

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

藤林 献明¹⁾ 坂口 将太²⁾ 刈山 靖³⁾ 凵子 浩二⁴⁾

Nobuaki Fujibayashi¹, Syota Sakaguchi², Yasushi Kariyama³ and Koji Zushi⁴: Use of the Rebound Long Jump Index for devising effective takeoff techniques. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 59: 175-188, June, 2014

Abstract : The present study was conducted to examine the most effective takeoff movement for the Rebound Long Jump Test (RLJ test) under high-speed conditions. This test is designed to evaluate the ability to perform the ballistic stretch-shortening cycle movement for unilateral horizontal jump events on the basis of the RLJ index (RLJ index (m/s) = Jumping distance (JD (m))/Contact time (CT (s))). Subjects jump from a 0.1-m-high step to the ground after an approach run (falling jump), followed by jumping without interruption for as far as possible (propulsive jump). Eleven male college track-and-field athletes performed the RLJ test, and the RLJ index was calculated. On the basis of the average value of the RLJ index, the athletes were assigned to an upper level group (RLJ index > mean value) or a lower level group (RLJ index < mean value), and the takeoff movement of upper level group was considered the effective takeoff movement. The results suggested that it was important to minimize the rotation angle of the body, and to use a faster rotation velocity. This was achieved by 1) increasing the movement distance and velocity in the direction of the forward movement of the swing leg in the air, 2) minimizing the rotation angle of the foot and shank segment, and increasing that of the thigh segment during the initial phase, and 3) accelerating the rotation angle of the thigh segment again and swinging the swing-leg forward and up during the latter phase. These results suggest that the RLJ test and RLJ index provide a measure of the takeoff movement technique in terms of pre-rotation moment, the mechanism of rotation of the lower limb segment, and the swing moment of the swing leg.

Key words : Horizontal jump event, Jumping technique, Stretch-shortening cycle movement, movement of center of gravity, movement of flee swing leg

キーワード : 水平跳躍種目, 跳躍技術, 伸張-短縮サイクル運動, 身体重心の挙動, 振込脚重心の挙動

- 1) (新)立命館大学共通教育推進機構
〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1
(旧)筑波大学大学院人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
- 2) 筑波大学大学院
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
- 3) 筑波大学スポーツ R&D コア
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1
- 4) 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 藤林献明

1. *Institute for General Education, Ritsumeikan University*
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577
Graduate School of Comprehensive Human Sciences,
University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
2. *Graduate School of Comprehensive Human Sciences,*
University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
3. *Sports Research & Development Division Core, University of Tsukuba*
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
4. *Faculty of Sport Sciences, University of Tsukuba*
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574
Corresponding author n-fuji@fc.ritsumei.ac.jp

I. 緒 言

陸上競技の走幅跳や三段跳の踏切動作は、極めて短時間でバリスティックに遂行される伸張-短縮サイクル運動 (Ballistic Stretch-Shortening Cycle movement : 以下, BSSC 運動) によって遂行されている。BSSC 運動の遂行能力は、運動を行う方向が上方であり高さを獲得する場合と、前方であり距離を獲得する場合には、パフォーマンスを構成する要因にかなりの相違が見られることが明らかになっている (藤林ほか, 2013)。これらのことは、走幅跳や三段跳において優れたパフォーマンスを発揮するためには、水平方向への BSSC 運動の遂行能力を高い水準に向上させることが必要不可欠となることを示している。

水平方向への BSSC 運動の遂行能力を、走幅跳や三段跳の専門性に配慮して測定評価する方法として、リバウンドロングジャンプテスト (Rebound Long Jump Test : 以下, RLJ test) が考案されている (藤林ほか, 2013)。このテストは、0.1 m の台上を助走した後片脚で踏切って跳び下りる Falling jump と、その逆脚で接地し、できるだけ短時間に弾むように踏切って可能な限り遠くまで跳ぶ Propulsive jump の連続した 2 跳躍で構成される (Fig. 1)。主運動となる Propulsive jump の跳躍距離と接地時間をもとにして、Propulsive jump 踏切中において時間あたりに獲得した跳躍距離、すなわち踏切中の平均パワーを意味するリバウンドロングジャンプ指数 (Rebound Long Jump index : 以下, RLJ index) を

算出し、その値を成績として評価診断を行うものである。また、RLJ は 1 回目の Falling jump の距離を変化させることで、続く 2 回目の Propulsive jump の際の接地速度を任意に調整することができる。大学・シニアレベルの選手を対象とした際には、Falling jump の距離を 3 m に設定することで、Propulsive jump の踏切動作や運動特性を走幅跳や三段跳の踏切動作に類似させることが可能になることも明らかになっている。一方、上記した条件において測定した RLJ index は、陸上競技の跳躍種目の成績と高い関係性が認められており、走幅跳や三段跳の踏切動作に内在する種々のパフォーマンス構成要因の中から、水平速度の減速を最小限にしながらも最大限の鉛直速度を獲得する要因に関して評価することが可能となる (藤林ほか, 2013 ; 2014)。RLJ test を用いた測定評価は高度な機器を必要としないことから、トレーニング現場で即座にフィードバックができるという利点も存在している。したがって、RLJ index の成績を決定する技術的評価を行うことができれば、RLJ index を用いた跳躍技術の評価法が確立できることに加えて、実際の競技における踏切動作を改善するためのトレーニングを簡便に行うことが可能になると考えられる。しかし、現在までに RLJ index の成績と踏切動作との関係に関する研究はなされていない。

RLJ test 遂行時の踏切においては、接地瞬間とともに下肢が地面反力を受け止め、その後推進力を獲得することで身体重心を前方へと移動させる。この時の動作を身体重心と足部接地点を仮想的線分で結んだモデルとして構成すると、踏切動

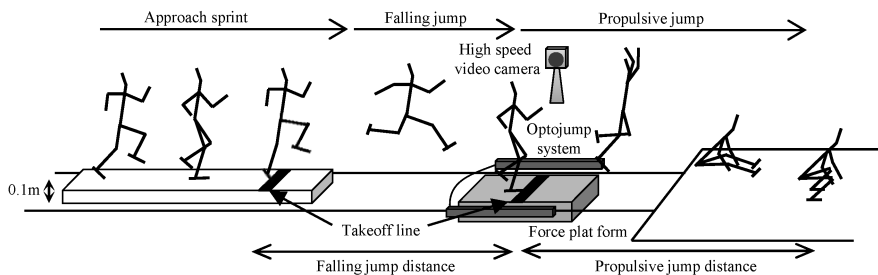


Fig. 1 The trial method of Rebound Long Jump.

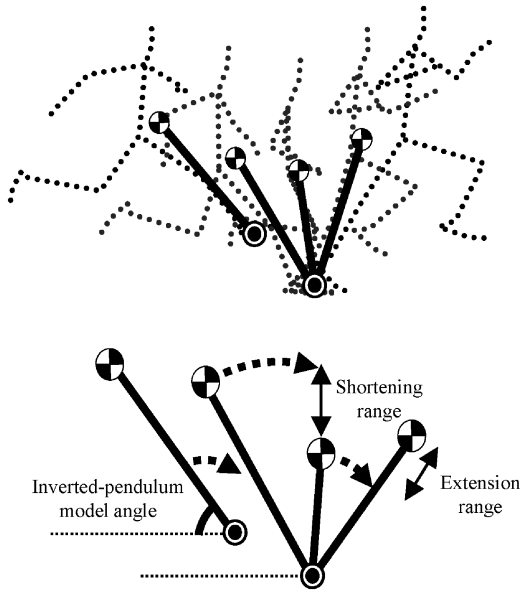


Fig. 2 The definition of Inverted-pendulum model.

- ⊙: Center of gravity
- : Point on the ground

作は短縮-伸張運動を伴う逆振り子型の回転運動モデル（以下、モデル：Fig. 2）として捉えることができる（Jacobs and van Ingen Schenau, 1992；木野村ほか，2012；三井・図子，2006；Zushi et al., 2003；Zushi et al., 2005）。このモデルの挙動は、主に短縮した後に伸張する作用と、地面反力を受け止めたことによって、足部接地点を支点として身体が前方へと回転する作用によって構成されていることが認められている（三井・図子，2006；Zushi et al., 2005）。このモデルを用いて踏切中の身体の挙動を検討することができれば、身体各部位が複雑に関係し合い連携するRLJ test 遂行時の踏切動作を上記の2要因に単純化して把握するとともに、それを配慮した上で身体各部の動きについて究明していくことができる。そこで本研究では、RLJ index を決定する踏切技術について、RLJ index が優れる対象者と劣る対象者のモデル挙動を比較するとともに、モデル挙動の相違が生じる原因となる身体各関節及び各セグメントの動きの詳細について明らかにすることを目的とした。

II. 方 法

1. 対象者

対象者は大学の陸上競技部に所属しており、跳躍種目を専攻とする男子選手11名であった。対象者に関する詳細な情報は Table 1 に示した。対象者のうち2名は全日本選手権出場の経験（1名は優勝経験）を有しており、Table 1には「National」レベルの競技者として示した。また、4名は全日本学生選手権出場の経験を有す「University」レベル、残りの5名は地域大会出場レベルの成績を有した「Division」レベルの競技者として示した。このことに加えて、対象者は少なくとも専門種目の経験を5年以上有しており、1週間に12時間程度の専門的トレーニングを行っていたことから、比較的高い競技力水準を有した集団であった。研究の実施時には、ヘルシンキ宣言を順守し、事前に実験の目的や方法、危険性などの説明を十分に行った。また、個人の意思で中止や中断が可能であること、実験施設の設置には細心の注意を払うこと、天候などの危険性が考慮された場合は即座に中断することを伝えた上で、書面による同意を得た。

2. 実験試技

テスト試技は、本研究の参加者である大学・シニアレベルの跳躍選手に対して水平方向へのBSSC能力を測定評価するために有効とされる（藤林ほか，2013）、0.1 mの高さの台と3 mのFalling Jumpの距離を用いたRLJ testを用いた（Fig. 1）。Propulsive jumpにおける助走距離は、上記した先行研究を参照して、10 mの助走距離に設定した。対象者には、規定の距離の中で自由に助走を行うが、Falling jumpおよびPropulsive jumpの踏切位置に接地した0.2 m幅の2本のラインを必ず踏むことを成功試技の設定条件とした。実施の際には、Falling jumpでは設定条件を確実に実施すること、Propulsive jumpでは弾むように短時間で踏切ってできるだけ遠くへ跳躍すること、着地は両足をそろえた状

Table 1 The characteristics of subjects

Subject	Age (yrs)	Height (m)	Weight (kg)	RLJ index (m/s)	Jumping distance (m)	Contact time (s)	Group	Performance level
A	20	1.92	71.0	32.08	5.10	0.159	Upper	National
B	23	1.78	69.9	19.52	4.06	0.208	Lower	National
C	21	1.65	68.1	20.98	3.86	0.184	Upper	University
D	20	1.80	73.7	22.87	4.07	0.178	Lower	University
E	19	1.82	69.7	23.43	4.17	0.178	Lower	Division
F	22	1.74	67.6	26.00	4.29	0.165	Upper	Division
G	22	1.72	55.1	27.69	4.07	0.147	Upper	University
H	20	1.78	60.2	25.20	4.31	0.171	Upper	University
I	19	1.68	65.1	29.74	4.55	0.153	Upper	Division
J	24	1.75	67.6	21.58	4.23	0.196	Lower	Division
K	19	1.73	75.0	24.88	4.28	0.172	Lower	University
Mean	20.8	1.76	67.5	24.91	4.27	0.174	—	—
S.D.	1.7	0.07	5.8	3.82	0.33	0.018	—	—

Group mean categorized group by average value of RLJ index. Upper shows upper level group that RLJ index is higher than average value. Lower shows lower level group that RLJ index is lower than average value.

Performance level of subject is sorted into 3 categories. National mean subjects who had an experience in national class competition. University mean subjects who had an experience in national university class competition. Division mean subjects who had not experience in national or national university class competition.

態で行うことを指示した。そして、ラインを超えた場合、あるいはラインから大きく後方で踏切った場合には無効試技とした。Propulsive jump を行う脚は走幅跳の踏切脚とし、Falling jump はその逆の脚で行わせた。対象者には事前に数日間に渡って試技を正確に行えるように練習を行わせ、動作が正確に安定してできるようになったことを確認した上で試技を実施するようにした。

3. 測定項目および算出項目

RLJの主運動であるPropulsive jumpの踏切を測定対象とした。

Propulsive jumpの接地足のつま先から、砂場に着地した最も近い部分の痕跡までの距離を跳躍距離とし、テープメジャーを用いて測定した。踏切接地から離地までに要した時間を接地時間とし、Optojump System (Microgate社製, 1000 Hz)を用いて測定した。

測定した跳躍距離 (Jumping Distance) と踏切による接地時間 (Contact Time) を用いて、Propulsive jumpの踏切において時間当たりに獲

得した跳躍距離の大きさを意味するRLJ indexを、以下の式を用いて算出した。

$$\text{RLJ index (m/s)} = \frac{\text{Jumping Distance (m)}}{\text{Contact Time (s)}}$$

本研究の対象者を、RLJ indexの平均値 (24.91 m/s) を基準として、平均値よりも高いRLJ indexを示した5名の対象者を上位群 (25.20—31.08 m/s)、平均値よりも低いRLJ indexを示した6名の対象者を下位群 (24.88—19.52 m/s) として群分けした。

Propulsive jumpの踏切動作を、高速度ビデオカメラ (CASIO社製, EX-F1) を用いて、毎秒300コマで撮影した。撮影されたビデオ画像をパーソナルコンピューター (DELL社製, DM061) 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, Frame-DIAS II for windows ver.3) を用いて、画像上の身体部分点23点 (左右の手先, 手首, 肘, 肩峰, つま先, 母指球, 踵, 外果, 膝関節中心, 大転子, 耳珠点, 頭頂, 胸骨上縁) および4点の較正マークを、毎

秒150フレームでデジタイズした．本研究では接地前の空中局面も分析対象としたために，接地前10コマを空中局面，足部の接地から離地までを接地局面として定義した．デジタイズは，空中局面の10コマ前から離地後10コマまで行った．得られた身体部分点の二次元座標は，較正マークをもとに実長換算した後，最適遮断周波数を 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3.0—10.5 Hz の範囲で平滑化した．空中局面および接地局面は各局面に要した時間をそれぞれ100%としてデータを規格化した．

デジタイズデータをもとにして，阿江 (1996) の日本人アスリートの身体部分慣性係数を用いて各セグメントの重心および身体重心を算出した．また，母指球と外踝を結んだ線分を足部セグメント，外踝と腓骨頭を結んだ線分を下腿部セグメント，腓骨頭と大転子を結んだ線分を大腿部セグメントとして定義した．そして，各セグメントと地面に対する垂線のなす角度に対して進行逆方向を0度として時計回りに計算したものを，各セグメント角度として算出した (Fig. 3)．セグメント角度の変位を変位時間で除した値を，セグメント回転速度として算出した．また，足部セグメントと下腿部セグメントのなす角度を足関節角度，下腿部セグメントと大腿部セグメントのなす角度を膝関節角度，大腿部セグメントと体幹部セグメントのなす角度を股関節角度と定義した．

Propulsive jump の踏切動作は，身体を身体重

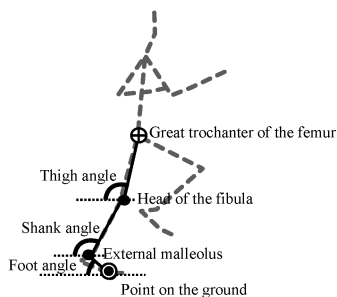


Fig. 3 The definition of segment angle of takeoff leg.

心と接地点重心の2点を結ぶ仮定の線分によって構成される逆振り子 (Jacobs and van Ingen Schenau, 1992 ; 木野村ほか, 2012 ; 三井・因子, 2006; Zushi et al., 2003; Zushi et al., 2005) としてモデル化した．足部接地点は，踏切脚の母子球と定義した．具体的には，身体重心と母子球を結ぶ仮定の線分が，踏切前の空中では短縮と伸張を伴い前方回転をしながら地上へと落下し接地した後，地上では母子球を支点として前方へ回転するモデル挙動になる (Fig. 2)．モデルの仮定の線分の長さをモデル長，モデルと水平面の成す角度をモデル角度として算出した．モデル角度は進行逆方向を0度として時計回りに計算した．また，上記した空中局面に加えて，接地からモデル長が最短の値を示した時点を踏切前半局面，モデルが伸張を開始した後，足部が離地するまでを踏切後半局面として局面分けを行った．なお，踏切前半局面と後半局面の切り替わった時点の全対象者の規格化された時間に関する平均値は $39.80 \pm 3.16\%$ であった．そして，接地時と離地時のモデル角度の差分を踏切角度，踏切前半局面における角度変位を前半角度，踏切後半局面における角度変位を後半角度として算出した．モデル長およびモデル角度の変位は変移時間で除すことで，モデル短縮-伸張速度および回転速度として算出した．なお，短縮-伸張速度は伸張，回転速度は進行方向を正とした．

空中局面でのモデル挙動に関して，モデルの回転が主に身体重心を回転中心としたものなのか，あるいは足部接地点を回転中心としたものかを判別するために，身体重心の水平方向への移動距離から足部接地点の水平方向への移動距離を減算することで，足部接地点の変位に対する身体重心の相対変位を算出した．この値が正方向へ大きければ，主に身体重心が前方へと回転していたことを示し，負方向へ大きければ，主に足部接地点が後方に回転していたことを示している (Fig. 6)．

自由振込脚 (以下，振込脚) の挙動は，振込脚の下肢3セグメントの合成重心から算出した振込脚重心の挙動とした (Fig. 4)．振込脚の付着部である大転子と振込脚重心の水平方向の距離を

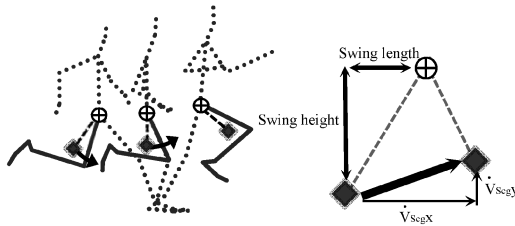


Fig. 4 The definition of movement of center of gravity of swing leg.

- ◆: Center of gravity of swing leg
- ⊕: Great trochanter of femur of swing leg

振込距離、鉛直方向の距離を振込高として算出した。同時に、水平方向ならびに鉛直方向への振込脚重心速度を各方向への振込速度として算出した。振込距離ならびに振込高は、振込脚重心が大転子よりも前方もしくは上方に位置している状態、振込速度は、進行方向もしくは上方への速度を正として算出した。

4. 統計処理

RLJ index 上位群と下位群の差を検定するために、SPSS Statistics ver.17.0 (SPSS 社製) を使用し、対応のない T-test を行った。なお、統計処理の有意水準は 5%未満とした。

Ⅲ. 結 果

Table 2 には、RLJ index 上位群と下位群の身体特性および RLJ index, 跳躍距離, 接地時間, 水平方向の接地速度およびモデル回転範囲の平均値を示した。上位群と下位群の身長, 体重, 接地速度には有意差は認められなかった。また, 上位群は下位群と比較して, 有意に大きな跳躍距離と有意に短い接地時間を示すとともに, RLJ index も有意に高い値を示した。モデル回転範囲は, 上位群は下位群と比較して有意に小さい値を示した。

Fig. 5 には、RLJ index 上位群と下位群のモデル挙動を比較した結果を示した。2 群間には回転挙動に関する要因にのみ有意差が認められた。モデル角度では、空中局面における -100%時点から -40%時点までは上位群が有意に小さい値を

Table 2 The comparison of physical characteristic and measured value of Rebound Long Jump test with the use of 3 m Falling Jump distance between upper level group and lower level group

	Upper level group	Lower level group
Body height (m)	176.1 ± 9.4	175.0 ± 5.8
Body weight (kg)	66.7 ± 7.5	67.9 ± 4.9
Touchdown velocity (m/s)	6.49 ± 0.55	6.35 ± 0.46
RLJ index (m/s)	28.14 ± 2.80*	21.67 ± 1.55
Jumping distance (m)	4.46 ± 0.39*	4.08 ± 0.14
Contact time (s)	0.159 ± 0.01*	0.189 ± 0.01
Model angle (deg)	40.49 ± 3.04*	43.06 ± 3.13

*: significant difference between upper level group and lower level group.

示し、2 群間の相違は時間の経過とともに小さくなる傾向を示した。一方、接地の後半になるに伴って、2 群間の相違は時間の経過とともに大きくなり、40%時点では再度有意差が認められた。これとは対照的に、モデル回転速度は空中局面における -100%時点では有意差が認められなかったが、2 群間の相違は時間の経過とともに大きくなり、-30%時点以降離地まで上位群が有意に高い値を示した。

Fig. 6 には、RLJ index 上位群と下位群の空中局面における身体重心の足部接地点に対する水平方向への相対変位を比較した結果を示した。相対変位は上位群、下位群ともに正の値を示し、-70%時点以降では上位群が有意に高い値を示した。

Fig. 7 には、RLJ index 上位群と下位群の踏切脚における下肢セグメント挙動を比較した結果を示した。空中局面では、全ての項目において 2 群間に有意差は認められなかった。接地以降、セグメント角度では下腿部と足部に有意差が認められ、下腿部では 20%時点、足部では接地直後から離地まで上位群の値が小さくなる傾向が認められた。また、セグメント回転速度では、15-30%時点と 60-80%時点において上位群の大腿部が有意に高い値を示した。

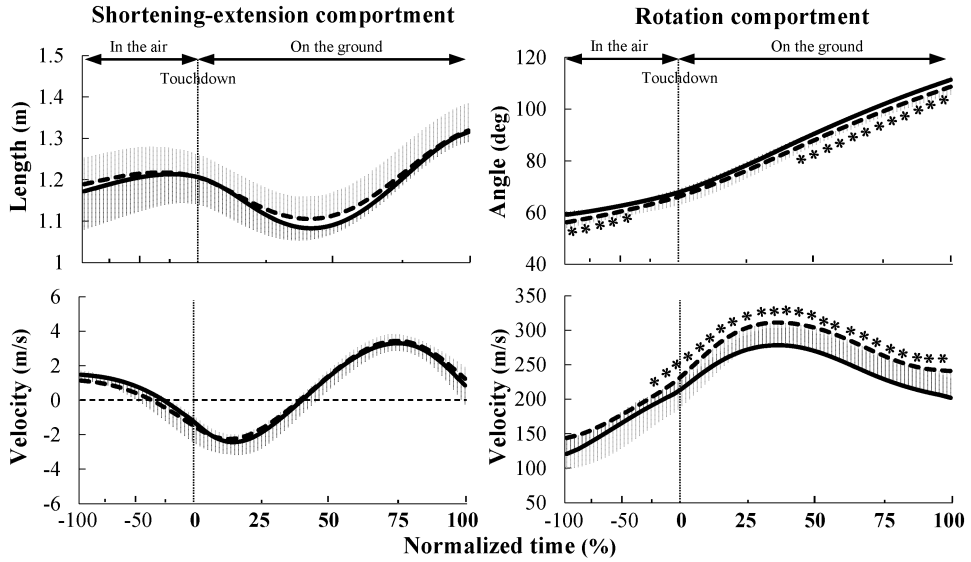


Fig. 5 The comparison of length, angle, shortening-extension velocity and angular velocity of inverted-pendulum model during takeoff phase of Rebound Long Jump test between upper level group and lower level group.
 ---: Upper level group
 —: Lower level group
 * : Statistically-significant difference between upper level group and lower level group.

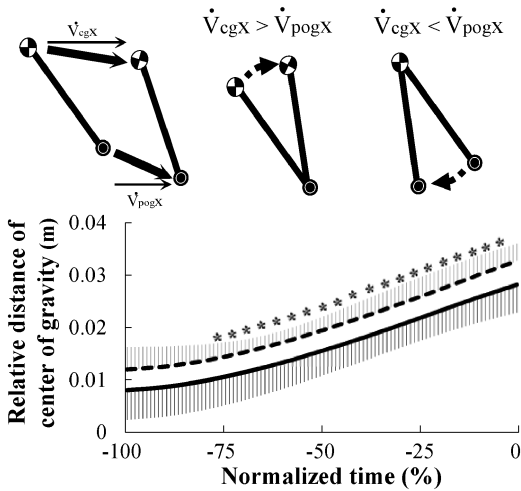


Fig. 6 The comparison of relative distance of center of gravity and point on the ground right before takeoff phase of Rebound Long Jump test between upper level group and lower level group.
 ⊕ : Center of gravity
 ⊙ : Point on the ground
 ---: Upper level group
 —: Lower level group
 * : Statistically-significant difference between upper level group and lower level group.

Fig. 8 には、RLJ index 上位群と下位群の振込脚重心挙動を比較した結果を示した。振込距離では、空中局面における-100%時点では統計的有意差は認められなかったが、2 群間の相違は時間の経過とともに大きくなり、-20%時点以降上位群が正方向に大きな値（すなわち、身体に近い場所に位置する）を示した。上位群の振込距離は、接地後30%時点まで有意差が維持されるとともに、その後認められなくなった。振込速度では、水平方向では全局面、鉛直方向では75%時点以降離地まで上位群が有意に高い値を示した。

Fig. 9 には、RLJ index 上位群と下位群の接地中の踏切脚における下肢関節角度の挙動を比較した結果を示した。股関節、膝関節、足関節に共通して全ての局面において有意差は認められなかった。

Table 3 には、RLJ index 上位群と下位群のモデル長、踏切脚における下肢関節角度について踏切前半もしくは後半局面の変化量を示した。モデル長と膝関節角度は共通して踏切前半局面にのみ

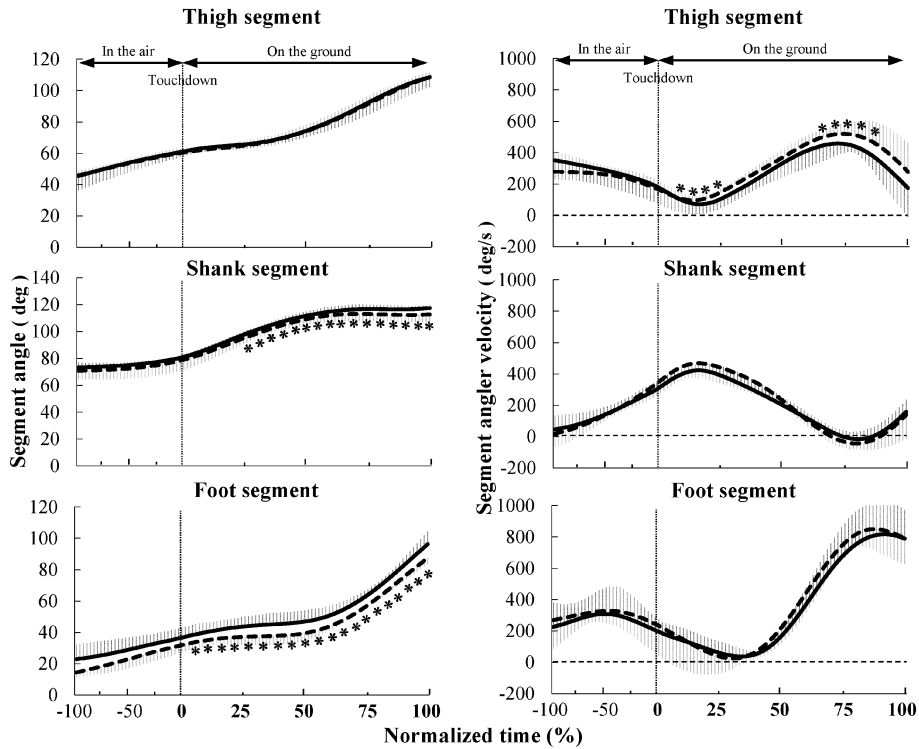


Fig. 7 The comparison of segment angle and angular velocity of thigh, shank or foot segment of Rebound Long Jump test between upper level group and lower level group.
 ---: Upper level group
 —: Lower level group
 * : Statistically-significant difference between upper level group and lower level group.

有意差が認められ、上位群が下位群よりも小さい値を示した。

Ⅳ. 考 察

1. 上位群と下位群の分類

本研究の目的は、高い RLJ index を獲得するための踏切局面の技術的要因を明らかにすることであった。このために対象者を RLJ index の平均値 (24.91 m/s) を基準として、5 名の対象者を上位群 (25.20—31.08 m/s)、6 名の対象者を下位群 (24.88—19.52 m/s) として群分けした。

その結果、上位群には「National」レベルの対象者 1 名と「University」レベルの対象者が 3 名、「Division」レベルの対象者 1 名が分類された。一方下位群には、「National」レベルの対象者 1

名と「University」レベルの対象者が 2 名、「Division」レベルの対象者が 3 名分類された。RLJ index では、走幅跳や三段跳の踏切動作に内在する種々のパフォーマンス構成要因の中から、水平速度の減速を最小限にしながらも最大限の鉛直速度を獲得する要因に関して評価することが可能となる (藤林ほか, 2013; 2014)。一方、実際の走幅跳や三段跳のパフォーマンスは、踏切動作に加えて、助走速度や踏切脚の爆発的な脚の力発揮能力など、多数の構成要因が複合的に作用することによって決定される。これらのことは、RLJ index を用いた測定評価法は、現在のトレーニング課題が上記した踏切技術にあるか否かの判断が可能となることを示唆している。実際に、「National」レベルの競技力を有しながら、RLJ index では全対象者において最も低い値を示した Subject

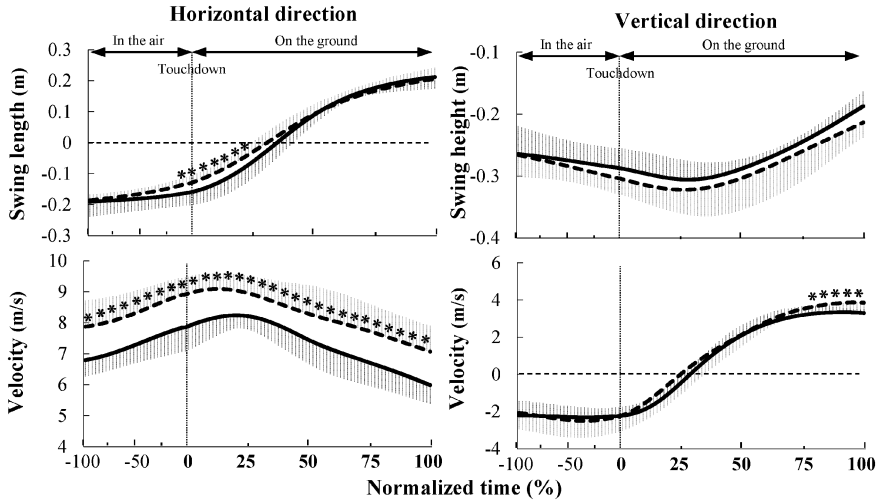


Fig. 8 The comparison of swing length, swing height and velocity of center of gravity of swing leg about horizontal or vertical direction during takeoff phase of Rebound Long Jump between upper level group and lower level group.
 ---: Upper level group
 —: Lower level group
 * : Statistically-significant difference between upper level group and lower level group.

B, 「University」レベルの競技力を有しながら下位群に分類された Subject D, Subject K は、高い身体能力を有しながらも、踏切技術を改善することに大きな課題を有していた。このことを逆の視点で捉えると、「Division」レベルの競技力であるにも関わらず、上位群に分類された Subject F や Subject I は、踏切技術ではなく、助走速度や爆発的な脚の支持能力（藤林ほか, 2014）に関するトレーニング課題を設定することが不可欠となると考えることができる。

本研究の対象者を上位群と下位群に分類した結果、2 群間の RLJ index には有意差が認められたが、身長、体重、接地速度には有意差は認められなかったことから、RLJ index の優劣による群分けは適切であることが理解できる (Table 2)。また、上位群では有意に大きな跳躍距離と有意に短い接地時間を示し、有意に高い RLJ index を示した。これらのことは、先行研究（木野村ほか, 2012）で示されているように、上位群は RLJ の接地時間を短縮するとともに、その短縮された接地時間の条件の中で大きな運動量を獲得し、遠くまで跳ぶことのできる踏切技術を身に付けている

ことを示唆するものである。

Fig. 10に、上位群と下位群の中の典型的な選手1名、すなわち Subject A は最も高い RLJ index を示した対象者、Subject B は最も低い RLJ index を示した対象者のスティックピクチャーを示した。本研究では上位群の行う踏切動作を、高い RLJ index を獲得するための踏切技術として位置付け、上位群と下位群の比較を行った。

2. 踏切局面における技術的要因の比較

本研究の第1の課題は、上位群と下位群の踏切動作をモデル化し、それぞれの比較を行うことによって、RLJ index を高めるための技術的要因を明らかにすることであった。上位群と下位群の踏切中のモデル挙動では、回転に関する項目のみに有意差が認められた (Fig. 5)。また、モデル角度では、上位群と下位群では同程度の角度で接地していたが、離地時には有意に小さく、このためにモデルの回転範囲も小さい値に留まっていた (Table 2)。また、上位群は下位群と比較して、踏切中に有意に高い回転速度を有していることが明らかになった。モデルの幾何学的特徴を考慮す

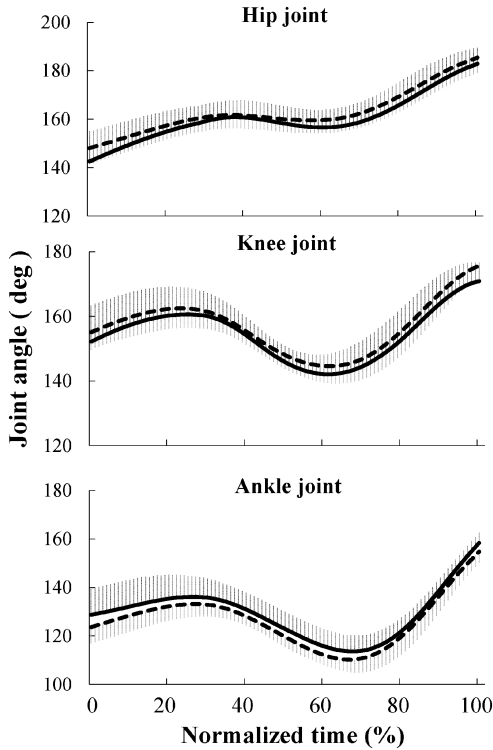


Fig. 9 The comparison of joint angle and angular velocity of thigh, shank or foot segment of Rebound Long Jump test between upper level group and lower level group.
 - - -: Upper level group
 —: Lower level group

ると、小さな回転範囲と高い回転速度はともに踏切における接地時間を短縮するために作用する。水平跳躍種目において短時間で大きな跳躍距離を

Table 3 Variations in model length and angle of hip, knee or ankle angle during former or later phase of takeoff phase in Rebound Long Jump test with the use of 3 m Falling Jump distance between upper level group and lower level group

	Upper level group	Lower level group
Change of Model length		
Former phase (m)	-0.06 ± 0.03*	-0.12 ± 0.04
Later phase (m)	0.16 ± 0.06	0.17 ± 0.02
Change of Hip joint angle		
Former phase (deg)	2.20 ± 1.56	-5.27 ± 4.12
Later phase (deg)	28.70 ± 5.47	24.12 ± 6.00
Change of Knee joint angle		
Former phase (deg)	-11.38 ± 5.80*	-21.21 ± 7.98
Later phase (deg)	31.59 ± 5.25	27.40 ± 3.75
Change of Ankle joint angle		
Former phase (deg)	-14.25 ± 8.38	-21.14 ± 6.47
Later phase (deg)	39.00 ± 4.06	42.53 ± 10.79

*: significant difference between upper level group and lower level group.

Subject A (RLJ index = 31.08 m/s) | Upper level group



Subject B (RLJ index = 19.52 m/s) | Lower level group

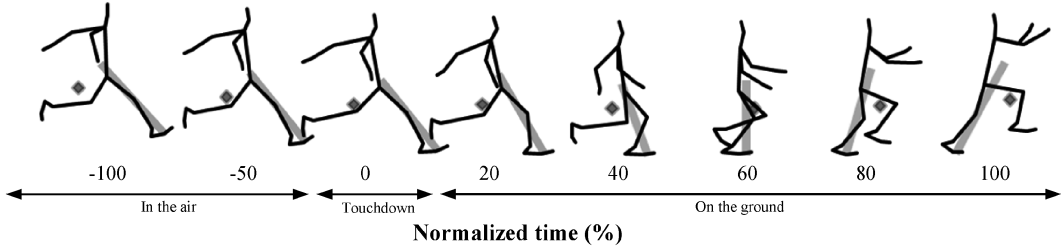


Fig. 10 The typical examples of stick picture, inverted-pendulum model, center of gravity of swing leg of Rebound Long Jump test of upper level group and lower level group.

—: Inverted-pendulum model
 ◆ : Center of gravity of swing leg

獲得するためには、踏切中にモデルを高速で伸展させることと、高速で回転させることの2要因が存在する(木野村ほか, 2012; 三井・図子, 2006). 本研究の結果を考慮すると、上位群は踏切中に身体を高速で回転させるという後者の方法によって接地時間を短縮しながら、大きな跳躍距離も獲得していることが示唆された. なお、両群の踏切瞬間における身体重心の接地速度には有意差が認められなかったことから (Table 2), 上位群は踏切中に何らかの技術的要因によって高い回転速度を獲得していることが推察できる. このことが可能になる原因としては、2つの可能性が考えられる. 第1の可能性は、踏切中に接地点である足部を回転中心にして、下肢を高速で前方へと回転させるための力が加わっていることである. 一方、接地時および接地直前においてモデルの回転速度に既に有意差が生じていることを考慮すると、第2の可能性として、身体重心の並進速度は変わらなくても、接地前の空中局面の時点ですでに身体が回転の速度を持ちながら踏切に向かっていていることである. そこで次には、上位群と下位群の空中局面におけるモデルの挙動と下肢セグメントの挙動に着目して検討した.

3. 踏切接地前の空中局面における技術的要因の比較

上記の結果をもとにして、次に上位群と下位群の空中局面におけるモデル挙動の比較を行った (Fig. 5). その結果、上位群のモデル角度は-100%時点では下位群よりも有意に小さい値を示したが、-40%時点においては有意差が認められなくなった. 一方、回転速度では、-100%時点では有意差が認められなかったが、2群間の差は時間の経過とともに増大し、-30%時点以降において有意差が認められるようになった. これらのことから、上位群は空中局面においてモデルの回転範囲を大きくすることによって、踏切接地前の空中局面において、踏切後の回転を促す先取りのための回転速度を獲得していたことが示唆された. なお、空中局面での回転挙動については、足部を中心に身体重心が相対的に上方へ並進する

ことにより回転が生じていることと、身体重心を中心にして足部が相対的に下方に引き戻される挙動により回転が生じていることが考えられる (Fig. 6). 前者は身体重心が前方へと推進する動作、後者は足部接地点を後方へと引き戻される動作であり、後者の場合には身体各部分重心の推進力に対する影響が少ないか、負の影響を与える動作であることが推察できる. しかし、モデル挙動の角度変位のみに着目した検討だけでは、この2つのどちらの回転挙動が生じていたのかを判断することは困難となる. そこで、身体重心の水平方向への位置変位から足部接地点の水平方向への位置変位を減算することで、足部接地点に対する身体重心の相対変位を算出した (Fig. 6). この値が正方向に大きければ、身体重心が足部の上方へ乗り込むように推進したこと、負方向に大きければ、足部が身体重心の下方へと引き戻されたように推移したことを意味している. その結果、両群ともに身体重心が足部の上方へと乗り込むように推進した回転動作が行われていたが、-70%時点以降では上位群の値が有意に高い値を示した. 以上のことから、上位群では、踏切接地前の空中局面において、身体重心が足部の上方へ乗り込むような先取り動作が遂行されており、これが接地時および踏切中のモデルの回転速度を高めていることが明らかになった.

4. 上位群と下位群の技術的要因に違いを生じさせた要因

上位群と下位群のモデル挙動に認められた相違を発生させた要因を究明するために、モデルの挙動を下肢セグメントの動きへと細分化して比較検討を行った. 空中局面については、身体重心の放物運動は離地時点に決定されることから、Falling jumpの踏切動作に依存する要因が大きい. しかし、上位群と下位群に認められた有意差が、接地直前となる-30--40%において変化することを考慮すると、効果的な接地を導くための踏切技術が内在している可能性がある. 上位群と下位群の下肢セグメント挙動には有意差が認められなかったことから、空中局面における踏切脚の挙動

には相違がないことが明らかになった (Fig. 7). そこで、踏切脚と協調して遂行される逆脚である振込脚の挙動 (青山ほか, 2009; 村木, 1996; Zushi et al., 2005) に着目した. また、振込動作は振込脚に存在する3つの関節とセグメントが連鎖的に作用することによって遂行される. さらに、振込動作の運動パターンは実施者によって無数に存在することから (村木, 1982; 渡邊ほか, 2009), 振込動作を一律に比較することには困難が伴う. 一方、身体重心の挙動は身体各セグメント重心の合成値から算出されることを考慮すると、振込脚の挙動を振込脚重心の挙動へと置き換えることによって、振込脚が身体重心挙動に対して与えた影響について言及できると判断した. 2群間の振込脚重心の挙動を比較すると、-100%時点ではほぼ同様の位置から振込動作が開始されていたが、上位群の水平方向への振込速度が有意に高い値を示しており、2群間の距離の差は時間の経過とともに大きくなり、-20%時点以降において有意差が認められるようになった (Fig. 8). これらの結果は、空中局面におけるモデルの回転挙動に認められた傾向と一致していた. 振込脚重心の移動範囲や速度は、直接的に身体重心と身体各部位の位置関係に影響を与える. すなわち、上位群は踏切接地前の空中局面において、振込脚を大きな範囲 (身体の近くまで) に渡り高い速度で前方へと移動させることによって、足部接地点に対する身体重心の前方への推進に貢献した結果、空中局面におけるモデルの回転が大きな範囲を高い速度で回転していた可能性が示唆された.

次に、接地局面について着目すると、上位群の方が空中局面においてより身体の近くに移動させていた振込脚重心は、接地後30%時点まで有意に前方に位置していた. しかし、振込脚の前方への移動距離には制約があることから、2群間の相違は時間の経過とともに小さくなり、30%時点以降では同様の値を示すに至った (Fig. 8). また、振込速度については、空中局面から継続して離地まで上位群が有意に高い値を維持した. 一方、接地から10%時点までにおける踏切脚の下肢セグメント挙動には2群間に有意差が認めら

れる項目は存在しなかった. このことは、踏切接地直後のモデル回転速度が空中局面における接地の先取り動作によって高められていた可能性を示唆している. したがって、接地前の先取りから踏切接地全般に渡って振込脚を素早く振込むことが、RLJ index を高めるための踏切に関する技術的要因の1つであることが明らかになった.

一方、踏切脚の下肢セグメントは、接地後10%時点以降において2群間に有意差が認められたことから、接地後の回転挙動に影響を与えていたことが考えられる. セグメント角度については、下腿部では20%時点以降、足部では接地直後から離地まで、上位群が下位群よりも有意に小さな値に留まっていることが明らかになった (Fig. 7). これらのことを、上位群のモデル挙動についての結果を考慮しながら考えると、上位群では下腿部および足部の回転範囲を小さくすることによってモデルの回転範囲を小さくし、短時間の踏切動作を遂行していることが推察できる. また、大腿部のセグメント角度に有意差が認められないことに対して、下腿部のセグメント角度が小さな値を示したことは、膝関節の伸展状態を作ることとなる. このことを逆の視線で捉えると、下位群の接地中の膝関節には、上位群よりも大きな屈曲が生じていたことが予測できる. 上位群と下位群の踏切中の下肢3関節における関節角度の変化に着目すると、関節角度の変化パターンには有意差が認められないが (Fig. 9), 膝関節の屈曲範囲は下位群が上位群よりも有意に大きいことが明らかになった (Table 3). 同様の傾向はモデル長にも認められ (Fig. 5, Table 3), モデル長は下腿部と大腿部による相互の挙動によって決定される膝関節の動態を反映している可能性がある. 踏切前半局面に生じる膝関節のエキセントリックな伸展力を高めることは、同局面における身体の回転挙動を促進させる (藤林ほか, 2014; Muraki et al., 2008). したがって、接地中のモデルの回転速度を高めた第2の要因として、膝関節の伸展状態を維持してモデルの短縮変位を抑制すること、すなわち膝関節角度を決定する下腿部と大腿部のセグメント相互の位置関係や回転様態

が挙げられる。セグメントの回転速度に着目すると、両群に共通して接地直後には下腿部が加速し、その後の下腿部の減速に対応して大腿部が加速し、次いで大腿部の減速に対応して足部の加速がもたらされていることが認められた (Fig. 7)。

これらのことは、下肢3セグメントは時相差を持って連動しながら身体重心速度を獲得していることを意味している。各セグメントの回転速度を比較すると、15—30%並びに60—80%時点において上位群の大腿部が有意に高い値を示した。踏切接地直後に生じる下腿部の急激な加速に対して大腿部の回転速度が低いことは、膝関節の屈曲を誘発させる。したがって、上位群は踏切前半局面における大腿部の回転速度を高く維持して膝関節の屈曲を抑制することで、下腿部の回転がその上部に搭載された大腿部の回転へと連動させる序列が生じ、引き続き局面における大腿部の回転速度が高く維持されたと考えられる。ここまでの結果をスティックピクチャーで確認すると、上位群では接地以降の足部ならびに下腿部の回転範囲が抑制されることに加えて、大腿部が高速で前方へと回転したことにより、下肢全体が足部の上方へと推進しており、身体重心が前方へと大きく推進する動作が認められた。一方、下位群では接地以降、下腿部が先行して大きく回転したことに対して大腿部の回転速度が小さかったことから、膝関節が大きく屈曲されるように前方へと推進したことから、身体重心の前方への移動は小さい範囲に留まっていることが理解できる (Fig. 10, 0—40%)。このことは、下腿部と大腿部の回転に関する連動が効果的に遂行されていなかったことを示唆するものである。すなわち、優れた RLJ index を獲得するための接地中の踏切技術について下肢セグメント挙動の観点から言及すると、接地直後の下腿部の過度な回転を抑制するとともに、大腿部の回転速度を高めることで、下肢セグメントの回転を効果的に連動させることが重要な要因となることが示唆された。なお、75%時点以降離地までにおいては、鉛直方向への振込速度が有意に高い値を示した (Fig. 8)。振込脚を上方へと引き上げる速度は、身体重心を直接的に上方へと推

進させることから、下肢関節の伸展作用を助長する作用を持っている (青山ほか, 1994)。これらのことから、振込脚の作用は離地直前の踏切局面においても重要な役割を担っていることが明らかになった。

以上のことから、高い RLJ index を獲得するためには、空中局面から先取りを推進し踏切局面を通して行われる振込脚の振込動作と、踏切局面における踏切脚の下肢各セグメントが、遠位端を回転中心にして下腿部、大腿部、足部の順に回転する序列を伴った踏切技術が要求されることが明らかになった。

V. 要 約

本研究の目的は、水平方向へのバリスティックな伸張—短縮サイクル運動の遂行能力を専門的に測定評価する RLJ index を決定する跳躍技術について明らかにすることであった。この目的を達成するために、RLJ index が優れる対象者 (上位群) と劣る対象者 (下位群) の接地直前から離地に至るまでの踏切動作をモデル化し、2 群間の相違について検討した。さらに、その後明らかになった相違点を発生させた要因に対して、下肢セグメント挙動に着目して検討を加えた。踏切動作のモデル化には、身体を身体重心と足部接地点を結んだ仮想の線分が短縮—伸張しながら回転する逆振り子型の回転モデルを用いた。

本研究の結果から、高速条件で行われる RLJ index を高める技術的要因として、接地中の身体の回転範囲を小さく高速に回転させることが明らかになった。また、これらを可能にするためには、接地前の空中局面において、振込脚を大きな範囲 (身体の近くまで) に渡り高い速度で前方へと移動させること、接地中には、下肢各セグメントが独立して回転せずに、各セグメントの遠位端を回転中心にして下腿部、大腿部、足部の順に序列を伴いながら回転させる踏切技術が要求されることが明らかになった。

以上のことから、RLJ index は空中での踏切動作の先取りや振込動作、接地中の下肢セグメント

の効果的な配列や回転機序に関する観点から踏切技術の評価が可能となることが明らかになった。RLJ index は実際の走幅跳や三段跳の成績との関係性が高く運動特性も類似していることから、本研究で得られた知見は実際の走幅跳や三段跳の踏切技術の評価やトレーニングに応用できると考えられる。

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. *Japanese journal of sports sciences*, 15: 155-162.
- 青山清英・越川一紀・吉木和浩・森長正樹・吉田孝久・尾懸 貢 (2009) 上級走幅跳選手におけるパフォーマンスに影響を与えるバイオメカニクスの要因とコーチの他者観察内容の関係. *スポーツ方法学研究*, 22: 87-100.
- 青山清英・濱松亜紀・小山曾一之・小山裕三・関岡康雄 (1994) 走り幅跳びの踏切動作における身体各部位の使い方に関するバイオメカニクスの分析. *陸上競技研究*, 45: 4-10.
- 藤林献明・荻山 靖・木野村嘉則・関子浩二 (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.
- 藤林献明・荻山 靖・木野村嘉則・関子浩二 (2014) リバウンドロングジャンプテストの遂行能力からみた水平片脚跳躍において高い接地速度に対応するための踏切動作. *陸上競技学会誌*, 12: 33-44.
- Jacobs, R. and van Ingen Schenau, G.J. (1992) Intramuscular coordination in a sprint push-off. *Journal of Biomechanics*, 25: 953-965.
- 木野村嘉則・村木征人・関子浩二 (2012) 走幅跳における助走歩数を増やして踏切するための踏切動作: 短助走から長助走に至る踏切動作等の変化率に着目して. *体育学研究*, 57: 71-82.
- 三井 孝・関子浩二 (2006) はずみ運動を用いて評価した高齢者における伸張-短縮サイクル運動の遂行能力. *体育学研究*, 51: 773-782.
- 村木征人 (1982) 現代スポーツコーチ実践講座 2 陸上競技 (フィールド). ぎょうせい: 東京, pp. 326-350.
- 村木征人 (1996) 陸上競技指導教本一種目別実技編一. 日本陸上競技連盟編. 大修館書店: 東京, pp. 169-186.
- Muraki, Y., Ae, M., Koyama, H., and Yokozawa, T. (2008) Joint kinetics in the long jump takeoff: *International Journal of Sport and Health Science*, 6: 21-32.
- 渡辺輝也・朝岡正雄・宮下 憲・佐野 淳 (2009) 走高跳におけるスピードフロップの類型化に関する運動学的考察. *体育学研究*, 54: 327-342.
- Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Human Locomotion*, 1: 92-93.
- Zushi, K., Ishii, Y., and Elliott, B. (2005) Changes on spring-like behavior according to different touchdown velocities drop long jump. *Proceedings of the XIXth Congress of the International Society of Biomechanics*, Cleveland, USA, 932.
- Zushi, K., Mitsui, T., and Elliott, B. (2003) Changes in movement control during acceleration in human sprinting. *International Society of Biomechanics XIXth Congress*, 442-445.

(平成25年9月16日受付)
(平成26年2月7日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2014/4/18