

身体の水平回転を伴う 片脚ドロップジャンプ着地における 垂直床反力パラメーターの特徴

Characteristics of vertical ground reaction force parameters during
single-leg drop-jump-landing with horizontal body rotation

大路駿介*, 相澤純也*, 廣幡健二*
大見武弘*, 柳下和慶*

キー・ワード：vertical ground reaction force, single-leg drop-jump-landing, horizontal body rotation
垂直床反力, 片脚ドロップジャンプ着地, 水平回転

〔要旨〕 身体の90°水平回転を伴う片脚ドロップジャンプ着地(DJL)における垂直床反力(VGRF)の特徴を検討した。55名のスポーツ習慣のある者を対象とした。高さ20cmから60cm前方にあるフォースプレート上に前方DJLと、90°水平回転(外回り, 内回り)DJLを利き足で3回ずつ行わせた。VGRFの最大値(pVGRF), 初期接地からpVGRFまでの時間およびLoading rateを算出した。床反力パラメーターを従属変数とし, DJL課題を要因とした反復測定による一元配置分散分析および多重比較を実施した。内回りDJLにおいて, 前方DJLおよび外回りDJLよりpVGRFが大きく, 外回りDJLよりpVGRFまでの時間が短かった。内回りDJLでは, 前方DJLや外回りDJLよりも着地衝撃吸収能をより注意深く評価する必要性が示唆された。

はじめに

非接触型の前十字靭帯(Anterior cruciate ligament: 以下ACL)損傷は片脚ジャンプ着地のような急激な減速動作時に生じやすい^{1,2)}。床反力(Ground reaction force: 以下GRF)は他者との接触を伴わない着地時に加わる唯一の外力であり, 特に垂直床反力(Vertical ground reaction force: 以下VGRF)はACL損傷のリスクファクターとされている。ヒトのACLにストレインゲージを埋め込みホップ動作を行わせた研究では, 着地時のVGRFとACLストレインのピークタイミングはほぼ同時期に生じており³⁾, VGRFの最大値はACLのストレインに関わる近位脛骨の前方剪断力および膝伸展モーメントと有意な正相関を示したと報告されている⁴⁾。着地時のVGRFは大腿脛

骨関節の圧縮や, 大腿骨に対する脛骨の内旋および前方移動に作用し, ACLのストレイン増大に関与する⁵⁾。Hewettら⁶⁾はバスケットボール, サッカー, バレーボールに参加している青年期女性アスリートを対象に1シーズンの前向き観察研究を行った結果, ACL損傷者は, 非損傷者と比べて着地時のVGRFが20%高かったことを報告しており, 着地時のVGRFを緩衝することの重要性を示唆している。

ACL損傷予防に向けた着地の評価・指導のために, 着地時のVGRF増大因子について過去に検討されている^{7,8)}。しかし, これらのVGRFの計測で用いられた動作課題は単純な前方へのドロップジャンプ着地(drop-jump-landing: 以下DJL)または落下着地のみである。受傷時の状況を聴取すると, 実際の前接触型ACL損傷場面では相手をかかわす際や, スパイクやシュートを放つ際に, 空中で身体の水平回転を伴いながら着地する場面が

* 東京医科歯科大学スポーツ医歯学診療センター

表 1 対象者の参加競技の内訳

種目	人数
サッカー	15
バスケットボール	7
バレーボール	5
ハンドボール	5
バドミントン	2
テニス	5
ラグビー	2
陸上	2
スキー	2
野球	3
アイスホッケー	1
登山	1
パワーリフティング	1
空手	1
トライアスロン	1
ロードバイク	1
剣道	1

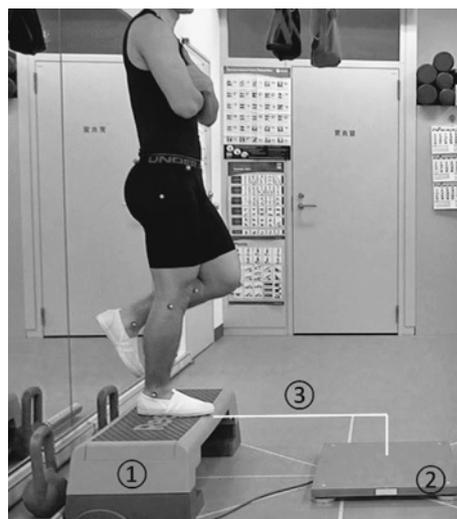


図 1 計測機器の設置
 ①ステップ台の高さ：25cm
 ②フォースプレートの高さ：5cm
 実際の高さは①から②を引いた 20cm
 である
 ③ステップ台前縁からフォースプレート中央までの距離：60cm

多い。しかし、身体の水平回転を伴う片脚 DJL の VGRF を分析した報告は見当たらない。

本研究の目的は、空中での身体の水平回転を伴う片脚 DJL における VGRF の量的、時間的な特徴を前方への単純な DJL と比較することで、水平回転 DJL 時の衝撃を和らげるための評価・指導を行う根拠となる基礎データを得ることとした。空中で身体の水平回転を伴う DJL は前方 DJL と比べて身体の水平回転のコントロールを要する複合的な課題であり、緩衝が比較的困難であるとの推察から、前方 DJL よりも VGRF が高値を示す、そして VGRF 最大値までの時間が短くなるとの仮説を立てた。

対象および方法

対象

対象の選択基準は 18 歳以上でスポーツ習慣のある者とした。除外基準は四肢、体幹に明らかな疾患・外傷の既往や手術歴のある者とした。各対象者には事前に研究内容の説明を口頭と書面により実施し、研究参加の同意を得た。本研究は東京医科歯科大学医学部附属病院倫理審査委員会の承認を得た後に実施した（承認番号：1518）。

計測を終了した対象者は 55 名（男性 41 名：年齢 23.2 ± 3.7 歳，身長 172.1 ± 5.5 cm，体重 66.1 ± 7.7 kg，BMI 22.3 ± 2.3 。女性 14 名：年齢 22.1 ± 2.0 歳，身長 158.9 ± 4.8 cm，体重 53.1 ± 5.0 kg，BMI 21.0 ± 1.5 ）であった。そのうちの男性 11 名（年齢 26

± 4.5 歳，身長 172.9 ± 4.6 cm，体重 65.4 ± 4.3 kg，BMI 21.9 ± 1.3 ）については、再テストの信頼性を確認するために 1 週間後に同一の計測を行った。彼らの約 60% がバスケットボール、サッカー、ハンドボール、バレーボール、バドミントン等のジャンプ着地を必要とする競技に参加していた（表 1）。

方法

計測時に履くシューズはクッション性の低い同一のタイプ（step101, Lucky Bell, Kobe, Japan）に統一した。対象者はウォーミングアップとしてセルフストレッチと無負荷エルゴメーター駆動を 5 分ずつ実施した後、動作課題を 3 回ずつ練習した。ボールを自覚的により遠くに蹴ることができ脚を利き脚と定義し⁹⁾、利き脚での DJL を分析対象とした。

計測には高さ 25cm のステップ台と、高さ 5cm のフォースプレート（260AA6, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland）を用い、ステップ台の前縁から 60cm 前方にフォースプレートの中央が位置するように設置した（図 1）。対象者の計測開始肢位はステップ台の前縁に計測脚のつま先を位置した計測脚による自然片脚立位とした。上肢運動による影響を取り除くため両上肢を前胸部で腕を組ませた¹⁰⁾。

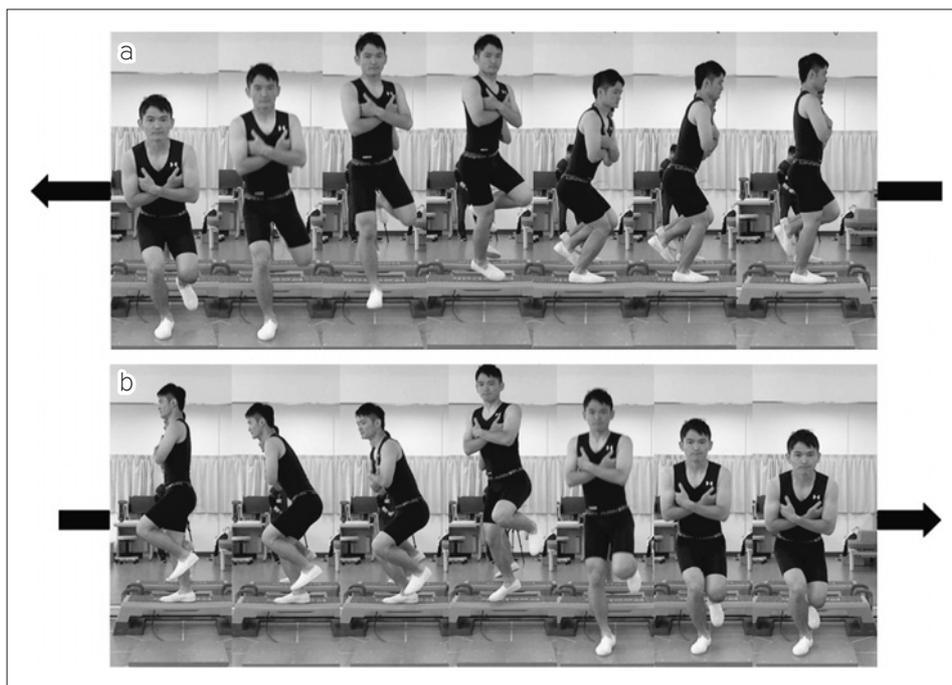


図2 身体の水平回転を伴う片脚 DJL 課題

- a. 外回り DJL. 右脚での課題の場合、足部の外側がステップ台前縁に位置するように立ち、ジャンプ着地に伴い時計回りに約 90° 身体を水平に回転させ着地する。
- b. 内回り DJL. 右脚での課題の場合、足部の内側がステップ台前縁に位置するように立ち、ジャンプ着地に伴い反時計回りに約 90° 身体を水平に回転させ着地する。

動作課題はステップ台上からの片脚 DJL とし、前方への DJL、空中での外回り 90° 水平回転を伴う DJL (以下：外回り DJL)、空中での内回り 90° 水平回転を伴う DJL (以下：内回り DJL) とした (図 2)。

課題中は可能な限りフォースプレートを注視せず、最小限の上方ジャンプでフォースプレートの中央に着地するように指示した。着地の成功は、着地後フォースプレート上で 5 秒間バランスを維持できた場合とし、着地の失敗は、手が胸から離れる、フォースプレート上で足部の位置が動く、着地時に身体が前方向を向いていない場合、または遊脚側の足部が床やステップ台に接地した場合とした。各々の課題を 3 回成功するまで計測した。順序や疲労の効果を考慮してジャンプ着地課題の計測順は無作為とした。

フォースプレートのサンプリング周波数を 1000Hz とし、解析ソフト (IFS-4J/3J, DKH, Tokyo, Japan) を使用してジャンプ着地中の GRF を計測し体重で正規化した。GRF は遮断周波数 50Hz の Low pass butterworth filter によって平滑化した。GRF パラメーターは、VGRF 最大値 (peak vertical ground reaction force：以下 pVGRF)、初

期接地から pVGRF までにかかる時間 (以下 Time to pVGRF)、衝撃吸収を示す Loading rate (pVGRF/time to pVGRF) とした。初期接地は VGRF が 10N を超えた時点と定義した^{9,11,12)}。

統計学的分析には SPSS Ver. 21 (IBM Corp, Armonk, NY, USA) を使用した。各 DJL 課題における GRF パラメーター計測の再現性を確認するために級内相関係数 (Intraclass Correlation Coefficients：以下、ICC) を算出した。試行間再現性については 3 試行の計測値を用いて ICC (1, 3) を分析した。また 1 週間後に再計測を行った 11 名のデータを用いて再テスト再現性を確認するために、ICC (1, 2) を分析した。いずれも 3 試行分の平均値を分析対象とした。各 GRF パラメーターを従属変数とし、DJL 課題 (3 水準) を要因とした反復測定による一元配置分散分析を実施した。有意な効果を認めた場合に Tukey 法を用いた多重比較を実施した。有意水準はいずれも 5% とした。

■ 結 果

各課題における GRF パラメーターの計測再現性の分析結果を表 2, 3 に示す。平均 pVGRF は前方 DJL, 外回り DJL, 内回り DJL で各々 375.1%

表 2 各課題における床反力パラメーターの級内相関係数 (1, 3)

床反力パラメーター	前方 DJL		外回り DJL		内回り DJL	
	ICC	95% 信頼区間	ICC	95% 信頼区間	ICC	95% 信頼区間
pVGRF	0.93	0.89-0.96	0.94	0.91-0.96	0.93	0.89-0.96
Time to pVGRF	0.94	0.91-0.94	0.95	0.92-0.97	0.94	0.90-0.96
Loading rate	0.94	0.91-0.97	0.92	0.87-0.95	0.97	0.95-0.98

ICC : Intraclass Correlation Coefficients

DJL : Drop-jump-landing

pVGRF : peak vertical ground reaction force

Time to pVGRF : 初期接地から pVGRF までの時間

Loading Rate = pVGRF/time to pVGRF

BW : body weight

表 3 各課題における床反力パラメーターの再テストによる級内相関係数 (1, 2)

床反力パラメーター	前方 DJL		外回り DJL		内回り DJL	
	ICC	95% 信頼区間	ICC	95% 信頼区間	ICC	95% 信頼区間
pVGRF	0.92	0.73-0.98	0.94	0.78-0.98	0.94	0.81-0.99
Time to pVGRF	0.89	0.61-0.97	0.96	0.84-0.99	0.98	0.94-0.99
Loading rate	0.92	0.73-0.98	0.95	0.83-0.99	0.98	0.92-0.99

ICC : Intraclass Correlation Coefficients

DJL : Drop-jump-landing

pVGRF : peak vertical ground reaction force

Time to pVGRF : 初期接地から pVGRF までの時間

Loading Rate = pVGRF/time to pVGRF

BW : body weight

表 4 各課題における床反力パラメーターの記述統計値

床反力パラメーター	前方 DJL		外回り DJL		内回り DJL	
	Mean	SD (SE)	Mean	SD (SE)	Mean	SD (SE)
pVGRF	375.1	64.0 (8.6)	378.1	70.9 (9.6)	391.2	67.3 (9.1)
Time to pVGRF	42.5	12.0 (1.6)	47.4	14.1 (1.9)	43.8	12.0 (1.6)
Loading rate	10.9	7.1 (1.0)	10.7	7.7 (1.0)	11.1	7.5 (1.0)

DJL : Drop jump-landing

pVGRF : peak vertical ground reaction force

Time to pVGRF : 初期接地から pVGRF までの時間

Loading Rate = pVGRF/time to pVGRF

BW : body weight

BW, 378.1%BW, 391.6%BW であった。分散分析および多重比較の結果, pVGRF において DJL 課題の効果が有意であり (F (2, 108)=4.9, $p<.01$), 前方 DJL ($p=.01$), 外回り DJL ($p=.05$) と比較して内回り DJL で有意に大きかった。平均 Time to pVGRF は前方 DJL, 外回り DJL, 内回り DJL で各々 42.5ms, 47.4ms, 43.8ms であった。DJL 課題の効果が有意であり (F (2, 108)=13.2, $p<.01$), 外回り DJL と比較して, 前方 DJL ($p<.01$), 内回り DJL ($p=.01$) で有意に短かった。

平均 Loading rate は前方 DJL, 外回り DJL, 内回り DJL で 各々 10.9%BW/ms, 10.7%BW/ms, 11.1%BW/ms であった。DJL 課題の効果は有意ではなかった ($p=.36$) (表 4)。

■ 考 察

本研究では, 水平回転を伴う片脚 DJL と単純な前方 DJL の間で VGRF の量的, 時間的な値に差を認めた。前方および外回り DJL と比較して内回り DJL で pVGRF が大きく, 外回り DJL と比較

して前方 DJL と内回り DJL で Time to pVGRF が短くなりやすい特徴を示した。この結果は、単純な前方 DJL と比較して身体の内回り水平回転を伴う DJL は pVGRF が高まりやすいという本研究の仮説を支持するものであった。

単純な前方 DJL と比べて内回り DJL で pVGRF が高まった理由として課題の複雑さが考えられる。空中での水平回転を伴う DJL は、前方 DJL に加えて水平回転の制御を必要とする複合課題である。Shinya ら¹⁴⁾は、ジャンプ着地前に視覚刺激を用いた反応課題を付加した課題では、着地時の pVGRF が増大することを報告した。このことは、注意が分割する複合課題下では着地衝撃が高まりやすいことを示唆している。本研究の結果は単純な前方 DJL に比べ、内回り DJL は複合課題であり、着地することに加えて身体の水平回転をコントロールすることに意識を向ける必要があるために VGRF を緩衝しにくかったのかもしれない。

本研究では身体の外回り DJL よりも内回り DJL の pVGRF が大きかった。前方 DJL において、着地中の足部底屈角や膝屈曲角¹³⁾、体幹前傾角⁸⁾が浅い、いわゆる stiff landing の場合に pVGRF が高まりやすいことが報告されている⁷⁾。内回り DJL ではこのような stiff landing に影響するキネティクスが現れた可能性はある。しかし、本研究で分析した床反力データから詳細に述べることはできない。

各課題における pVGRF は全体平均で 381% であり、類似した計測環境設定での前方 DJL における先行研究の結果¹³⁾とほぼ同様の値であった。Time to pVGRF は全体平均で 44ms であり、実際の ACL 損傷場面の動画を用いたモデル解析による ACL 損傷タイミングとほぼ一致した^{1,2)}。ACL 損傷は pVGRF が大きく、time to pVGRF が早い着地によって生じやすいことから、本研究の結果は先行研究と同様に ACL 損傷のリスクファクターとしての着地衝撃吸収能を評価しうるデータであるといえる。

過去には着地衝撃吸収能の評価として、pVGRF を減らす、あるいは Time to pVGRF を遅延させる着地方法に関する検討¹⁶⁾がされてきたが、身体の水平回転を伴う DJL におけるこれらの GRF 特性を分析した研究は過去にない。本研究の結果は、ACL 損傷予防に向けた着地衝撃吸収能の評価・

指導において、前方への単純な DJL だけではなく水平回転を伴う DJL を行う必要性を示した新たな基礎的データである。身体の水平回転を伴う着地動作は、非接触型 ACL 損傷時に観察される動作のひとつである。ACL 損傷予防のための着地衝撃吸収能を評価する上では、身体の水平回転を伴う着地の GRF パラメーターの特性について検討することは重要であるといえる。ACL 損傷予防に向けては、空中での身体の内回り水平回転を伴う DJL で pVGRF が高まりやすい、または Time to pVGRF が短くなりやすいという特徴を考慮した上で着地評価・指導を行う必要があるかもしれない。

本研究の問題点としては、各 GRF パラメーターが ACL ストレインに及ぼす影響は不明であることや、非接触型 ACL 損傷における性差や解剖学的特徴などのリスクファクターによる影響を考慮していないことが挙げられる。また、pVGRF や Time to pVGRF は着地時の下肢・体幹等の関節角度や筋活動による影響を受けるが^{7,8)}、それらを検討していないことや、水平回転が伴うことにより発生しうる内方床反力やフリーモーメントの変化を検討していないなどの計測上の問題点が挙げられる。着地動作において、体幹の回転は膝の外反と関連することが示されており¹⁵⁾、今後内回り DJL と外回り DJL の運動学的、運動力学的特徴について検討する必要がある。

結 論

非接触型 ACL 損傷シーンを考慮した身体の水平回転を伴う DJL における VGRF 特性について検討した。空中での内回り DJL は前方および外回り DJL と比較して pVGRF が大きく、身体の水平回転を伴う DJL の中でも、外回り DJL と比較して Time to pVGRF が短くなりやすい特徴を示した。

謝 辞

本研究は公益社団法人東京都理学療法士協会の平成 26 年度研究機器貸し出し助成を受け実施したものである。

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

- 1) Koga, H 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(11): 2218-2225.
- 2) Krosshaug, T et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med.* 2007; 35(3): 359-367.
 - 3) Cerulli, G et al. In vivo anterior cruciate ligament strain behaviour during a rapid deceleration movement: case report. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2007; 11(5): 307-311.
 - 4) Yu, B et al. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2006; 21(3): 297-305.
 - 5) Meyer, EG, Haut, RC. Anterior cruciate ligament injury induced by internal tibial torsion or tibio-femoral compression. *J Biomech.* 2008; 41(16): 3377-3383.
 - 6) Hewett, TE 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(4): 492-501.
 - 7) Self, BP, Paine, D. Ankle biomechanics during four landing techniques. *Med Sci Sports Exerc.* 2001; 33(8): 1338-1344.
 - 8) Shimokochi, Y et al. Changing sagittal plane body position during single-leg landings influences the risk of non-contact anterior cruciate ligament injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2013; 21(4): 888-897.
 - 9) Walsh, M et al. Lower extremity muscle activation and knee flexion during a jump-landing task. *J Athl Train.* 2012; 47(4): 406-413.
 - 10) Popovich, JM, Kulig, K. Lumbopelvic landing kinematics and EMG in women with contrasting hip strength. *Med Sci Sports Exerc.* 2013; 44(1): 146-153.
 - 11) Borotikar, BS et al. Combined effects of fatigue and decision making on female lower limb landing postures: central and peripheral contributions to ACL injury risk. *Clin Biomech.* 2007; 23(1): 81-92.
 - 12) McLean, SG et al. Effect of gender on lower extremity kinematics during rapid direction changes: an integrated analysis of three sports movements. *J Sci Med Sport.* 2005; 8(4): 411-422.
 - 13) Ali, N et al. Gender, Vertical Height and Horizontal Distance Effects on Single-Leg Landing Kinematics: Implications for Risk of non-contact ACL Injury. *J Hum Kinet.* 2013; 5(37): 27-38.
 - 14) Shinya, M et al. The effect of choice reaction task on impact of single-leg landing. *Gait Posture.* 2011; 34(1): 55-59.
 - 15) Dempsey, AR et al. Whole body kinematics and knee moments that occur during an overhead catch and landing task in sport. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2012; 27(5): 466-474.
 - 16) Ericksen, HM et al. Different modes of feedback and peak vertical ground reaction force during jump landing: a systematic review. *J Athl Train.* 2013; 48(5): 685-695.

(受付：2016年5月12日，受理：2017年5月8日)

Characteristics of vertical ground reaction force parameters during single-leg drop-jump-landing with horizontal body rotation

Ohji, S. *, Aizawa, J. *, Hirohata, K. *
Ohmi, T. *, Yagishita, K. *

* Clinical Center for Sports Medicine and Sports Dentistry, Tokyo Medical and Dental University (TMDU)

Key words: vertical ground reaction force, single-leg drop-jump-landing, horizontal body rotation

[Abstract] We analyzed vertical ground reaction force (VGRF) during single-leg drop-jump-landing (DJL) with horizontal body rotation. Fifty-five subjects participated in this study. All subjects performed single-leg drop-jump-landing from a 20-cm high platform that was placed 60 cm posterior to the force plate. The landing was anterior DJL and DJL with 90° horizontal body rotation (external and internal rotation). The peak VGRF (pVGRF), time to pVGRF, and loading rate (LR) were calculated. These data were analyzed with one-way repeated measures analysis of variance to compare the main effect of DJL tasks. The Tukey test was used in post hoc analyses to assess the specific differences between the tasks. In DJL with internal rotation, the pVGRF was significantly larger than that for anterior DJL and external DJL, and time to pVGRF was shorter than that for external rotation DJL. Additional care must be taken to reduce the ground reaction force during single-leg DJL with internal body rotation.