASIO 社製, EX-F1) 一台を用いて, SDL をハイスピードモードで前額面

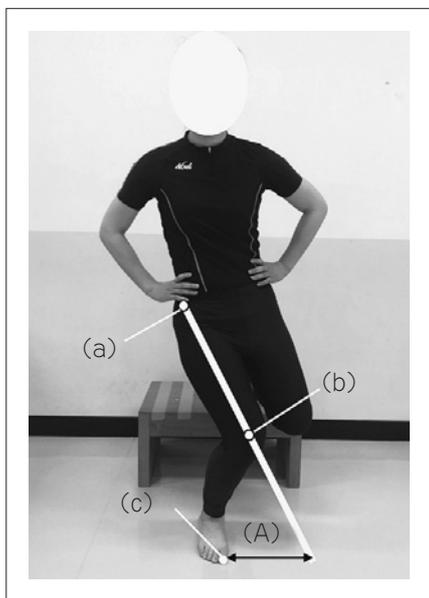


図2 膝内側移動量の測定方法 (文献 14 より引用改変)

(a) 上前腸骨棘 (b) 膝蓋骨中心
(c) 母趾中央

膝内側移動量 (A) は上前腸骨棘と膝蓋骨中心を結んだ延長線と, 母趾中央部の距離を測定した。

から撮影した (300 フレーム/秒)。ビデオカメラの撮影位置は, 被験者の 5.5m 前方かつ高さ 85cm で水平にし, フレームの中心が台上における片脚立位時の膝関節中心となるように位置を調整し, ズーム機能は用いなかった。接地時, 接地後 40ms, 80ms, 120ms, 160ms, 200ms の静止画を, 分析対象として抽出した。また後述する膝内側移動量のみ接地前 40ms の静止画も分析対象として抽出した。

4. 二次元画像による下肢運動解析

抽出した二次元画像の静止画から, 画像解析ソフト ImageJ (Ver.1.51) を用いて, 膝内側移動量, 股関節内外転角度, 膝関節内外反角度, 下腿傾斜角度を計測した。膝内側移動量は Kagaya ら¹⁴⁾ の方法を参考にして, 上前腸骨棘と膝蓋骨中心を結んだ延長線と母趾中央部の距離を測定した (図 2)。股関節内外転角度は両側の上前腸骨棘を結ぶ線への垂直線と上前腸骨棘と膝蓋骨中心を結んだ線のなす角とした (図 3A)。膝関節内外反角度は上前腸骨棘と膝蓋骨中心を結んだ線と膝蓋骨中心と足関節内外果中央を結んだ線のなす角とした (図 3B)。下腿傾斜角度は足関節内外果中央からの垂直線と膝蓋骨中心と内外果中央を結んだ線のなす角とした (図 3C)。それぞれ knee-in・股関節内転・膝関節外反・下腿内側傾斜を+, knee-out・股関節外転・膝関節内反・下腿外側傾斜を一と定

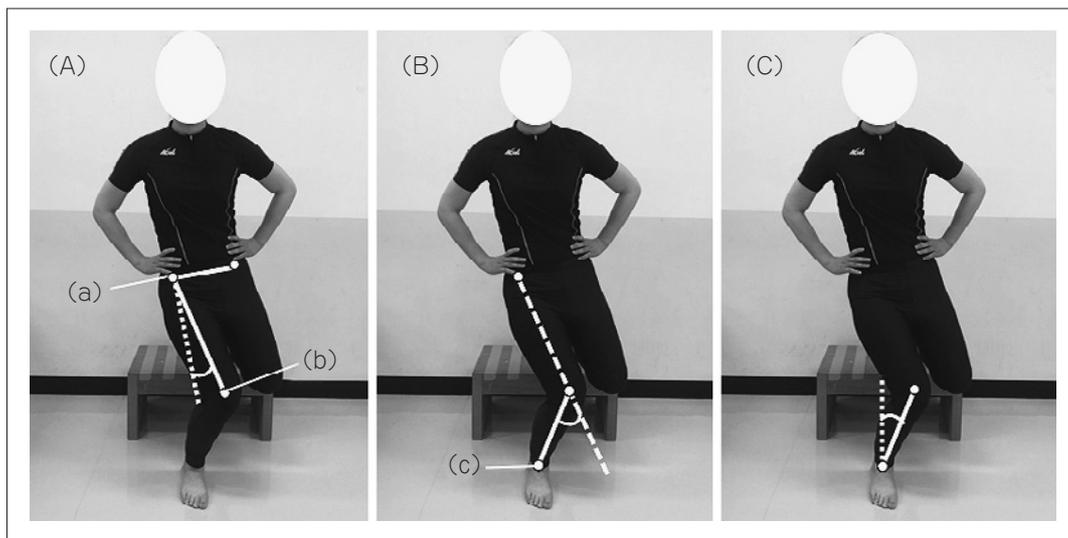


図3 関節角度の測定方法

(A) 股関節内外転角度 (内転+, 外転-)
(B) 膝関節内外反角度 (外反+, 内反-)
(C) 下腿傾斜角度 (内側傾斜+, 外側傾斜-)
(a) 上前腸骨棘 (b) 膝蓋骨中央 (c) 足関節内外果中央

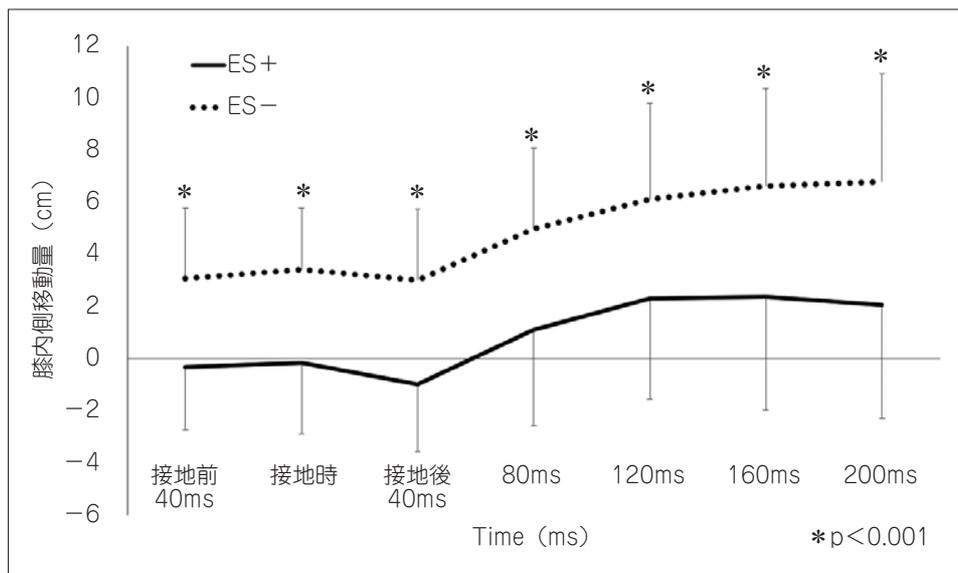


図4 膝内側移動量の推移
ESの装着により、膝内側移動量 (Knee-in) が有意に着地前から着地後にかけて減少した ($p < 0.001$).

義した。

5. 統計解析

統計解析にはEZR¹⁵⁾を使用し、ES+とES-の膝内側移動量と関節角度を比較した。Kolmogorov-Smirnov 検定にて正規性を確認後、対応のある t 検定を実施し、有意水準は5%とした。

結果

ES+/ES-の膝内側移動量 (cm) は、接地前 40 ms ($-0.3 \pm 2.4/3.1 \pm 2.7$), 接地時 ($-0.2 \pm 2.7/3.4 \pm 2.3$), 接地後 40ms ($-1.0 \pm 2.6/3.0 \pm 2.7$), 接地後 80ms ($1.1 \pm 3.7/5.0 \pm 3.1$), 接地後 120ms ($2.3 \pm 3.9/6.1 \pm 3.7$), 接地後 160ms ($2.4 \pm 4.3/6.6 \pm 3.7$), 接地後 200ms ($2.1 \pm 4.3/6.8 \pm 4.2$) であり、ES+がES-と比べ着地前より有意に低値を示し、knee-in を制動した (図4, 図5, 表1)。

股関節内転角度・膝関節外反角度・下腿内側傾斜角度は、ES+がES-と比べ着地直後から有意に低値を示した。

考察

ESを着用することで着地動作時の knee-in を制動した。これまで骨盤から下肢に着用するストラップが片脚スクワット時の knee-in を制動したとの報告¹⁶⁾がある一方、ストラップ自体の効果よりも誤差に起因する可能性⁶⁾や knee-in を制動できなかったとする報告¹⁷⁾がある。さらに、渉猟し

得た範囲では、これらのストラップがACL損傷に多発するジャンプからの着地における knee-in を制動したとする報告は見られない。これに対し、弾性素材を使用し解剖学的な螺旋ラインにより作成したESは、SDL前後のknee-inを制動した。

その要因として、第一にESの素材としたTPSの高い弾性が挙げられる。我々は予備的に実施した引張試験において、幅80mm、長さ100mmのTPS切片が200%の伸長に対し、約8Nの応力を発揮することを確認した。このTPSの弾性に初期張力を加えたストラップは、従来の弾性繊維から成るストラップと比べて高い張力を維持し、着地動作における下肢の関節運動を制動したと考えられた。さらにTPSの伸張性と表面の粘性性は、体表面の運動に追従し、運動に伴うESの緩みやズレが生じにくかったと考えられた。

第二にESの解剖学的なライン走行が挙げられる。着地動作時のknee-inは、股関節の内旋可動域を増大させる大腿骨頭の前捻角と相関し¹⁸⁾、股関節の外転や外旋筋に着目したトレーニングにより減少したとする報告がある¹⁹⁾。我々が作成した骨盤帯から大殿筋と縫工筋の解剖学的な走行に近似させたESは、TPSの弾性と初期張力とともに、螺旋のライン走行が片脚着地動作中の股関節外転と外旋を誘導 (股関節内転と内旋の制動) したと考えられた。さらにこうした股関節の誘導が下降性の運動連鎖により、膝関節外反と下腿の内側傾斜

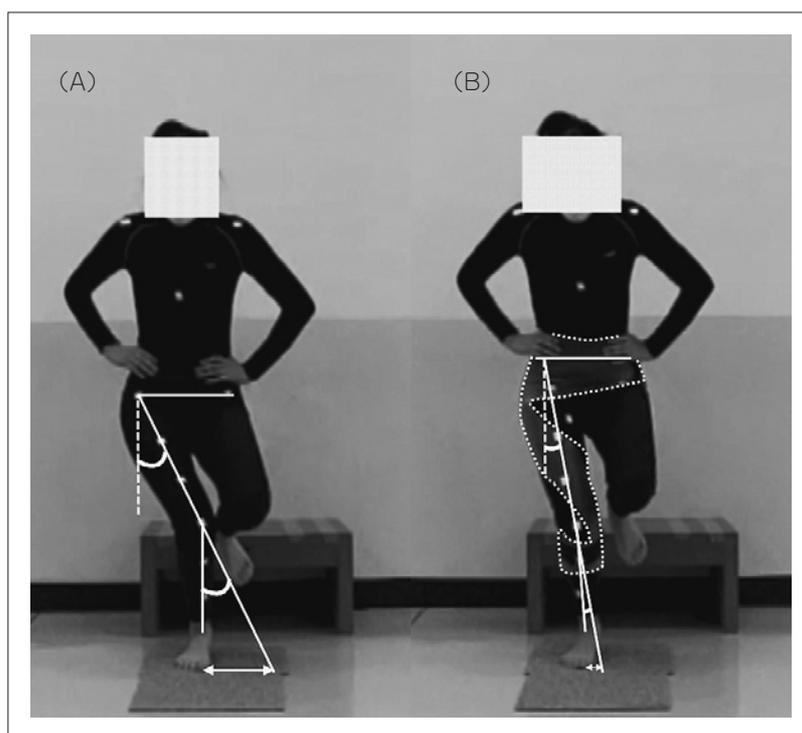


図 5 Elastomeric Strap 装着の効果 (最大 knee-in 時)
 (A) ES- (B) ES+
 ES は片脚着地時の Knee-in・股関節内転・膝関節外反を制動した

表 1 片脚着地時の膝内側移動量および下肢関節角度

	接地前 40ms	接地時	接地後 40ms	80ms	120ms	160ms	200ms
膝内側移動量 (cm)							
ES + ^a	-0.3 ± 2.4	-0.2 ± 2.7	-1.0 ± 2.6	1.1 ± 3.7	2.3 ± 3.9	2.4 ± 4.3	2.1 ± 4.3
ES - ^a	3.1 ± 2.7	3.4 ± 2.3	3.0 ± 2.7	5.0 ± 3.1	6.1 ± 3.7	6.6 ± 3.7	6.8 ± 4.2
p 値	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
股関節内転角度 (°)							
ES + ^a	—	-6.2 ± 4.2	-5.9 ± 4.8	0.3 ± 5.7	4.5 ± 4.7	5.4 ± 5.4	4.9 ± 5.0
ES - ^a	—	-2.8 ± 2.9	-1.8 ± 3.7	4.2 ± 4.5	9.3 ± 5.0	10.6 ± 4.9	10.7 ± 4.4
p 値	—	<0.001*	<0.001*	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
膝関節外反角度 (°)							
ES + ^a	—	2.7 ± 2.9	3.6 ± 3.9	5.4 ± 4.5	6.4 ± 4.8	7.1 ± 6.1	7.0 ± 6.4
ES - ^a	—	5.6 ± 2.9	6.2 ± 3.5	8.8 ± 4.7	10.4 ± 4.7	11.1 ± 5.0	11.3 ± 5.4
p 値	—	<0.001*	0.002*	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
下腿内側傾斜角度 (°)							
ES + ^a	—	-6.1 ± 3.3	-7.9 ± 4.3	-7.8 ± 4.8	-7.8 ± 5.3	-7.9 ± 5.8	-7.6 ± 5.6
ES - ^a	—	-5.0 ± 3.1	-5.7 ± 3.4	-5.8 ± 4.4	-5.3 ± 4.3	-5.2 ± 4.5	-4.8 ± 3.8
p 値	—	0.020*	<0.001*	0.016*	0.007*	0.008*	0.008*

*Significant (p<0.05).

^aMean ± standard deviation (SD).

を制動し、その結果、着地前後の knee-in が制動されたと推察された。

膝内側移動量の増大は ACL 損傷の危険因子とされる²⁰⁾。さらに、ACL 損傷は着地後早期に発生

することから、予防には接地前からの予測制御 (フィードフォワード) が重要とされる⁴⁾。開発した ES は、着地前および着地直後から膝内側移動量を制動したことから、着地時に Knee-in を呈す

る対象の ACL 損傷および再損傷を予防する可能性が示唆された。

本研究は前額面の 2 次元画像解析であり、ES が矢状面や水平面に及ぼす影響、運動力学については明らかではない。今後は ES が体幹や床反力へ及ぼす影響を含めた 3 次元動作解析が必要である。

結 語

Knee-in を呈する女子大学生を対象に、開発した ES の片脚着地動作における knee-in 制動効果を検証した。ES は着地前および着地直後から knee-in を制動した。

謝 辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 (21K11434) の助成を受けたものである。

利益相反

利益相反あり。本論文に関連し、開示すべき利益相反関係にある企業等は以下の通りである。

研究費：日本シグマックス株式会社 (共同著者：小柳磨毅)

文 献

- 1) 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.
- 2) Krosshaug T, Steffen K, Kristianslund E, et al. The Vertical Drop Jump Is a Poor Screening Test for ACL Injuries in Female Elite Soccer and Handball Players A Prospective Cohort Study of 710 Athletes. *Am J Sports Med.* 2016; 44: 874-883.
- 3) Koga H, Muneta T, Bahr R, et al. Video analysis of ACL injury mechanisms using a model-based image matching technique. *Sports Injuries and Prevention.* 2015; 3: 109-120.
- 4) 古賀英之. ACL 損傷メカニズムからみた予防プログラムの構築. *The Journal of Clinical Sports Medicine.* 2018; 35: 338-343.
- 5) Webster KE, Hewett TE. Meta-analysis of meta analyses of anterior cruciate ligament injury reduction training programs. *J Orthop Res.* 2018; 36: 2696-2708.
- 6) Omi Y, Sugimoto D, Kuriyama S, et al. Effect of Hip-Focused Injury Prevention Training for Anterior Cruciate Ligament Injury Reduction in Female Basketball Players: A 12-Year Prospective Intervention Study. *Am J Sports Med.* 2018; 46: 852-861.
- 7) Limroongreungrat W, Boonkerd C. Immediate effect of ACL kinesio taping technique on knee joint biomechanics during a drop vertical jump: a randomized crossover controlled trial. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* 2019; 11: 32.
- 8) Andrýsková A, Lee JH. The Guidelines for Application of Kinesiology Tape for Prevention and Treatment of Sports Injuries. *Healthcare.* 2020; 26: 144.
- 9) Fleet K, Galen S, Moore C. Duration of strength retention of ankle taping during activities of daily living. *Injury.* 2009; 40: 333-336.
- 10) Lee Herrington. Effect of a SERF Strap on Pain and Knee-Valgus Angle During Unilateral Squat and Step Landing in Patellofemoral Patients. *Journal of Sport Rehabilitation.* 2013; 22: 27-32.
- 11) Cannon J, Cambridge E, McGill SM. Anterior Cruciate Ligament Injury Mechanisms and the Kinetic Chain Linkage: The Effect of Proximal Joint Stiffness on Distal Knee Control During Bilateral Landings. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2019; 49: 601-610.
- 12) Hollman JH, Hohl JM, Kraft JL, et al. Modulation of frontal-plane knee kinematics by hip-extensor strength and gluteus maximus recruitment during a jump-landing task in healthy women. *J Sport Rehabil.* 2013; 22: 184-190.
- 13) 青木隆明, 林 典雄. Ⅲ 下肢の筋. In: 青木隆明, 林 典雄 (編). 運動療法のための機能解剖学的触診技術 下肢・体幹. 改定第 2 版. 東京: MEDICALVIEW; 146-150, 2013.
- 14) Kagaya Y, Kawasaki W, Fujii Y, et al. Validation of two-dimensional motion analysis technique for quantifying dynamic knee valgus during a drop landing by comparisons to data from three-dimensional analysis. *Fitness Sports Med.* 2010; 59: 407-414.
- 15) Kanda Y. Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZR' for medical statistics. *Bone Marrow Transplant.* 2013; 48: 452-458.
- 16) Powers CM, Souza RB, Selkowitz D, et al. The ef-

- fect of femoral strapping on pain response, hip rotation and gluteus maximus activation in persons with patellofemoral pain. *Physiotherapy*. 2007; 93: S198.
- 17) Greuel H, Herrington L, Liu A, et al. Influence of the Powers™ strap on pain and lower limb biomechanics in individuals with patellofemoral pain. *The knee*. 2019; 26: 1210-1219.
- 18) 金子雅志, 大見頼一, 尹 成祚, 他. 大腿骨前捻角が片脚着地時の膝外反角度に与える影響—二次元動作解析法を用いて—. *日本臨床スポーツ医学会誌*. 2015; 23: 50-57.
- 19) 大見頼一. 予防トレーニングによる着地動作の変化. *The Journal of Sports Medicine*. 2019; 36: 516-521.
- 20) Numata H, Nakase J, Kitaoka K, et al. Two-dimensional motion analysis of dynamic knee valgus identifies female high school athletes at risk of non-contact anterior cruciate ligament injury. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*. 2017; 26: 442-447.

(受付: 2021年10月2日, 受理: 2021年12月9日)

Knee-in posture was controlled by Elastomeric Strap developed for the prevention of anterior cruciate ligament injury. —Analysis of landing motion using two-dimensional images—

Miura, D.^{*1}, Koyanagi, M.^{*2,3}, Mukai, K.^{*4}, Song, J.^{*2}
Morishita, S.^{*3,5}, Sakai, T.^{*6}, Koshino, Y.^{*2,3}, Nakano, K.^{*7}

*1 Division of Rehabilitation Medicine, Kobe University Hospital

*2 Department of Physical Therapy Faculty of Medical Science and Health-Promotion, Osaka Electro-Communication University

*3 Division of Biomedical Engineering, Osaka Electro-Communication University

*4 Department of Physical Therapy, Faculty of Rehabilitation, Shijonawate Gakuen University

*5 Department of Rehabilitation, Takebe Orthopaedic Rehabilitation

*6 Department of Rehabilitation Science, Osaka Health Science University

*7 Department of Orthopaedic Surgery, Nishioka Daiichi Hospital

Key words: Elastomeric Strap, knee-in posture, prevention of anterior cruciate ligament injury

[Abstract] The purpose of this study was to verify the controlling effect of knee-in posture on the landing motion of Elastomeric Strap (ES), which was developed using elastic material for the prevention of anterior cruciate ligament (ACL) injury. The subjects were 28 healthy female undergraduates with knee-in posture without any diseases of the trunk or lower extremities. Compression wear with spiral ES lines (with ES) and without ES were randomly applied, and the subjects performed five single-legged landing motions from a 30-cm platform. The images in the frontal plane were taken using a high-speed camera, and still images were extracted every 40ms before and after ground contact. Based on the still images, the distance from the hallux to the point where the line connecting the superior anterior iliac spine and the center of the patella intersected the floor was measured, and the average of the three trials was used as the medial knee displacement (MKD). The MKD (cm) with ES/without ES was measured at 40ms before contact ($-0.3 \pm 2.4/3.1 \pm 2.7$), at contact ($-0.2 \pm 2.7/3.4 \pm 2.3$), 40ms after contact ($-1.0 \pm 2.6/3.0 \pm 2.7$), and 80ms after contact ($1.1 \pm 3.7/5.0 \pm 3.1$). All parameters had significantly lower values with ES. Spiral ES lines controlled the knee-in posture before and after single-leg landing.