

# 下肢 Stiffness 特性がバウンディングの踏切動作に及ぼす影響

荻山 靖<sup>1)</sup> 関子 浩二<sup>2)</sup>

Yasushi Kariyama<sup>1</sup> and Koji Zushi<sup>2</sup>: Effect of leg stiffness characteristics on take-off motion during bounding. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.

**Abstract** : In the present study, we aimed to (1) clarify the relationship between stiffness and take-off leg motion during bounding and (2) append the information gathered from the study to a hierarchical training model (Kariyama and Zushi 2013, 2015). Seventeen male track and field athletes (sprinters, jumpers, and decathletes) performed bounding. Jumping motions in the sagittal plane (300 Hz) and ground reaction force data (1,000 Hz) were recorded. Stiffness was calculated using the spring-mass model, and the kinematic and kinetic variables of both the take-off leg and swing leg were calculated. We found correlations between stiffness and the following parameters: vertical ground reaction force impulse during the late phase ( $r = -0.488$ ), distance between the center of gravity of the body (CG) and the toe at touch down ( $r = -0.760$ ), hip-toe distance at touch down and at toe off ( $r = -0.568$  and  $-0.472$ , respectively), range of flexion at the hip joint angle ( $r = -0.517$ ), range of extension at the knee joint angle ( $r = -0.484$ ), negative joint work and relative work at the hip joint ( $r = -0.462$  and  $-0.511$ , respectively), positive joint work and relative work at the knee joint ( $r = -0.619$  and  $-0.534$ , respectively), swing-leg angle at touch down ( $r = -0.755$ ), and swing-leg vertical impulse during the late phase ( $r = -0.535$ ). The results we obtained suggest that take-off motion in bounding is affected by stiffness characteristics, although jump distance is not affected by stiffness (Kariyama and Zushi 2013, 2015). Previous studies (Kariyama and Zushi 2013, 2015) indicated that stiffness in bounding is affected by stiffness in rebound jumping. On the basis of our results and those of previous studies, take-off motion correlated with stiffness in bounding could be affected by rebound jump stiffness. Therefore, an understanding of the characteristics of stiffness in rebound jumping is important for training that changes the above-mentioned take-off motion in bounding.

**Key words** : plyometric training, jump, swing leg

キーワード : プライオメトリックトレーニング, 跳躍, 振込脚

## I 緒 言

多くのスポーツ競技において優れたパフォーマンスを達成するためには、踏切中に下肢が大きな力を短時間に発揮し、大きな地面反力を獲得する

ことが重要となる。この能力の向上に有効な方法として、ジャンプ運動を用いたプライオメトリックトレーニング（以下「プライオメトリクス」と略す）がある（Radcliffe and Farentinos, 1999 ; Zatsiorsky and Kramer, 2006 ; 関子, 2012）。その代表的な手段としては、多くのスポーツ競技が

1) (新)山梨学院大学スポーツ科学部  
(新)〒400-8575 山梨県甲府市酒折 2-4-5  
(旧)筑波大学体育系  
(旧)〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
2) 筑波大学体育系  
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
連絡先 荻山 靖

1. Faculty of Sport Science, Yamanashi Gakuin University  
2-4-5 Sakaori, Kofu, Yamanashi, 400-8575, Japan  
Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba  
1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan  
2. Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba  
1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan  
Corresponding author y-kariyama@ygu.ac.jp

水平方向へ片脚で行われることから、それに類似した動作形態（片脚踏切，水平方向への移動）であるバウンディングが用いられている。

プライオメトリクスは同じエクササイズであっても、一定水準の技術が確保されていないと適切なトレーニング効果を引き出すことができなくなる（Radcliffe and Farentinos, 1999；図子, 2012）。様々なエクササイズの中でもバウンディングは技術性が高い（Radcliffe and Farentinos, 1999；図子, 2012）ために、特にこのことに留意する必要があると考えられる。バウンディングの技術性について検討した研究では、より遠くへ跳ぶための踏切動作について（永松・図子, 1999；藤林ほか, 2014；酒井ほか, 2014）、キネマティクスの観点から述べているものが多い。これらキネマティクスからみた踏切動作に関する研究は、バウンディングにおいてより遠くへ跳ぶ、すなわち踏切中の発揮パワーを大きくし、プライオメトリクスによる高い効果を得るために重要な情報になると考えられる。

バウンディングにおいてより遠くへ跳ぶための踏切動作について考える際、後述する Stiffness 特性を踏まえることが有効になる可能性がある。ここで、バウンディングの踏切局面における身体重心と接地点を結んだ線分の挙動に着目すると、その線分は接地と共に短縮し離地に向けて伸長する、ばねの反発する動きに類似していることが確認できる（荻山・図子, 2013）。この挙動は、バウンディング以外にもランニングや歩行など多くの運動に共通して確認されるため、この線分における変位あたりの力で算出される Stiffness により定量化され、様々な身体運動のメカニズム解明に用いられてきた（Brughelli and Cronin, 2008ab；荻山・図子, 2013, 2015；Serpell et al., 2012）。Stiffness 特性からバウンディングを分析すると、バウンディングにおいて Stiffness が高いことは、跳躍距離へ直接影響するものではないが、踏切時間を短くし高い水平速度に対応するための要因であることが示されている（荻山・図子, 2013, 2015）。一方、これを言い換えると、跳躍距離は踏切離地時の水平速度だけでなく

鉛直速度によっても構成されるために、Stiffness が低い者は水平速度が低くとも高い鉛直速度によって、大きな跳躍距離を獲得している可能性がある。さらに、これにより踏切動作にも相違のあること、つまり Stiffness 特性によって遠くへ跳ぶための踏切動作に相違のあることが推察できる。しかしながら、Stiffness 特性からバウンディングの踏切動作を評価した研究は、足部の接地動作に着目したものに限られており（荻山・図子, 2015）、情報が少ない。

バウンディングにおける Stiffness は、両脚踏切で鉛直方向へ行われるリバウンドジャンプの Stiffness による影響を受けること（荻山・図子, 2013, 2015）、さらに、両ジャンプの Stiffness は共に足関節の影響を受けること（荻山・図子, 2015）が報告されている。これらの結果から荻山・図子（2015）は、バウンディングにおける Stiffness を変化させるためには、事前にリバウンドジャンプにおける足関節の力やパワー発揮を変化させておく、階層構造的に配慮したトレーニングモデルを提案している。ここで示した階層構造的とは、単純な手段から複雑な手段へと内在する要素を段階的に移行し、各手段に類似性のある要素間におけるトレーニング効果の転移を狙ったものであり、トレーニングの専門性（特異性）の原則、もしくは漸進性の原則に基づいた考え方である（Young, 2006；Zatsiorsky and Kramer, 2006；図子, 2012）。これらを考慮すると、バウンディングの Stiffness に影響する踏切動作が存在すれば、その動作は事前にリバウンドジャンプの Stiffness がある程度高まっていなくて改善することが困難、といったリバウンドジャンプによる Stiffness の高低へ留意しなければならない動作である可能性がある。このことが明らかになれば、バウンディングの踏切動作改善を目指したトレーニングを行う際の有益な情報が提供できると考えられる。

そこで本研究は、バウンディングにおける Stiffness と踏切動作との関係について検討すること、さらにその結果からリバウンドジャンプからバウンディングへ繋がる階層的なトレーニング

モデル (荻山・凶子, 2013, 2015) へ, 踏切動作改善のための観点を加えることを目的とした。

## II 方 法

### 1. 対象者

対象者は, 陸上競技の短距離, 跳躍および混成種目を専門とする男性17名 (年齢:  $20.3 \pm 1.2$  歳, 身長:  $1.76 \pm 0.47$  m, 体重:  $67.1 \pm 5.3$  kg) であった。実験を開始するにあたり, すべての対象者に本研究の目的, 方法および実験にともなう危険性を十分に説明し, 実験に参加するための同意を得た。なお, 対象者は, 本研究で用いた実験試技を日常から定期的に行っていたが, 事前に実験試技に関する説明を行い, 実験の数日前から十分に練習を行わせた。これらの手順は, 国立大学法人筑波大学大学院人間総合科学研究科研究倫理委員会の承認を得て行われた。

### 2. 実験試技

実験試技であるバウンディングは, 運動課題としてできるだけ遠くへ跳ぶことを指示した, 立位姿勢から前方へ片脚交互に10回連続して跳躍する運動とした (荻山・凶子, 2013, 2015)。対象脚は, 対象者自身の判断から, バウンディングを行いやすい方の脚とした。対象者ごとの跳躍距離の増加が無くなる歩数を事前に調査し, その歩数 (7-9 歩) における踏切がフォースプラットフォーム上に接地するようにスタート位置を調節してバウンディングを行わせた。その際, フォースプラットフォーム上に足部全体が接地し, フォームを崩さず, かつ対象者の内省の良かった試技を分析に用いた。なお, 対象者へは普段のトレーニング時に用いるスパイクシューズ以外のシューズを履かせ, 試技間には疲労の影響を無くすために十分な休息をとらせた。

### 3. 測定方法および測定項目

バウンディングの動作を, 対象者の側方から高速度ビデオカメラ (CASIO 社製, EX-F1) を用いて, 毎秒300フレーム, 露出時間  $1/2,000$  秒で

撮影した。撮影と同時に, 地面反力をフォースプラットフォームを3台 (Kistler 社製, 9287C,  $0.9 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ ; 9281A,  $0.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ ; 9281B,  $0.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ ) 用いて測定した。なお, 2台のフォースプラットフォームにまたいで足部が接地した試技は無効とした。

地面反力は, 1,000 Hz のサンプリング周波数で A/D 変換した後, パーソナルコンピュータに取り込んだ。地面反力と画像を同期するために同期ライトをカメラに写し込み, 同時に同期信号を A/D 変換ボードを介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。撮影されたビデオ画像をパーソナルコンピュータに取り込み, ビデオ動作解析システム (ディケイエイチ社製, FrameDIASII Ver.3 for Windows) を用いて, 毎秒150フレームで全身23点 (両下肢の足先・拇指球・かかと・外果・腓骨頭・大転子, 両上肢の肩峰突起・肘・手首・中手骨および胸骨上縁・耳珠点・頭頂部) と校正マーク (対象者の近傍4点) の2次元座標を読み取った。動作分析は, フォースプラットフォームへの接地10フレーム前から離地後10フレームにわたって行った。画像から読み取った身体各部の座標は, 校正マークをもとに実長換算した後, 最適遮断周波数 (4.5-10.5 Hz) を Wells and Winter (1980) の方法に基づいて決定し, Butterworth Low-Pass Digital Filter を用いて平滑化した。

### 4. 算出項目および算出方法

各セグメントの重心位置, 質量, 慣性モーメント等の慣性パラメータについては, 阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて算出した。

身体質量の5%を基準に, 鉛直成分の地面反力から踏切時間を求めた。跳躍距離を, 画像データから求めた踏切時のつま先から続く逆足接地時のつま先までの距離とし, バウンディングの遂行能力とした。地面反力データについて, 鉛直成分における身体重心最下降点から離地までの後半局面の力積, 水平成分における負の値の力積, 正の値の力積を算出した。

踏切脚3関節の角度を算出し, 角度変位を時

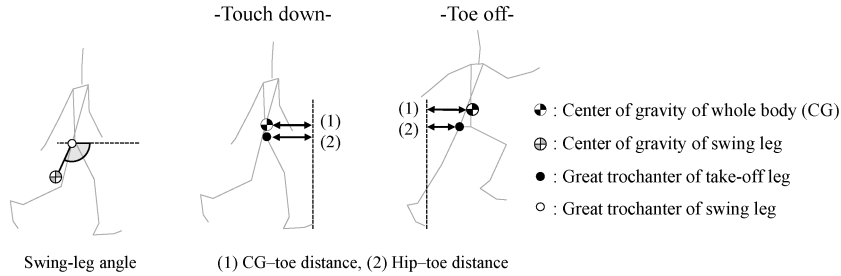


Fig. 1 Definition of the angle and distance variables.

間微分することで角速度を算出した。足関節は拇指球と外顆、腓骨頭と外顆それぞれを結んだ線分、膝関節は腓骨頭と外顆、大転子と腓骨頭それぞれを結んだ線分、股関節は大転子と腓骨頭、肩と大転子それぞれを結んだ線分とした。なお、本研究における符号の正負は、全ての変数において伸展および底屈を正、屈曲または背屈を負とした。

振込脚角度として、振込脚の大転子と振込脚の重心（振込脚側の足部、下腿部、大腿部それぞれの重心の合成）を結んだ線分と水平線のなす角度を算出した (Fig. 1)。さらに、接地距離および離地距離として身体重心と踏切脚つま先間の距離 (Fig. 1) を、踏切接地時および離地時それぞれで算出し、身長で規格化した。また、身体重心には振込脚など踏切脚以外の要因も影響するために、これらの影響を除いた股関節と踏切脚つま先間の距離も踏切接地時および離地時において算出し、身長で規格化した。

振込脚による鉛直地面反力への影響を検討するために、振込脚の鉛直成分の力  $F_Y$  を以下の式により算出した。

$$F_Y = M \cdot a_Y + M \cdot g \quad (\text{Fig. 2})$$

ここで、 $M$  は振込脚の質量、 $a_Y$  は振込脚重心の鉛直加速度、 $g$  は重力加速度である。振込脚の鉛直力を用いて、後半局面における正の値の力積 (以下「振込脚鉛直力積」と略す)、踏切局面における最大値、さらに踏切時間を100%とし最大値が出現する相対時間 (以下「振込脚相対時間」と略す; Fig. 2) を算出した。

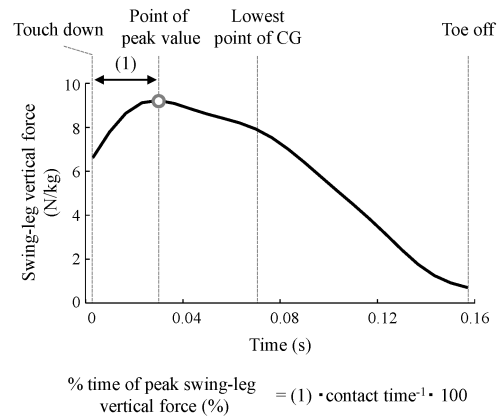


Fig. 2 Definition of the swing-leg vertical force variables. CG: center of gravity of whole body.

Stiffness を算出するために、跳躍中の身体を身体重心と踏切足拇指球を結んだ質量一ばねモデルのばねからなる質量一ばねモデルを用い、以下の式より算出した。

$$\text{Stiffness} = F_{\text{mean}} \cdot \Delta L^{-1}, \quad (\text{荻山・図子, 2013, 2015})$$

ここで、 $F_{\text{mean}}$  は踏切足接地から質量一ばねモデルの最大短縮までにおける地面反力の平均値であり、 $\Delta L$  は踏切足接地からの質量一ばねモデルの短縮量である。したがって、Stiffness の値が高いほど「硬いばね」を示すことになる。 $F_{\text{mean}}$  においては、質量一ばねモデルが接地点を中心に回転運動を起こすことを考慮し、地面反力ベクトルを質量一ばねモデルの線分上に正射影し、踏切

足接地から質量一ばねモデルの最大短縮時までの平均力を算出した。

関節トルクを算出するために、下肢を足、膝および股関節で分割した2次元リンクセグメントモデルを構築した。また、Free Body Diagramにもとづき、各部分の近位端に作用する関節トルクを運動方程式により求め、関節トルクと関節角速度の内積を関節パワーとした。そして、伸展（底屈）トルクによる負および正のパワーをそれぞれ時間積分することで関節仕事を求め、下肢3関節の関節仕事の総和である総仕事から各関節の関節仕事の割合（貢献度）を算出した。

### 5. 統計処理

各算出項目は平均値±標準偏差で示した。相関係数はPearsonの方法を用いて算出した。なお、有意性は危険率を5%未満で判定した。

## III 結 果

Stiffnessは $409.80 \pm 111.52$  N/m/kg、跳躍距離は $3.21 \pm 0.20$  mであり、踏切時間は $0.176 \pm 0.019$  sであった。また、跳躍距離を構成する踏切離地時の水平速度は $5.44 \pm 0.50$  m/sであった。

Stiffnessは、跳躍距離との間には有意な相関関係は認められなかったものの ( $r = -0.112$ , n.s.)、踏切時間 ( $r = -0.641$ ,  $P < 0.01$ ) および踏切離地時の水平速度 ( $r = 0.511$ ,  $P < 0.05$ ) それぞれの間には有意な負または正の相関関係が認められた。また、踏切時間と踏切離地時の水平速度の間には有意な負の相関関係が認められた

( $r = -0.752$ ,  $P < 0.01$ )。

Fig. 3には、Stiffnessと水平および鉛直成分の力積との間の関係性について示した。負および正の水平力積はそれぞれ $-0.53 \pm 0.13$ ,  $0.32 \pm 0.06$  Ns/kg、後半局面の鉛直力積は $3.01 \pm 0.40$  Ns/kgであった。Stiffnessと後半局面の鉛直力積との間にのみ有意な負の相関関係が認められた ( $r = -0.488$ ,  $P < 0.05$ )。なお、後半局面の鉛直力積との間には、後半局面における鉛直地面反力の最大力 ( $r = -0.013$ , n.s.) との間に有意な相関関係は認められなかったが、後半局面における踏切時間 ( $r = 0.881$ ,  $P < 0.01$ ) との間には有意な正の相関関係が認められた。

Fig. 4には、Stiffnessと接地距離および離地距離それぞれとの間の関係性について示した。接地距離は $26.14 \pm 2.38\%$ 、離地距離は $25.26 \pm 3.21\%$ であった。Stiffnessと接地距離 ( $r = -0.652$ ,  $P < 0.01$ ) との間にはのみ有意な負の相関関係が認められた。なお、Stiffnessと、股関節とつま先間の距離との関係性も、踏切接地時 ( $24.85 \pm 2.07\%$ ;  $r = -0.491$ ,  $P < 0.05$ ) および離地時 ( $18.94 \pm 3.54\%$ ;  $r = -0.086$ , n.s.) とともにFig. 4と同様であった。

Table 1には、Stiffnessと関節角度および角速度との間の関係性について示した。Stiffnessとの間には、足関節の背屈範囲 ( $r = -0.511$ ,  $P < 0.05$ )、膝関節の最小角度 ( $r = 0.596$ ,  $P < 0.05$ ) および伸展範囲 ( $r = -0.484$ ,  $P < 0.05$ )、股関節の屈曲量 ( $r = -0.517$ ,  $P < 0.05$ ) それぞれとの間に有意な負または正の相関関係が認められた。

Fig. 5には、Stiffnessと関節仕事および貢献度

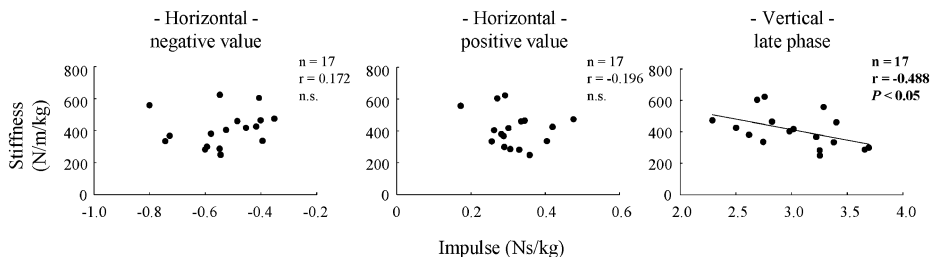


Fig. 3 Relationships between stiffness and impulses in bounding.

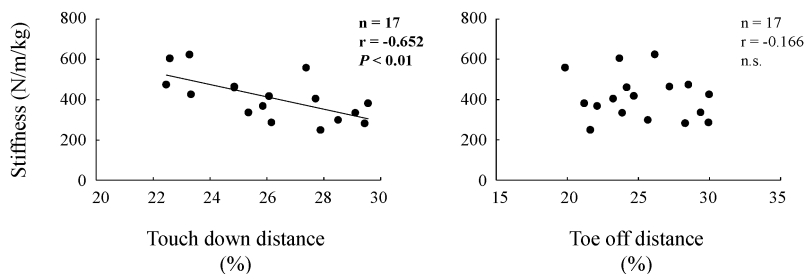


Fig. 4 Relationships between stiffness and touch down distance and toe off distance in bounding.

Table 1 Relationships between stiffness and joint kinematic variables in bounding.

		Joint kinematics	Correlation coefficient vs stiffness
Ankle	Angle (deg.)	Touch down	135.07 ± 6.47
		Minimum	111.27 ± 8.79
	Toeff	Dorsiflexion	156.17 ± 6.36
		Plantarflexion	23.68 ± 6.42
	Angular velocity (deg./s)	Minimum	44.90 ± 8.23
		Maximum	-375.75 ± 71.27
Knee	Angle (deg.)	Touch down	838.52 ± 184.71
		Minimum	159.59 ± 4.15
	Toeff	Flexion	132.23 ± 4.95
		Extension	171.15 ± 5.14
	Angular velocity (deg./s)	Minimum	27.36 ± 6.70
		Maximum	38.92 ± 5.04
Hip	Angle (deg.)	Touch down	151.19 ± 3.83
		Minimum	143.32 ± 6.57
	Toeff	Flexion	188.74 ± 6.87
		Extension	7.28 ± 5.45
	Angular velocity (deg./s)	Minimum	45.42 ± 8.07
		Maximum	-194.72 ± 107.08

との間の関係性について示した。足、膝、股関節の順に、負の関節仕事は  $-1.06 \pm 0.35$ ,  $-1.43 \pm 0.36$ ,  $-0.31 \pm 0.30$  J/kg, 正の関節仕事は  $1.63 \pm 0.34$ ,  $0.64 \pm 0.29$ ,  $0.51 \pm 0.25$  J/kg, 負の貢献度は  $38.26 \pm 9.54$ ,  $50.85 \pm 9.88$ ,  $10.89 \pm 8.90\%$ , 正の貢献度は  $58.85 \pm 9.12$ ,  $22.65 \pm 7.56$ ,  $18.50 \pm 8.60\%$ であった。Stiffness との間には、膝関節の

正の仕事 ( $r = -0.619$ ,  $P < 0.01$ ), 股関節の負の仕事による貢献度 ( $r = -0.511$ ,  $P < 0.05$ ), 膝関節の正の仕事による貢献度 ( $r = -0.534$ ,  $P < 0.05$ )との間に有意な負の相関関係が認められた。

Fig. 6 には、Stiffness と振込脚角度との間の関係性について示した。Stiffness と踏切接地時の振込脚角度との間にのみ有意な負の相関関係が認

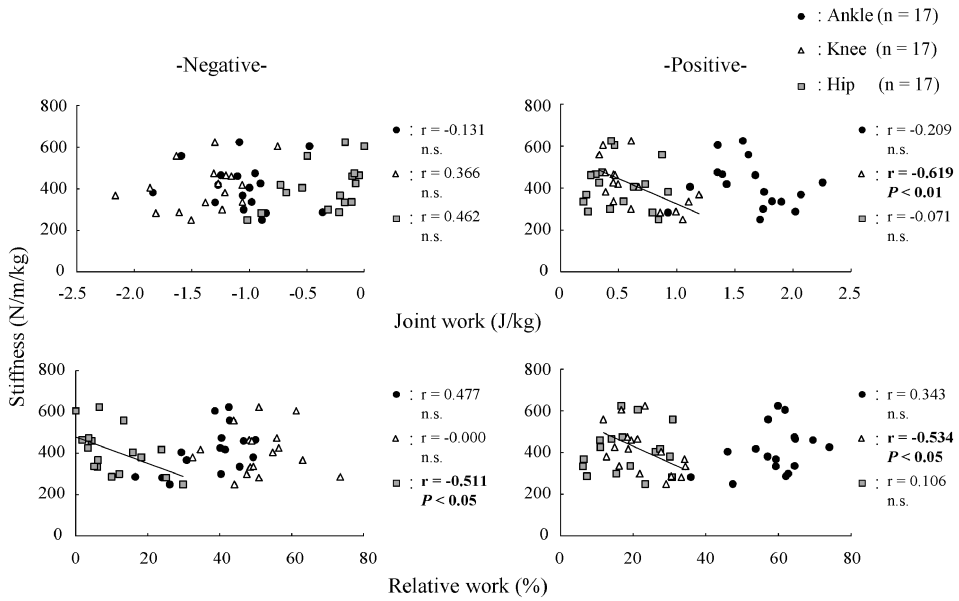


Fig. 5 Relationships between stiffness and joint work, and relative work in bounding.

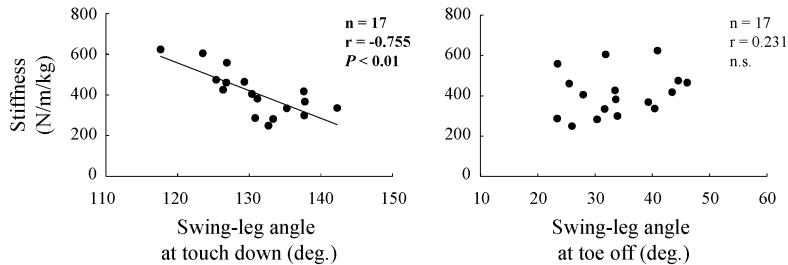


Fig. 6 Relationships between stiffness and swing-leg angles in bounding.

められた ( $r = -0.755$ ,  $P < 0.01$ ).

Fig. 7 には、Stiffness と各種振込脚変数との間の関係性について示した。Stiffness との間には、振込脚鉛直力積において有意な負の相関関係は認められたが ( $r = -0.535$ ,  $P < 0.05$ )、最大鉛直力との間には認められなかった ( $r = -0.177$ , n.s.)。また、踏切接地時の振込脚角度と振込脚相対時間との間 ( $r = 0.552$ ,  $P < 0.05$ )、振込脚相対時間と振込脚鉛直力積との間 ( $r = 0.502$ ,  $P < 0.05$ ) に有意な正の相関関係が認められた。

## IV 考 察

本研究の目的は、バウンディングにおける Stiffness と踏切動作との関係について検討すること、さらにその結果よりリバウンドジャンプからバウンディングへ繋がる階層的なトレーニングモデル (荻山・関子, 2013, 2015) へ踏切動作改善のための観点を加えることであった。本研究の主な結果としては、バウンディングにおける Stiffness の高低によって、踏切脚および振込脚の動作に相違があり、それにより跳躍距離を構成する水平速度や鉛直速度の大きさが異なることが

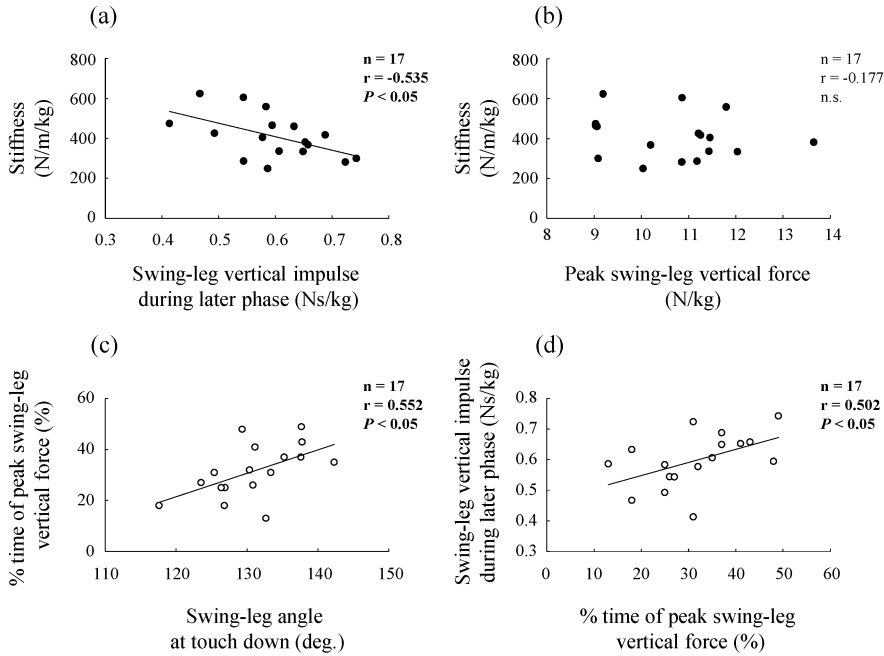


Fig. 7 Relationships between stiffness and swing-leg variables in bounding.

示された．これまで，バウンディングにおける Stiffness 特性については，Stiffness が高いことによる跳躍距離獲得への利点に関して述べられてきた（荊山・図子，2013, 2015）．しかし，Stiffness 特性によって遠くへ跳ぶための踏切動作が異なる可能性がある（荊山・図子，2013）ことから，Stiffness が高い者だけでなく低い者の特徴も合わせて捉えることで，Stiffness と踏切動作との関係をより明確にできると考えられる．そこで本研究では，Stiffness が低い者がどのように Stiffness が高い者と同程度の跳躍距離を獲得しているか，主にこの視点から考察していく．

### 1. Stiffness 特性からみた地面反力の相違

バウンディングにおいて Stiffness は，遂行能力である跳躍距離との間に有意な相関関係は認められないものの，踏切時間との間，さらに踏切時間と跳躍距離を構成する水平速度との間に有意な相関関係が認められている（荊山・図子，2013, 2015）．このことは本研究においても認められているために，バウンディングにおいて Stiffness

が高いことは跳躍距離へ直接影響するものではないが，踏切時間を短くし高い水平速度に対応するための要因であることが理解できる．これに加えて，跳躍距離は水平速度だけでなく鉛直速度によっても決定されることを考慮すると，高い水平速度への対応に重要な Stiffness が低かったとしても，高い鉛直速度によって跳躍距離を獲得している可能性がある．これについて本研究では，Stiffness と力積との間の関係性から検討した（Fig. 3）．その結果，Stiffness と後半局面の鉛直力積との間には有意な負の相関関係が認められた．また，後半局面の鉛直力積と，その構成要素である力の大きさ与作用時間との関係性について検討したところ，作用時間（踏切時間）にのみ有意な相関関係が認められた（ $r = 0.881$ ,  $P < 0.01$ ）．これらのことから，Stiffness が低い者は水平速度が低い（ $r = 0.511$ ,  $P < 0.05$ ）もの，踏切時間が長いことで大きな鉛直力積（鉛直速度）を獲得し，Stiffness が高い者と同程度の跳躍距離を獲得していることが理解できる．本研究ではさらに，このような速度獲得の相違に影響する踏



切動作について、踏切脚および振込脚それぞれから検討する。

## 2. Stiffness 特性からみた踏切脚における動作の相違

Stiffness と接地距離および離地距離との間の関係性について検討したところ、接地距離において有意な負の相関関係が認められた (Fig. 4)。また股関節とつま先間の距離においても同様の関係性 ( $r = -0.491$ ,  $P < 0.05$ ) が認められたことから、Stiffness が低い者ほど踏切接地時により身体の前方で地面を捉えていることが理解できる。

次に、踏切動作について下肢関節の角度および角速度、さらに荻山・図子 (2015) で検討されなかった関節仕事から検討した。関節仕事をを用いた理由は、後述する関節角度の屈曲伸展範囲において Stiffness との間に有意な相関関係が認められたことから、それらを構成要素とする関節仕事をを用いることで、Stiffness 特性による相違をより明確にできると考えたためである。

まず、着地衝撃を受け止める踏切の前半部について検討すると、Stiffness が低い者ほど、股関節の屈曲範囲が大きく股関節の負の貢献度が大きいことが認められた (Table 1 and Fig. 5)。股関節周辺の筋群は、大きな力を発揮することに有利な解剖学的構造を有する (図子ほか, 1998) が、その一方で股関節を構成する身体部位は質量や慣性モーメントが大きいため、バウンディングにおいて股関節による負の仕事や貢献度が大きくなった際には、水平速度の獲得へ不利に働くことが報告されている (荻山・図子, 2014)。バウンディングにおいて Stiffness と踏切前半の足関節トルクや負のパワーとの間に有意な相関関係が示されていること (荻山・図子, 2015) を合わせて考えると、Stiffness が低い者は足関節ではなく股関節において相対的に大きな仕事をすることで着地衝撃を受け止めていること、そのために踏切時間が長く、Stiffness が低いことが推察される。

足関節においては、Stiffness との間に、背屈範囲に相関関係が認められたものの、負の関節仕事とそれによる貢献度に相関関係は認められな

った (Table 1 and Fig. 5)。先行研究 (荻山・図子, 2015) において、踏切前半における足関節の負のパワーとの間に有意な相関関係が認められたことを考えると、バウンディングにおいて Stiffness が高いことには、仕事の大きさではなく、それをどれだけ短い時間で遂行したかを意味するパワーの大きさが重要になると考えられる。

一方、下肢関節の伸展により地面反力が獲得される踏切の後半部では、Stiffness の低い者ほど膝関節の伸展範囲が大きいこと、さらに、正の膝関節仕事およびそれによる貢献度が大きいことが示された (Table 1 and Fig. 5)。より高い疾走速度の獲得が課題となるスプリント走では、支持期における膝関節の伸展動作は身体重心の鉛直方向への移動を促すために、速く走ることに對し悪影響を及ぼすことが報告されている (伊藤ほか, 1998)。このため、Stiffness の低い者ほど後半局面の鉛直力積が大きかったこと (Fig. 3) には、膝関節の相対的にも絶対的にも大きな仕事が影響していることが推察される。

## 3. Stiffness 特性からみた振込脚における動作の相違

Stiffness と振込脚角度との間には、Stiffness が低い者ほど踏切接地時における振込脚角度が大きいことが示された (Fig. 6)。明確な機序こそ示されていないが、走高跳 (奥山ほか, 2003) やスプリント走 (豊嶋ほか, 2015) において、踏切 (支持) 脚接地時における振込脚角度の大きさは鉛直地面反力の獲得に影響する可能性が示唆されている。本研究におけるバウンディングでは、Stiffness が低い者ほど鉛直力積が大きかったことから (Fig. 3)、Stiffness が低い者にみられた振込脚角度が大きいことが鉛直力積の獲得に影響している可能性がある。この仮説を検証するために、振込脚による鉛直力を算出した。Fig. 2 は典型例の振込脚による鉛直力を示しているが、踏切局面にわたって正の値で推移していることが確認できる。2名の対象者において離地直前にわずかに負の値へ移行することが確認されたが、典型例のパターンはほぼ全ての対象者において共通して

いた。このことから、Stiffness 特性に関わらず、バウンディングにおける振込脚は鉛直地面反力を大きくすることに影響していることが理解できる。本研究では、鉛直速度の獲得に影響する後半局面において、正の値の鉛直力から成る力積として振込脚鉛直力積を算出した。この力積が大きいことが、振込動作による鉛直地面反力の獲得に影響しているという仮定を置き、Stiffness 特性の観点から振込脚の影響について検討した。

Stiffness との間には、振込脚鉛直力積において有意な負の相関関係が認められたが、最大鉛直力においては認められなかった (Fig. 7a, b)。この結果と、先行研究 (荻山・図子, 2013, 2015) および本研究において認められた Stiffness と踏切時間との間の有意な負の相関関係を合わせて考えると、Stiffness の高低により振込脚鉛直力の最大値に相違はないものの、Stiffness が低い者ほど、作用時間が長いこと、すなわち正の振込脚鉛直力が作用している時間が長いために振込脚鉛直力積が大きいことが理解できる。これらのことから、Stiffness が低い者ほど、振込動作により高い鉛直速度を獲得していることが推察される。

次に、Stiffness が低い者ほど踏切接地時の振込脚角度が大きかったこと (Fig. 6) を、振込脚を振込むタイミングが遅いことと捉え、これによる影響について検討した (Fig. 7c, d)。その結果、踏切接地時の振込脚角度と振込脚相対時間との間に有意な正の相関関係が認められ、さらに、振込脚相対時間と振込脚鉛直力積との間に有意な正の相関関係が認められた。これらの結果を解釈すると、振込脚の鉛直力は踏切接地直後にピークを迎えその後低下する (Fig. 2) もの、Stiffness の低い者は踏切接地時に振込脚角度が大きいことで、踏切局面における振込脚鉛直力の最大値が出現する時間が相対的に遅くなり (踏切離地時に近い時間で出現する)、これにより鉛直速度に影響が生じ始める身体重心最下降点での鉛直力が大きく維持された状態にあり、鉛直力積の獲得に貢献していることが推察できる。以上のことから、Stiffness が低い者は踏切接地時における振込脚角度が大きく、このことが鉛直力積の獲得に

影響していることが示唆された。

#### 4. 現場への示唆および今後の課題

本研究では Stiffness が低い者がどのように跳躍距離を獲得しているか、主にこの観点から Stiffness と踏切動作の関係について示すことができた。この動作と逆の特徴を示すのが高い Stiffness を有する者であり、それは、接地距離が短く、足および股関節の屈曲 (背屈) 範囲および膝関節の伸展範囲が小さく、振込脚角度が小さいことで、高い水平速度に対応し、Stiffness が低い者と同程度の跳躍距離を獲得していることが理解できる。

荻山・図子 (2013, 2015) は、バウンディングの Stiffness とリバウンドジャンプの Stiffness との間に有意な相関関係が認められたこと、両ジャンプ共に Stiffness が足関節による影響を受けることとトレーニング手段の配列に関する原則を用いて、技術的に複雑なバウンディングの Stiffness を改善するためにはより単純なリバウンドジャンプの Stiffness を事前に高めておくことが有効とする、階層構造関係を考慮したトレーニングモデルを提案している。この先行研究の結果と本研究の結果を合わせて考えると、本研究で示したバウンディングにおいて Stiffness と関係性の認められた踏切動作は、リバウンドジャンプにおける Stiffness の影響を受けること、言い換えるとリバウンドジャンプの Stiffness の高低により必然的に決定されている可能性がある。そのために、これらの動作の改善を目指したトレーニングを行う際には、リバウンドジャンプの Stiffness を事前に変化させておかなければならない可能性がある。または、リバウンドジャンプの Stiffness が高いものの、バウンディングにおける踏切動作が本研究で示した Stiffness が低い者の特徴であった場合、この観点から踏切動作を改善することで跳躍距離が増大する可能性もある。本研究では、これまでに荻山・図子 (2013, 2015) が示した、リバウンドジャンプからバウンディングに繋がる階層構造的なトレーニングモデルへ、踏切動作の観点から新たな知見を加えることがで

きた。今後は、実際のトレーニングによる効果から検証する必要があるが、その実験デザインやトレーニング内容などについて検討する際、本研究の結果が具体的な仮説として機能し、より詳細な検証が可能になると考えられる。ところで、本研究では Stiffness という変数を用いて、ばねとしての挙動から身体運動の評価を試みている。しかしながら、Stiffness は質量一ばねモデルにおける変位とそれに作用した地面反力から成る指標であるために、複雑系である身体運動のばね特性をどの程度評価することができているのか、また、それによりパフォーマンスをどの程度説明できているのか、本研究ではこれらについて検討することはできなかった。今後、このような観点から Stiffness について検討すると共に、それに代わる指標の開発も重要な課題であろう。

## V ま と め

本研究では、バウンディングにおける Stiffness と踏切動作との関係について検討すること、さらにその結果からリバウンドジャンプからバウンディングへ繋がる階層的なトレーニングモデル(荻山・図子, 2013, 2015)へ踏切動作改善のための観点を加えることを目的とした。陸上競技の短距離、跳躍および混成種目を専門とする男性17名を対象にバウンディングを行わせ、Stiffness、さらに踏切脚および振込脚における各種キネマティクスおよびキネティクス変数を算出し、Stiffness との関係性について検討した。主な結果は以下の通りである。

- 1) Stiffness が低い者は、水平速度が低いものの、大きな鉛直力積(鉛直速度)を獲得することで、Stiffness が高い者と同程度の跳躍距離を獲得していた。
- 2) Stiffness が低い者は、接地距離が遠く、また、踏切脚における足および股関節の屈曲範囲が大きく膝関節の伸展範囲が大きい動作を遂行し、大きな鉛直速度の獲得に貢献していることが示された。
- 3) Stiffness が低い者は、踏切接地時におけ

る振込脚角度が大きく、このことが振込脚による鉛直地面反力の獲得を促し、大きな鉛直速度の獲得に貢献していることが示された。

- 4) Stiffness が高い者は、上記とは逆の踏切動作を行っていること、すなわち接地距離が短く、足および股関節の屈曲(背屈)範囲および膝関節の伸展範囲が小さく、振込脚角度が小さいことで、高い水平速度に対応していることが示された。

先行研究(荻山・図子, 2013, 2015)において、バウンディングの Stiffness はリバウンドジャンプの Stiffness による影響を受けることが示されている。これを考慮すると、本研究において Stiffness と相関関係のあった踏切動作はリバウンドジャンプにおける Stiffness の影響を受けることから、これらの動作の改善を目指したトレーニングを行う際にはリバウンドジャンプにおける Stiffness の高低へ配慮することが必要になる可能性がある。これらのことは、プライオメトリクスを用いたトレーニングを階層構造的に考える際の有用な知見になると考えられる。

## 文 献

- 阿江通良(1996)日本人幼少年およびアスリートの身体部分係数. *J. J. Sports Sci.*, 15: 155-162.
- Brughelli, M. and Cronin, J. (2008a) A review of research on the mechanical stiffness in running and jumping: methodology and implications. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 18: 417-426.
- Brughelli, M. and Cronin, J. (2008b) Influence of running velocity on vertical, leg and joint stiffness: modelling and recommendations for future research. *Sports Med.*, 38: 647-657.
- 藤林献明・坂口将太・荻山 靖・図子浩二(2014)リバウンドロングジャンプ指数の優劣を決定する踏切局面の技術的要因. *体育学研究*, 59: 175-188.
- 伊藤 章・市川博啓・齊藤昌久・佐川和則・伊藤道郎・小林寛道(1998)100 m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係. *体育学研究*, 43: 260-273.
- 荻山 靖・図子浩二(2013)陸上競技跳躍種目のパフォーマンス向上に対するバウンディングとリバウンドジャンプの用い方に関するトレーニング学的研

- 究. トレーニング科学, 25: 41-53.
- 荻山 靖・図子浩二 (2014) 跳躍方向の異なるバウンディングにおける踏切脚の力発揮特性. 体育学研究, 59: 397-411.
- 荻山 靖・図子浩二 (2015) バウンディングにおける Stiffness 特性へ影響する踏切脚の力およびパワー発揮: リバウンドジャンプとの比較から. 体育学研究, 60: 137-150.
- 永松幸一・図子浩二 (1999) 踏切中の地面反力と身体の逆振り子運動からみたバウンディングの特性. バイオメカニクス研究概論, 356-360.
- 奥山良樹・横澤俊治・村木有也・小山宏之・藤井範久・阿江通良 (2003) 走高跳の振上脚の効果に関するバイオメカニクス的研究. 日本体育学会大会号, 54: 371.
- Radcliffe, J. C. and Farentinos, R. C. (1999) High-powered plyometrics (first edition). Human Kinetics, 41-96, 133-151.
- 酒井 卓・福島洋樹・山田 顕・堀田朋基 (2014) 水平移動バウンディング運動の動作特徴. 富山大学人間発達科学部紀要, 8: 57-65.
- Serpell, B. G., Ball, N. B., Scarvell, J. M., and Smith, P. N. (2012) A review of models of vertical, leg, and knee stiffness in adults for running, jumping or hopping tasks. *J. Sports Sci.*, 30: 1347-1363.
- 豊嶋陵司・田内健二・遠藤俊典・磯 繁雄・桜井伸二 (2015) スプリント走におけるピッチおよびストライドの個人内変動に影響を与えるバイオメカニクスの要因. 体育学研究, 60: 197-208.
- Wells, R. P. and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In: Human Locomotion 1 (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian Society of Biomechanics), 92-93.
- Young, W. B. (2006) Transfer of strength and power training to sports performance. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 1: 74-83.
- Zatsiorsky, V. M. and Kramer, W. J. (2006) Science and practice of strength Training (second edition). Human Kinetics, pp. 6-9.
- 図子浩二 (2012) プライオメトリクス. 体育の科学, 62: 44-50.
- 図子浩二・西園秀嗣・平田文夫 (1998) 筋収縮の違いからみた下肢三関節のトルク発揮特性. 体力科学, 47: 593-600.

(2016年1月18日受付)  
(2016年4月26日受理)

Advance Publication by J-STAGE  
Published online 2016/6/8