

日本一流女子走高跳競技者における踏切動作のキネマティクスの特徴

杉浦 澄美¹⁾ 柴田 篤志²⁾ 景行 崇文³⁾ 小山 宏之⁴⁾

1) 筑波大学 2) 新潟医療福祉大学 3) 国立スポーツ科学センター 4) 京都教育大学

1. はじめに

国内の女子走高跳は、2013年に福本幸氏が1m92を記録して以降1m90を超えた選手は現れていない。また、2025年に東京で開催される世界陸上競技選手権大会の参加標準記録は日本記録を上回る1m97であり、世界大会レベルとの差は大きいと言わざるを得ない。しかし、2024年度は高橋渚氏が日本歴代9位の1m88を記録し、福本氏以来の1m90を超える跳躍に期待が高まっている。本報告では、2024年日本陸上競技選手権大会およびU20日本選手権大会の女子走高跳において上位に入賞した競技者の基礎的なキネマティクス変数について報告する。

2. 方法

2-1 分析対象者および分析対象試技

分析対象者は、2024年日本陸上競技選手権大会の女子走高跳で1～5位に入賞した5名、およびU20日本陸上競技選手権大会の女子走高跳で2位までに入賞した2名の計7名で、各対象者の最も記録の高い試技を対象試技とした。

2-2 データ収集およびデータ処理

跳躍の様子をマットの右後方および左後方の観客席上段に設置した2台のハイスピードカメラ(LUMIX GH5s, Panasonic 社製; フレームレート240 fps, 露光時間1/1600-1/800 s)を用いて固定撮影した。撮影範囲は踏切2歩前からバークリアまでとし、キャリブレーション範囲はバーの midpoint を原点として左右5 m, 助走路方向に5 mとした。試技の撮影前にキャリブレーション範囲内の計測点にキャリブレーションポールを立てて撮影した。なお、この撮影は日本陸上競技連盟科学委員会の活動として行われたものである。

撮影したVTR画像から、踏切2歩前接地の10コ

マ前から踏切足離地の10コマ後までの身体分析点23点をビデオ動作分析システム(Frame DIAS V, Q's fix 社製)を用いてデジタイズを行った。2台のカメラの同期は、足の接地あるいは離地のコマを用いて行った。2台のカメラから得られた身体分析点とコントロールポイントの2次元座標値から、3次元DLT法を用いて身体分析点の3次元座標を算出した。3次元座標はバーの midpoint を原点とし、地面と水平かつバーと平行の軸をX軸、地面と水平かつバーと垂直に交わる軸をY軸、鉛直軸をZ軸とする右手座標系を静止座標系と定義した。Y軸は原点からマットへ向かう向きを正とした。コントロールポイントの3次元座標値と計算値との標準誤差は、X軸で0.004 m, Y軸で0.006 m, Z軸で0.007 mであった。身体分析点の座標はWells and Winter (1980)の方法を用いて分析点ごとに最適遮断数周波数(7.2-12.0 Hz)を決定し、4次のButterworth low-pass digital filterを用いて平滑化した。

2-3 算出項 -

身体分析点の3次元座標から、阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて部分および全身の重心座標を算出した。身体重心の座標値と、身体分析点の座標値を用いて、以下の項目を算出した。

① 身体重心の変位

H0: 踏切足接地時における身体重心のZ軸座標値と定義した。

H1: 踏切足離地時における身体重心のZ軸座標値と定義した。

H2: 空中における身体重心の上昇高で、次の式より算出した。

$$H2 = \frac{VCGV_{To}}{2g}$$

ここで、 $VCGV_{To}$ は踏切足離地時における身体重心の鉛直速度を示し、 g は重力加速度 9.81 m/s^2 を示す。

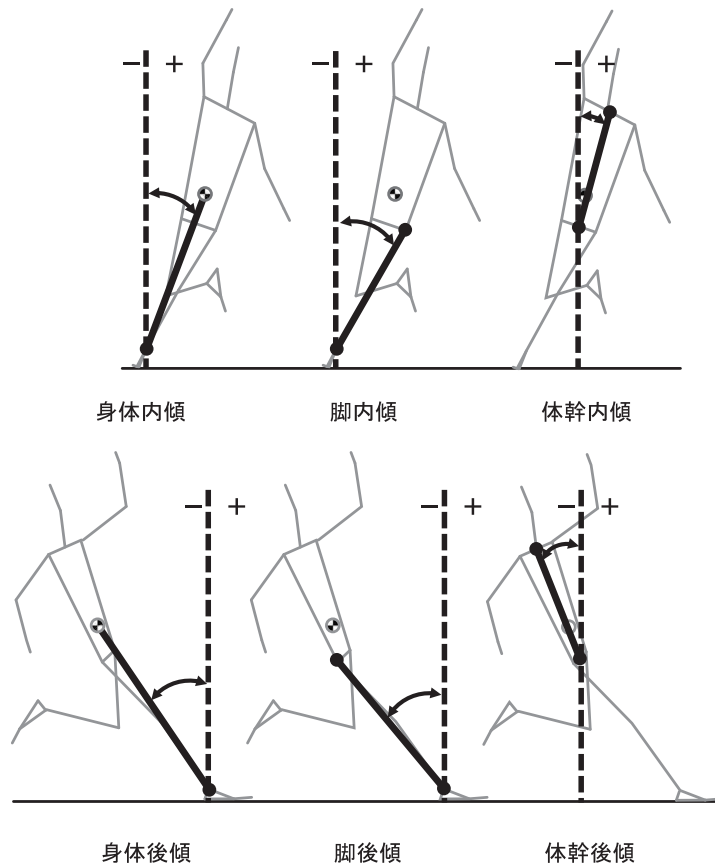


図1 後傾角度と内傾角度の定義

最大重心高：H1 と H2 との和と定義した。

H3:最大重心高とバーの高さとの差と定義した。

- ② 身体重心の速度：身体重心の変位を時間微分することで身体重心速度を算出し、身体重心速度のZ軸成分を鉛直速度、X軸成分とY軸成分を合成した成分を水平速度とした。
- ③ 踏切位置：踏切接地時の踏切足つま先とバーとのY軸方向の距離と定義した。
- ④ 踏切脚の関節角度
 膝関節角度：踏切脚の大腿と下腿のなす角度と定義した。
 股関節角度：両股関節の midpoint から両肩関節の midpoint へ向かうベクトルと大腿のなす角度と定義した。
 足関節角度：踵から足先に向かうベクトルと下腿のなす角度と定義した。

なお、伸展および底屈を正、屈曲および背屈を負とした。

- ⑤ 踏切脚膝関節平均伸展角速度：踏切後半における膝関節伸展量を踏切後半の時間で除すことで算出した。
- ⑥ 踏込角度および踏切角度：踏切足接地時点における身体重心速度ベクトルが水平面となす角度を踏込角度、踏切足離地時点における身体重心

速度ベクトルが水平面となす角度を踏切角度と定義した。

- ⑦ 身体、脚、体幹の内傾角度および後傾角度

踏切局面における身体重心速度ベクトルの水平成分（静止座標系のXおよびY成分の合成ベクトル）をY'軸、地面に水平かつY'軸に直行する軸をX'軸、鉛直軸をZ軸とする右手系の移動座標系を定義した。身体重心と踏切脚足関節を結んだ線分、踏切脚股関節と踏切脚足関節を結んだ線分、両肩中点と両股関節中点を結んだ線分をY'-Z平面に投影し、鉛直軸となす角度をそれぞれ全身、踏切脚、体幹の後傾角とし、正を後傾、負を前傾とした。また、これらの線分をX'-Z平面に投影し、鉛直軸となす角度をそれぞれ全身、踏切脚、体幹の内傾角とし、正を内傾、負を外傾とした。（図1）

2-4 局面定義

踏切脚膝関節の最大屈曲時点を踏切の中間とし、それ以前を踏切前半、以降を踏切後半とした。

3. 結果

表1には、対象者の分析試技の記録および身体重心高に関する変数と踏切位置を示した。図2には、

表 1 身体重心高と踏切位置

	記録	身長	身体重心高 (m)					身体重心高/身長 (%)		踏切位置 (m)
			接地 (H0)	離地 (H1)	H2 *	H3 *	最大 *	接地 (H0)	離地 (H1)	
高橋	1.87	1.72	0.85	1.18	0.80	-0.11	1.98	49.4	68.6	-0.66
青山	1.78	1.72	0.85	1.17	0.69	-0.08	1.86	49.4	68.0	-1.07
津田	1.78	1.79	0.85	1.21	0.68	-0.11	1.89	47.5	67.6	-0.86
武山	1.75	1.70	0.79	1.15	0.75	-0.15	1.90	46.5	67.6	-0.87
新村	1.75	-	0.75	1.09	0.78	-0.12	1.87	-	-	-1.09
森崎 (U20)	1.77	-	0.78	1.11	0.68	-0.02	1.79	-	-	-0.75
前西 (U20)	1.74	-	0.79	1.11	0.82	-0.19	1.93	-	-	-0.81
mean	1.78	1.73	0.81	1.15	0.74	-0.11	1.89	48.2	68.0	-0.87
SD	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	1.3	0.4	0.15

*: 離地時の身体重心鉛直速度から推定。

表 2 身体重心速度

	身体重心水平速度 (m/s)			身体重心水平速度変化量 (m/s)			身体重心鉛直速度 (m/s)			身体重心鉛直速度変化量 (m/s)			踏込角度 (deg)	踏切角度 (deg)
	接地	離地	中間	前半	後半	全体	接地	離地	中間	前半	後半	全体		
高橋	6.32	3.53	4.44	-1.88	-0.91	-2.79	-0.13	3.95	2.36	2.49	1.59	4.09	-1.2	48.2
青山	6.17	3.94	4.43	-1.74	-0.49	-2.23	0.00	3.68	2.73	2.73	0.95	3.68	0.0	43.0
津田	6.57	3.36	4.20	-2.37	-0.84	-3.21	-0.59	3.65	2.68	3.27	0.97	4.24	-5.1	47.4
武山	6.55	3.31	3.84	-2.72	-0.53	-3.25	-0.61	3.83	2.83	3.44	1.00	4.44	-5.3	49.2
新山	6.59	3.69	4.22	-2.37	-0.54	-2.90	-0.36	3.91	3.01	3.37	0.90	4.27	-3.1	46.7
森崎 (U20)	6.26	3.72	4.42	-1.83	-0.71	-2.54	-0.14	3.66	2.55	2.69	1.11	3.80	-1.3	44.5
前西 (U20)	6.77	4.10	4.81	-1.96	-0.72	-2.68	-0.15	4.02	2.75	2.90	1.27	4.17	-1.3	44.4
mean	6.46	3.66	4.34	-2.12	-0.68	-2.80	-0.28	3.81	2.70	2.98	1.11	4.10	-2.5	46.2
SD	0.20	0.27	0.27	0.34	0.15	0.34	0.22	0.14	0.19	0.35	0.23	0.25	1.9	2.1

表 3 踏切時間

	踏切時間 (sec)		
	全体	前半	後半
高橋	0.146	0.067	0.079
青山	0.142	0.075	0.067
津田	0.163	0.079	0.083
武山	0.179	0.104	0.075
新村	0.150	0.088	0.063
森崎 (U20)	0.146	0.071	0.075
前西 (U20)	0.133	0.067	0.067
mean	0.151	0.079	0.073
SD	0.014	0.012	0.007

表 4 踏切脚の関節角度

	膝関節角度 (deg)					膝関節平均角速度 (deg/s)		股関節角度 (deg)			足関節角度 (deg)		
	接地	最小	離地	屈曲量	伸展量	屈曲	伸展	接地	最小	離地	接地	最小	離地
高橋	160.2	139.7	177.7	20.5	38.0	306.0	481.0	136.4	136.4	170.4	124.6	96.1	131.7
青山	166.6	140.1	169.8	26.5	29.7	353.3	443.3	152.5	150.0	179.7	102.5	90.3	125.0
津田	168.0	137.0	177.3	31.0	40.3	392.4	485.5	150.6	148.2	172.8	109.8	92.5	131.6
武山	162.7	127.2	169.9	35.5	42.7	341.3	569.3	138.1	135.1	167.4	94.9	88.6	135.1
新村	165.2	134.2	170.1	31.0	35.9	352.3	569.8	143.1	143.1	168.7	98.2	90.7	127.5
森崎 (U20)	163.8	140.8	176.3	23.0	35.5	323.9	473.3	140.1	139.3	174.2	111.5	87.9	127.5
前西 (U20)	167.0	151.7	171.5	15.3	19.8	228.4	295.5	146.1	146.1	167.5	110.6	97.4	129.8
mean	164.8	138.7	173.2	26.1	34.6	328.2	474.0	143.8	142.6	171.5	107.4	91.9	129.7
SD	2.5	6.9	3.4	6.5	7.1	47.8	85.6	5.7	5.4	4.1	9.2	3.4	3.1

表 5 後傾角度と内傾角度

	接地時後傾角度 (deg)			離地時後傾角度 (deg)			接地時内傾角度 (deg)			離地時内傾角度 (deg)		
	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹
高橋	37.9	44.5	11.6	-0.2	9.0	0.2	-6.0	1.2	7.9	-2.9	-1.3	-5.1
青山	33.8	39.5	16.5	-2.7	3.6	5.6	-3.8	2.3	3.6	-3.1	-5.1	-9.8
津田	38.3	43.5	18.7	-0.9	7.0	7.2	-5.3	1.1	3.5	-2.7	-2.4	-9.5
武山	41.1	46.5	12.8	-2.8	7.3	-2.0	-2.8	4.0	8.0	-4.1	-3.4	-9.7
新山	38.5	44.1	14.6	-5.0	5.0	-1.7	-2.9	4.4	10.1	-1.8	-3.4	0.2
森崎 (U20)	34.7	41.9	8.8	-5.1	4.4	-0.7	0.0	7.2	5.3	-0.7	-2.1	-3.0
前西 (U20)	34.3	39.6	12.6	-4.4	5.5	-3.5	-2.9	2.3	11.0	-0.2	2.9	-3.8
mean	36.9	42.8	13.7	-3.0	6.0	0.7	-3.4	3.2	7.1	-2.2	-2.1	-5.8
SD	2.5	2.4	3.0	1.8	1.7	3.8	1.8	2.0	2.8	1.3	2.3	3.6

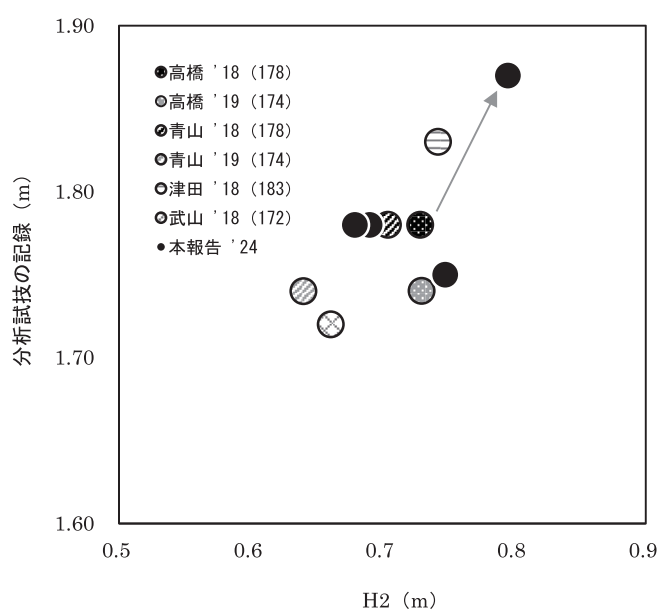


図 2 記録と H2 との関係

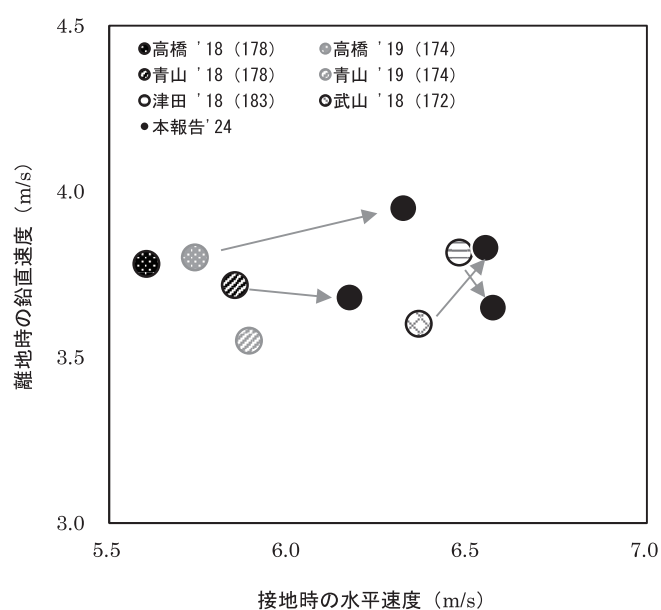


図 3 離地時の鉛直速度と接地時の水平速度との関係

高橋、青山、津田、武山の4選手の記録とH2との関係を示した。いずれの選手も、記録の高い試技においてH2が高い傾向がみられた。

表2には、身体重心の水平速度と鉛直速度に関する変数を示した。図3には、高橋、青山、津田、武山の4選手の離地時の鉛直速度と接地時の水平速度との関係を示した。いずれの選手も2018年または2019年の跳躍と比較して、接地時の水平速度の値は大きかったが、離地時の鉛直速度は、高橋選手と武山選手で大きくなり、青山選手と津田選手では小さくなった。

表3には、踏切時間を示した。踏切全体時間の平均値 0.151 ± 0.014 s であった。前半時間の平均値は 0.079 ± 0.012 s、後半時間の平均値は 0.073 ± 0.007 s であった。

表4には、踏切脚の下肢関節角度に関する変数を示した。踏切脚膝関節角度の最小値、屈曲量、伸展量の平均値はそれぞれ 138.7 ± 6.9 deg, 26.1 ± 6.5 deg, 34.6 ± 7.1 deg であった。

表5には、踏切足接地時および踏切足離地時の内傾角度と後傾角度に関する変数を示した。踏切足接地時の身体の後傾角度の平均値は 36.9 ± 2.5 deg で後傾しており、踏切足離地時の身体の後傾角度は -3.0 ± 1.8 deg で前傾していた。

4. 考察

本報告の目的は、2024年日本陸上競技選手権大会およびU20日本陸上競技選手権大会において女子走高跳で上位に入賞した選手の跳躍に関する基礎的なキネマティクス変数を報告することであった。以降では、高橋、青山、津田、武山の4選手におけるこれまでの報告（杉浦ほか，2019；柴田ほか，2020）のデータを含めて、特に走高跳の跳躍高に関連する変数について考察を加える。

走高跳の記録を構成する3つの高さ（H1，H2，H3）のうち、H2は実質的な跳躍高にあたる。高橋選手は、2018年の1m78および2019年の1m74の跳躍から記録は10–14 cmの向上がみられ、H2は0.73 mから0.80 mへと7 cmの向上がみられた（表1，図2）。これに伴い、最大重心高も1m94および1m92から1m98へと4–6 cm向上していた。同様に、青山選手、津田選手、武山選手も、個人内で記録の高い試技においてH2の値が大きい傾向にあった。これらの事例は、個人内での記録の向上にはH2の向上が必要であることを示しているといえるだろう。

世界トップレベル競技者との比較を行ったこれ

までの報告では、日本の競技者は世界トップレベル競技者と比較して踏切足接地時の身体重心の水平速度が小さいこと（杉浦ほか，2019）、最大重心高と踏切足接地時の身体重心の水平速度との間に有意な正の相関関係が認められたこと（柴田ほか，2020）が報告されている。つまり、記録横断的に調べた研究に基づくと、踏切足接地時の水平速度が大きいほど踏切足離地時の鉛直速度が大きくなり、H2の向上につながるものが推測される。高橋、青山、津田、武山の4選手は、2018年あるいは2019年の跳躍と比較して接地時の水平速度が大きくなっていた（図3）。一方、離地時の鉛直速度は、高橋選手と武山選手で大きくなり、青山選手と津田選手では小さくなっていた（ただし、青山選手は2019年1m78の跳躍と比較して）。この結果からは、個人内で比較すると、必ずしも接地時の水平速度が大きい試技において離地時の鉛直速度が大きいとは限らないことが読み取れる。走高跳の踏切では、助走で獲得した水平速度を大きく減少させながら鉛直方向に跳び上がっているため（深代，1990）、接地時の水平速度が大きくなった場合、これを適切に減速させるために踏切でより大きな力発揮が必要となる。つまり、（経験的によく知られたことだが）接地時の水平速度の増大を跳躍高の増大に結びつけるためには、踏切で大きな力を発揮できる脚筋力や大きな水平速度を伴った中で適切な踏切動作を遂行する技術などが同時に備わっている必要がある。このため、トレーニング過程において接地時の水平速度と離地時の鉛直速度の増大は必ずしも直線的ではなく、水平速度が大きくなっても脚筋力や踏切技術が未熟なうちは鉛直速度が小さくなることは想像できる。したがって、大きな鉛直速度を獲得しH2を向上するためには、長期的な課題として助走スピードの向上を念頭に置きつつ、接地時の水平速度と離地時の鉛直速度との関係の変化をトレーニング経過と合わせて継続的に追いつながら、助走スピードを跳躍高に繋げるための脚筋力の強化や踏切動作の適応の方法について模索していく必要があるだろう。

4. まとめ

本報告では、2024年日本陸上競技選手権大会およびU20日本選手権大会の女子走高跳において上位に入賞した競技者の基礎的なキネマティクス変数について報告した。2018年と2019年の報告から10 cm近く記録を伸ばした高橋選手では、H2の向上および離地時の鉛直速度の増大と接地時の水平速度の

増大もみられた。一方，水平速度の増大に伴う鉛直速度の変化は一様ではなく，長期的には助走スピードを向上させつつ，助走スピードを跳躍高に繋げるための脚筋力の強化や踏切動作の適応が課題となるだろう。

参考文献：

- 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 Science*, 15 (3): 155-162.
- 深代千之（1990）跳ぶ科学．大修館書店，pp. 66-67.
- 柴田篤志，杉浦澄美，荏山靖，清水悠，奥野哲弥，澤田尚吾，小山宏之（2020）日本トップレベルの女子走高跳競技者における踏切動作のキネマティクスの特徴．*陸上競技研究紀要*，15：251-256.
- 杉浦澄美，柴田篤志，小山宏之，長澤涼介（2019）日本トップレベルの女子走高跳競技者における踏切動作のキネマティクスの特徴．*陸上競技研究紀要*，14：191-196.
- Wells, R. P. and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics normal, pathological and sporting gaits. In: *Human Locomotion 1* (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian Society of Biomechanics). pp. 92-93.