

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

荻山 靖 関子 浩二

Yasushi Kariyama and Koji Zushi: The joint kinetics of the take-off leg affecting stiffness characteristics during bounding: Comparison with the rebound jump. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 60: 137-150, June, 2015

Abstract : The present study attempted to develop a training model using the rebound jump (RJ) for improving stiffness during bounding (BD), focusing on joint kinetics. 17 male track and field athletes (sprinters, jumpers, and decathletes) performed the BD and RJ. Video images of their jumping motions in the sagittal plane (300 Hz) and their ground reaction force data (1,000 Hz) were recorded. Stiffness was calculated using the spring-mass model, and the joint extension and plantar flexion torques during the first half of the take-off phase and negative torque power of the 3 lower joints (ankle, knee, hip) were calculated. The foot angle at the moment of touchdown during BD was also calculated. The results were as follows:

1. During BD and RJ, stiffness was correlated with the ankle joint torque during the first half of the take-off phase and the negative torque power about the ankle joint.
2. The foot angle at the moment of touchdown during BD was correlated with stiffness, contact time, ankle joint torque during the first half of the take-off phase, and negative torque power of the ankle joint.
3. Ankle joint torque and negative torque power about the ankle joint during the first half of the take-off phase in BD were correlated with those during RJ.

These results suggest that stiffness during BD and RJ are affected by ankle joint kinetics. On the basis of these results, previous studies and sports training principles, plyometric training using the RJ may be useful for improving the stiffness in BD via ankle joint kinetics.

Key words : plyometric trainings; jump; joint torque; ankle joint; foot strike pattern

キーワード : プライオメトリックトレーニング, 跳躍, 関節トルク, 足関節, 足部接地パターン

I 緒 言

陸上競技の短距離, 跳躍種目, 球技種目に内在するスプリント走やフットワーク, 各種ジャンプなどの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. この能力を向上させるための方法として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) が挙げられ (荻山・関子, 2013; Radcliffe and Farentinos, 1999; Zatsiorsky and Kramer, 2006; 関子, 2012), その代表的な手段としては片脚交互で水平方向へできるだけ遠くへ跳躍するバウンディング, 両脚において踏切時間を短くし鉛直方向へできるだけ高く跳躍するリバウンドジャンプが用いられている. 両ジャンプは, 対象とするスポーツ競技と, 跳躍方向や踏切脚の様相 (両脚踏切または片脚踏切), さらにには下肢関節の力発揮特性か

ら見た類似点や相違点を基に使い分けられている。中でもバウンディングは、その動作形態から、片脚で水平方向へ行われるスポーツ競技の専門的なプライオメトリクス手段として用いられている。

バウンディングとリバウンドジャンプは、跳躍方向や踏切脚の様相などが異なるために、それぞれが運動特性の異なる手段として用いられていることが多い。しかしながら、両ジャンプを踏切中の身体重心と接地点を結んだ線分（質量-ばねモデル）で捉えると、両ジャンプにおける線分は踏切足の接地とともに短縮し、その後離地に向けて伸長する短縮-伸長運動により遂行されているという共通点が存在している。このような身体の挙動は、ジャンプ運動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、ばねの反発する挙動に類似していることから、変位あたりの力で算出される Stiffness により定量化され、これまでに様々な身体運動のメカニズムを検証するために用いられてきた (Brughelli and Cronin, 2008a, 2008b; Serpell et al., 2012)。荻山・図子 (2013) は、立位姿勢からできるだけ遠くへ跳ぶバウンディング（試技開始後、跳躍距離の増加がなくなり始める跳躍の踏切を分析対象）とその場で踏切時間を短くし、できるだけ高く連続で跳ぶリバウンドジャンプにおいて、Stiffness は踏切時間との間に有意な相関関係が認められており、両ジャンプにおいて身体が硬いばねのように振る舞うことは踏切時間を短縮するために重要であることを報告している (荻山・図子, 2013)。さらに、バウンディングにおいて Stiffness は跳躍距離（分析対象とする踏切時の踏切脚つま先から、続く逆足接地時のつま先までの距離）との間に有意な相関関係は認められていないものの、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。これらのことから、バウンディングにおいて Stiffness が高いことは、その遂行能力である跳躍距離へ直接的に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)。

上述の Stiffness は、質量-ばねモデルの変位とその際の地面反力、すなわち身体全体の挙動から算出されていることから、身体各部位が複雑に連携する踏切動作を単一線分の挙動という単純な動作として把握できる利点が存在する。さらにこの Stiffness は、その算出方法から判断すると身体運動の挙動をばねとして仮定した見かけ上のばね特性を評価した指標であるため、これを用いることはトレーニング現場で用いられている、いわゆる「硬いばね」や「柔らかいばね」といった直感的な動きの把握に対し、有用な情報を提供するものと考えられる。しかしながら、その選手個人の Stiffness を変化させるトレーニングについて考える際には、Stiffness に影響する要因、すなわち踏切脚の下肢3関節（股、膝、足関節）に作用する筋群の力やパワー発揮についての情報が必要となる。これまでにリバウンドジャンプやドロップジャンプ、ホッピングといった鉛直方向へのジャンプにおいては、下肢関節をばね蝶番に見立てた関節 Stiffness（関節トルクと関節角度変位から算出）によって全身の Stiffness の説明がなされている (Brughelli and Cronin, 2008a; Hobara et al., 2011; Serpell et al., 2012)。しかし、Stiffness を変化させるトレーニングについて考えるためには、筋張力やそれによるパワーを推定した関節トルクやトルクパワーに関する情報が重要になると考えられるものの、最大努力で遂行されるリバウンドジャンプにおいて下肢3関節のトルクやトルクパワーから Stiffness に影響する要因について検討したものは見当たらない。さらに、水平方向へのバウンディングにおいてはその Stiffness に影響する要因について検討した研究も見当たらない。

Stiffness は、プライオメトリクスによって変化させることが期待できる。プライオメトリクスは、同じエクササイズであっても行い方によって大きく特性の異なる運動が形成されること、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ことが指摘されている (Radcliffe and Farentinos, 1999; 図子, 2012)。そのために、他のプライオメトリ

クス手段の中でも、技術性が高いバウンディング (Radcliffe and Farentinos, 1999 ; 図子, 2012) を用いる際にはこのことに留意する必要があると考えられる。ここでの技術性とは、両脚踏切よりも片脚踏切、高さを目指すその場での運動よりも距離を目指す移動運動といった、各手段に内在する動作の複雑性に着目したものであり。この観点から、リバウンドジャンプは技術性の高いバウンディングの導入手段として用いることが提案されている (荻山・図子, 2013 ; Radcliffe and Farentinos, 1999 ; 図子, 2012)。このことは、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ている (Young, 2006 ; Zatsiorsky and Kramer, 2006 ; 図子, 2012)。このことを Stiffness について検討した荻山・図子 (2013) は、バウンディングとリバウンドジャンプにおける Stiffness の間に有意な相関関係が認められたことと、上述の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であるとする、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。しかしながら、荻山・図子は両ジャンプにおける Stiffness に影響する下肢の力とパワー発揮、さらにそれらの両ジャンプ間における関係性については検討していない。この関係性の存在を明らかに出来れば、Stiffness に関し両ジャンプの階層性を考慮したプライオメトリクスを実施する際の有用な情報を提供できると考えられる。

これらのことから本研究では、バウンディングにおける Stiffness に影響する踏切脚各関節の力やパワー発揮についてリバウンドジャンプとの比較から検討し、両ジャンプにおける Stiffness に影響する要因間の階層性について検討することで、Stiffness に関しリバウンドジャンプからバウンディングへ繋がるトレーニングモデルを構築する

こととした。

II 方 法

1. 被験者

被験者には、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: 20.33 ± 1.15 歳, 身長: 176.27 ± 4.70 cm, 身体質量: 67.10 ± 5.31 kg) を用いた。被験者の競技水準としては、関東学生陸上競技対校選手権大会における一部校の参加標準記録に満たない選手から、日本ランキング上位者 (走幅跳: 7.93 m) までの選手が含まれていた。陸上競技者を対象にした理由としては、その競技パフォーマンスの向上にプライオメトリクスが重要であること、本研究の被験者は実験試技と同じ運動を定期的に行っており、十分に精通していると考えられたためである。実験を開始するにあたり、すべての被験者に本研究の目的、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、被験者は、本研究で用いた実験試技に精通していると考えられたが、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

バウンディングとして、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 (Fig. 1 : 荻山・図子, 2013, 2014) を、リバウンドジャンプとして、立位姿勢からその場での両脚踏切を用いた5回連続して跳躍する運動 (遠藤ほか, 2007 ; 荻山・図子, 2013) を用いた。対象脚は、被験者自身の判断から、バウンディングを行いやすい方の脚とした。

運動課題として、バウンディングにおいてはできるだけ遠くへ跳ぶことを、リバウンドジャンプにおいてはできるだけ踏切時間を短くかつ高く跳ぶことを指示した。バウンディングでは、被験者ごとの跳躍距離の増加が無くなる歩数を、実験日

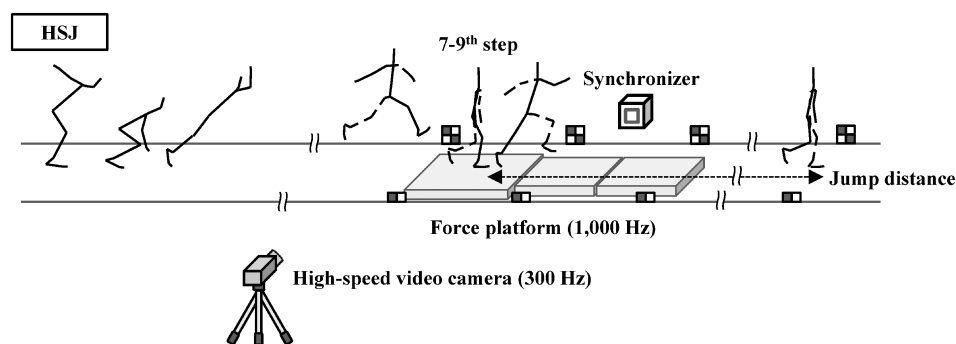


Fig. 1 The trial (HSJ) and experimental settings in this study.

前および当日に足跡から実測することで調査し、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、1枚のフォースプラットフォーム上に足部全体が接地した試技の内、跳躍距離が最も大きかった試技を分析に用いた。リバウンドジャンプにおいては、フォースプラットフォーム上で、できる限り踏切時間を短くし、できる限り高く跳ぶことを口頭で指示して行わせ、後述する RJ-index が最も高い値を示したものを分析に用いた。また、本研究では運動課題を最大限に達成することを優先し、バウンディングおよびリバウンドジャンプの運動課題については、被験者を含む一般的なプライオメトリクス実施者が普段のトレーニングで多く用いているものをそれぞれ選択し、さらに腕および脚の振込動作に制限を加えなかった。なお、被験者に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

バウンディングおよびリバウンドジャンプの動作を、被験者の側方約 30 m 地点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 1/2000 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リバウンドジャンプでは 1 台（Kistler 社製，9287C，0.9 m × 0.6 m）、バウンディン

グでは無効試技を少なくするために 3 台（Kistler 社製，9287C，0.9 m × 0.6 m；Type9281A，0.6 m × 0.4 m；9281B，0.6 m × 0.4 m）用いて測定した（Fig. 1）。なお、バウンディングでは 2 台のフォースプラットフォームに足部がまたがって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，FrameDIAS II Ver.3 for Windows）を用いて、毎秒 150 フレームで全身 23 点（両下肢のつま先・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）と較正マーク（被験者の近傍 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、較正マーク（マーク間距離 1 m および 1.25 m）をもとに実尺換算した後、最適遮断周波数（x 成分：4.5—10.5 Hz，y 成分：6.0—10.5 Hz）を Wells and Winter (1980) の方法にもとづいて決定し、Butterworth Low-Pass Digital Filter を用いて平滑化した。

4. 算出項目

身体重心を、阿江（1996）の身体部分慣性係数を用いて算出した。

バウンディングにおいて、各被験者における身体質量の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、画像データにおける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。

リバウンドジャンプにおいても、バウンディングと同様に踏切時間と滞空時間を求め、さらに滞空時間を以下の式に代入することにより跳躍高を算出した。

$$H = 1/8 \cdot g \cdot t^2$$

ここで、Hは跳躍高（m）を、gは重力加速度（9.81 m/s²）を、tは滞空時間（s）を意味している。

リバウンドジャンプの遂行能力である RJ-index を、リバウンドジャンプの跳躍高をリバウンドジャンプの踏切時間で除すことで算出した（遠藤ほか、2007；図子ほか、1993）。

本研究では、バウンディングおよびリバウンドジャンプにおける 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と線形のばねからなる質量-ばねモデル（以下「ばねモデル」と略す）を用い、以下の式より算出した。

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

ここで、 F_{mean} は踏切足接地から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、 ΔL は踏切足接地からの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_{mean} においては、バウンディングにおいて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ばねモデルの線分上に正射影し、踏切足接地から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、Newton の運動方程式に基づき、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トルクパワーとした。この際、後述する踏切前半における伸展または底屈方向の関節トルクの平均値、および踏切前半における伸展または底屈トルクによる負の関節トルクパワーの平均値を算出した。ここでは伸展および底屈を正、屈曲および背屈を負とした。なお、リバウンドジャンプにおいては片脚あたりの値を算出するために地面反力データを半分にした値を用いた。

バウンディングにおいてのみ、踏切足接地時における足部角度を算出した。踏切足接地時における足部角度は、踏切足接地時における踏切脚足部（踵とつま先を結んだ線分）と地面のなす角度とし、足部が地面と平行になる場合を0°、踵が地面に着いている状態でつま先が地面から離れるほど足部角度が正の値に大きくなることとした。

5. 動作の局面分けおよびデータの規格化・平均化

本研究では、踏切局面を踏切足の着地から離地までとし、踏切局面をばねモデルの最大短縮地点を基準に、その前半部を踏切前半とした。また、典型例によるバウンディングの踏切動作を視覚的に観察するために、踏切前半における Stic Figure と地面反力ベクトルを同時に示した。また、地面反力、トルクを被験者の身体質量で規格化した。

6. 統計処理

各算出項目は平均値±標準偏差で示した。また、算出項目間の関係性について検討するために、Pearson の方法を用いて相関係数を算出し、有意性は危険率を5%未満として判定した。

Ⅲ 結 果

Table 1 には、両ジャンプにおけるパフォーマンスと Stiffness について示した。バウンディングにおける跳躍距離と Stiffness 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.）、踏切時間との間には有意な相関関係が認められた（ $r = -0.641$, $p < 0.01$ ）。さら

に、リバウンドジャンプにおいても跳躍高と Stiffness との間には有意な相関関係は認められなかったものの ($r = -0.122$, n.s.), RJ-index ($r = 0.589$, $p < 0.05$), 踏切時間 ($r = -0.873$, $p < 0.001$) との間には有意な相関関係が認められた. バウンディングとリバウンドジャンプの間には, Stiffness ($r = 0.541$, $p < 0.05$), 踏切時間 ($r = 0.559$, $p < 0.05$), それぞれにおいて有意な相関関

係が認められた. また, バウンディングにおける踏切時間と踏切離地時の水平速度との間には有意な相関関係が認められた ($r = -0.752$, $p < 0.05$).

Fig. 2 には, Stiffness と踏切前半における踏切脚3関節の平均関節トルク (以下「伸展トルク」または「底屈トルク」と略す) との間関係性を, バウンディングおよびリバウンドジャンプそれぞれについて示した. バウンディング ($r = 0.510$, $p < 0.05$) およびリバウンドジャンプ ($r = 0.583$, $p < 0.05$) とともに, Stiffness と足関節底屈トルクとの間においてのみ有意な相関関係が認められた.

Fig. 3 には, Stiffness と踏切脚3関節の負の関節トルクパワー (以下「負のトルクパワー」と略す) との間関係性を, バウンディングおよびリバウンドジャンプそれぞれについて示した. バウンディング ($r = -0.500$, $p < 0.05$) およびリバウンドジャンプ ($r = -0.610$, $p < 0.05$) とともに, Stiffness と足関節における負のトルクパワーと

Table 1 Parameters in bounding and rebound jump.

| | Bounding | Rebound jump |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Jump distance or height (m) | 3.21 ± 0.20 | 0.520 ± 0.048 |
| Contact time (s) | 0.176 ± 0.019 | 0.148 ± 0.017 |
| RJ-index | — | 3.544 ± 0.504 |
| Horizontal velocity (m/s) | 5.44 ± 0.50 | — |
| Stiffness (N/m/kg) | 409.80 ± 111.52 | 631.13 ± 145.98 |

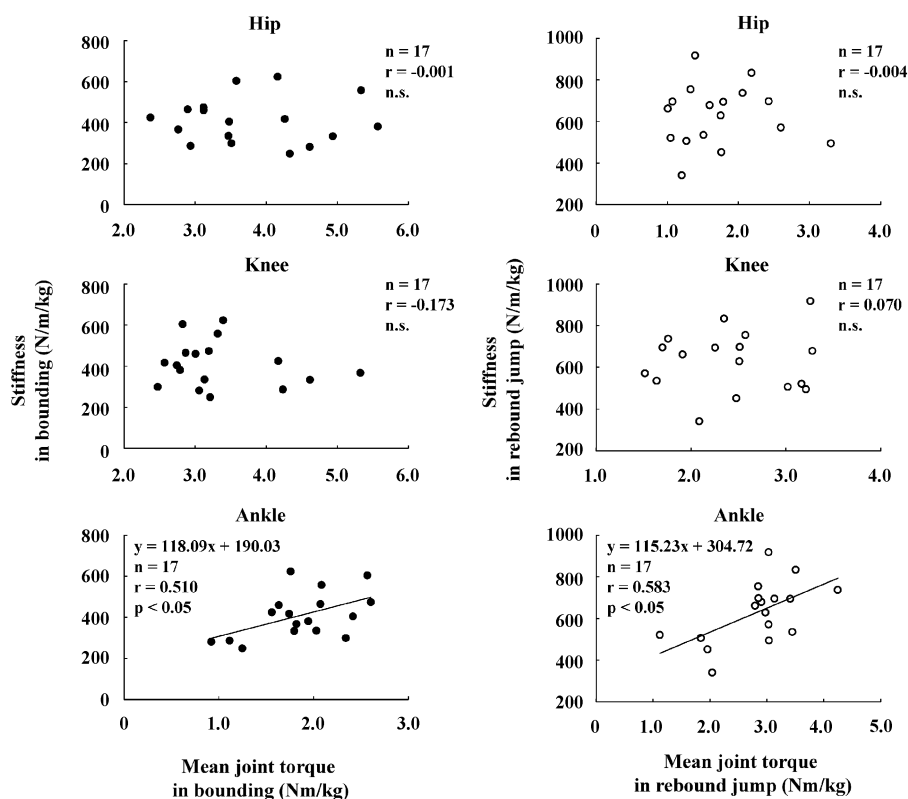


Fig. 2 Relationships between stiffness and mean joint torque in bounding and rebound jump.

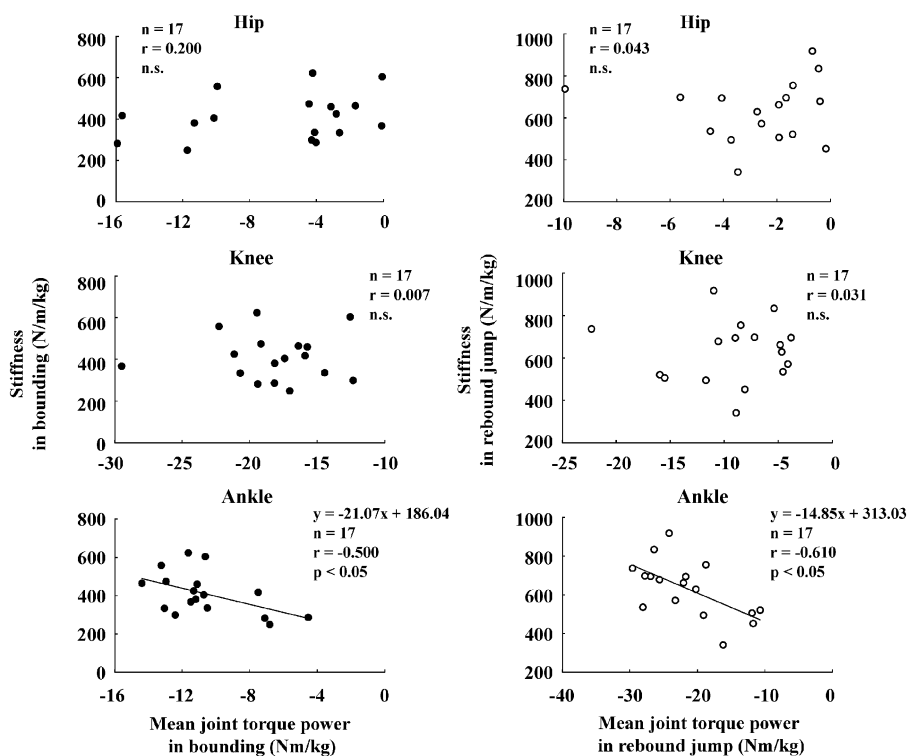


Fig. 3 Relationships between stiffness and mean joint torque power in bounding and rebound jump.

の間においてのみ有意な相関関係が認められた。なお、Stiffness と関節トルクパワー算出に用いた足関節平均角速度（当該時刻における足関節角速度の平均値）との間の関係性について検討したところ、リバウンドジャンプ ($r = -0.124$, n.s.) およびバウンディング ($r = -0.002$, n.s.) いずれにおいても有意な相関関係は認められなかった。

バウンディングにおける足関節の役割を検討するために、まず典型例による跳躍動作や地面反力の評価から着眼点の抽出を試みた。Fig. 4 には、バウンディングにおける Stiffness が高く遂行能力（跳躍距離）に優れる被験者 (Stiff.A) と劣る被験者 (Stiff.B), Stiffness が低く遂行能力に優れる被験者 (Comp.A) と劣る被験者 (Comp.B) の踏切動作と地面反力ベクトルを、Stiffness 算出に関する踏切足接地から質量-ばねモデルの最短縮時まで示した。Stiff は Comp と比較して、踏切足接地時において足部角度が小さいことが確認された。さらに、踏切足接地時において Stiff

では Comp よりも圧力中心点がつま先側へ位置しており、地面反力ベクトルは足関節中心の身体前側を通過しているものの、Comp ではその逆の傾向を示し、地面反力ベクトルは足関節中心の身体後側を通過していることが確認された。

Fig. 5 には、バウンディングについて上述の典型例における地面反力、足関節トルクおよび足部角度の時系列な変化パターンを示した。Stiff および Comp は共通して踏切足の接地直後に大きな地面反力が棘波形状に発揮されているものの、その付近において Stiff では底屈トルクの立ち上がりが高く大きな値が発揮される一方、Comp ではまず背屈トルクが発揮されており、その後の底屈トルクの立ち上がりが遅くその値は小さいことが確認された。さらに、Stiff では Comp よりも、踏切足の接地時における足部角度が小さく、その後 0° 付近へ短い時間で移行していることが確認された。

上述の典型例において確認された足部接地動作

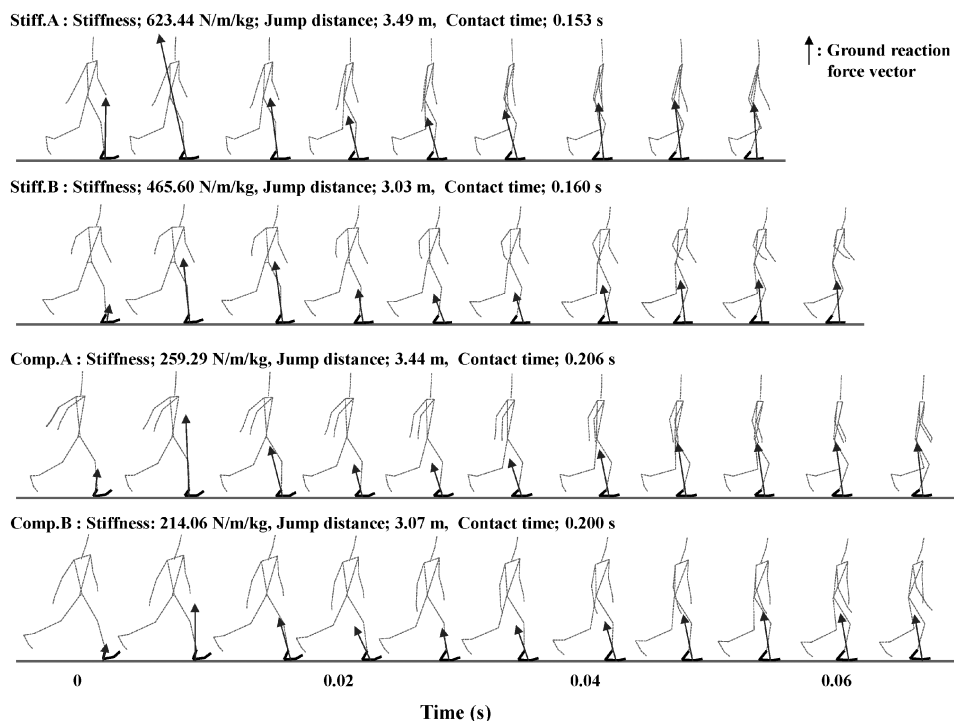


Fig. 4 Exemplar stick figure and ground reaction force vector from touch down to the shortest point about length of spring-mass model in bounding.

による影響について検討するために、Fig. 6には、バウンディングにおける踏切足接地時の足部角度と Stiffness, 踏切時間, 足関節底屈トルク, 足関節の負のトルクパワーそれぞれの相関関係について示した. 足部角度との間には, Stiffness ($r = -0.484$, $p < 0.05$), 踏切時間 ($r = 0.647$, $p < 0.01$), 足関節の底屈トルク ($r = -0.683$, $p < 0.01$), 足関節の負のトルクパワー ($r = 0.659$, $p < 0.01$) 全ての間に関連関係が認められた.

Fig. 7には、足関節底屈トルクおよび足関節の負のトルクパワーにおけるバウンディングとリバウンドジャンプとの間の関係性について示した. 足関節の底屈トルク ($r = 0.675$, $p < 0.01$) および足関節の負のトルクパワー ($r = 0.511$, $p < 0.05$) それぞれにおいて、バウンディングとリバウンドジャンプとの間に有意な相関関係が認められた.

IV 考 察

本研究では、バウンディングにおける Stiffness に影響する踏切脚各関節の力やパワー発揮についてリバウンドジャンプとの比較から検討し、両ジャンプの Stiffness に影響する要因間の階層性について検討することで、Stiffness に関しリバウンドジャンプからバウンディングへ繋がるトレーニングモデルを構築することを目的とした. バウンディングにおいて Stiffness は、跳躍距離との間に有意な相関関係は認められていないものの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ことから、Stiffness が高いことは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 (刈山・図子, 2013). これら先行研究の内容は、本研究の結果からも支持される. 本研究では、このような Stiffness を主に制御していると考えられ

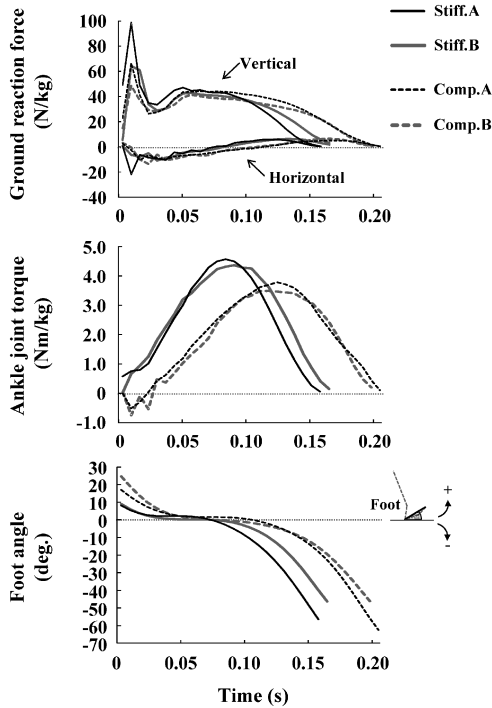


Fig. 5 Ground reaction force, ankle joint torque and foot angle for typical subjects during takeoff phase in bounding.

る踏切脚における下肢3関節の力やパワー発揮に着目し、Stiffnessとの関係性について検討し、目的の達成を目指した。

1. バウンディングとリバウンドジャンプにおける Stiffness へ影響する要因

バウンディングおよびリバウンドジャンプそれぞれにおける Stiffness と踏切脚3関節における伸展または底屈トルクおよび負のトルクパワーとの関係性について検討したところ、両ジャンプともに足関節においてのみ、底屈トルクおよび負のトルクパワーとの間に有意な相関関係が認められた (Fig. 2 および Fig. 3). このことは、バウンディングおよびリバウンドジャンプにおける Stiffness には、ともに踏切脚の足関節が影響している可能性のあることを意味している. なお、Stiffness と関節トルクパワー算出に用いた足関節平均角速度との間には、バウンディングおよびリバウンドジャンプそれぞれにおいて有意な相関関係は認められなかったことから、両ジャンプ共に Stiffness は足関節底屈トルクによる影響が大きいものと考えられる.

本研究で用いたリバウンドジャンプは、膝およ

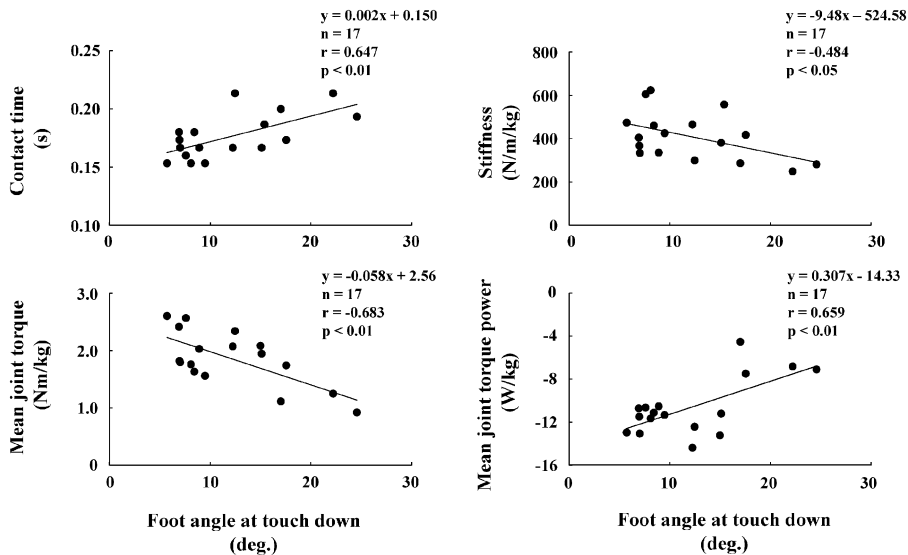


Fig. 6 Relationships between foot angle at touch down and contact time, stiffness, mean joint torque, mean joint torque power in bounding.

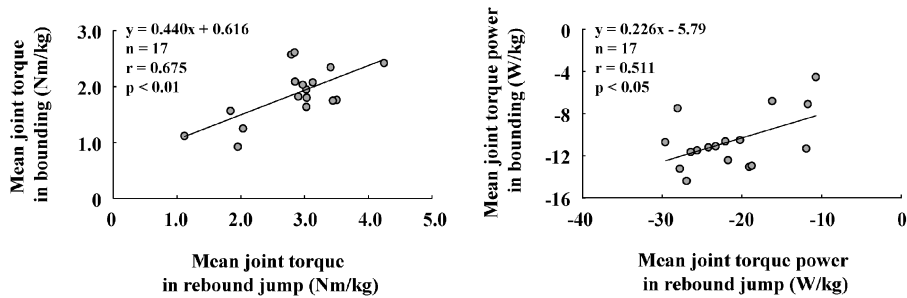


Fig. 7 Relationships between mean joint torque in bounding and that in rebound jump, and mean joint torque power in bounding and that in rebound jump.

び股関節よりも足関節における底屈トルクや負のトルクパワーが大きなジャンプ運動であり（荻山ほか, 2012), リバウンドジャンプやリバウンドドロップジャンプにおける踏切時には, 足関節トルク (Yoon et al., 2007) やそれによる負の関節仕事 (図子・高松, 1995) が影響していることが知られている. これらの報告と共に, 上述した Stiffness は踏切時間に影響する要因であること (荻山・図子, 2013), リバウンドジャンプにおける Stiffness は足関節におけるトルクとトルクパワーに相関関係があったこと (Fig. 2 および Fig. 3) を加味すると, 本研究のリバウンドジャンプにおける Stiffness はその運動の主体となる足関節により制限されていることが考えられる.

一方, バウンディングでは足関節の底屈トルクや負のトルクパワーは膝関節のそれよりも小さいことが報告されている (荻山・図子, 2014). この理由としては, バウンディングは踏切足接地時において身体の持つ大きな運動エネルギーを受け止めるために, 下肢3関節の中で質量や横断面積の小さな足関節底屈筋群を優先的に動員した際には, 背屈範囲が増大することで踏切時間が増大し, 跳躍距離の獲得へ悪影響を及ぼす可能性があるためである. そのために, 足関節よりも大きな質量や横断面積を有し, より大きな力やパワーを発揮できる膝関節や股関節周りの伸展筋群 (図子ほか, 1998) が優先的に動員されていることが挙げられている. さらに, これらのことは跳躍距離の増大に伴って顕著になっていくこと (荻山・図子, 2014) を合わせて考えると, バウンディ

ングにおいて跳躍距離を獲得するためには足関節底屈筋群を動員しないこと, 言い換えると足関節底屈トルクやトルクパワーが小さいほうが望ましいとも解釈できる. バウンディングにおける Stiffness は踏切時間を短くし高い水平速度条件に対応するために重要であり, その Stiffness には足関節が関与している (Fig. 2 および Fig. 3) ことから考えると, 本研究の結果は上記の報告 (荻山・図子, 2014) と矛盾する内容と受け取ることでもできる. そこで本研究では, バウンディングにおける足関節の役割について検討した. そのためにまず, Stiffness が高い被験者 (Stiff.A および B) と低い被験者 (Comp.A および B) の踏切動作を地面反力ベクトルとともに観察することで, バウンディングにおける足関節の役割を検討するための着眼点の抽出を試みた (Fig. 4 および Fig. 5). なお, Stiffness と跳躍距離との間に有意な相関関係が認められないことを考慮し, Fig. 4 と Fig. 5 には Stiffness に加え跳躍距離の大小を加味した4名の典型例を示している.

Stiff と Comp を比較したところ, Stiff.A および B はともに踏切足接地時において足部角度が地面に対して小さく, 足の裏全体で地面を捉えるような接地動作である一方, Comp.A および B では足部角度が大きく, 踵付近で接地していることが確認できる. このような足部の接地動作により生じる影響について考えると, ①接地時における圧力中心点の相違により足関節トルクの発揮様相が変化すること, ②その後の足部の回転範囲が異なることで踏切時間が変化することの2点を

挙げることができる。

まず、①について考えると、Stiff は Comp と比較して、踏切足接地時における圧力中心点が、よりつま先側に位置している一方、Comp では圧力中心点が踵付近であり、足関節中心点よりも身体重心側へ位置していることが確認できる (Fig. 4)。ここで、典型例における踏切脚の接地直後の地面反力と足関節トルクの発揮パターンに着目すると、Stiff と Comp は共通して棘波形状に大きな地面反力が発揮されているものの、その付近の足関節トルクをみると、Stiff では底屈トルクの立ち上がりが早くその値も大きい、Comp ではまず背屈トルクが発揮されており、その後の底屈トルクの立ち上がりが遅くその値は小さいことが確認できる (Fig. 5)。このような典型例の結果から、足部の接地動作が足関節におけるトルクやトルクパワー発揮に影響していることが推察される。この手がかりを基に、踏切足接地時の足部角度と足関節の底屈トルクおよび負のトルクパワーとの間の関係性について検討したところ、それぞれに有意な相関関係が認められた (Fig. 6)。この結果を時系列的に考えると、バウンディングにおける足部の接地動作はその後の足関節による力やパワー発揮に影響していることが理解できる。つまり、Stiff では大きな地面反力に対して足関節底屈筋群を動員することで対応しているものの、Comp ではこれを避けていることが推察される。Stiffness は足関節における力とパワーにおいてのみ有意な相関関係が認められたこと (Fig. 3 および Fig. 4) を基に、Comp を例に考えると、Comp は足部角度を大きくし踵付近で接地することで、大きな地面反力に対し足関節底屈筋群を動員せず、荊山・図子 (2014) が示すように膝関節または股関節伸張筋群で対応していることが推察できる。また、鉛直方向のリバウンドドロップジャンプを扱った先行研究 (図子・高松, 1995) によれば、踏切時間を短縮するためには、質量や慣性モーメントの大きな部位を動員しないこと、つまり、下肢の関節の中でも足関節に関与する筋群の伸張性収縮の大きいことが重要であると示されている。このような足関節の持つ踏切時

間短縮への役割については本研究におけるバウンディングにおいても同様であり、このような特徴を持つ足関節における底屈トルクや負のトルクパワー発揮が Stiffness に影響していたことが推察できる。

次に、②についてみると、Stiffness が高いためには外力に対して変位が少ないこと、すなわち下肢関節の背屈量や屈曲量、セグメントの回転範囲が少ないことが必要となり、このことは踏切時間を短くする要因と同様であると考えられる。これを足部の接地動作に当てはめて考えると、踏切足接地時における足部角度の大きさは、その後の足部の回転範囲の大きさを決定することになり、Stiffness、踏切時間に影響することが考えられる。実際に Stiff では足部角度が 0° になるまでの時間が Comp よりも短いことが確認でき (Fig. 5)、これを相関分析により検討したところ、Stiffness の高い者ほど踏切足接地時における足部角度が小さく、さらに、同様の関係性が踏切時間との間においても認められた (Fig. 6)。これらのことから、Stiff は足部角度の小さな接地動作を用い足部の角度変位が小さいことで、高い Stiffness を達成していたことが考えられる。

他にも足関節の特徴としては、下肢関節の中で最も地面に近く (中足趾関節を除いた場合)、それを構成する足部は地面と接していること、足関節を構成する足部の挙動はそれより上位に位置するほぼすべての身体部位の挙動に影響することが挙げられる。また、足関節が踏切時間 (接地時間) に影響することは、本研究のリバウンドジャンプやバウンディング以外にも、最大下努力で行うその場でのホッピング (Farley and Morgenroth, 1999)、スプリント走での加速局面 (Charalambous et al., 2012) や最大疾走局面 (Kuitunen et al., 2002) などの運動において示されている。これらのことから、足関節は上述の様々な運動において踏切時間の短縮に影響する要因であり、バウンディングにおいても足関節が踏切時間すなわち、Stiffness に影響を及ぼしていることが推察できる。

2. Stiffness 特性からみたバウンディングと リバウンドジャンプの階層構造関係

荻山・図子 (2013) は、バウンディングとリバウンドジャンプにおける Stiffness の間に有意な相関関係が認められた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であるとする、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。本研究によると、バウンディングとリバウンドジャンプの Stiffness は、共に足関節による影響を受けていること、さらに両ジャンプの Stiffness に影響すると考えられる足関節底屈トルクおよび負のトルクパワーそれぞれ (Fig. 7) の間には有意な相関関係が認められている。ここでは、荻山・図子が示す Stiffness に関するリバウンドジャンプからバウンディングへつながる階層性について、本研究によって明らかとなった足関節に着目し検討していく。

Fig. 7 をみると、リバウンドジャンプにおける足関節の底屈トルクおよび負のトルクパワーの大きさは、バウンディングのそれよりも大きいことが確認できる。リバウンドジャンプにおける足関節のトルクやトルクパワーは、他の関節のものよりも大きく (荻山ほか, 2012)、リバウンドジャンプの遂行能力である RJ-index (荻山ほか, 2012) や、それを構成する踏切時間と跳躍高 (Yoon et al., 2007) に影響する要因であることから、リバウンドジャンプの遂行能力は足関節底屈筋群の力やパワー発揮能力を反映した指標としても解釈できる。また、これらの結果と Fig. 7 の相関関係から考えると、リバウンドジャンプはバウンディングにおける足関節底屈筋群に対して過負荷を与えるトレーニング手段として位置づくものと解釈できる。以上のことから、バウンディングにおいて大きな足関節トルクやトルクパワーを発揮するためには、リバウンドジャンプにおける足関節のそれらに優れていることが前提条件になると推察できる。すなわち、Stiff における足部の接地動作やそれによる足関節の大きな底屈トル

クや負のトルクパワー発揮は、リバウンドジャンプの遂行能力、言い換えると足関節底屈筋群による力やパワー発揮能力が高いために遂行できた可能性がある。一方で Comp は足関節底屈筋群の力やパワー発揮能力が高くないことから、Stiff のように足部の接地動作を変化させたとしても足関節底屈筋群が高い速度に対応することができず、足関節は大きく背屈することで踏切時間が増大し、跳躍距離を獲得する上で不利になることが予測できる。このような状況を避けるために Comp は、足関節底屈筋群を動員しない接地動作を用いている可能性がある。このような足部の接地動作と足関節底屈筋群の筋力との関係については、ランニングを対象とした研究で検討されている。Liebl et al. (2014) は、等尺性足関節底屈筋力の高い者がランニング中の底屈筋群を動員しやすい前足部での接地動作を用いていること、底屈筋力の低い者は後足部での接地動作を用いていることを指摘しており、本研究と同様に足関節底屈筋群の筋力と足部接地動作の関係性を認めている。Liebl et al. は、この研究が日常的にランニングを行う者を対象としているために、上記の関係性について、日常的に前足部でランニングを行っているために足関節底屈筋力が高いのか、または高い足関節底屈筋力を有していることが前足部接地動作を用いるための前提条件であるのかについては明言できないものの、ランニング中の足関節底屈トルクの大きさは、底屈筋力の増大を引き起こすには小さすぎることを理由に、底屈筋力が足部接地動作に影響している可能性も示唆している。この研究を基に考えれば、バウンディングにおける足部接地動作も、足関節底屈筋群における筋力、すなわちリバウンドジャンプの遂行能力が影響している可能性がある。

以上の結果を、荻山・図子 (2013) の示したモデルを基に考えると、Fig. 8 におけるトレーニングモデルを構築することができる。すなわち、リバウンドジャンプを用いたプライオメトリクスによって足関節底屈筋群の力やパワー発揮能力を向上させておくと、バウンディングにおいて足関節底屈筋群を動員しやすい足部接地動作が遂行で

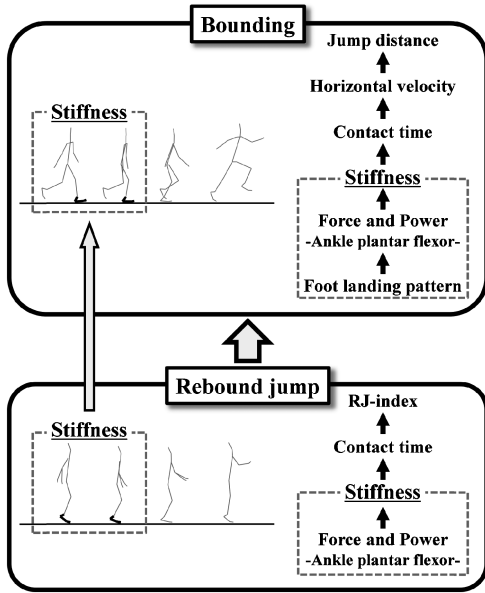


Fig. 8 Hierarchical structure model between bounding and rebound jump about stiffness.

き、高い Stiffness が達成できる、とするモデルである。しかしながら、バウンディングにおける足関節の底屈トルクやトルクパワーはリバウンドジャンプのそれらよりも小さい (Fig. 7) ことについて別の観点に立つと、バウンディングにおける足関節の底屈トルクやトルクパワーの大きさは発揮し得る限界値に対して余力を残している状態にあると捉えることもできる。このことから、リバウンドジャンプの遂行能力の向上が必ずしもバウンディングにおける足関節を介した Stiffness 向上に結びつかない可能性のあることも指摘できる。また、これに関連し、バウンディングにおいては足部の接地動作が足関節底屈筋群の動員様相を決定し Stiffness に影響していると解釈できるために、Comp においても Stiff のような接地動作を行うことでバウンディングにおける Stiffness を高めることができる可能性も存在することになる。今後は、上記のモデルを用いたトレーニングを実施し、実際にリバウンドジャンプの足関節底屈トルクやトルクパワー発揮が向上した際の、バウンディングにおける足関節の挙動や Stiffness への影響について検討していく必要が

ある。なお、上述のように、バウンディングにおける Stiffness は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ものの、跳躍距離そのものとの間には認められていない。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えると、バウンディングにおいて Stiffness が高いことは大きな跳躍距離を獲得するために必須の要因ではないこと、言い換えると Stiffness が低くてもより遠くへ跳ぶための踏切動作や力・パワー発揮特性が存在する可能性がある。今後は、この可能性について検討していくことも重要な課題である。

V ま と め

本研究では、バウンディングにおける Stiffness に影響する踏切脚各関節の力やパワー発揮についてリバウンドジャンプとの比較から検討し、両ジャンプの Stiffness に影響する要因間の階層性について検討することで、Stiffness に関しリバウンドジャンプからバウンディングへつながるトレーニングモデルを構築す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、バウンディングとリバウンドジャンプを行わせ、両ジャンプにおける Stiffness、踏切脚における踏切前半の関節トルクおよび負のトルクパワーを算出した。主な結果は、以下の通りである。

1) バウンディングとリバウンドジャンプそれぞれにおいて、Stiffness は、足関節における踏切前半の底屈トルクおよび負のトルクパワーとの間に有意な相関関係が認められた。

2) バウンディングにおいて、踏切足接地時における足部角度は、Stiffness、踏切時間、足関節の底屈トルク、負のトルクパワーとの間に有意な相関関係が認められた。

3) バウンディングとリバウンドジャンプの間には、足関節における踏切前半の底屈トルクおよび負のトルクパワーそれぞれにおいて有意な相関関係が認められた。

本研究の結果から、バウンディングとリバウン

ドジャンプにおける Stiffness は共に足関節による影響を受けていることが示された。さらに、この結果と先行研究の結果、トレーニング手段の配列に関する原則を用いて論考すると、バウンディングにおける Stiffness を高めるためには、リバウンドジャンプにおける足関節底屈筋群の力やパワー発揮能力を向上させておくことが有効とするトレーニングモデルが構築された。

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.
- Charalambous, L., Irwin, G., Bezodis, I. N., and Kerwin, D. (2012) Lower limb joint kinetics and ankle joint stiffness in the sprint start push-off. *J. Sports Sci.*, 30: 1-9.
- 遠藤俊典・田内健二・木越清信・尾縣 貢 (2007) リバウンドジャンプと垂直跳の遂行能力の発達に関する横断的研究. *体育学研究*, 52: 149-159.
- Farley, C. T. and Morgenroth, D. C. (1999) Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *J. Biomech.*, 32: 267-273.
- Hobara, H., Inoue, K., Omuro, K., Muraoka, T., and Kanosue, K. (2011) Determinant of leg stiffness during hopping is frequency-dependent. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111: 2195-2201.
- 刈山 靖・遠藤俊典・藤井宏明・森 健一・尾縣 貢・図子浩二 (2012) 片脚踏切を用いたリバウンド型ジャンプの動作および力発揮特性: 両脚踏切を用いたリバウンド型ジャンプと比較して. *体育学研究*, 57: 143-158.
- 刈山 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使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.
- 刈山 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.
- Kuitunen, S., Komi, P. V., and Kyröläinen, H. (2002) Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34: 166-173.
- Liebl, D., Willwacher, S., Hamill, J., and Bruggemann, G. P. (2014) Ankle plantarflexion strength in rearfoot and forefoot runners: A novel clusteranalytic approach. *Hum. Mov. Sci.*, 35: 104-120.
- Radcliffe, J. C. and Farentinos, R. C. (1999) High-powered plyometrics (first edition). *Human Kinetics*, pp. 41-96, pp. 133-151.
- 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.
- 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.
- Yoon, S., Tauchi, K., and Takamatsu, K. (2007) Effect of ankle joint stiffness during eccentric phase in rebound jumps on ankle joint torque at midpoint. *Int. J. Sports Med.*, 28: 66-71.
- 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.
- 図子浩二・高松 薫・古藤高良 (1993) 各種スポーツ競技者における下肢の筋力およびパワー発揮に関する特性. *体育学研究*, 38: 265-278.
- 図子浩二・高松 薫 (1995) リバウンドドロップジャンプにおける踏切時間を短縮する要因: 下肢の各関節の仕事と着地に対する予測に着目して. *体育学研究*, 40: 29-39.

(平成26年7月25日受付)
(平成27年1月29日受理)