

日本一流棒高跳競技者と世界一流棒高跳競技者の 跳躍に関するキネマティクス変数の比較

景行 崇文¹⁾ 植松 倫理²⁾ 廣田 元輝²⁾ 石川 稜将²⁾ 杉浦 澄美³⁾ 福地 修也²⁾
高松 潤二⁴⁾ 小山 宏之⁵⁾

1) 国立スポーツ科学センター 2) 筑波大学大学院 3) 筑波大学体育系 4) 流通経済大学
5) 京都教育大学

1. はじめに

近年、女子棒高跳では日本記録が更新され、男子棒高跳ではU20世界選手権で上位入賞を果たすなど国内において棒高跳界の注目は高まりつつある。ただし、依然として日本棒高跳界の競技水準は世界と大きな差がある現状に鑑みると、日本棒高跳界が世界に近づく一歩として、日本一流棒高跳競技者と世界一流競技者との差を具体的に知ることは重要であろう。

そこで本報告では、跳躍に関する基礎的なキネマティクス変数を日本一流棒高跳競技者と世界一流棒高跳競技者と比較することを目的とした。

2. 方法

対象者は、2024年日本陸上競技選手権大会の男女棒高跳決勝で8位入賞した計16名であった。分析試技は、各競技者の最終有効試技とした。なお、男女ともに最大重心高が高かった競技者順にラベリングした。

跳躍の様子は、競技場の観客席上段に設置した2台のカメラ（GH-5s 2台、Panasonic社製；フレームレート120 fps、露光時間1/1000 s）を用いて撮影した。2台のカメラは、踏切足接地時で同期した。ボックス奥の上縁中点を原点として、助走の進行方向をY軸の正方向、鉛直上向きをZ軸の正方向、Y軸とZ軸の外積をX軸の正方向と定義した（図1）。キャリブレーションは、X軸方向に7.0 m、Y軸方向に10.0 m、Z軸方向に7.0 mの範囲で行った（図1）。男子棒高跳決勝の標準誤差は、X軸で0.014 m、Y軸で0.019 m、Z軸で0.010 mであった。女子棒高跳決勝の標準誤差は、X軸で0.019 m、Y軸で0.017 m、

Z軸で0.009 mであった。踏切2歩前からバークリアランスまでを撮影し、動作解析ソフト（Frame-DIAS VI, Q's fix社製）を用いて、撮影した映像上の身体分析点23点を120Hzで手動デジタイズした。デジタイズすることで算出した各カメラ映像上の身体分析点の2次元座標値を用いて、3次元DLT法により、身体分析点の実空間上の3次元座標値を算出した。残差分析法（Wells and Winter, 1980）によって最適遮断周波数（6.00 - 13.08 Hz）を決定し、4次のButterworth型ローパスフィルターを用いて、身体分析点の3次元座標値を平滑化した。平滑化した3次元座標値および阿江（1996）の身体部分慣性係数を用いて、競技者の身体を頭部・体幹・左右の上腕・前腕・手・大腿・下腿・足からなるセグメントリンクモデルにモデル化することで、跳躍動作を分析した。なお、本報告で用いた映像は国立スポーツ科学センタースポーツ医・科学研究事業において収集された。

跳躍に関する基礎的なキネマティクス変数として、先行研究（Kageyuki et al., 2020; Schade et al., 2004; 高松, 1998; 武田ほか, 2006; 武田ほか, 2007）で検討されている下記のキネマティクス変数①～⑤を算出した。

- ①最大重心高：身体重心の座標値Z成分の最大値を、最大重心高と定義した（図2）。
- ②グリップ高：突っ込みからポールリリースまでにおけるボックス最下点の中央から、上グリップまでの距離をポール弦長とし、ポール突っ込み時のポール弦長をグリップ高と定義した（図2）。
- ③抜き：グリップ高からボックスの深さ0.2mを差し引いた距離を有効グリップ高とし、最大重心高から有効グリップ高を差し引いた高さを抜

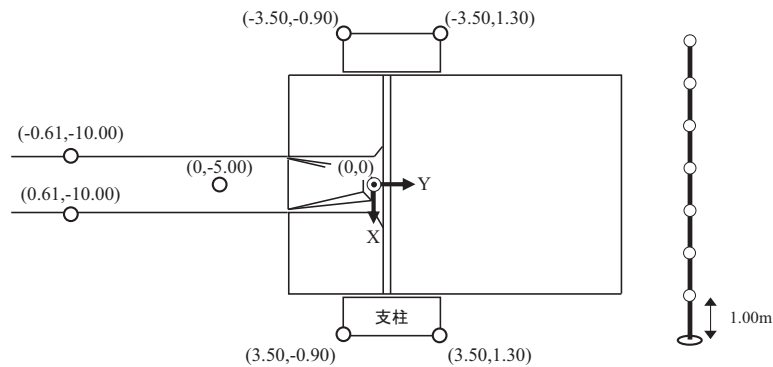


図1 コントロールポリューム

きと定義した (図 2)。

- ④ポール湾曲量：グリップ高からポール弦長を差し引いた距離をポール湾曲量と定義し，その最大値をポール最大湾曲量と定義した。
- ⑤ポール湾曲率：グリップ高に対するポール湾曲量をポール湾曲率と定義し，以下の式より算出した．加えて，ポール湾曲率の最大値をポール最大湾曲率と定義した。

$$\text{ポール湾曲率} = \frac{\text{ポール湾曲量}}{\text{グリップ高}} \times 100$$

各変数の平均値と標準偏差（以下，「SD」と略す）を算出した．男女世界一流棒高跳競技者の各変数は Schade et al. (2004) より引用し，日本一流棒高跳競技者と世界一流棒高跳競技者の平均値の差は Mann-Whitney の U 検定を用いて検討した．日本一流棒高跳競技者と世界一流棒高跳競技者の差の大きさは効果量を用いて検討した．有意水準は 5% とした．

3. 結果

図 3 には，男子棒高跳決勝で入賞した日本一流男性棒高跳競技者 8 名の跳躍動作をスティックピクチャーで示した．全ての対象者は右手が上握り手となる姿勢で跳躍した．

表 1 には，日本一流男性棒高跳競技者と世界一流男性棒高跳競技者の跳躍に関するキネマティクス変数を示した．日本一流男性棒高跳競技者の最大重心高は 5.48 ± 0.15 m，グリップ高は 4.82 ± 0.10 m，抜きは 0.86 ± 0.22 m，ポール最大湾曲量は 1.45 ± 0.13 m，ポール最大湾曲率は 30.08 ± 2.49 % であった．世界一流男性棒高跳競技者と比較して日本一流男性棒高跳競技者は最大重心高，グリップ高，抜きが有意に低かった (表 1)。

図 4 には，女子棒高跳決勝で入賞した日本一流女性棒高跳競技者 8 名の跳躍動作をスティックピク

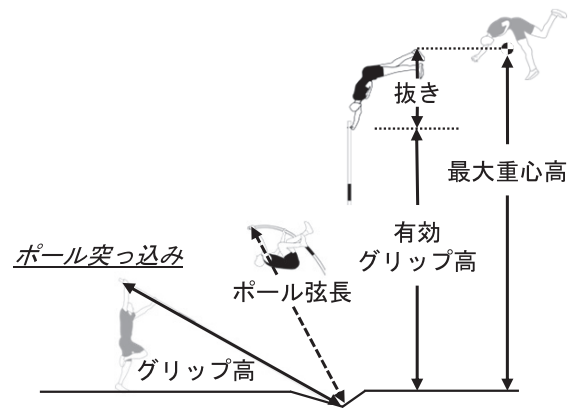


図2 跳躍に関するキネマティクス変数

チャーで示した．全ての対象者は右手が上握り手となる姿勢で跳躍した．

表 2 には，日本一流女性棒高跳競技者と世界一流女性棒高跳競技者の跳躍に関するキネマティクス変数を示した．日本一流女性棒高跳競技者の最大重心高は 4.13 ± 0.16 m，グリップ高は 4.15 ± 0.08 m，抜きは 0.19 ± 0.11 m，ポール最大湾曲量は 1.17 ± 0.10 m，ポール最大湾曲率は 28.13 ± 2.47 % であった．世界一流女性棒高跳競技者と比較して日本一流女性棒高跳競技者は最大重心高，グリップ高，抜きが有意に低かった (表 2)．一方，世界一流女性棒高跳競技者と比較して日本一流女性棒高跳競技者はポール最大湾曲量が有意に大きく，ポール最大湾曲率が有意に高かった (表 2)。

4. 考察

本報告は跳躍に関する基礎的なキネマティクス変数を日本一流棒高跳競技者と世界一流棒高跳競技者と比較することを目的として，2024 年日本選手権の男女棒高跳決勝の動作分析を行った．その結果，世界一流棒高跳競技者と比較して男女ともに日本一流棒高跳競技者は最大重心高，グリップ高，抜きが有意に低いことが明らかとなった (表 1 および 2)。

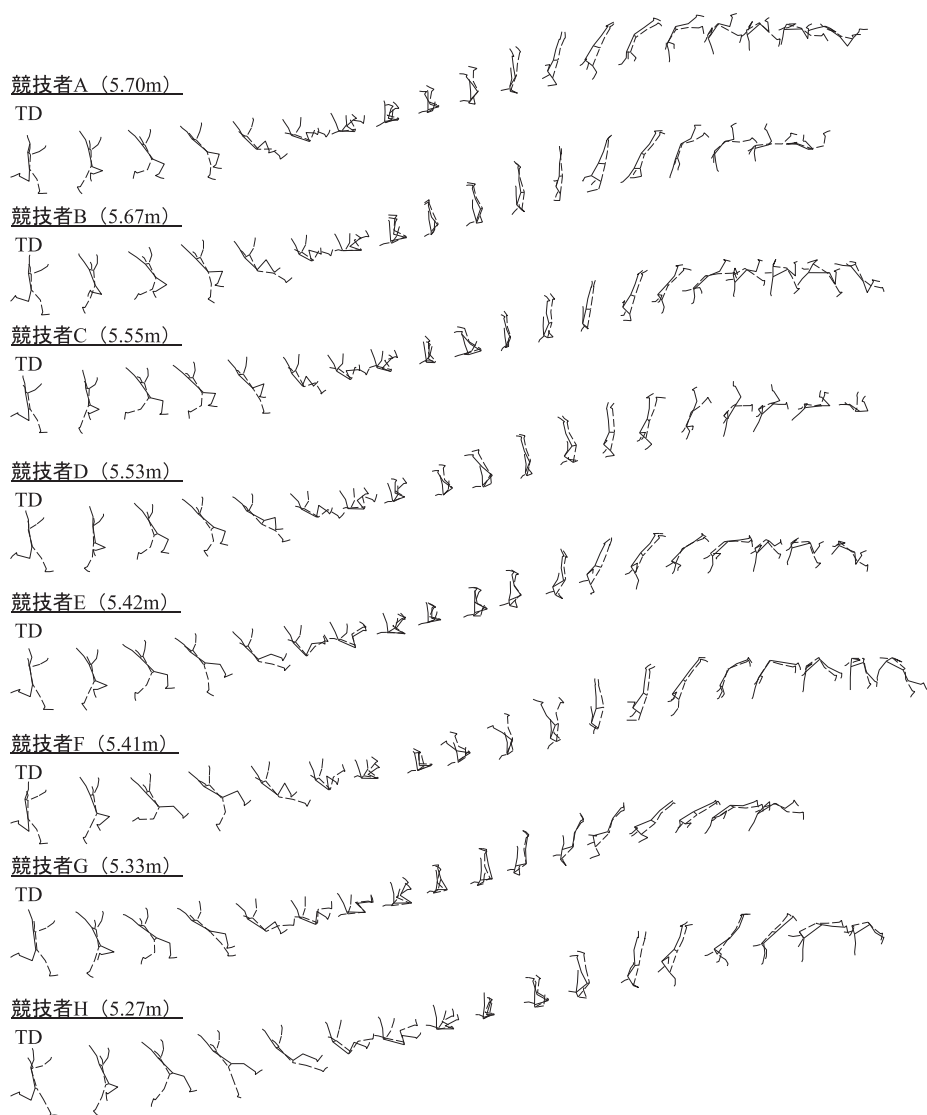


図3 日本一流男性棒高跳競技者の跳躍動作
踏切足接地時（TD）を基準にして，0.1s ごとのスティックピクチャーを図示
実線は右半身，破線は左半身，（）内は記録した最大重心高

表1 日本一流男性棒高跳競技者の跳躍に関するキネマティクス変数

変数	競技者								平均±SD	世界一流 平均±SD	p	効果量
	A	B	C	D	E	F	G	H				
最大重心高（m）	5.70	5.67	5.55	5.53	5.42	5.41	5.33	5.27	5.48±0.15	5.93±0.09	<0.01	3.56
グリップ高（m）	4.79	4.70	4.79	4.79	4.93	4.78	5.02	4.77	4.82±0.10	5.00±0.07	<0.01	2.84
抜き（m）	1.11	1.16	0.97	0.94	0.69	0.84	0.51	0.70	0.86±0.22	1.13±0.05	<0.01	2.67
ポール最大湾曲量（m）	1.38	1.49	1.44	1.42	1.35	1.56	1.69	1.28	1.45±0.13	1.40±0.15	n.s.	-1.24
ポール最大湾曲率（%）	28.72	31.64	30.12	29.66	27.31	32.69	33.75	26.78	30.08±2.49	28.00±2.80	n.s.	-1.69

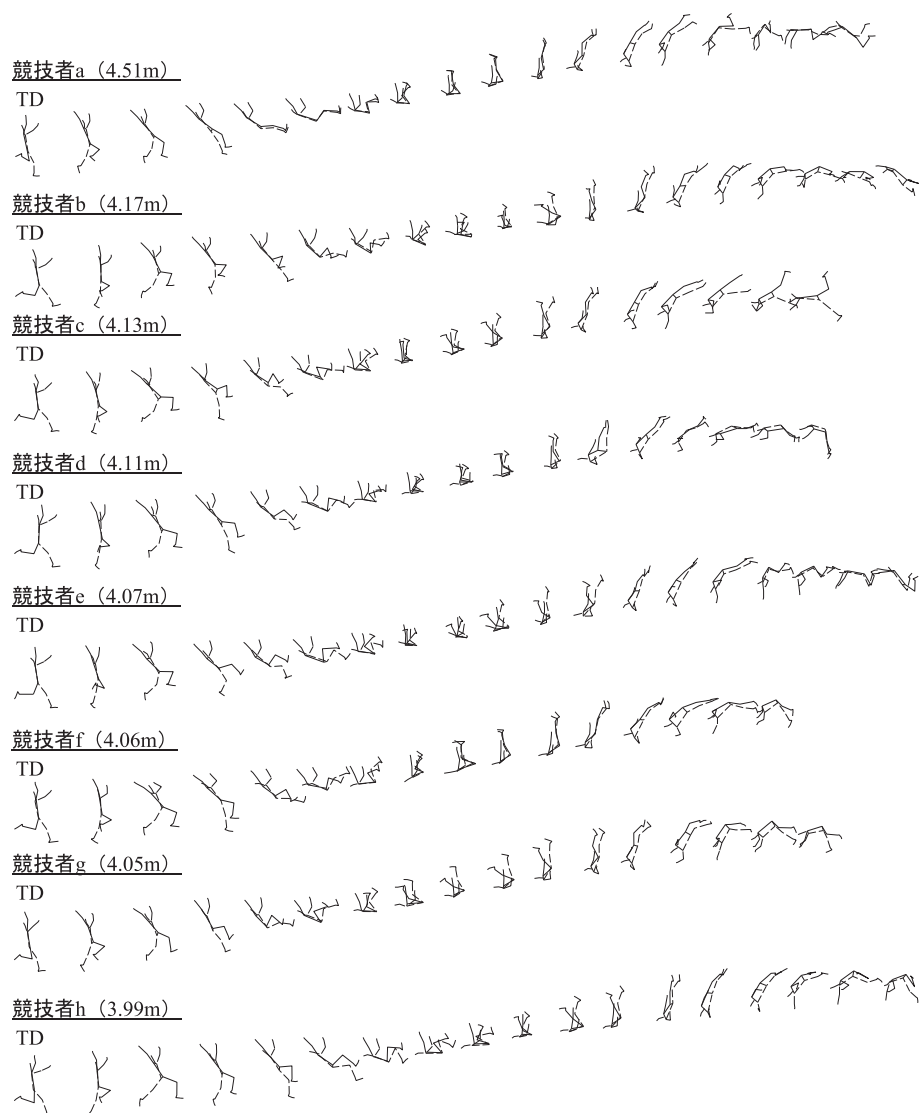


図4 日本一流女性棒高跳競技者の跳躍動作
踏切足接地時 (TD) を基準にして, 0.1s ごとのスティックピクチャーを図示
実線は右半身, 破線は左半身, () 内は記録した最大重心高

表2 日本一流女性棒高跳競技者の跳躍に関するキネマティクス変数

変数	競技者								平均±SD	世界一流 平均±SD	p	効果量
	a	b	c	d	e	f	g	h				
最大重心高 (m)	4.51	4.17	4.13	4.11	4.07	4.06	4.05	3.99	4.13±0.16	4.58±0.08	< 0.01	3.47
グリップ高 (m)	4.30	4.13	4.13	4.17	4.16	4.12	4.01	4.16	4.15±0.08	4.25±0.09	< 0.05	2.31
抜き (m)	0.41	0.24	0.20	0.13	0.11	0.14	0.24	0.03	0.19±0.11	0.53±0.10	< 0.01	3.47
ポール最大湾曲量 (m)	1.25	1.04	1.11	1.06	1.36	1.14	1.19	1.20	1.17±0.10	1.03±0.15	< 0.05	-2.05
ポール最大湾曲率 (%)	28.98	25.04	26.97	25.31	32.64	27.74	29.59	28.80	28.13±2.47	24.14±3.60	< 0.05	-2.22

そこで以下では、世界との差を埋めるための要素を性別ごとに検討する。

日本一流男性棒高跳競技者について

先述の通り、世界一流男性棒高跳競技者と比較して日本一流男性棒高跳競技者は最大重心高、グリップ高、抜きが有意に低かった（表 1）。最大重心高は有効グリップ高と抜きから構成される（村木, 1982）。加えて、グリップ高と抜きの効果量は同程度であったこと（表 1）も踏まえると、世界へ近づくために日本一流男性棒高跳競技者にはグリップ高と抜きの両者を高めることが求められるであろう。

今日では大きく変形する弾性ポールが広く普及しており、ポールが大きく曲がることでポール下端周りにおける競技者 - ポール系全体の慣性モーメントが小さくなり、ポールが立ちやすくなることから、高い位置を握って跳躍できる点が弾性ポールを用いるメリットとして考えられている（Hay, 1993；景行ほか, 2020b；木越ほか, 2007）。ただし、ポール最大湾曲量とポール最大湾曲率は日本一流男性棒高跳競技者と世界一流男性棒高跳競技者との間で有意な差は認められなかった（表 1）。これは裏を返すと、世界一流男性棒高跳競技者は高い位置を握ってもポールを立てることができることを示唆している。ポールが起きやすくなるためには、先述の通り、ポール下端周りにおける系全体の慣性モーメントが小さくなるのが有効である。そして、系全体の慣性モーメントが小さくなるためには、“ポールが大きく曲がること”と“身体が伸びた姿勢になって身体重心がポール下端に近づくこと”が寄与すると考えられる。よって、日本一流男性棒高跳競技者は世界一流男性棒高跳競技者と比較して同じくらいポールが大きく曲がっていたこと（表 1）を踏まえると、ポールが立つ技術の習得が重要であると考えられる。ただし、海外の競技者と比較して一般的に日本人棒高跳競技者は形態が小さいため、形態の大きな海外競技者の技術を日本人競技者がそのまま導入することは難しい可能性があり、日本人の形態に適した優れた技術の習得や検討が今後求められるであろう。

一方、淵本（1992）は、ポールには復元するのに必要以上のエネルギーが蓄えられていたことを報告し、この過剰に蓄積されたエネルギーを超過弾性エネルギーと定義している。この超過弾性エネルギーは競技者の身体をより上方に跳ね上げる能力を指し、超過弾性エネルギーが大きいほど抜きが高く、競技者の体重に対してポールが硬いほど超過弾性エネルギーが大きいことが報告されている（淵本,

1992）。世界一流男性棒高跳競技者は日本一流男性棒高跳競技者と比較して抜きが高かったことから（表 1）、本研究の結果は日本一流男性棒高跳競技者がより硬いポールを用いることの必要性を示唆している。また、ポールが完全に復元する時点（ポールストレート）付近で身体重心最大鉛直速度は出現し、身体重心最大鉛直速度が高い競技者ほど最大重心高が高いことが報告されている（高松, 1998；景行ほか, 2020a）。加えて、身体重心最大鉛直速度が高い競技者はポール伸展局面における身体重心鉛直速度増加量が大きいことが報告されている（景行ほか, 2020a）。ただし、身体重心最大鉛直速度とポール伸展局面におけるボックス反力鉛直成分の力積との間に有意な相関関係は認められなかった（景行ほか, 2020a）。これらの結果を踏まえると、抜きの向上にはポール復元時の反発を競技者が上手く受け止め、鉛直上向きの運動へと繋げることが重要であると考えられる。ポール復元時の反発を受け止めることに関して、上半身の筋群が共収縮して固めること（stabilizing）の重要性が示されているほか（Frère et al., 2012a）、ポール伸展局面における身体重心鉛直速度増加量が大きい競技者は、ポール湾曲局面における体幹部の後方回転が大きい（より水平位になっていた）ことが報告されている（景行ほか, 2020a）。すなわち、ポールが復元を開始する時にはボックス反力の作用線上に身体重心を位置させる身体操作が有効であると考えられ、ポールが立ちながらもポール復元時の反発を上手く受け止められるような技術の習得と検討が今後求められるであろう。

以上を踏まえると、日本一流男性棒高跳競技者は、“①高い位置を握ってもポールが立つ技術の習得によるグリップ高の向上”ならびに“②硬いポールを曲げてポールの反発を強くしながらもその反発をもらう技術の習得による抜きの向上”が今後期待される。

日本一流女性棒高跳競技者について

続いて、日本一流女性棒高跳競技者に着目する。世界一流女性棒高跳競技者と比較して日本一流女性棒高跳競技者は最大重心高、グリップ高、抜きが有意に低かった（表 2）。そのため、世界へ近づくためには日本一流女性棒高跳競技者もグリップ高と抜きの両者を高めることが求められるであろう。ただし、男性棒高跳競技者とは異なり、女性棒高跳競技者はグリップ高の効果量と比較して抜きの効果量が大きかったことは特筆すべき点である（表 2）。先述の通り、超過弾性エネルギーが大きいほど抜きが

高く、競技者の体重に対してポールが硬いほど超過弾性エネルギーが大きいことが報告されている（淵本, 1992）。加えて、世界一流女性棒高跳競技者と比較して日本一流女性棒高跳競技者はポール最大湾曲量が有意に大きく、ポール最大湾曲率が有意に高かった（表2）。これらを踏まえると、日本一流女性棒高跳競技者が用いるポールは柔らかすぎる可能性が考えられる。Schade et al. (2004) は、世界一流男性棒高跳競技者と比較して世界一流女性棒高跳競技者はポール最大湾曲量が小さく、ポール最大湾曲率も低かったことを報告している。さらに Schade et al. (2004) は、世界一流女性棒高跳競技者は世界一流男性棒高跳競技者と比較して踏切足離地直後の身体重心周りにおける角運動量の増大が顕著であったことを報告している。踏切直後に意図せぬタイミングで身体が後方回転してしまう現象は振られる（passive swing）と呼ばれ、ポールの湾曲に負の影響があると考えられている。よって、Schade et al. (2004) は、世界一流男性棒高跳競技者と比較して世界一流女性棒高跳競技者はポールが硬すぎることで、肩関節周りや身体前面の筋力ならびにそれら筋群のエネルギー貯蓄能力が低いことをポールの湾曲が小さかった要因として挙げている。踏切足離地以降、ポールに作用する力はグリップを介して身体に作用することから、上半身の筋力や動作の重要性は研究・現場問わず言及されており（Frère et al., 2012b）、より硬いポールの使用を目指したトレーニングが女性競技者には特に求められるであろう。なお、一般的に、男性と比較して女性は肩幅が狭く（リオード・フェイゲンバウム, 2018）、肩関節周りや身体前面の筋力ならびにそれら筋群のエネルギー貯蓄能力には解剖学的な影響も含まれる。そのため、Schade et al. (2004) は、世界一流女性棒高跳競技者の技術は世界一流男性棒高跳競技者の低い跳躍をそのまま当てはめたものではなく、跳躍の戦略やポールの弾性との関わり方がそもそも性別で異なっている可能性を示唆している。したがって、動作や体力の観点から男女の棒高跳競技者で何が共通し異なるかを検討することは、女性棒高跳競技者のパフォーマンス向上に資する可能性があることから、女性競技者を対象とした研究や分析も今後必要になるであろう。

以上を踏まえると、日本一流女性棒高跳競技者は、“①高い位置を握ってもポールが立つ技術の習得によるグリップ高の向上”ならびに“②硬いポールを曲げてポールの反発を強くしながらもその反発をもらう技術の習得による抜きの向上”が今後期待され

る。そして、日本一流女性棒高跳競技者は後者の必要性が高いと考えられる。

5. まとめ

本報告では、2024年日本選手権の男女棒高跳決勝で8位入賞した16名を対象に動作分析を行った。

その結果、世界一流棒高跳競技者と比較して、男女ともに日本一流棒高跳競技者は最大重心高、グリップ高、抜きが有意に低かった。一方、世界一流男性棒高跳競技者と比較して日本一流男性棒高跳競技者はポール最大湾曲量とポール最大湾曲率が同程度であった。それに対し、世界一流女性棒高跳競技者と比較して日本一流女性棒高跳競技者はポール最大湾曲量が有意に大きく、ポール最大湾曲率も有意に高かった。これらの結果は、“①高い位置を握ってもポールが立つ技術の習得によるグリップ高の向上”ならびに“②硬いポールを曲げてポールの反発を強くしながらもその反発をもらう技術の習得による抜きの向上”が男女に共通して求められることを示唆している。

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慣性係数. *Japanese Journal of Sports Science*, 15(3) : 155-162.
- Frère, J., Göpfert, B., Hug, F., Slawinski, J. and Tourny-Chollet, C. (2012a) Catapult effect in pole vaulting: Is muscle coordination determinant?. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22 (1): 145-152.
- Frère, J., Göpfert, B., Slawinski, J., and Tourny-Chollet, C. (2012b) Effect of the upper limbs muscles activity on the mechanical energy gain in pole vaulting. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 22(2): 207-214.
- Hay, J. G. (1993) *The biomechanics of sports techniques* (4th edition). New Jersey: Prentice Hall.
- 淵本隆文 (1992) スポーツ用具に注入されるエネルギーを測る—棒高跳ポールの場合—. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 11(3) : 188-193.
- 景行崇文・松林武生・浅井武・大山卞圭悟・木越清信 (2020a) 棒高跳における身体重心の最大鉛直

- 速度へ影響を及ぼす力学的要因. 陸上競技学会誌, 18 : 17-26.
- 景行崇文・松林武生・浅井武・大山卞圭悟・木越清信 (2020b) 棒高跳におけるポールの曲がりとお尻グリップの動きとの関係. 体育学研究, 65 : 415-426.
- Kageyuki, T., Matsubayashi, T., Yamamoto, T., Kobayashi, F., Asai, T., Ohyama-Byun, K., and Kigoshi, K. (2020) Mechanical Factors Influencing Bending of Pole in Pole Vault. International Journal of Sport and Health Science, 18 : 134-143.
- 木越清信・小林史明・下嶽進一郎 (2007) 棒高跳におけるグリップに影響を及ぼす技術的要因 - 日本人競技者はグリップ高を高めるために何をすべきか? -. 陸上競技学会誌, 6 : 89-94.
- リオード・フェイゲンバウム (2018) 年齢差・性差とレジスタンスエクササイズへの影響. 篠田邦彦・岡田純一監修, ストレングストレーニング & コンディショニング第4版. ブックハウス・エイチディ, pp. 149-170.
- 村木征人 (1982) 棒高跳. 大石三四郎および浅田隆夫 編著 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, pp. 380-443.
- Schade, F., Arampatzis, A., Brüggemann, G.-P., and Komi, P. V. (2004) Comparison of the men's and the women's pole vault at the 2000 Sydney Olympic Games. Journal of Sports Sciences, 22(9): 835-842.
- 高松潤二 (1998) 棒高跳のポール支持局面の跳躍動作に関するバイオメカニクス的研究: 最大重心高増大のための技術的要因. 筑波大学博士 (体育科学) 学位論文
- 武田理・村木有也・小山宏之・阿江通良 (2006) 男子棒高跳における重心水平速度変化およびポール湾曲度. 陸上競技研究紀要, 2 : 144-146.
- 武田理・小山宏之・吉原礼・阿江通良 (2007) エネルギー変換率からみた男子棒高跳選手の跳躍技術に関するバイオメカニクスの分析. 陸上競技研究紀要, 3 : 16-24.
- Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. Human Locomotion, 1: 36-41.