

日本一流男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

近年、国内の男子走高跳では、2019年に戸邊直人氏によって13年ぶりに日本記録が更新され、2024年8月に開催されたパリ五輪では赤松諒一氏が五輪日本人最高記録の2m31で5位入賞を果たすなど、競技レベルが高まりつつある。しかし、近年の国内男子走高跳競技者に関する基礎的資料は少ない。本報告では、2024年日本陸上競技選手権大会およびU20日本選手権大会の男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男子走高跳で1～4位に入賞した4名、およびU20日本陸上競技選手権大会の男子走高跳で2位までに入賞した2名の計6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0.005 m, Y軸で0.006 m, Z軸で0.008 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 算出項目

身体分析点の3次元座標から、阿江(1996a)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。

$$H2 = \frac{VCGV_{T0}}{2g}$$

ここで、 $VCGV_{T0}$ 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。

最大重心高: H1とH2との和と定義した。

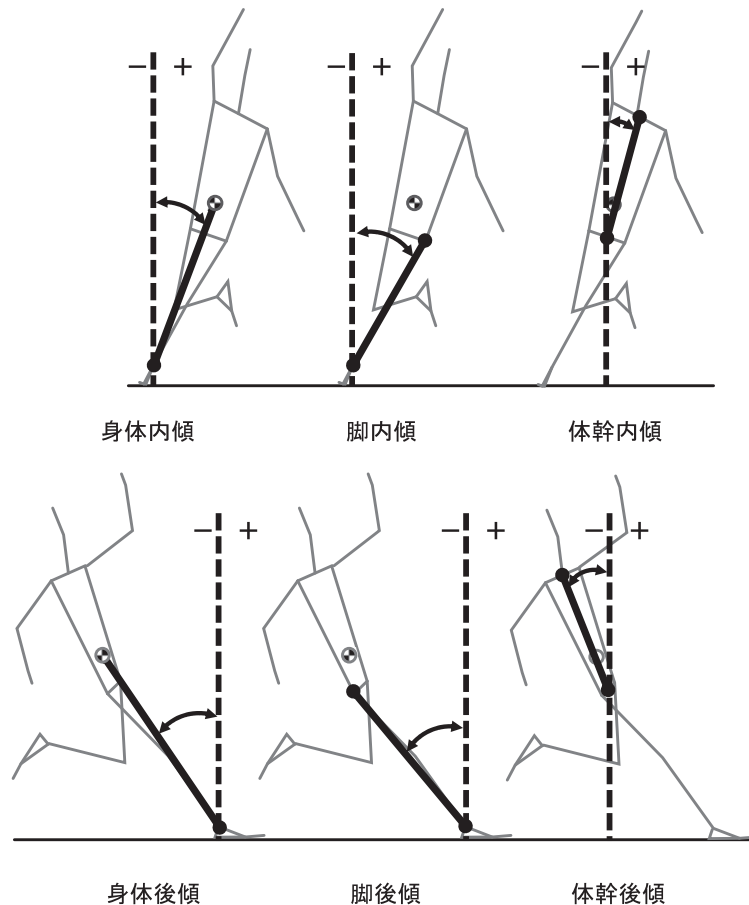


図1 後傾角度と内傾角度の定義

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 midpoint と両股関節 midpoint 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. 結果および考察

本報告の目的は、2024年日本陸上競技選手権大

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 (H0)	離地 (H1)	H2 *	H3 *	最大 *	
赤松	2.25	0.88	1.30	0.99	-0.04	2.29	-1.20
衛藤	2.25	0.88	1.29	1.12	-0.16	2.41	-1.08
真野	2.20	0.87	1.24	1.16	-0.20	2.40	-1.30
長谷川	2.20	0.80	1.25	1.09	-0.14	2.34	-1.31
永瀬 (U20)	2.09	0.87	1.23	1.02	-0.16	2.25	-1.12
中村 (U20)	2.09	0.85	1.24	0.97	-0.12	2.21	-1.32
mean	2.18	0.86	1.26	1.06	-0.14	2.32	-1.22
SD	0.07	0.03	0.03	0.07	0.05	0.07	0.10

*: 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		
赤松	7.22	4.29	4.68	-2.54	-0.39	-2.93	-0.05	4.40	3.95	4.00	0.45	4.45	-0.4	45.7
衛藤	7.17	3.63	4.72	-2.45	-1.09	-3.54	-0.43	4.68	3.40	3.83	1.28	5.11	-3.4	52.2
真野	7.87	4.53	5.16	-2.70	-0.63	-3.34	0.14	4.78	3.60	3.46	1.18	4.64	1.0	46.5
長谷川	7.33	3.86	4.60	-2.73	-0.74	-3.47	-0.05	4.62	3.54	3.59	1.08	4.67	-0.4	50.1
永瀬 (U20)	7.41	4.55	5.10	-2.31	-0.55	-2.86	0.18	4.47	3.70	3.52	0.77	4.30	1.4	44.5
中村 (U20)	7.76	4.29	4.96	-2.81	-0.66	-3.47	-0.50	4.36	3.35	3.85	1.01	4.86	-3.7	45.5
mean	7.46	4.19	4.87	-2.59	-0.68	-3.27	-0.12	4.55	3.59	3.71	0.96	4.67	-0.9	47.4
SD	0.26	0.34	0.21	0.17	0.21	0.27	0.26	0.15	0.20	0.20	0.28	0.26	2.0	2.8

表 3 踏切時間

	踏切時間 (sec)		
	全体	前半	後半
赤松	0.158	0.104	0.054
衛藤	0.150	0.083	0.067
真野	0.129	0.075	0.054
長谷川	0.167	0.096	0.071
永瀬 (U20)	0.129	0.075	0.054
中村 (U20)	0.167	0.100	0.067
mean	0.150	0.089	0.061
SD	0.016	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			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
赤松	166.7	131.9	164.5	34.8	32.6	334.6	517.5	144.9	143.2	171.6	117.0	87.0	127.9
衛藤	165.5	142.3	174.2	23.2	31.9	279.5	476.1	140.1	140.1	174.6	121.7	94.2	123.6
真野	173.3	139.0	164.5	34.3	25.5	457.3	472.2	146.9	146.9	166.9	129.2	90.8	127.8
長谷川	164.0	143.0	175.5	21.0	32.5	218.8	457.7	138.2	138.2	176.5	104.0	94.5	135.9
永瀬 (U20)	171.3	155.7	174.1	15.6	18.4	208.0	340.7	148.1	148.1	171.9	110.4	99.6	126.8
中村 (U20)	170.2	136.9	172.6	33.3	35.7	333.0	532.8	144.8	139.9	174.8	99.6	88.7	118.6
mean	168.5	141.5	170.9	27.0	29.4	305.2	466.2	143.8	142.7	172.7	113.7	92.5	126.8
SD	3.3	7.3	4.6	7.5	5.8	84.0	61.9	3.5	3.7	3.1	10.2	4.2	5.2

表 5 後傾角度と内傾角度

	接地時の後傾角度 (deg)			離地時の後傾角度 (deg)			接地時の内傾角度 (deg)			離地時の内傾角度 (deg)		
	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹
赤松	39.9	44.0	16.6	-4.7	4.3	-0.1	-2.7	1.7	11.1	-0.2	0.7	-4.9
衛藤	40.4	45.9	13.6	-1.6	5.8	6.4	-3.2	2.3	8.8	1.8	1.0	-5.4
真野	38.3	44.0	16.9	-2.0	6.3	4.1	-1.9	1.5	15.0	0.7	-0.6	5.3
長谷川	42.4	49.6	15.3	-4.3	4.6	-0.7	-0.3	5.1	13.4	1.8	1.4	0.7
永瀬 (U20)	37.4	43.7	15.0	-2.1	7.3	-3.1	-1.2	4.5	9.5	1.0	-0.5	-1.6
中村 (U20)	41.2	46.6	15.4	-7.3	1.3	-1.8	-1.4	6.3	8.3	1.9	2.5	0.7
mean	39.9	45.6	15.5	-3.7	4.9	0.8	-1.8	3.6	11.0	1.2	0.8	-0.9
SD	1.7	2.1	1.1	2.0	1.9	3.3	1.0	1.8	2.5	0.8	1.1	3.7

会および U20 日本陸上競技選手権大会における男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、跳躍高に関連する項目について考察を加える。

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 (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。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 (2-3 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、踏切中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, 1993)。そして、踏切中における身体重心の鉛直速度の変化量は、踏切中に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によって力学的に決定される。

踏切足接地時における身体重心の鉛直速度を見ると、平均値は -0.12 ± 0.26 m/s で負の値を示した (表 2)。踏切足接地時における身体重心の鉛直速度が負の方向に大きい場合、この下方向の速度を踏切初期で受け止めてから上方向に変えるために、踏切中における身体重心の鉛直速度の変化量を大きくする必要がある。このため、踏切足接地時における身体重心の鉛直速度の負の値を小さくする (踏込角度を小さくする) ことが、踏切脚への負担を減らし、踏切足離地時における身体重心の鉛直速度の獲得に有効であることが指摘されている (村木, 1982 ; 阿江, 1992 ; 深代, 1990)。個別の値を見ると、赤松選手と長谷川選手は -0.05 m/s で値が小さく、真野選手 (0.14 m/s) と永瀬選手 (0.18 m/s) では正の値を示していた。上述の指摘を踏まえると、特に真野選手と永瀬選手は身体重心を上昇させながら踏切を開始しており、H2 獲得に対して合理的な踏切開始時の条件を整えていたと解釈できる。一方、衛藤選手 (-0.43 m/s) と中村選手 (-0.50 m/s) では、特

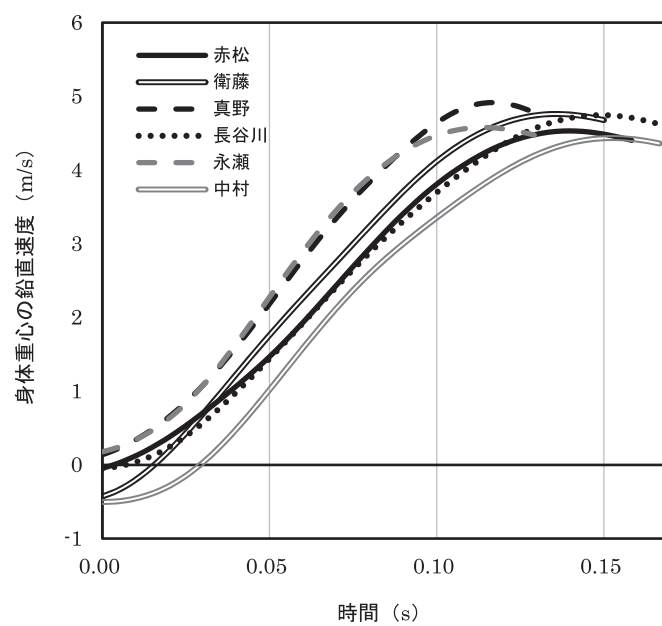


図 2 踏切における身体重心鉛直速度の変化

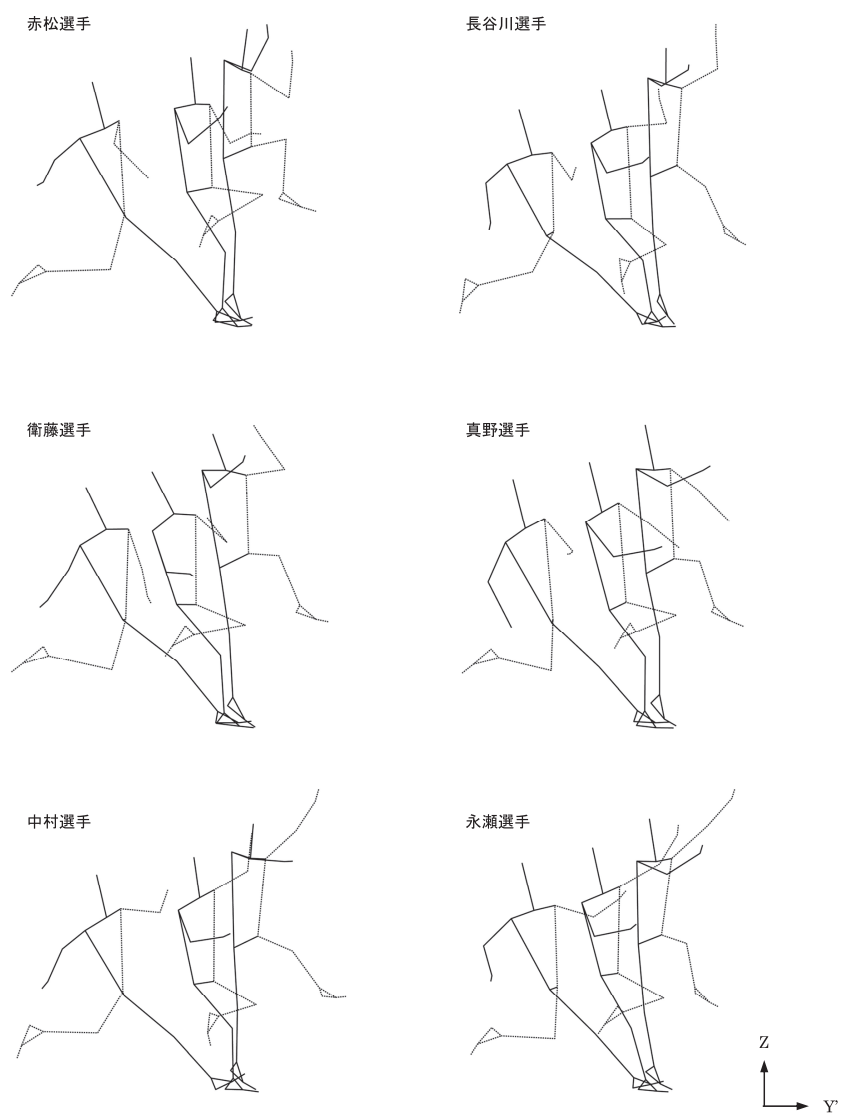


図 3 対象者の跳躍動作

(右踏切の選手は左踏切に変換した。左から，接地時点，中間時点，離地時点の姿勢を示す。)

に大きな負の値を示していた。また、踏切中における身体重心の鉛直速度の変化量は、衛藤選手 (5.11 m/s) が対象者の中で最も大きく、中村選手 (4.86 m/s) も平均値 (4.67 m/s) を上回っていた。この結果から、衛藤選手と中村選手は、踏切足接地時の身体重心の鉛直速度が負の方向に大きく、これを受け止めてから上方向に変えるために、踏切中における身体重心の鉛直速度の変化量が大きくなったことがうかがえる。しかし、衛藤選手の H2 は、踏切足接地時における身体重心の鉛直速度が正の値であった永瀬選手よりも 10 cm 大きい。また、世界一流男子走高跳競技者を対象とした近年の研究 (Nicholson et al., 2018; Nicholson et al., 2019) によると、踏切足接地時の身体重心の鉛直速度は -0.06 m/s から -0.90 m/s (平均 -0.52 m/s) と報告されている。これらを踏まえると、必ずしも力学的に合理的な踏切開始時の条件を整えることだけが走高跳の踏切において H2 増大につながるとは限らないことが推察される。

そこで以降では、踏切開始時の要因に類似の特徴が認められたシニア選手と U20 選手について、踏切中の変数を比較し H2 の差に影響した要因について検討する。具体的には、踏切足接地時における身体重心の鉛直速度が正の値であった真野選手と永瀬選手、負の値であった衛藤選手と中村選手の 2 組について検討する。

3-1. 真野選手と永瀬選手との比較

真野選手と永瀬選手では、H2 で 14 cm、踏切足離地時の身体重心の鉛直速度にして 0.31 m/s の差があった (表 1, 表 2)。また、踏切中における身体重心の鉛直速度の変化を比較すると (図 2)、約 0.090 s 時点以降、真野選手が永瀬選手を上回っていた。踏切中における身体重心の鉛直速度の変化量は、踏切全体および踏切後半において真野選手 (4.64 m/s と 1.18 m/s) が永瀬選手 (4.30 m/s と 0.77 m/s) と比較して大きかった。対して、踏切全体 (0.129 s) と踏切後半 (0.054 s) の時間は両者で同じであった。つまり、真野選手は永瀬選手と比較して、踏切中、特に、踏切脚の膝関節が伸展していく踏切後半において、同じ時間でより大きな鉛直速度を獲得していた。このことから、踏切後半において真野選手は永瀬選手よりも大きな力を地面に対して作用させていたことが推察される。踏切の約 60% 時以降では、膝関節の伸展や足関節の底屈による関節トルクパワー (関節トルクと関節角速度の内積) の発揮が鉛直速度の獲得に貢献することが示唆されている (戸邊ほ

か, 2019)。スティックピクチャ (図 3) を比較すると、真野選手が永瀬選手よりも踏切脚の屈曲伸展を行っている様子が見受けられる。また、踏切脚の関節角度について表 4 をみると、真野選手が永瀬選手と比較して、膝関節の伸展量と平均伸展角速度および足関節の底屈量が大きかった。したがって、真野選手は永瀬選手と比較して踏切脚を大きな範囲で素早く伸展しており、両者の踏切後半での身体重心の鉛直速度の差には、踏切脚の積極的な伸展による力発揮の違いが影響していた可能性がある。

3-2. 衛藤選手と中村選手との比較

衛藤選手と中村選手では、H2 で 15 cm、踏切足離地時の身体重心の鉛直速度にして 0.32 m/s の差があった (表 1, 表 2)。また、踏切中における身体重心の鉛直速度は踏切局面全体を通じて衛藤選手が中村選手を上回っていた (図 2)。踏切中における身体重心の鉛直速度の変化量は、踏切全体および踏切後半において衛藤選手 (5.11 m/s と 1.28 m/s) が中村選手 (4.86 m/s と 1.01 m/s) と比較して大きかった。対して、踏切全体の時間は衛藤選手 (0.150 s) が中村選手 (0.167 s) と比較して短く、踏切後半の時間は同じ (0.067 s) であった。したがって、真野選手と永瀬選手との比較の場合と同様に、衛藤選手は中村選手と比較して、踏切中、特に踏切脚の膝関節が伸展していく踏切後半において、同じ時間でより大きな鉛直速度を獲得しており、より大きな力を地面に対して作用させていたことが推察される。一方、膝関節の伸展量と平均伸展角速度は、中村選手が衛藤選手と比較して大きかった (表 4)。つまり、中村選手は踏切脚の膝関節を大きな範囲で素早く伸展していたが、踏切後半における身体重心の鉛直速度の獲得が小さかったことになる。踏切脚を含め身体全体が伸展する踏切後半局面では、伸展範囲の大きさや伸展スピードだけでなく、伸展する方向が鉛直速度の獲得に影響をおよぼしていることが指摘されている (杉浦ほか, 2021)。スティックピクチャ (図 3) を比較すると、中村選手は中間時点から踏切足離地時点にかけてやや前方に跳び出しているのに対し、衛藤選手は真上に跳び出している様子が見受けられる。また、身体の後傾角度について表 5 をみると、踏切足接地時には両者の差は 0.8 deg と小さいが、踏切足離地時には中村選手 (-7.3 deg) が衛藤選手 (-1.6 deg) と比較して負の値が大きく、身体が前傾していた。したがって、中村選手は踏切中の身体が前方へ起き上がる範囲が大きく、踏切後半において伸展方向が前方

向になってしまうことで、鉛直速度の獲得が小さくなった可能性がある。なお、後傾した身体を前方へ起こすもとなるのは助走で得られた運動量(阿江, 1996b), すなわち踏切足接地時の身体重心の水平速度である。中村選手は衛藤選手と比較して、踏切足接地時において身体重心の水平速度が大きく(表2), これが踏切中の身体の前方への起き上がりを助長したのかもしれない。

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日本選手権大会の男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。また、踏切足接地時における身体重心の鉛直速度に共通の特徴が認められた2組のシニア選手とU20選手について踏切中の変数を比較した。その結果、いずれもシニア選手はU20選手と比較して、踏切後半における身体重心の鉛直速度が大きかった。したがって、踏切後半における身体重心の鉛直速度の増大が、走高跳における跳躍高の向上に向けた課題となることが示唆された。

なお、本報告において取り上げたシニア選手が記録向上の過程においてU20選手のキネマティクス変数を通過したのかは不明であり、U20選手のキネマティクス変数が記録向上とともに比較対象としたシニア選手に近づくかどうかはわからない。したがって、男子走高跳における記録向上に向けた課題を明確にするためには、今後も継続的にデータを収集していく必要がある。

参考文献:

阿江道良 (1992) 5. 跳のバイオメカニクス. 日本陸上競技連盟編, 陸上競技指導教本基礎理論編. 大修館書店, p. 47.

阿江通良 (1996a) 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.

阿江通良 (1996b) 陸上競技の高く跳ぶ動作と遠く跳ぶ動作 -How they jump-. バイオメカニズム学会誌, 20: 57-62.

深代千之 (1990) 跳ぶ科学. 大修館書店, pp. 66-67.

Hay, J. G. (1993) The Biomechanics of Sports Techniques (4th ed.). Benjamin Cummings, p. 442.

村木征人 (1982) フィールド競技の特性. 大石三四郎・浅田隆夫編, 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, p. 281.

Nicholson, G., Bissas, A. and Merlion, S. (2018) High jump Men's -2017 IAAF World Championships Biomechanical report. <https://worldathletics.org/about-iaaf/documents/research-centre>, (accessed 2024-12-27)

Nicholson, G., Bennet, T., Bissas, A. and Merlion, S. (2019) Men's high jump - 2018 IAAF World Indoor Championships Biomechanical Report. <https://worldathletics.org/about-iaaf/documents/research-centre>, (accessed 2024-12-27)

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, 小山宏之, 尾縣貢, 木越清信 (2021) 女子走高跳における鉛直速度の獲得に影響をおよぼす踏切局面の技術的要因. 体育学研究, 66: 827-839.

戸邊直人, 荻山靖, 林陵平, 木越清信, 尾縣貢 (2019) 走高跳の踏切局面における下肢3関節の力・パワー発揮特性. 体育学研究, 64: 625-635.

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.