

## 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

荻山 靖 関子 浩二

Yasushi Kariyama and Koji Zushi: The characteristics of joint kinetics associated with the take-off leg during bounding while jumping in different directions. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 59: 397-411, December, 2014

**Abstract** : The aim of this study was to clarify the point of attention and determine an effective method for the vertical single-leg rebound jump (VSJ) and horizontal single-leg bounding jump (HSJ) in plyometrics by investigating the differences and relationship between the two jumps with respect to take-off movement and joint kinetics. 11 male track and field athletes performed the VSJ, 50%HSJ, 75%HSJ, and HSJ. The kinematics and kinetics during the take-off phase were recorded using a high-speed video camera (300 Hz) for movements in the sagittal plane and force platforms (1000 Hz), and then analyzed. The results are summarized below:

1. According to a spring-mass model, the vertical velocity of the center of gravity in the VSJ was attained by using shortening-lengthening movements. However, in the HSJ, most of the horizontal velocity of the center of gravity was due to rotational movement. This velocity increased with increasing jump distance.
2. The extension torque of the knee and hip joints during the former phase, the negative torque power of the knee, and the positive torque power of the ankle and hip joints in the HSJ were greater than those in the VSJ. However, the ankle joint torque during the former phase and the negative torque power in the HSJ were smaller than those in the VSJ.
3. The jump distance for the HSJ was correlated with the RJ-index for the VSJ. Moreover, there was a correlation between the HSJ and VSJ with respect to negative joint work and joint contribution.

These results suggest that there are differences in take-off movement and joint kinetics between the VSJ and HSJ; however, both jumps show similarities in the recruitment characteristics of the take-off leg muscle during the former phase.

**Key words** : plyometrics, jump, single-leg, joint torque

キーワード : プライオメトリクス, ジャンプ, 片脚, 関節トルク

### I 緒 言

多くのスポーツ競技に内在する運動は片脚運動であることが多く、優れたパフォーマンスを達成するためには、片脚による大きな力やパワーを発

揮することが重要となる。このことから、トレーニング現場では下肢のプライオメトリクス手段として、片脚踏切を用いたりバウンドジャンプが多く用いられている。これまで、リバウンドジャンプの運動特性について検討した研究 (Bobbert et al., 1987 ; 高松ほか, 1989 ; 関子ほか, 1993;

Young et al., 1999; Taube et al., 2012) では、鉛直方向への両脚踏切によるジャンプ運動を対象としたものが多く、片脚踏切のリバウンドジャンプを対象としたものは極めて少ない。しかし、近年、荻山ほか (2012; 2013) は、鉛直方向への片脚踏切のリバウンドジャンプ (Vertical Single-leg rebound Jump: VSJ) の運動特性を、両脚踏切のリバウンドジャンプとの比較から検討し、VSJ は両脚リバウンドジャンプよりも、足関節底屈筋群のパワー発揮が小さく、股関節伸展および外転筋群のパワー発揮が大きい特性のあることを報告し、プライオメトリクスとして両脚ジャンプと片脚ジャンプを選択する際の視点を提示している。

一方、トレーニング現場では、片脚踏切のリバウンドジャンプを用いる際には、その場で行う VSJ 以外にも、水平方向へ片脚で両脚交互に跳躍し、跳躍距離の獲得を目指すバウンディング (Horizontal Single-leg bounding Jump: HSJ) が頻繁に用いられている。この HSJ に関する研究では、より遠くへ跳ぶための踏切動作に注目したもの (永松・図子, 1999) や、HSJ の遂行能力と各種運動能力との関係性に注目したもの (有川・太田, 2005; Holm et al., 2008; 稲岡ほか, 1993; 藤林ほか, 2013)、地面反力や筋活動の大きさなどからトレーニング手段としての特性について検討したもの (Mero and Komi, 1994; 木越ほか, 2001; 2012)、さらに走幅跳や三段跳に内在する専門的な能力の測定評価法について検討したもの (藤林ほか, 2013) など、様々なものが存在する。しかし、下肢のプライオメトリクス手段として HSJ を利用する場合には、これらの情報以外にも、踏切脚各関節における関節トルクや関節トルクパワーの発揮特性について理解することが不可欠であると考えられる。このことは、プライオメトリクスの効果が用いる運動の関節トルクやトルクパワーなどの力発揮特性の影響を強く受ける (池田・淵本, 2005; Taube et al., 2012; Young et al., 1999) ことから理解できる。

HSJ と VSJ では、同じ片脚踏切を用いた跳躍運動であるものの、跳躍方向が異なることで運動

の遂行に関わる力学的な諸条件が大きく異なっていると考えられる。これらについては、両ジャンプにおいて、身体重心と接地点を結んだ線分 (質量-ばねモデル: McMahon and Cheng, 1990) の挙動に着目すると理解しやすい (Zushi et al., 2005; 図子, 2006)。すなわち、VSJ においては、このモデルが着地とともに短縮し、その後、伸長することで運動が遂行される一方、HSJ においてはこの短縮-伸長運動に加え、接地点を中心としたモデルの前方への回転運動が遂行されている。これらを考慮すると、HSJ と VSJ では回転運動を遂行するための関節トルクやトルクパワーなどからみた力発揮特性に大きな相違が生じていることが予測される。しかしながら、これまでに HSJ における下肢各関節の力発揮について示した研究は少なく (藤林ほか, 2013)、また、HSJ と VSJ における相違について検討した研究はない。

プライオメトリクス手段としての HSJ と VSJ は、上述のような相違が存在するために、それぞれが異なる特性を持つ運動として区別的に用いられている場合が多い。しかしながら、VSJ は技術的に複雑な HSJ の導入手段として用いることも提案されている (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することを示しており、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もとづいている。このように、トレーニング手段を階層構造的に配慮した計画を立案するためには、各手段の運動特性の相違とともに、類似性についても明らかにしておくことが重要となる (荻山・図子, 2013)。HSJ と VSJ を上述の質量-ばねモデルで捉えた際には、回転運動の有無についての相違は存在するが、短縮-伸長運動という共通点を指摘することもできる。そのために、HSJ と VSJ には何らかの対応関係のあることが推察できる。しかし、これまでに両ジャンプにおける類似性については検討されていない。したがって、HSJ と VSJ における相違とともに、類似性についても明らかにすることが出来れば、両ジャンプ

をプライオメトリクス手段として用いる際の有用な情報を提供できると考えられる。

そこで本研究では、HSJとVSJによる踏切脚の力発揮特性の相違点と、類似性について検討することによって、両ジャンプをプライオメトリクス手段として用いる際の留意点について提案することを目的とした。

## II 方 法

### 1. 被検者

被検者には、陸上競技を専門とする男性11名 (Age,  $22.1 \pm 2.3$  years; Height,  $176.4 \pm 5.7$  cm; Weight,  $66.2 \pm 4.2$  kg) を用いた。実験を開始するにあたり、すべての被検者に本研究の目的、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、被検者は、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ない、実験の数日前から十分に練習を行なわせた。これらの手順は、筑波大学大学院人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行なわれた。

### 2. 実験運動

鉛直方向へのリバウンドジャンプとしてVSJ (Vertical Single-leg rebound Jump) を、水平方向へのリバウンドジャンプとして50% HSJ (Horizontal Single-leg bounding Jump), 75% HSJ およびHSJを用いた (Fig. 1)。VSJは、立位姿勢からその場で両脚を交互に入れ替えて10回連続して跳躍する運動 (荊山ほか, 2012) とした。HSJでは、立位姿勢から前方へ両脚交互に連続して10回連続して跳躍する運動 (木越ほか, 2012; 荊山・凶子, 2013) とした。50% HSJ および75% HSJでは、HSJにおいて分析対象となった踏切における跳躍距離を100%とし、その距離の50%および75%間隔にマーカーを並べ、その間を連続して跳躍する運動とした。被検脚は、被検者自身の判断から、VSJを行ないやすい方の脚とした。VSJにおいては、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

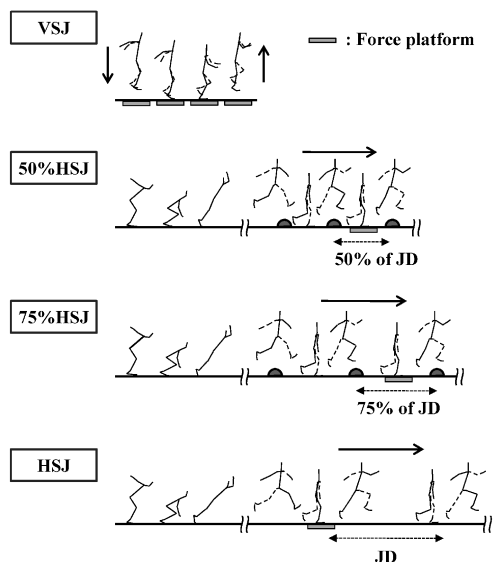


Fig. 1 Experimental tasks in this study.  
JD: Jump Distance in HSJ

口頭で指示して行なわせ、10回のジャンプ中においてフォームを崩さず、かつ被検者の内省の良かった試技の中から、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。HSJでは、跳躍開始から跳躍距離が増加していくが、ある歩数から跳躍距離の増加は無くなりほぼ一定の値を示した。本研究では、事前にその歩数 (7–9歩目) を被検者ごとに調査し、その際の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行なわせ、フォースプレート上に足部全体が接地し、フォームを崩さず、かつ被検者の内省の良かった試技を分析に用いた。50% HSJ および75% HSJ においては、設置したマーカー内を、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なわせた。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、HSJ およびVSJ において腕および脚の振込動作に制限を加えなかった。これらの実験運動により、立位姿勢から運動を開始し最大努力にて運動課題を達成するという、共通した条件下において各跳躍運動を比較でき、跳躍方向の変化に伴う各種力学量の変化について検討することができると考えられる。なお、被検者に

は、普段ジャンプ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るために十分な休息をとらせた。

### 3. 測定項目および測定方法

実験試技を、被検者の側方から高速ビデオカメラ（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VSJでは1台、HSJでは3台（Kistler社製、9287B, 0.9 m×0.6 m; Type9281A, 0.6 m×0.4 m; 9281C, 0.6 m×0.4 m）用いて測定した。地面反力は、1000 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ー（DELL社製、DXP061）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ーに取り込んだ。撮影されたビデオ画像をパーソナルコンピューター（SONY社製、VGN-TT50B）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（被検者の近傍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なった。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（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

VSJにおいては、体重の3%の値を基準に地面反力の波形から踏切時間と滞空時間を求め、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。その際、着地時と離地時における身体の姿勢は同じであると仮定した。

$$\text{跳躍高} = (9.81 \cdot \text{滞空時間}^2)^{0.5},$$

9.81は重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

RJ-indexは、跳躍高を踏切時間で除すことで算出した（図子ほか, 1993; 遠藤ほか, 2007）。なお、RJ-indexを力学的に捉えた際には、踏切中の力学的パワーとして解釈することができる（深代, 1992; Tauchi et al., 2008）。

また、HSJにおいても地面反力の波形から踏切時間を算出し、HSJでは跳躍距離を、フォースプラットフォーム上での接地時のつま先から、逆足接地時のつま先までの距離とし、算出した。

踏切脚の関節角度を算出し、角度変位を時間微分することで角速度を算出した。角度および角速度の定義はFig. 2に示した。

本研究では、踏切動作を簡易的に評価するために、跳躍中の身体を身体重心と地面の固定点を結んだ質量と線形のばねからなる質量-ばねモデルとした（Fig. 2; McMahon and Cheng, 1990）。固定点は、身体重心最下高時点における踵からつま先の中点とし、分析対象区間を通して固定されているものとした（Zushi et al., 2005）。本研究では、短縮-伸長運動としてモデルの長さ変化量とその速度、回転運動として回転角度とその角速度を算出した。また、以下の式を用いることで、身体重心速度を、短縮-伸長運動によって獲得される速度と、回転運動によって獲得される速度に分解した（Jacobs and Ingen, 1992; Zushi et al.,

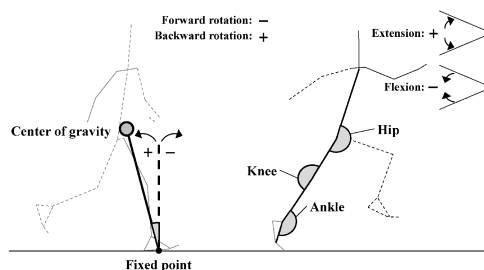


Fig. 2 Definitions of the spring-mass model and joint angles and angular velocity

2005).

$$\dot{X}_{cg} = -\dot{L} \cos \theta + L\dot{\theta} \sin \theta$$

$$\dot{Y}_{cg} = \dot{L} \sin \theta + L\dot{\theta} \cos \theta$$

ここで、 $\dot{X}_{cg}$  および  $\dot{Y}_{cg}$  は水平および鉛直方向の身体重心速度を、 $L$  はモデルの長さを、 $\theta$  はモデルと地面のなす角度を示している。本研究では、水平成分の身体重心速度を、短縮-伸長運動によるもの ( $\dot{L} \cos \theta$ ) と回転運動によるもの ( $L\dot{\theta} \sin \theta$ )、同様に鉛直成分の身体重心速度を短縮-伸長運動によるもの ( $\dot{L} \sin \theta$ ) と回転運動によるもの ( $L\dot{\theta} \cos \theta$ ) それぞれに分解した。なお、このモデルには脚や腕による振込動作が含まれるために、踏切脚による影響を直接的に反映したモデルではない。しかし、モデルの挙動に影響する地面反力は踏切脚により獲得されること、さらに、その踏切脚の動作や力発揮は振込動作との相互関係の中で達成され、それぞれは不可分であることから、踏切脚について検討することで質量-ばねモデルの挙動の大部分が説明可能であると仮定した。

鉛直方向の地面反力データから、後述する踏切前半および後半局面それぞれの力積を、さらに水平方向の地面反力データから、負(減速成分)および正(加速成分)の値それぞれの力積を算出した。

関節トルク(以下、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。さらに、Free Body diagram にもとづき、各部分の近位端に作用するトルクを運動方程式により求め、トルクと関節角速度の内積を関節トルクパワー(以下、トルクパワー)とし、踏切前半および後半における伸展トルクの平均値、踏切局面における伸展トルクによる負および正のトルクパワーの平均値を算出した。また、伸展トルクによるトルクパワーを時間積分することで関節仕事を算出した。関節仕事は、正と負の仕事に分け、それぞれを下肢の3関節における仕事の総和で除すことによって、各関節の相対仕事(貢献度)を算出した。なお、各セグメントの重心や慣性モーメントの算

出には阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いた。

## 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、踏切局面を身体重心の最下降地点を基準に、踏切前半および踏切後半の2つの局面に分けた。各ジャンプにおいて各被検者が踏切局面全体に要した時を100%としてデータを規格化し、1%ごとに平均した。また、地面反力、トルクを被検者の体重で規格化した。

## 6. 統計処理

各測定項目は平均値±標準偏差で示した。本研究では測定項目の比較には、一元配置の分散分析を行ない、F値が有意であった項目についてはTukey-Kramer法による多重比較を行なった。測定項目の関係性については、Pearsonの方法を用いて相関係数を算出した。なお、有意性は危険率を5%未満で判定し、10%未満を有意傾向として扱った。

## III 結 果

Table 1には踏切離地時における身体重心速度と踏切時間を示した。踏切離地時における身体重心速度は、VSJから、50%HSJ、75%HSJ、HSJへと、跳躍距離の増大に伴い、鉛直速度は減少、水平速度は増大し、これらによって形成される合成速度は増大した。本研究で用いた跳躍運動は連続跳躍であることから、踏切接地時における鉛直(VSJ:  $-2.48 \pm 0.16$ , 50%HSJ:  $-2.35 \pm 0.17$ , 75%HSJ:  $-2.23 \pm 0.15$ , HSJ:  $-1.82 \pm 0.31$  m/s)、水平(VSJ:  $0.03 \pm 0.11$ , 50%HSJ:  $2.32 \pm 0.18$ , 75%HSJ:  $3.70 \pm 0.40$ , HSJ:  $5.29 \pm 0.52$  m/s)および合成速度(VSJ:  $2.48 \pm 0.16$ , 50%HSJ:  $3.30 \pm 0.18$ , 75%HSJ:  $4.33 \pm 0.33$ , HSJ:  $5.60 \pm 0.44$  m/s)も同様の变化を示した。さらに、踏切時間は、HSJはVSJと比較し、踏切前半が短いため踏切局面全体の時間も短く、この傾向は跳躍距離の増大に伴ってより顕著になった。

**Table 1** Takeoff velocity and contact time in various jumps

	VSJ	50%HSJ	75%HSJ	HSJ	Difference
Jump height (m)	0.300±0.031	0.267±0.038	0.246±0.024	0.214±0.043	VSJ>50%>75%>HSJ
Jump distance (m)	—	1.61±0.11	2.40±0.17	3.20±0.27	50%<75%<HSJ
Takeoff velocity (m/s)	2.41±0.14	3.19±0.15	4.19±0.29	5.57±0.44	VSJ<50%<75%<HSJ
Vertical	2.40±0.14	2.28±0.16	2.19±0.14	2.04±0.21	VSJ, 50%>75%>HSJ
Horizontal	—	2.22±0.21	3.50±0.35	5.18±0.49	50%<75%<HSJ
Contact time (s)	0.219±0.022	0.208±0.018	0.193±0.019	0.183±0.022	VSJ>50%>75%, HSJ
Former	0.099±0.009	0.084±0.011	0.074±0.011	0.067±0.009	VSJ>50%>75%, HSJ
Later	0.121±0.015	0.125±0.014	0.119±0.011	0.116±0.015	n.s.

<, >:  $p < 0.05$ .

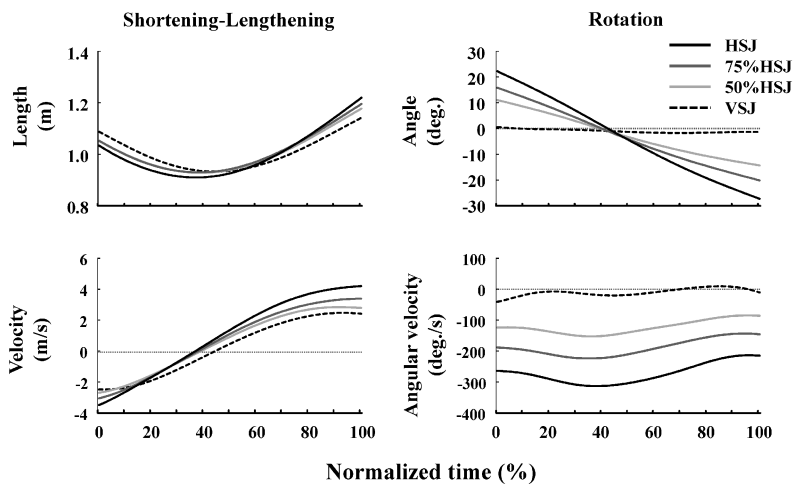
**Fig. 3** Averaged patterns of spring-mass model movement during ground contact phase in various jumps

Fig. 3には、質量-ばねモデルの短縮-伸長運動における長さおよび速度、さらに回転運動における回転角度および角速度の時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。短縮-伸長運動においては、すべてのジャンプ運動において踏切接地後にモデルが短縮し、その後伸長する共通したパターンを示した。一方、回転運動においてはVSJでは確認されなかったもののHSJにおいては発生し、さらに、跳躍距離が増大するにつれて回転範囲および回転速度ともに増大していく傾向を示した。

Fig. 4には、鉛直および水平成分の身体重心速度を質量-ばねモデルの短縮-伸長運動により獲得されるもの、回転運動により獲得されるものに分

けて、それぞれの時系列的な変化パターンを規格化時間で示した。VSJにおける離地時の鉛直速度は、短縮-伸長運動によってのみ獲得されており、回転運動による獲得はなかった。一方、水平方向への移動が発生した50%HSJは、水平速度においては、短縮-伸長運動による獲得速度は極めて小さく、回転運動による獲得速度がかなり大きい傾向を示した。さらに75%HSJ, HSJへと跳躍距離の増大に伴い、回転運動による水平速度獲得は増大し、短縮-伸長運動による水平速度獲得よりも大きな値で推移する傾向を示した。

Fig. 5には、鉛直方向および水平方向の地面反力の時系列的な変化パターンを、規格化時間で示した。鉛直成分では、HSJはVSJと比較して、

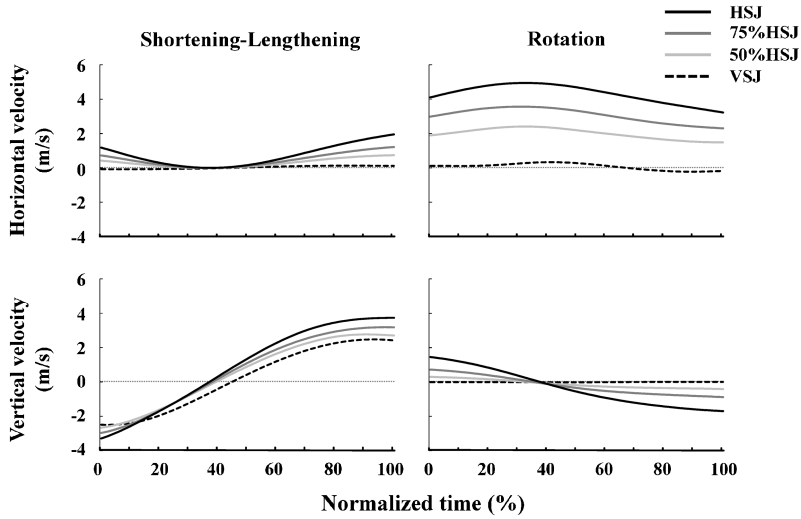


Fig. 4 Averaged patterns of vertical and horizontal velocity of the shortening-lengthening and rotation components during ground contact phase in various jumps

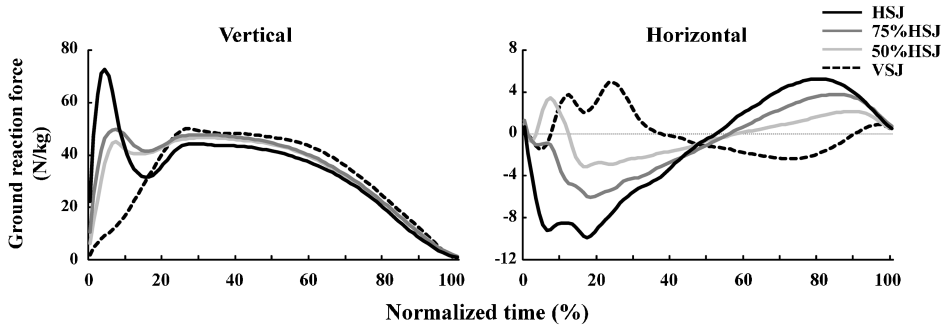


Fig. 5 Averaged patterns of vertical and horizontal ground reaction force during ground contact phase in various jumps

踏切前半においては棘波形のパターンを示し、最大値が大きな値を示す傾向にあるものの、踏切後半においては低い値で推移する傾向を示した。水平成分では、HSJはVSJと比較して、減速成分および加速成分の地面反力が共に高い値で推移する傾向を示した。また、HSJはVSJと比較して、鉛直成分の踏切前半および後半の力積は小さく、水平成分の減速力積および加速力積は大きな値を示した (Table 2)。なお、これら地面反力に見られた特徴は、跳躍距離が増大するにつれて顕著になる傾向を示した。

Fig. 6 には、踏切脚の各関節における関節角速

度、トルクおよびトルクパワーの変化パターンを規格化時間で示した。足関節においては、HSJとVSJにおける各項目の変化パターンは類似していたが、HSJはVSJと比較して、負の関節角速度、踏切前半のトルクおよび負のトルクパワーが低い値で推移し、正の関節角速度および正のトルクパワーは高い値で推移する傾向を示した。また、跳躍距離の増大にしたがって、これらの傾向は顕著になることが示された。膝関節においても各項目の変化パターンは類似していたが、その大きさについてみると、HSJはVSJと比較して、トルクおよび負の関節角速度、負のトルクパワー

Table 2 Impulse in various jumps

	VSJ	50%HSJ	75%HSJ	HSJ	Difference
Vertical impulse (Ns/kg)	7.03 ± 0.35	6.96 ± 0.37	6.69 ± 0.48	6.10 ± 0.49	VSJ, 50% > 75% > HSJ
Former (Ns/kg)	3.40 ± 0.15	3.39 ± 0.19	3.17 ± 0.31	2.90 ± 0.31	VSJ, 50% > 75% > HSJ
Later (Ns/kg)	3.58 ± 0.31	3.53 ± 0.27	3.44 ± 0.29	3.14 ± 0.40	VSJ, 50% > 75% > HSJ
Horizontal impulse (Ns/kg)	0.43 ± 0.08	0.43 ± 0.09	0.58 ± 0.08	0.86 ± 0.10	VSJ, 50% < 75% < HSJ
Negative (Ns/kg)	-0.22 ± 0.08	-0.24 ± 0.12	-0.34 ± 0.08	-0.56 ± 0.11	VSJ, 50% < 75% < HSJ
Positive (Ns/kg)	0.21 ± 0.05	0.19 ± 0.08	0.24 ± 0.07	0.30 ± 0.03	VSJ, 50% < 75% < HSJ

<, >:  $p < 0.05$ .

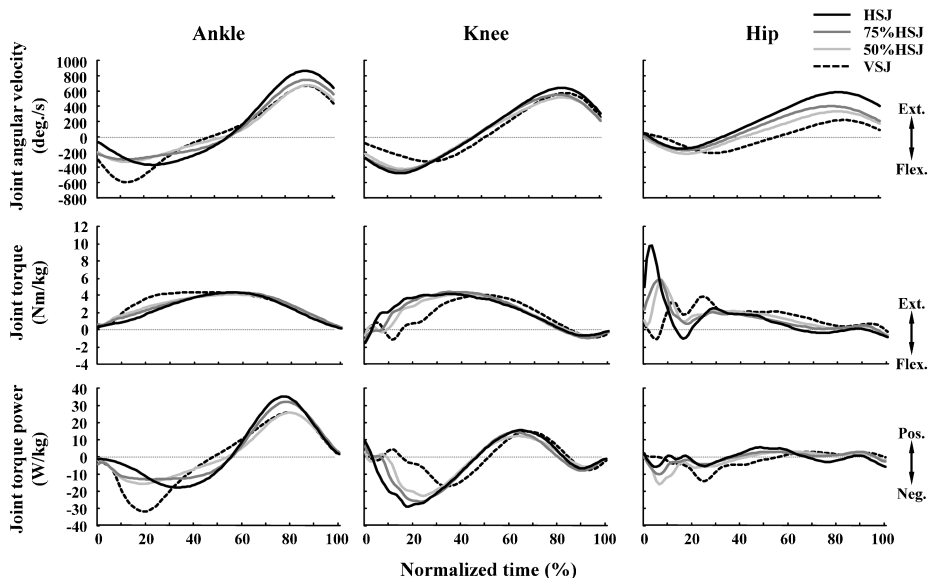


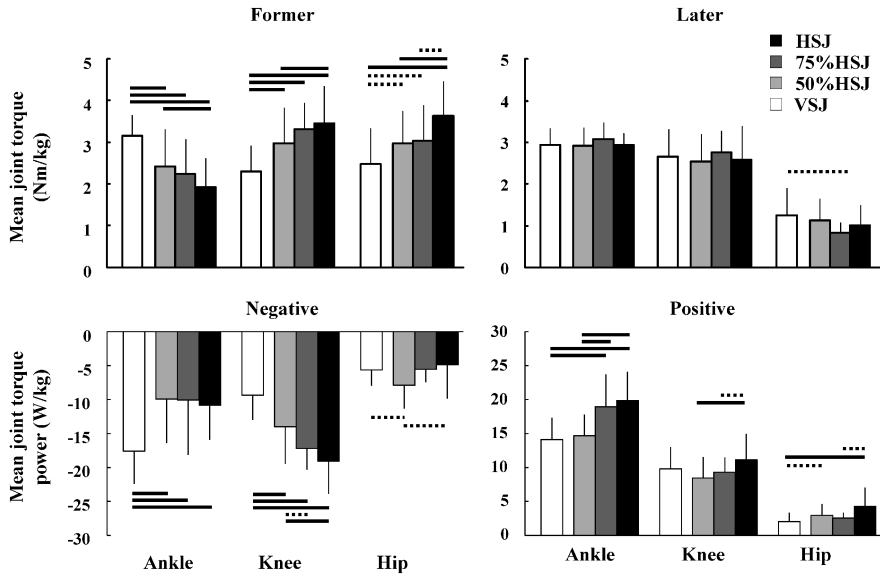
Fig. 6 Averaged patterns of joint angular velocity, joint torque and joint torque power about the ankle, knee, and hip joints during ground contact phase in HSJ and VSJ

が踏切接地から踏切局面の30%および40%付近にかけて高い値で推移する傾向を示した。正の関節角速度およびトルクパワーは、屈曲から伸展へ切り替わるあたりから踏切局面の60%にかけて高い値で推移する傾向を示した。また、跳躍距離の増大にしたがって、これらの傾向は顕著になる傾向が示された。股関節においては、HSJはVSJと比較して、着地直後に正のトルクが棘波形状に出現するパターンを示し、その際の最大値も増大する傾向を示した。角速度については、HSJはVSJと比較して、屈曲速度から伸展速度への切り替わるタイミングが早くなり、負の関節

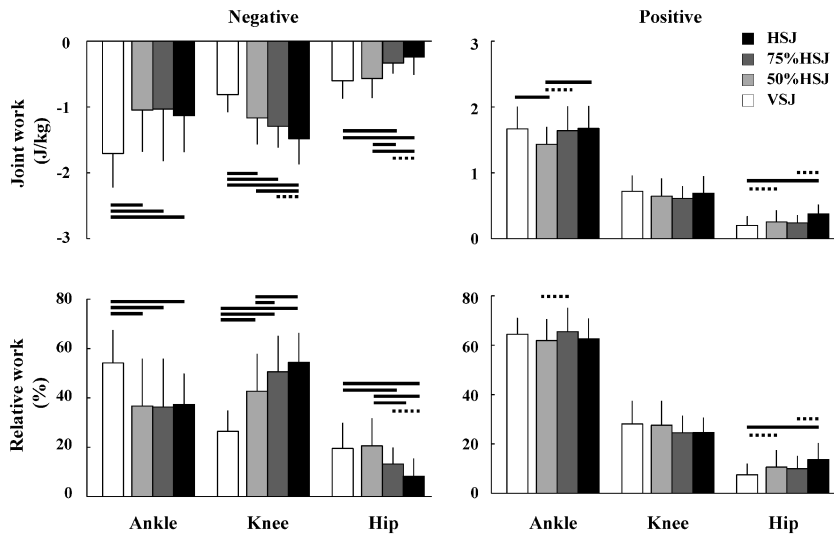
角速度は低い値で、正の関節角速度は高い値で推移する傾向を示した。さらに、負および正のトルクパワーは、低い値および高い値で推移する傾向を示した。また、跳躍距離の増大にしたがって、これらの傾向は顕著になることが示された。

Fig. 7には、踏切脚の踏切前半および踏切後半におけるトルクと、負および正のトルクパワーを平均値で示した。HSJはVSJと比較して、踏切前半における平均トルクは足関節において小さく、膝および股関節においては大きな値を示した。また、HSJはVSJと比較して、負の平均トルクパワーは、膝関節では大きな値を示し、正の





**Fig. 7** Comparison of mean joint torque and torque power about the ankle, knee, and hip joints during ground contact phase among various jumps  
 —:  $p < 0.05$  ----:  $p < 0.1$



**Fig. 8** Comparison of joint work and relative joint work done by joint torque about the ankle, knee, and hip joints during ground contact phase among various jumps  
 —:  $p < 0.05$  ----:  $p < 0.1$

平均トルクパワーは、足および股関節において大きな値を示した。また、これらの特徴は跳躍距離が増大するにつれて顕著になることが示された。なお、足関節における負の平均トルクパワーは、

すべての水平跳躍においてVSJと比較して小さな値を示した。

Fig. 8には、踏切脚の関節仕事および貢献度を示した。負の関節仕事および貢献度において、

HSJはVSJと比較して、足関節では小さく、膝関節では大きな値を示し、股関節では小さな値を示した。正の関節仕事および貢献度においては、股関節においてのみ大きな値を示した。また、跳躍距離が増大するにつれて、膝関節の負の関節仕事および貢献度、股関節の正の関節仕事および貢献度は増大する傾向を示した。

Fig. 9には、HSJの跳躍距離とVSJのRJ-indexとの間の相関関係を示した。両者の間には、有意な相関関係 ( $r=0.611$ ,  $p<0.05$ ) が認められた。

Fig. 10には、踏切脚におけるHSJの関節仕事とVSJの関節仕事、HSJの貢献度とVSJの貢献

度との相関関係を示した。負の関節仕事では、股関節 ( $r=0.620$ ,  $p<0.05$ ) および足関節 ( $r=0.609$ ,  $p<0.05$ ) においてHSJとVSJの間に有意な相関関係が認められ、膝関節 ( $r=0.535$ ,  $p<0.1$ ) においてはHSJとVSJの間に相関関係のある傾向がみられた。負の貢献度においては、股関節 ( $r=0.730$ ,  $p<0.05$ ) においてHSJとVSJの間に有意な相関関係が認められ、膝関節 ( $r=0.578$ ,  $p<0.1$ ) においてはHSJとVSJの間に相関関係のある傾向がみられた。一方、正の値においては、膝関節においてのみ関節仕事 ( $r=0.858$ ,  $p<0.05$ ) および貢献度 ( $r=0.633$ ,  $p<0.05$ ) においてHSJとVSJの間に有意な相関関係が認められるに留まった。

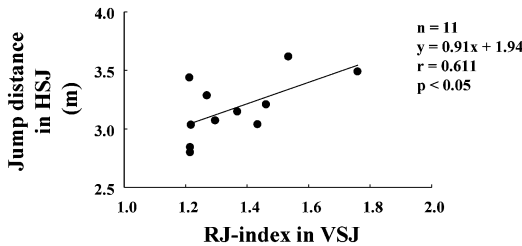


Fig. 9 Relationship between jump distance in HSJ and RJ-index in VSJ

## IV 考 察

### 1. HSJとVSJにおける運動特性の相違

#### 1) 質量-ばねモデルからみた踏切動作の相違

VSJから、50%HSJ, 75%HSJ, HSJへと跳躍距離の増大に伴って、踏切離地時の鉛直速度は減少するものの水平速度が増大しており、跳躍距離の増大は水平速度の増大に起因していることが示

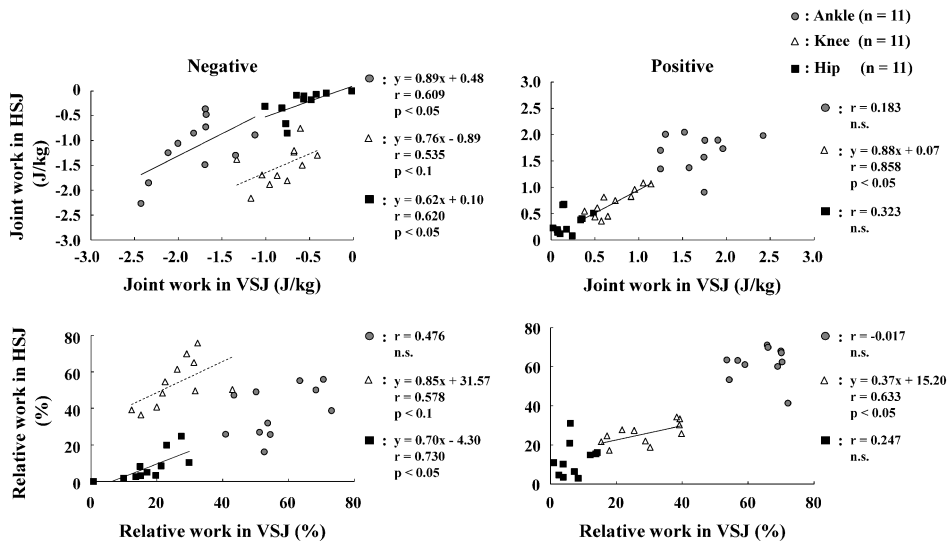


Fig. 10 Relationships between HSJ and VSJ about negative joint work and relative work at the ankle, knee, and hip joints during ground contact phase

された (Table 1). 本研究では, このような速度獲得に対する踏切動作の相違について, まず, 身体重心と足部支点を結んだ線分からなるモデルから検討した (Fig. 3, 4). その結果, 鉛直方向への跳躍運動である VSJ では, このモデルが踏切接地後に短縮し, その後伸長する短縮-伸長運動により離地時の重心鉛直速度が獲得されていた. 一方, VSJ から 50%HSJ へと水平方向への移動が発生すると, 短縮-伸長運動に加えてモデルの回転運動が発生し, この回転運動により重心速度が獲得されていた. この際, 水平速度の獲得は, 回転運動において短縮-伸長運動よりも大きいことが示された. さらに, 75%HSJ, HSJ へと跳躍距離の増大に伴い, 短縮-伸長運動による水平速度獲得が増大しているものの, 回転範囲と回転速度は大きくなり, 回転運動による水平速度獲得は顕著に増大する傾向が認められた. これらのことから, 質量-ばねモデルからみると, HSJ には VSJ では生じない回転運動が発生することで大きな水平速度が獲得され, 跳躍距離の獲得に大きく貢献していることが示された.

## 2) 踏切脚各関節からみた力発揮特性の相違

地面反力をみると, 身体の回転運動を発生させる地面反力の水平成分 (永松・図子, 1999) は, 跳躍距離の増大に伴い, 減速成分および加速成分ともに増大していた (Fig. 5, Table 2). さらに, 鉛直成分においては, HSJ は VSJ と比較して, 最大力においては踏切前半において大きく, 跳躍距離の増大に伴ってより顕著になる傾向を示した. 身体の回転運動は, 踏切前半におけるこの大きな地面反力を踏切脚が受け止めることで発生する. そのために, 踏切前半における踏切脚各関節の力発揮は, HSJ と VSJ において大きな相違のあることが推察される.

踏切前半に着目すると, HSJ は VSJ と比較して, 膝関節と股関節における伸展トルクは大きく, より早いタイミングで発揮されており, 跳躍距離の増大に伴ってより顕著になっていくことが認められた (Fig. 6). これらのことは, 両関節における伸展トルクは, 大きな地面反力に抗するとともに, 両関節の屈曲を抑制し, 身体の回転運

動を促進することに影響していることが考えられる. ここで, 負のトルクパワーや負の関節仕事, 貢献度に注目すると, HSJ は VSJ と比較して, 膝関節において大きな値を示すが, 股関節の関節仕事, 貢献度においては逆に小さな値を示しており, この傾向は跳躍距離の増大に伴ってより顕著になることが認められた (Fig. 6, 7, 8). 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ために (図子ほか, 1998), VSJ では股関節が屈曲範囲を確保しながら大きな負の仕事を遂行し, 力学的エネルギーの吸収に貢献している (Fig. 6 ; 刈山ほか, 2012 ; 2013). しかし, スプリント走や走幅跳, 本研究の HSJ と運動形態の類似したバウンディングなどの水平方向への移動運動において高い水平速度を獲得するためには, 質量の大きな体幹部を過度に前後傾させないこと (Muraki et al., 2008), 限られた踏切時間の中で股関節を高い速度で伸展させること (阿江ほか, 1986 ; 木越ほか, 2001) が重要であることから, 踏切接地後の股関節の屈曲は大きな水平速度を獲得するためには不利に働くと考えられる. これらに加えて, 股関節では正のトルクパワーやそれによる関節仕事, 貢献度が大きいこと (Fig. 6, 8) から判断すると, VSJ から HSJ へと跳躍距離の増大に伴って, 股関節は力学的なエネルギーの吸収ではなく, その発生を担う役割へと変化していることが推察できる. そのために, 水平速度の獲得が課題となる HSJ では, 膝関節が力学的エネルギーを吸収する主要な関節として機能していることが考えられる.

一方, 足関節では股および膝関節と異なり, 水平跳躍である 50%HSJ, 75%HSJ, HSJ は VSJ と比較して踏切前半における底屈トルクが小さい値を示し, さらに, 負のトルクパワー, 負の関節仕事および貢献度も小さい値を示した (Fig. 6, 7, 8). 足関節に作用する筋群およびアキレス腱は, 短時間に大きな力を発揮することに有利な構造的・機能的特性を有する (図子ほか, 1998). そのために, 鉛直方向へのリバウンドジャンプでは, 両脚踏切, 片脚踏切に関わらず, 股および膝関節と比較して足関節の仕事量やトルクおよびト

ルクパワーが大きいことが示されている (Fig. 6, 7, 8; Bobbert et al., 1987; 高松ほか, 1989). しかしながら, HSJ を含むすべての水平跳躍では, 踏切前半において足関節よりも膝関節において大きなトルクおよび負のトルクパワーが発揮されていた. 鉛直方向へのリバウンドジャンプにおいて, 足関節底屈筋群へ過度の力が加わった際には, 足関節の背屈範囲が増大し, 踏切時間が増大してしまうことが報告されている (Bobbert et al., 1987; 高松ほか, 1989). このことは HSJ においても同様であり, HSJ において足関節の背屈範囲が大きい場合には, 身体の回転運動を阻害してしまうことが予測される. 以上のことから, VSJ より大きな運動エネルギーに対応する必要のある HSJ (Table 1) では, 踏切前半において, 足関節よりも大きな力を発揮することに有利な股関節や膝関節 (図子ほか, 1998) によって大きな地面反力に対応し, 身体の回転運動を推進していることが推察される.

一方, 踏切後半においては, HSJ は VSJ と比較して, 足および股関節において大きな正のトルクパワー発揮が確認された (Fig. 6, 7). HSJ では, VSJ よりも高い水平速度条件, さらに短い踏切時間において踏切動作が遂行されるために, この局面において地面反力を獲得するためには, より高い関節の伸展速度が要求されることが予測できる. 中でも足関節は, 他の関節よりも水平速度が高くなる踏切離地直前において, 高い角速度, 高いトルクパワー発揮が確認された (Fig. 6, 7). 足関節は足部をその構成部位の一つとしており, 足部は踏切脚を構成する身体部位の中で最も質量比および慣性モーメントが小さい (阿江, 1996). そのために, 足関節はこのような状況においても高い角速度を獲得しやすい機能解剖学的な条件を有していることが推察できる. 以上のことから, HSJ における踏切後半では, 股関節, 特に足関節において, より大きなトルクパワーを発揮することで地面反力を獲得し, 身体の回転運動に貢献していることが考えられる.

## 2. HSJ と VSJ における運動特性の類似性

これまでの結果から, HSJ と VSJ は回転運動に関与する踏切脚の力発揮特性に大きな相違が存在することが示された. しかしながら, このことは両ジャンプの運動特性に類似性が無いことを意味しているわけではない. HSJ と VSJ は, このような相違が存在する一方で, ともに片脚踏切において遂行されていること, さらに質量-ばねモデルで捉えた際には, 短縮-伸長運動が内在しているという共通点を指摘することが出来る (Fig. 3). すなわち, これらのことは両ジャンプの間には何らかの対応関係が存在する可能性を示唆するものである.

本研究では, この可能性について, まず両ジャンプの遂行能力を意味する HSJ の跳躍距離と VSJ の RJ-index との間の関係性について検討したところ, それぞれの間には有意な相関関係のあることが認められた (Fig. 9). このことは, 鉛直ジャンプに優れる者は水平ジャンプにも優れることを意味しており, 両ジャンプの遂行に関与する機構に類似性のあることを示唆するものである. この関係性の背景にある要因について, 両ジャンプにおける下肢3関節それぞれの関節仕事と貢献度の対応関係から検討した (Fig. 10). その結果, HSJ と VSJ の間には, 正の値に関しては膝関節の関節仕事と貢献度において相関関係が認められるに留まったものの, 負の値に関しては3関節の関節仕事, 膝および股関節の貢献度においてそれぞれ有意な相関関係もしくは相関関係のみられる傾向が示され, 両ジャンプの間には踏切前半における変数に対応関係のあることが示された. 本研究で用いたジャンプ運動は, 踏切脚における筋腱複合体が着地と共に強制的に伸長され, その後短縮する, 伸張-短縮サイクル (Stretch-Shortening Cycle: SSC) 運動により大きなパワー発揮を可能としている. この機序としては, 筋腱複合体の伸張時における筋の予備緊張 (高松ほか, 1991) や筋腱の弾性エネルギーの貯蔵 (Komi and Bosco, 1978) などが挙げられ, 踏切前半におけるこのような振る舞いが SSC 運動のパフォーマンスへ直接的に影響することが知られてい

る。さらに、HSJのように回転運動が伴う走幅跳においても、身体回転運動を促進し大きな跳躍距離を獲得するために、踏切前半における踏切脚の振り舞いが重要になることが報告されており (Lees et al., 1994; Muraki et al., 2008), 跳躍方向に関わらずジャンプ運動における踏切前半の重要性を指摘することが出来る。以上のことから、HSJとVSJは運動特性の大きく異なるジャンプ運動ではあるものの、SSC運動のパフォーマンスを直接的に左右する踏切前半における下肢筋群の動員様相においては類似性のあることが示された。

### 3. トレーニング現場への示唆

プライオメトリクスにおいてトレーニング効果を推定するためには、トレーニング手段として用いた運動における踏切脚のトルクやトルクパワーなどの情報が有益になる (池田・淵本, 2005; Taube et al., 2012; Young et al., 1999)。HSJとVSJは、その跳躍方向の相違を判断基準とし、それぞれの跳躍方向へ対応したスポーツ種目に特異的なトレーニング手段として用いられることが多い。本研究の結果からは、HSJはVSJと比較して、主に膝および股関節伸筋群におけるパワー発揮が大きいものの、足関節底屈筋群の伸張性収縮によるパワー発揮が小さいことが認められた。しかし、VSJでは足関節底屈筋群における伸張性収縮、すなわちSSC運動を伴った足関節のパワー発揮が大きいといった特徴が確認された。HSJとVSJを選択する際には、これらの下肢関節における相違について理解しておくことが重要である。

このような相違が存在する一方で、HSJとVSJには、踏切前半における下肢筋群の動員様相に類似性のあることも示された。VSJは、技術的に複雑なHSJを習得する前の基本的な導入手段として用いることが提案されており (Radcliffe and Farentinos, 1999; 関子, 2012), このように単純な手段から複雑な手段へ段階的に移行することによって、トレーニングの原則としての専門性 (特異性) と漸進性の原則を満足させるこ

とができる。この階層構造化を考慮すると、まずVSJを用いたプライオメトリクスを実施し、その遂行能力を高めることで、HSJにおける踏切前半の踏切脚の動員様相を改善し、HSJの遂行能力を高めていくことが適切であると考えられる。このような階層構造関係については、今後、実際にトレーニングを実施し、エビデンスを取りながら検討していく必要があるが、本研究の結果は、このための理論仮説モデルの構築に際して有用な情報を提供するものである。

## V ま と め

本研究では、踏切脚における関節トルクやトルクパワー、関節仕事などからみた力発揮特性を手掛かりに、水平方向 (Horizontal Single-leg bounding Jump: HSJ) と鉛直方向 (Vertical Single-leg rebound Jump: VSJ) の片脚リバウンドジャンプにおける相違と類似性について明らかにし、HSJとVSJをプライオメトリクス手段として用いる際の留意点について検討することを目的とした。陸上競技の短距離および跳躍種目を専門とする男性11名を対象にHSJとVSJ、さらに跳躍距離の異なる50%HSJ, 75%HSJを行なわせ、それぞれの矢状面における踏切脚のキネマティクスおよびキネティクスの変量を算出した。その結果、以下の内容が示された。

- 1) 質量-ばねモデルで踏切中の身体を捉えた場合、VSJはモデルの短縮-伸張運動のみで重心鉛直速度が獲得されていたが、水平方向への移動が伴うとHSJではモデルの回転運動が発生し、さらに跳躍距離の増大に伴ってモデルの回転範囲および回転速度が増大し、この回転運動によって大きな重心水平速度が獲得されていた。
- 2) HSJはVSJと比較して、主に踏切前半における膝および股関節の伸筋群の伸張トルクが大きいことが示された。さらに、膝関節の負のトルクパワー、足および股関節の正のトルクパワーが大きいことが示され、逆に、踏切前半における足関節の底屈トルク、負のトルクパ

ワーは小さいことが示された。

- 3) HSJ の跳躍距離と VSJ の RJ-index との間に有意な相関関係が認められた。また、負の関節仕事とそれによる貢献度において両ジャンプ間に相関関係のあることが認められた。

以上の結果から、HSJ と VSJ では跳躍方向が異なるために踏切脚における動作や力発揮特性が大きく異なるが、踏切前半における下肢筋群の動員様相には類似性のあることが示唆された。本研究の結果は、跳躍方向の異なる片脚リバウンドジャンプを、プライオメトリクス手段として選択する際の有用な知見である。

## 謝辞

本研究は、平成23年度日本体育学会茨城支部による研究助成を受けて実施いたしました。心より感謝申し上げます。

## 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.

阿江通良・宮下 憲・横井孝志 (1986) 機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度. *筑波大学体育科学系紀要*, 9: 229-239.

有川秀之・太田 涼 (2005) 疾走動作とバウンディング動作との関係. *埼玉大学紀要教育学部教育科学*, 54: 259-267.

Bobbert, M.F., Huijing, P.A., and van Ingen Schenau, G.J. (1987) Drop jumping. II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19: 339-346.

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.

深代千之 (1992) 垂直跳における発揮パワー—I. パワー評価に関する簡便法の検討—. *スポーツ医・科学*, 6: 5-9.

藤林献明・苅山 靖・木野村嘉則・図子浩二 (2013) 水平片脚跳躍を用いたバリスティックな伸張-短縮サイクル運動の遂行能力と各種跳躍パフォーマンスとの関係. *体育学研究*, 58: 61-76.

Holm, D.J., Stålbom, M., Keogh, J.W., and Cronin, J. (2008) Relationship between the kinetics and kinematics of a unilateral horizontal drop jump to

sprint performance. *J. Strength Cond. Res.*, 22: 1589-1596.

池田祐介・淵本隆文 (2005) ダブルレグホップのトレーニングにともなう下肢関節のモーメントとパワーの変化. *体育学研究*, 50: 1-11.

稲岡純史・村木征人・国土将平 (1993) コントロールテストからみた跳躍競技の種目特性および競技パフォーマンスとの関係. *スポーツ方法学研究*, 6: 41-48.

Jacobs, R. and van Ingen Schenau, G.J. (1992) Intermuscular coordination in a sprint push-off. *J. Biomech.*, 25: 953-965.

苅山 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.

苅山 靖・藤井宏明・森 健一・図子浩二 (2013) 片脚および両脚リバウンドジャンプにおける3次元的な力発揮特性の相違. *体育学研究*, 58: 91-109.

苅山 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.

木越清信・磯部 慶・加藤彰浩 (2012) 特徴の異なるバウンディング運動における力およびパワー発揮の特異性. *陸上競技学会誌*, 10: 1-10.

木越清信・尾縣 貢・田内健二・高松 薫 (2001) 特異的な筋力および筋パワートレーニング手段としての立ち五段跳および立ち十段跳の有効性. *陸上競技研究*, 47: 13-18.

Komi, P.V. and Bosco, C. (1978) Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med. Sci. Sports*, 10: 261-265.

Lees, A., Philip Graham-Smith, and Fowler, N. (1994) A biomechanical analysis of the last stride, touchdown, and takeoff characteristics of the men's long jump. *J. Appl. Biomech.*, 10: 61-78.

McMahon, T.A. and Cheng, G.C. (1990) The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *J. Biomech.*, 23(Suppl 1): 65-78.

Mero, A. and Komi, P.V. (1994) EMG, force, and power analysis of sprint-specific strength exercises. *J. Appl. Biomech.*, 10: 1-13.

Muraki, Y., Ae, M., Koyama, H., and Yokozawa, T. (2008) Joint torque and power of the takeoff leg in the long jump. *Int. J. Sport Health Sci.*, 6: 21-32.

- 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.
- Radcliffe, J.C. and Farentinos, R.C. (1999) High-Po-  
wered Plyometrics (first edition). Human Kinetics,  
pp. 41-96, 133-151.
- 高松 薫・会田 宏・図子浩二 (1991) Isometric およ  
び eccentric な予備緊張が肘屈曲速度に及ぼす影響—  
Concentric な収縮中の負荷重量および動作範囲に着  
目して—. 体育学研究, 36: 127-139.
- 高松 薫・図子浩二・会田 宏・吉田 亨・石島 繁  
(1989) デプスジャンプにおける台高と踏切中の膝曲  
げ動作の相違が跳躍高および下肢にかかる負荷特性  
に及ぼす影響. 昭和63年度日本体育協会スポーツ科  
学研究報告 No. VIII プライオメトリックアクティブ筋  
力トレーニングに関する研究—第2報, pp. 46-55.
- Taube, W., Leukel, C., Lauber, B., and Gollhofer, A.  
(2012) The drop height determines neuromuscular  
adaptations and changes in jump performance in  
stretch-shortening cycle training. Scand. J. Med. Sci.  
Sports, 22: 671-683.
- Tauchi, K., Endo, T., Ogata, M., Matsuo, A., and Iso, S.  
(2008) The characteristics of jump ability in adoles-  
cent elite athletes and healthy males: From the view-  
point of the development of countermovement and re-  
bound jump ability. Int. J. Sport. Health Sci., 6: 78-  
84.
- Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of  
signal and noise in the kinematics of normal, patholog-  
ical and sporting gaits. In: Human locomotion 1  
(Proceedings of the first biannual conference of the  
Canadian Society of Biomechanics), 92-93.
- Young, W.B., Wilson, G.J., and Byrne, C.A. (1999)  
Comparison of drop jump training methods: effects on  
leg extensor strength qualities and jumping perfor-  
mance. Int. J. Sports Med., 20: 295-303.
- 図子浩二 (2006) 跳躍動作とその指導・トレーニング—  
プライオメトリックトレーニングに注目して. ト  
レーニング科学, 18: 297-305.
- 図子浩二 (2012) プライオメトリクス. 体育の科学,  
62: 44-50.
- Zushi, K., Ishii, Y., and Elliott, B. (2005) Changes on  
spring-like leg behavior according to different touch  
down velocities in drop long jump. Proceedings of the  
XIXth Congress of the International Society of  
Biomechanics, Cleveland, USA, 932.
- 図子浩二・西園秀嗣・平田丈夫 (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.

(平成25年12月2日受付)  
(平成26年4月28日受理)