

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 : Yaroslava MAHUCHIKH 選手の跳躍との比較

杉浦 澄美¹⁾ 柴田 篤志²⁾ 荻山 靖³⁾ 廣田 元輝⁴⁾ 小山 宏之⁵⁾

1) 筑波大学 2) 新潟医療福祉大学 3) 山梨学院大学 4) 筑波大学大学院 5) 京都教育大学

1. はじめに

2025年の国内女子走高跳では、2月の室内競技会において高橋渚氏が日本歴代5位の1m92を記録し、津田シェリアイ氏と大学2年の森崎優希氏が1m85を記録するなど、複数の選手による好記録が達成され、競技レベルの向上に向けて期待が高まっている。本報告では、2025年日本陸上競技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跳躍について基礎的なキネマティクス変数を報告するとともに、Yaroslava MAHUCHIKH選手の跳躍との比較を行う。

2. 方法

2-1 対象者および分析対象試技

対象者は、2025年日本陸上競技選手権大会（以下、日本選手権とする）の女子走高跳で1～3位に入賞した3名、およびセイコーゴールデングランプリ陸上2025東京（以下、GGPとする）に出場したYaroslava MAHUCHIKH選手の計4名であった。分析対象試技は、日本選手権における対象者の最も記録が高い試技、GGPにおけるYaroslava MAHUCHIKH選手による全試技（1m91成功、1m96成功、2m00失敗）の計6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3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。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。

撮影したVTR画像から、踏切3歩前離地の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、地面と平行かつバーと水平の軸を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、日本選手権でX軸が0.006 m, Y軸が0.007 m, Z軸が0.004 m, GGPでX軸が0.006 m, Y軸が0.006 m, Z軸が0.004 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 移動座標系の定義

踏切動作に関する項目を算出するために、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X'-Y'-Zを定義した。

2-4 算出項目

身体分析点の3次元座標値から、日本選手については阿江(1996)、MAHUCHIKH選手についてはDe Leva(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値を算出した。身体重心の座標値

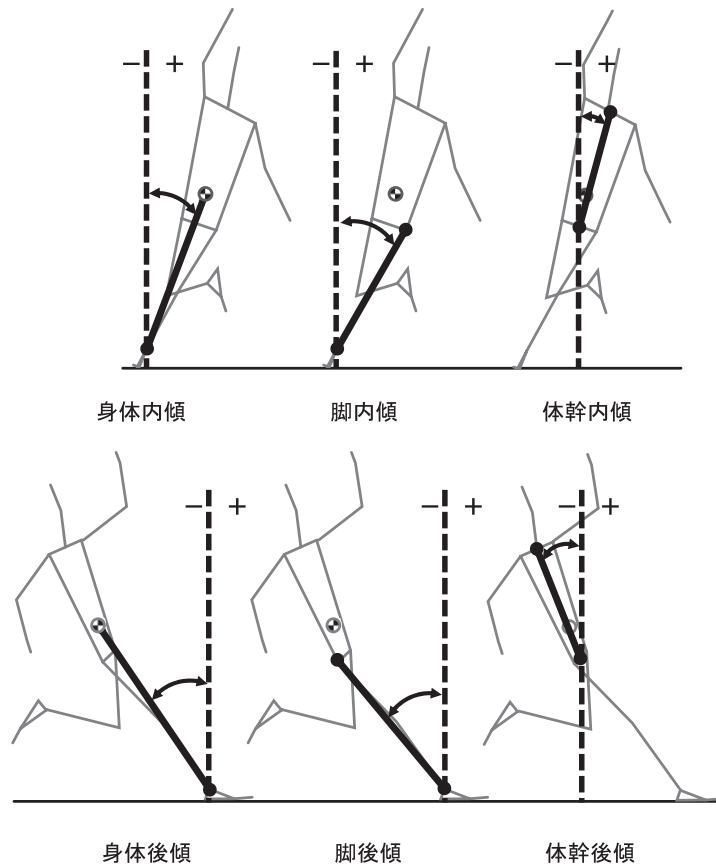


図1 後傾角度と内傾角度の定義

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 身体重心の位置および変位

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。

最下点：踏切足接地時から踏切足離地時における身体重心のZ軸座標値の最小値と定義した。

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。

上昇高：最下点とH1との差と定義した。

H2：踏切足離地後に身体重心がZ軸方向に移動する距離で、次の式より算出した。

$$H2 = \frac{VCGV_{to}^2}{2g}$$

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/s²を示す。

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。

④ 踏切位置：踏切足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。

⑤ 踏切脚の関節角度

踏切脚の関節角度は、Y'-Z平面に投影した身体分析点の座標値を用いて矢状面上の角度として算出した。なお、両股関節の midpoint から両肩関節の midpoint へ向かうベクトルを体幹ベクトル、踏切脚股関節から踏切脚膝関節へ向かうベクトルを大腿ベクトル、踏切脚膝関節から踏切脚足関節へ向かうベクトルを下腿ベクトル、踵からつま先に向かうベクトルを足部ベクトル定義とした。

膝関節角度：大腿ベクトルと下腿ベクトルのなす角度と定義した。

股関節角度：体幹ベクトルと大腿ベクトルのなす角度と定義した。

足関節角度：下腿ベクトルと足部ベクトル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

表1 身体重心高と踏切位置

	記録	身体重心高 (m)							踏切位置 (m)
		接地	最下点	上昇高	離地 (H1)	H2 *	H3 *	最大 *	
津田	1.84	0.88	0.87	0.36	1.23	0.76	-0.15	1.99	-0.88
高橋	1.84	0.85	0.85	0.35	1.20	0.78	-0.14	1.98	-0.94
森崎	1.78	0.81	0.81	0.34	1.15	0.74	-0.11	1.89	-0.99
MAHUCHIKH (191)	1.91	0.90	0.89	0.33	1.22	0.89	-0.21	2.12	-0.88
MAHUCHIKH (196)	1.96	0.90	0.90	0.35	1.25	0.90	-0.19	2.15	-1.02
MAHUCHIKH (200)	2.00	0.90	0.89	0.35	1.24	0.89	-0.13	2.13	-1.08

*: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	中間	離地	前半	後半	全体	接地	中間	離地	前半	後半	全体		
津田	6.76	4.12	3.47	-2.64	-0.65	-3.29	-0.49	2.65	3.85	3.14	1.20	4.34	-4.1	48.0
高橋	6.41	4.58	4.08	-1.83	-0.50	-2.33	0.03	2.31	3.91	2.28	1.60	3.88	0.3	43.7
森崎	6.55	4.50	4.01	-2.05	-0.49	-2.54	-0.33	2.34	3.81	2.67	1.47	4.14	-2.9	43.5
MAHUCHIKH (191)	7.32	5.31	4.51	-2.01	-0.80	-2.81	-0.38	2.21	4.19	2.59	1.98	4.57	-3.0	42.9
MAHUCHIKH (196)	7.40	5.46	4.55	-1.94	-0.91	-2.85	-0.53	2.28	4.20	2.81	1.92	4.73	-4.1	42.8
MAHUCHIKH (200)	7.40	5.74	4.75	-1.66	-0.99	-2.65	-0.45	2.12	4.19	2.57	2.07	4.64	-3.5	41.4

表3 踏切時間

	踏切時間 (sec)			
	全体	上昇	前半	後半
津田	0.158	0.138	0.079	0.079
高橋	0.150	0.150	0.067	0.083
森崎	0.146	0.129	0.067	0.079
MAHUCHIKH (191)	0.146	0.129	0.071	0.075
MAHUCHIKH (196)	0.154	0.133	0.075	0.079
MAHUCHIKH (200)	0.154	0.138	0.071	0.083

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			足関節角度		
	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
津田	175.3	140.5	179.3	34.8	38.8	440.5	491.1	151.5	147.1	176.5	115.6	94.5	129.5
高橋	162.0	139.5	179.9	22.5	40.4	335.8	486.7	142.9	142.4	176.4	118.0	91.8	134.7
森崎	164.5	135.4	175.4	29.1	40.0	434.3	506.3	141.3	135.3	168.6	114.7	93.9	132.6
MAHUCHIKH (191)	170.4	148.7	177.4	21.7	28.7	305.6	382.7	142.9	142.1	170.2	110.7	95.9	128.5
MAHUCHIKH (196)	169.0	141.9	171.7	27.1	29.8	361.3	377.2	143.4	140.2	169.4	109.3	89.7	125.0
MAHUCHIKH (200)	172.0	143.7	175.9	28.3	32.2	398.6	388.0	144.3	139.4	174.8	110.7	88.9	127.1

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
津田	38.3	44.3	18.0	0.2	6.7	9.9	-2.5	2.7	6.3	-0.7	1.0	-4.1
高橋	37.2	41.6	13.1	-3.6	3.8	0.2	-4.1	5.6	5.8	-3.9	-0.4	-10.2
森崎	35.7	42.6	11.3	-5.3	5.5	-3.7	-2.2	1.5	8.5	-0.6	-1.6	-0.6
MAHUCHIKH (191)	39.0	44.1	11.4	-3.6	6.6	-2.1	0.2	9.0	6.1	2.9	6.8	-5.7
MAHUCHIKH (196)	39.7	44.4	13.1	-5.0	5.1	-1.6	-1.7	5.9	5.8	1.2	3.3	-4.7
MAHUCHIKH (200)	39.4	43.4	11.6	-6.6	2.1	-1.2	-0.9	6.8	4.6	2.4	5.3	-7.1

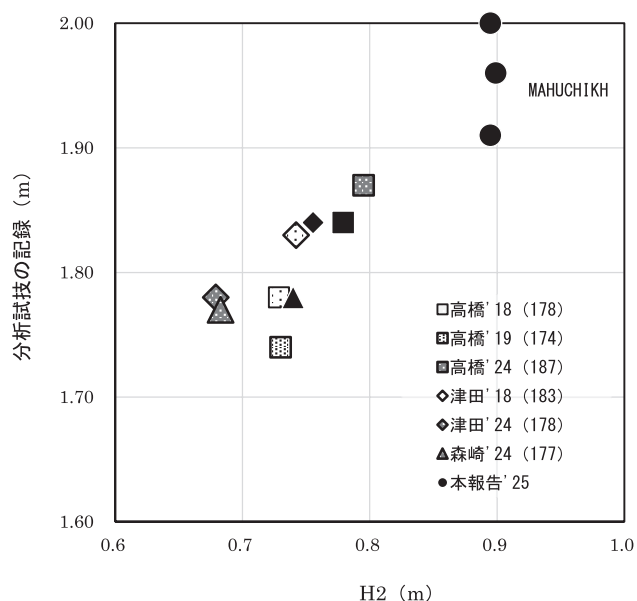


図 2 記録と H2 との関係

負とした。

踏切脚膝関節平均角速度：踏切脚膝関節の屈曲量および伸展量を前半時間および後半時間（前半と後半の定義は後述）で除すことで算出した。身体、脚、体幹の内傾角度および後傾角度
 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）

2-5 局面定義

踏切における身体重心の最下点から踏切足離地時点までを上昇局面と定義した。踏切脚膝関節角度が

最小となった時点を踏切の中間とし、それ以前を踏切前半、以降を踏切後半と定義した。

3. 結果と考察

本報告の目的は、日本選手権の女子走高跳において上位に入賞した競技者の跳躍について基礎的なキネマティクス変数を報告するとともに、Yaroslava MAHUCHIKH 選手の跳躍との比較を行うことであった。以降では、特に身体重心の上昇高に関連する変数について考察を加える。

バイオメカニクスの解釈に基づけば、走高跳の記録は、踏切足離地時における身体重心高 (H1)、踏切足離地後の空中における身体重心の上昇高 (H2) 最大重心高とバーの高さとの差 (H3) から構成される (Hay, 1993) (表 1)。このうち、H2 は競技者が跳び上がった実質的な跳躍高であり、記録向上のためにはこれを高めることが課題となる。日本選手では個人内で記録が高い試技において H2 の値が大きく、津田選手では 1m83 (2018 年) の試技と比較して 2 cm、森崎選手では 1m77 (2024 年) の試技と比較して 6 cm の増大がみられた (表 1, 図 2)。また、身長が同程度の津田選手と MAHUCHIKH 選手^(注)を比較すると、H1 の値は同程度 (津田選手 1.23 m, MAHUCHIKH 選手 1.22—1.25 m) であるのに対し、H2 の値には約 14 cm の差 (津田選手 0.76 m, MAHUCHIKH 選手 0.89—0.90 m) がみられた。これらの事例は、記録の向上には実質的な跳躍高である H2 の増大が必要であることを明示している。

ここで、H2 を決定する条件について整理しておく。H2 は、踏切足離地時における身体重心の鉛直速度によって決定され (2-4 ①参照)、踏切足離地時における身体重心の鉛直速度は、踏切足接地時における身体重心の鉛直速度と踏切における身体重心の鉛直速度の変化量によって決定される (Hay,

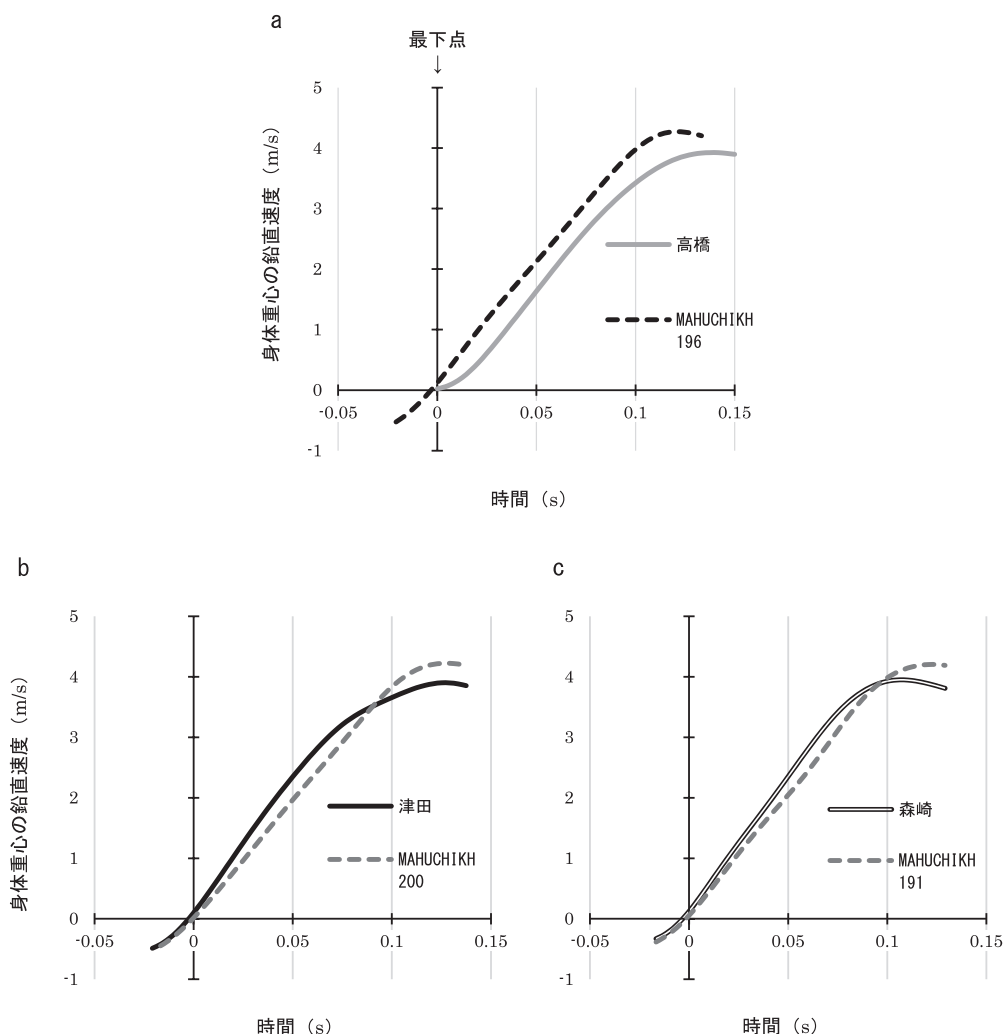


図3 踏切における身体重心鉛直速度
(身体重心の最下点を0 sとした.)

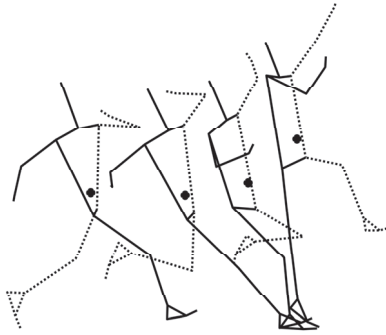
1993). そして、力学的解釈に基づけば、踏切における身体重心の鉛直速度の変化量は、踏切において身体重心に作用した力積、すなわち、身体重心に作用した力の大きさとその作用時間（つまり、踏切時間）によって決定される。ただし、走高跳の踏切では、踏切足接地時の鉛直速度が負の値である場合があり（表2）、この場合、踏切において鉛直下方向への速度を受け止めてから鉛直上方向へと加速することになる。したがって、踏切において身体重心に作用した力積のうち、身体重心の最下点から踏切足離地時までの間（つまり、上昇局面）に作用した力積が踏切足離地時の鉛直速度を決定する。つまり、踏切足離地時の鉛直速度を大きくするためには、上昇局面で身体重心に作用する力かその作用時間（つまり、上昇局面の時間）のどちらか、あるいは両方を大きくすればよいことになる。

しかし、走高跳の踏切において、上昇局面で身体重心に作用する力とその作用時間を際限なく大きくすることは困難である。なぜなら、力の作用時間は

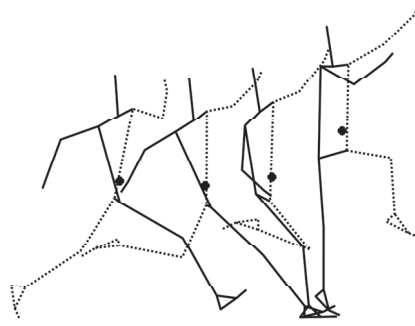
力を作用させることができる距離、すなわち、身体重心の鉛直方向への移動距離によって制約を受けるからである。例えば、力の作用時間を固定してより大きな力を作用させた場合（力積は大きくなる）、同じ時間をより大きな速度で移動するため、移動距離は力が小さい場合よりも大きくなる。これは、速度を時間積分した値が変位であることから理解できる。しかし、そもそも人が地面に足を接地した状態で身体重心を鉛直上方向に移動させることができる距離には身長に依存して限度があるし、さらに走高跳の踏切という動作条件において獲得可能な移動距離にも限度があることは推測できる。したがって、当然、踏切で可能な限り大きな鉛直方向への移動距離を獲得することは、より大きな鉛直速度の獲得に向けた課題となるわけだが、移動距離を「踏切において可能な最大の鉛直方向への移動距離」に固定した条件下でより大きな力を作用させた場合は、結果として力の作用時間は短縮させられてしまう。

以上の条件を踏まえて踏切でより大きな鉛直速度

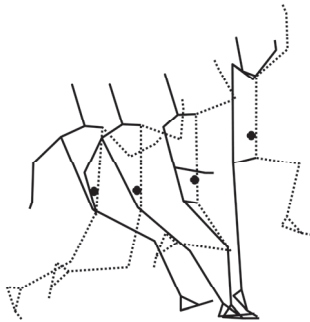
津田選手



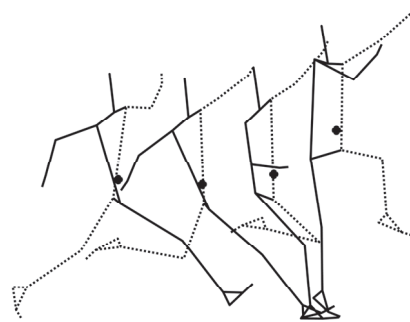
MAHUCHIKH選手 2m00



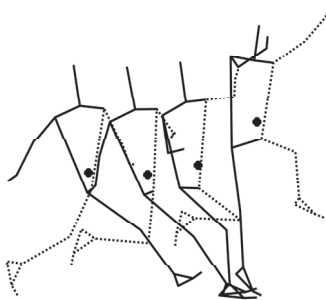
高橋選手



MAHUCHIKH選手 1m96



森崎選手



MAHUCHIKH選手 1m91

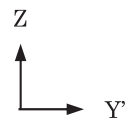
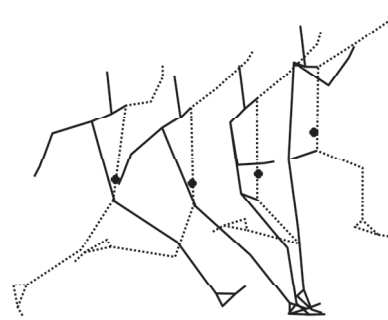


図4 対象者の跳躍動作

(右踏切の選手は左踏切に変換した。左から、踏切1歩前離地時点、接地時点、中間時点、離地時点の姿勢を示す。黒丸は、身体重心位置を示す。)

を獲得するという課題を単純化すると、相対的に大きな距離を相対的に短時間で鉛直方向に移動すればよく、①同じ距離を、より短時間で鉛直方向に移動する、②より大きな距離を、同じ時間で鉛直方向に移動する、というパターンが考えられる。なお、い

ずれのパターンにおいても、より大きな力を身体重心に対して作用させていることが前提となる。以降では、上述の①②に着目して日本選手と MAHUCHIKH 選手のデータを比較し、より大きな踏切足離地時における身体重心の鉛直速度を獲得する方法について

考えてみたい。

身体重心の上昇高(表1)をみると、高橋選手による試技と MAHUCHIKH 選手による 1m96 および 2m00 の試技は、いずれも上昇高が 0.35 m と同じであった。そして、これらの試技における上昇局面の時間(表3)を比較すると、MAHUCHIKH 選手(0.133 s および 0.138 s)が高橋選手(0.150 s)よりも短く、上昇局面の時間が短い試技ほど踏切足離地時の身体重心の鉛直速度(すなわち H2 の値)が大きかった(表1, 表2)。これらの試技は、上述の①に当てはまる事例と考えられる。また、MAHUCHIKH 選手による 1m96 の試技は高橋選手の試技と比較して、上昇局面における鉛直速度の増大の仕方が急であることから(図4 a)、MAHUCHIKH 選手は上昇局面を通じてより大きな力を身体重心に作用させていたことが推察される。したがって、MAHUCHIKH 選手は、同程度の鉛直方向の移動距離をより短時間で移動しており、その過程で身体重心に対してより大きな力を作用させていたと考えられる。言い換えれば、上昇局面における鉛直方向の平均パワーが大きかったといえる。

一方、上昇局面の時間が同じであった津田選手の試技と MAHUCHIKH 選手による 2m00 の試技(いずれも 0.138 s)、および森崎選手の試技と MAHUCHIKH 選手による 1m91 の試技(いずれも 0.129 s)を比較すると、踏切足離地時の身体重心の鉛直速度が大きかった MAHUCHIKH 選手による試技の方がわずかに身体重心の上昇高が小さかった(表1)。この結果は、上述の②には当てはまらない。そこで、これらの2組の試技について、踏切における身体重心の鉛直速度の時系列変化を、身体重心の最下点を 0 s として比較したところ(図4 bc)、いずれの組み合わせにおいても 0 s から約 0.09 s までは MAHUCHIKH 選手の値が日本選手2名の値を下回っていた。そして、約 0.09 s 時点を境に大小関係が逆転し、MAHUCHIKH 選手の値が日本選手2名の値を上回っていた。つまり、MAHUCHIKH 選手は津田選手や森崎選手と比較して、より終盤において鉛直速度を獲得していた。これらの事例を解釈するためには、単純化した条件における②のパターン(より大きな距離を、同じ時間で鉛直方向に移動する)を走高跳の踏切における実態にあわせて修正する必要がある。

上述の単純化した条件では、当該時間全体を通して力が一定である(等加速度運動)ことを前提としていた。しかし、実際の走高跳の踏切では、身体重心に作用させる力は一定ではなく、時々刻々と変化させることができる。仮に、「同じ時間内にトータ

ルで同じ距離を鉛直方向に移動する」という条件下であっても、力が一定ではない場合は、単位時間あたりの移動距離の増え方(つまり、速度)は一様であるとは限らない。そして、最後の時点における速度は、その直前の時点からの単位時間あたりの変位であり、極論すれば「最後の瞬間にどれだけ大きく変位したか」によって決まる。これらを考慮すれば、時間が同じ場合でも、移動距離の大小だけではなく、「どの局面でどのくらいの移動距離を獲得するか」が最後の時点における速度の大きさに影響をおよぼすことが考えられる。したがって、MAHUCHIKH 選手は上昇局面の時間が同じ日本選手2名と比較してトータルの移動距離がわずかに小さかったが、踏切初期の移動距離は小さく抑え、踏切終盤の力発揮によって大きな距離を一気に移動する(つまり、踏切終盤でのパワーが大きい)、という戦略で最終的に大きな踏切足離地時の鉛直速度を獲得していたことが推察される。

4. まとめ

本報告では、2025年日本陸上競技選手権大会の女子走高跳において入賞した競技者の跳躍について基礎的なキネマティクス変数を報告するとともに、Yaroslava MAHUCHIKH 選手の跳躍との比較を行った。日本選手では、特に2024年から2025年で記録を 8 cm 伸ばした森崎選手において跳躍高(H2)の増大がみられた。しかし、日本選手と MAHUCHIKH 選手との比較では、H2において 10 cm 以上の差がみられ、日本選手にとって H2 のさらなる増大が課題であることが再確認された。また、身体重心の鉛直速度の獲得に関与すると考えられる身体重心の上昇高は日本選手との間に大きな差はみられなかったが、同程度の距離をどのくらいの時間をかけて移動するか、あるいは、踏切のどの局面で多くの距離を移動するか、という点において違いがみられた。H2 のさらなる増大に向けては、爆発的な力発揮能力の向上が課題となるだろう。

注記：

津田選手の身長は、杉浦ほか(2019)の報告によれば 1.79 m である。また、MAHUCHIKH 選手の身長は、1.80m との報告がある(Roma 2024 EUROPEAN ATHLETICS CHAMPIONSHIPS, online)。

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.
- De Leva, P. (1996) Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics* 29, 1223-1230.
- Hay, J.G. (1985) *The Biomechanics of Sports Techniques* (4th Edition). Benjamin Cummings : San Francisco, : 440-441.
- 柴田篤志, 杉浦澄美, 荻山靖, 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.
- 杉浦澄美, 柴田篤志, 景行崇文, 小山宏之 (2025) 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. *陸上競技研究紀要*, 20 : 141-146.
- Roma 2024 EUROPEAN ATHLETICS CHAMPIONSHIPS : Meet the athletes:Yaroslava Mahuchikh. <https://www.roma2024.eu/en/meet-the-athletes-yaroslava-mahuchikh/>. (accessed 2025-12-31).
- 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.