

ACL 損傷の予防に向けて開発 した片側弾性ストラップの knee-in 制動効果 —三次元による着地動作の解析—

Knee-in posture was controlled by unilateral elastomeric strap developed
for the prevention of ACL injury

—Three-dimensional motion analysis during single leg drop landing—

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

キー・ワード : single leg drop landing, Posture Control, Unilateral Elastomeric Strap
片脚着地, 姿勢制御, 弾性ストラップ

〔要旨〕 (背景) 膝前十字靭帯損傷の予防には, 着地時の危険肢位とされる膝の内側移動 (knee-in) の抑制が重要である. そこで我々は弾性素材を用いて片側下肢に装着する弾性ストラップを考案した. 本研究の目的は着地動作の三次元的分析により, 弾性ストラップの knee-in に対する制御効果を明らかにすることとした.

(対象と方法) knee-in を呈する女子大学生 25 名 (19.6±0.7 歳) を対象とした. 大殿筋および縫工筋の走行に近似させた螺旋形状の弾性ストラップを, Compression wear (以下 CW) 上に装着した条件 (弾性ストラップあり) と, CW のみの条件 (弾性ストラップなし) にて, 30cm 台からの片脚着地動作を実施した. 動作の安定した 3 試行を採用し, 着地前 (-40ms), 着地時 (0ms), 着地後 40ms 後および 80ms 後までを解析対象とした. 計測は三次元動作解析装置を使用し, 関節角度を算出し, 2 条件間での比較を行った.

(結果) 弾性ストラップありは弾性ストラップなしと比較し, 着地前の股関節内旋と着地時 (0ms) から 80ms の股関節内転と内旋角度および膝外反角度が有意に減少した.

(結語) 弾性ストラップは着地動作において, knee-in の要因である股関節内転と内旋, 膝関節外反を抑制した.

はじめに

膝前十字靭帯 (anterior cruciate ligament : 以下 ACL) 損傷は, スポーツ競技中の発生頻度が高

く, 一旦発生するとその後の競技活動が継続困難となる¹⁾. そのため, 標準的な治療として 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⁾, 再損傷の発生率も高い³⁾. このため, ACL 損傷および再損傷の予防は極めて重要な課題である.

跳躍運動の着地時における膝の内側移動 (knee-in) は, ACL 損傷の危険肢位であることが指摘されている⁴⁾. Hewett ら⁵⁾ は, ACL を損傷した選手は損傷していない選手に比べ, 着地時の膝関節外反角度がより大きかったことを示し, ACL 損傷や

*1 四條畷学園大学リハビリテーション学科

*2 大阪電気通信大学医療健康科学部理学療法学科

*3 神戸大学医学部附属病院国際がん医療・研究センターリハビリテーション部門

*4 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

*5 西岡第一病院整形外科

Corresponding author : 中野和彦 (nakanospk@ybb.ne.jp)

再損傷の予防には膝関節の力学的負荷が増大する股関節の内転と内旋、膝関節の外反、下腿の内側傾斜により構成される knee-in の回避による、膝関節への力学的負荷の低減が重要としている。

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る。しかし、テーピングには皮膚障害の危険性や、緩みが生じることで効果が持続しないなどの問題がある。一方、ACL 損傷予防に関する装具の生体力学的な効果は不明であり、疫学的調査においても一定の見解が得られていない⁶⁾。また、身体接触を伴う競技種目では、硬性膝装具や金属性支柱付き装具の装着が禁止されることがあり、ACL 損傷の予防に対して積極的に推奨されていない⁷⁾。こうした現状を踏まえ、ACL 損傷や再損傷の予防にはテーピングや装具の欠点を補う新たな補助具の開発が望まれる。

近年、伸縮性素材を用いた着圧ウェアが ACL 再建術後患者の着地動作における重心位置を安定させたとする報告や⁸⁾、下肢から骨盤に着用する薄く軽量の素材からなる螺旋形のストラップが、スクワット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⁹⁾。しかしながら ACL 損傷が頻発する着地動作において、危険肢位である knee-in を制御する補助具は存在しなかった。そこで我々は knee-in の制動力を高めるため、新たな伸張性と弾性に富んだ素材(以下、弾性素材)を用いて、片側の骨盤から下肢を外的に支持する弾性ストラップを考案した(以下、弾性ストラップ)。これまでに前顔面の二次元画像を用いた動作解析により、弾性ストラップが knee-in を制御することを示した¹⁰⁾。しかし、これは二次元の解析¹¹⁾であり、下肢関節の三次元的な各関節運動の詳細は不明であった。本研究の目的は、三次元動作解析装置を用いて片脚の着地動作を分析し、開発した弾性ストラップの着地姿勢における下肢関節運動の制御効果を明らかにすることとした。本研究の仮説は、開発した弾性ストラップは、着地時の knee-in を制動するとした。

対象および方法

下肢に運動に支障をきたす疾患既往のない健康な女子大学生で、30cm 台からの片脚着地動作を実施し、目視にて knee-in が観察された 25 名(19.6 ± 0.7 歳)を対象とした。全ての被験者の運動レベ

ルはレクリエーション活動レベルであり、競技レベルでの参加はなかった。対象の平均身長は 160.0 ± 5.6cm、平均体重は 52.3 ± 4.4kg であった。ヘルシンキ条約に基づき、対象者には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)。

1) 弾性ストラップ

弾性ストラップは硬度 15°、厚さ 2mm、大きさ 100cm × 50cm の弾性素材(タナック社製)を切り出して作成した。弾性ストラップは、肋骨下部から骨盤上部までの腹部周囲を覆う部分(幅 20cm)と、大殿筋と縫工筋の走行に近似させた殿部~大腿外側部分(幅 18cm) および下腿近位の末端部分(幅 15cm) から構成した(図 1)。

2) 弾性ストラップの装着

対象者は、運動に影響を及ぼすライン縫製がない着圧ウェア(Compression Wear: CW, アシックス社製 XTB409)の上から片側下肢に弾性ストラップを着用した。まず、立位で骨盤帯部分を固定した後、股関節を外旋位とし、殿部~大腿外側部分を下腿前面に向かって螺旋方向に約 200% 伸張した。末端部分は面ファスナーで下腿の外側部に固定した(図 1)。

3) 運動課題と条件

運動課題は、30cm 台からの片脚着地動作とした。両手は腸骨稜を把持し、着地時に手を離さないように指示した。着地時の視線と足部の向きについては指示をせず、着地後に足部を移動させた場合は失敗試技とした。CW 上に上記の通り弾性ストラップを装着した条件(以下、弾性ストラップあり)と、CW のみを着用する条件(以下弾性ストラップなし)で実施順序をランダムに設定し、いずれも着地動作を 5 回実施した。

4) 運動計測

運動の計測には三次元動作解析装置(Vicon Nexus 1.6.1, サンプル周波数 200Hz)、床反力計(AMTI 社製 OR-6, サンプル周波数 1000 Hz)を用い、A/D 変換機を通じて解析用 personal computer(以下 PC)で記録した(図 2)。マーカーセットは Plug-in gait を使用した。

5) 解析方法

上記の片脚着地動作が成功した 3 試行を解析対象とした。着地は、床反力計の垂直成分の値が 10 N を超えたところと定義し、解析ソフトウェア

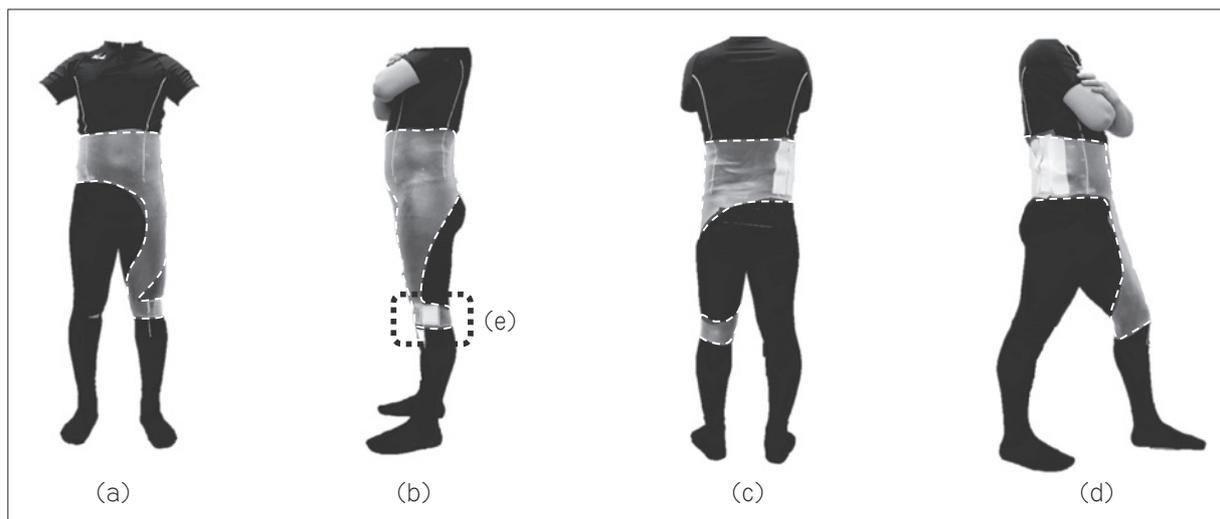


図1 弾性ストラップ
(a) 前面, (b) 外側面, (c) 後面, (d) 内側面, (e) 面ファスナーによる固定部

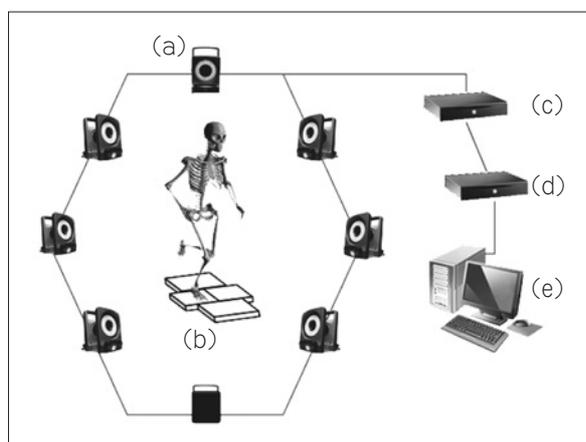


図2 計測方法
(a) 赤外線カメラ, (b) 床反力計, (c) Camera control box, (d) A/D converter, (e) 解析用コンピューター

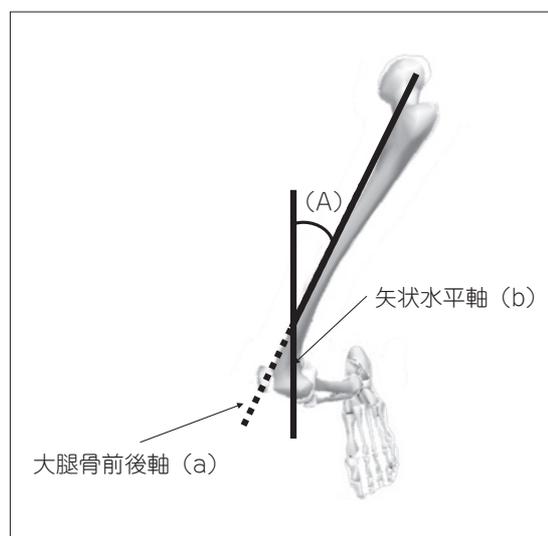


図3 股関節回旋の解析方法¹³⁾
(a) 大腿骨軸と (b) 矢状水平軸となす角度 (A) を股関節回旋角度の指標とした。

(Vicon Nexus 1.6.1) を用いて, 股関節の屈伸, 内外旋, 内外転角度, 膝関節の屈伸および内外反角度を算出した。股関節の回旋角度はマーカーセットによる計測精度の限界から¹²⁾, 股関節回旋角度との近似を確認した水平面上の大腿骨長軸と矢状軸のなす角¹³⁾を ImageJ を用いて算出し, これを股関節回旋角度の指標とした (図3)。

各項目の解析時期は, 1) 着地前 (-40ms), 着地時(0ms), 着地後 40ms および 80ms 後における関節角度¹⁴⁾, 2) 着地後の膝関節屈曲角度が 40°, 50°, 60° となった時点の股関節の屈伸, 内外旋, 内外転角度および膝関節の内外反角度とした。

統計処理は, 各評価項目について弾性ストラップ

ありと弾性ストラップなしを対応のある t 検定にて比較した。有意水準は 5% とした。すべての統計解析には EZR を使用した。EZR は R および R コマンダーの機能を拡張した統計ソフトウェアである。

結果

1) 各時期における下肢関節の角度 (表 1)

前額面: 全時期において, 弾性ストラップありは弾性ストラップなしに比べて股関節の内転角度および膝関節の外反角度が有意に小さかった。

水平面: 全時期において, 弾性ストラップあり

表 1 各時期における下肢関節角度の推移

接地の 40ms 以前より接地後 80ms までの下肢関節角度の推移を示す。角度表記は、股関節内転、屈曲、内旋、膝関節屈曲、内反を正とし、逆方向を負とした。

n = 25
単位 : deg

		経過時間								
		弾性 ストラップ	-40ms	P 値	0ms	P 値	40ms	P 値	80ms	P 値
股関節	屈曲	なし	36.7±8.6	0.02*	35.9±8.3	0.04*	38.4±8.6	0.22	42.4±9.7	0.20
		あり	34.8±8.7		33.6±8.3		37.2±8.3		42.3±8.7	
	外転	なし	-8.0±5.2	0.01*	-8.82±5.30	0.02*	-7.71±4.80	0.02*	-4.7±4.7	0.02*
		あり	-12.1±6.2		-13.1±6.50		-12.2±6.40		-9.1±6.4	
	内旋†	なし	14.3±13.6	0.00*	13.0±13.0	0.00*	11.5±11.1	0.00*	11.7±9.9	0.00*
		あり	6.4±13.0		4.8±13.0		2.5±12.5		2.8±11.5	
膝関節	屈曲	なし	39.1±19.4	0.00*	39.2±20.0	0.04*	45.5±18.5	0.35	53.0±17.6	0.30
		あり	31.4±20.4		30.9±20.2		40.5±18.8		50.5±18.5	
	外反	なし	2.0±7.5	0.01*	-3.7±7.4	0.02*	-5.0±7.6	0.03*	-6.5±8.1	0.02*
		あり	-4.0±8.1		2.2±8.3		0.7±8.5		-0.8±8.8	

Mean ± SD

* < 0.05

† : 水平面画像から計測した角度

表 2 膝関節屈曲角度別の下肢関節角度

膝関節の屈曲角度が 40°, 50°, 60° における、その他の下肢関節角度の推移を示す。角度表記は、股関節内転および屈曲、膝関節内反を正としている。

n = 25
単位 : deg

		膝関節角度						
		弾性 ストラップ	40°	P 値	50°	P 値	60°	P 値
股関節	屈曲	なし	38.6±8.7	0.59	42.3±12.6	0.45	49.6±8.80	0.66
		あり	36.8±12.8		41.9±13.2		46.7±15.2	
	外転	なし	-10.6±4.1	0.04*	-4.9±9.7	0.04*	-2.5±3.7	0.00*
		あり	-15.7±12.8		-11.8±13.8		-12.4±15.0	
膝関節	外反	なし	-3.3±5.2	0.00*	-2.6±13.0	0.00*	-7.0±6.6	0.00*
		あり	1.8±6.5		0.2±7.40		-2.6±7.3	

Mean ± SD

* < 0.05

は弾性ストラップなしに比べて股関節内旋角度の指標が有意に小さかった。

矢状面：着地前 (-40ms) と着地時 (0ms) において、弾性ストラップありは弾性ストラップなしに比べて股関節と膝関節の屈曲角度が有意に小さかった。着地後 40ms・80ms では 2 群間に有意差はなかった。

2) 膝関節屈曲角度別の下肢関節角度 (表 2)

前額面：弾性ストラップありは弾性ストラップなしに比べて股関節外転角度が有意に大きく、膝関節外反角度が有意に小さかった。

矢状面：着地後全ての膝関節屈曲角度 (40°, 50°, 60°) において、2 群間の股関節屈曲角度に有意差はなかった。

■ 考 察

近年、スポーツ損傷の予防に向けて下肢に着用するストラップが開発されている。Greuel^ら¹⁵⁾は、膝蓋大腿関節障害に対して knee-in を抑制するため、大腿から下腿にかけて装着した螺旋型の Powers StrapTMが、片脚スクワットの股関節外旋角度を増加、内転角度を減少、膝関節内反モーメント

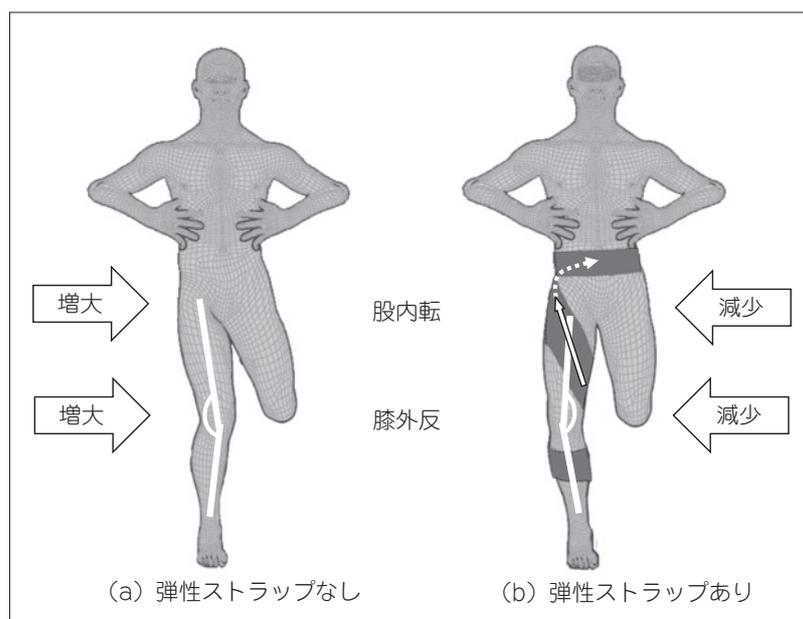


図4 弾性ストラップによる着地時の下肢関節への作用
 点線は下肢後面を走行する大殿筋の走行に近似した弾性ストラップの走行を示している (b). 着地に伴い、点線と実線の矢印で示した弾性ストラップの張力は (a) と比較して、股関節を外転と外旋、膝関節を内反方向へ誘導した。

を増加させたが、股関節の角度変化に対する効果量は小さく、knee-in は制動できなかつたとしている。一方、Herrington ら¹⁶⁾は、Powers Strap™と同様の形状をした S.E.R.F. Strap™の装着により、片脚スクワット中の knee-in が減少したと報告している。しかしいずれの報告も ACL 損傷の受傷機転である着地における knee-in の制御は検討していない。これに対し三浦ら¹⁷⁾は、二次元画像を用いた片脚着地姿勢の分析から、弾性素材を用いた弾性ストラップは、装着なしや S.E.R.F. Strap™と比べて knee-in を制御することを明らかにした。弾性素材の高い弾性と皮膚への定着性、股関節の内転と内旋を制御する大殿筋と縫工筋を模した螺旋ラインがその要因と考えられた。しかし、二次元画像の距離尺度を用いた解析¹⁸⁾であったため、弾性ストラップによる下肢関節の制御効果を三次元的に検討した。

考案した弾性ストラップの装着により、着地前から着地後の全時期と同じ膝屈曲角度において、knee-in の要素である股関節の内転と膝関節の外反角度が減少した。高い弾性の素材に初期張力を加えた殿部から大腿外側部分のストラップが、股関節の内転と後述する内旋運動を制動し、下行性の運動連鎖¹⁸⁾と膝内側に位置するストラップ (図

1-d)の張力が、膝関節の外反運動を制動したと考えられた。荷重位の膝関節外反は ACL 損傷の発生要因とされることから⁸⁾、これを制動した弾性ストラップは ACL 損傷の予防に貢献する可能性が示唆された。

骨盤から大腿の外側にのみマーカーを貼付する plug-in gait マーカーセットは、股関節回旋角度の計測精度が低いことが指摘されている¹²⁾。そのため、これまでに股回旋角度の実測値と高い相関(内旋 30°位 $r=0.95$, 外旋 30°位 $r=0.98$)を確認した計測指標¹³⁾を採用した。弾性ストラップは着地前から着地後の全時期と同じ膝屈曲角度において、knee-in をきたす股関節の内旋を減少させた。螺旋構造の大殿筋縫工筋ラインが股関節の内旋を制御したと考えられた。股関節内旋モーメントは ACL 損傷の独立した危険因子とされる³⁾ことから、内旋運動を制御した弾性ストラップは、ACL 損傷を予防する可能性が示唆された。

弾性ストラップは着地前と着地時における膝関節の屈曲角度を減少させた。膝関節軸の前方を通過する弾性ストラップ (図 1) は、膝関節の外部伸展モーメントが作用して屈曲角度を減少させたと考えられた。屈曲角度の減少は下腿の後傾と膝関節への前方剪断力の増加をきたし、ACL 損傷を惹

起する可能性がある。着地後の膝関節と着地前後の股関節には屈曲角度の差はなかったが、前傾姿勢が ACL 損傷を予防することから¹⁹⁾、今後弾性ストラップには着地前より股関節と膝関節の屈曲を促すデザインの改良が必要と考えられた。

本研究は股・膝関節角度に限定した検討であり、力学的負荷は不明である。立脚側への体幹側屈は膝外反モーメントを増大させることから、ACL 損傷の発生因子とされる⁸⁾。また、今回の研究では、single leg drop landing 以外は検討しておらず、運動パフォーマンスへの影響や、着地における体幹傾斜の解析などが必要である。

結 語

ACL 損傷の予防を目的に弾性素材を用いて作成した弾性ストラップの着地姿勢に対する制御効果を三次元的に検討した。弾性ストラップは ACL 損傷の発生要因とされる着地前後の股関節内旋、内転と膝関節外反を制御した。

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。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

著者貢献

向井公一：Conceptualization (概念化), Funding acquisition (資金獲得), Formal analysis (正式な分析), Writing original draft (草稿の執筆), 小柳磨毅：Project administration (プロジェクト管理), Supervision (指導), 森下 聖：Data curation (データ管理), Writing review & editing (原稿の見直しとエディティング), Resources (リソース提供), 成 俊弼：Methodology (方法論), Investigation (調査), Writing review & editing (原稿の見直しとエディティング), 三浦大祐：Methodology (方法論), Investigation (調査), 境 隆弘：Validation (検証), Visualization (可視化), 木村佳記：Validation (検証), Visualization (可視化), 越野八重美：Validation (検証), Visualization (可視化), 中野和彦：Project administration (プロジェクト管理), Supervision (指導)

文 献

- 1) 岩嶺弘志. 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. 2002; 9: 985-990.
- 2) Feller JA, Cooper R, Webster KE. Current Austra-

- lian trends in rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee*. 2002; 9: 121-126.
- 3) 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*. 1999; 27: 606-610.
- 4) Sheehan FT, Sipprell WH, Boden BP. Dynamic sagittal plane trunk control during anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med*. 2012; 40: 1068-1074.
- 5) 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.
- 6) 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*. 2011; 46: 1774-1780.
- 7) 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*. 2008; 43: 409-415.
- 8) Doan BK, Kwon YH, Newton RU, et al. Evaluation of a lower-body compression garment. *J Sports Sci*. 2003; 21: 601-610.
- 9) 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*. 2007; 93: S198.
- 10) 三浦大祐, 小柳磨毅, 向井公一, 他. 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—. 日本臨床スポーツ医学会誌. 2022; 30: 611-617.
- 11) 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 threedimensional analysis. *Fitness Sports Med*. 2010; 59: 407-414.
- 12) 鈴木康雄, 彦坂 潤, 後藤寛司, 他. ポイントクラスタ法を用いた膝関節運動の精度検定. 日本福祉大学健康科学論集. 2015; 18: 19-26.

- 13) 森下 聖, 小柳磨毅, 向井公一, 他. 新たに考案した股関節回旋角度の解析手法—3次元動作解析における検証—. 保健医療学雑誌. 2023; 15: (in press).
 - 14) Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al. Mechanisms for Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Am J Sports Med.* 2010; 38: 2218-2225.
 - 15) 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.
 - 16) Herrington L. 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.
 - 17) 三浦大祐, 小柳磨毅, 向井公一, 他. ACL 損傷の予防に向けて開発した Elastomeric Strap の Knee-in 抑制効果—S.E.R.F. Strap との比較—. スポーツ傷害 (J. sports Injury). 2020; 25: 7-10.
 - 18) Koyanagi M, Shino K, Yoshimoto Y, et al. Effects of changes in skiing posture on the kinetics of the knee joint. *Knee Sug. Sports Traumatol. Arthrosc.* 2006; 14: 88-93.
 - 19) Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, et al. Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: a prospective biomechanical-epidemiologic study. *Am J Sports Med.* 2007; 35: 1123-1130.
-

(受付：2023年11月29日，受理：2024年5月7日)

Knee-in posture was controlled by unilateral elastomeric strap developed for the prevention of ACL injury —Three-dimensional motion analysis during single leg drop landing—

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

^{*1} Department of Rehabilitation, Faculty of Rehabilitation, Shijonawate Gakuen University

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

^{*3} Division of Rehabilitation Medicine, Kobe University Hospital International Clinical Cancer Research Center

^{*4} Department of Rehabilitation Science, Faculty of Allied Health Sciences, Osaka Health Science University

^{*5} Department of Orthopaedic Surgery, Nishioka Daiichi Hospital

Key words: single leg drop landing, Posture Control, Unilateral Elastomeric Strap

[Abstract] (Background) To prevent anterior cruciate ligament (ACL) injuries, it is important to prevent the knee from moving inward (knee-in), which is a dangerous position during landing, is important. Therefore, we developed the unilateral elastomeric strap (UES) using elastic materials. This study aimed to clarify the control effect of UES on knee-in by three-dimensional analysis of during landing.

(Participants and Methods) The participants were 25 female university students (19.6 ± 0.7 years) with marked knee-in tendency. They performed a one-leg landing from a 30-cm platform, with a one-sided spiral-shaped UES, approximating the running of the gluteus maximus and sartorius muscles, was placed on a compression wear (UES [+]) and UES (-) was placed on the CW. Three successful trials were selected for analysis. The hip joint angles (flexion, abduction, internal rotation) and knee joint angles (flexion, valgus) were calculated using a three-dimensional motion analyzer, and the results were compared. Statistical processing was performed using a paired t-test with 5% significance level.

(Results) UES (+) significantly to preventing decreased hip internal rotation before landing, hip adduction and internal rotation angle from 0ms to 80ms after landing, and knee valgus.

(Conclusion) UES suppressed hip adduction, internal rotation, and knee valgus at landing.