

2023年日本選手権男女棒高跳決勝の上位入賞者の 跳躍および踏切に関するキネマティクス変数

景行 崇文¹⁾ 高松 潤二²⁾ 柴田 篤志³⁾ 荻山 靖⁴⁾ 小山 宏之⁵⁾

1) 国立スポーツ科学センター 2) 流通経済大学 3) 新潟医療福祉大学 4) 山梨学院大学
5) 京都教育大学

1. はじめに

2023年度、諸田選手が2度も女子棒高跳の日本記録を更新する活躍をおさめ、国内における棒高跳への関心が高まっている様子が伺える。その一方、2023年世界選手権の優勝者と比較して、女子棒高跳の日本記録は約40cm低いことに加え、男子棒高跳は17年間も日本記録が更新されていない状況に鑑みると、依然として、男女ともに日本棒高跳界の競技レベルは世界と大きな差がある。

他方、競技会で行った日本一流棒高跳競技者の跳躍動作に関する分析は、2007年の武田ほか(2007)の報告以降見当たらない。日本棒高跳界が世界に近づく一歩として、日本人棒高跳競技者の現状を明らかにすることは重要であると考えられる。

そこで本報告では、男女の日本一流棒高跳競技者の基礎的な跳躍および踏切に関するキネマティクス変数を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

分析対象者は、2023年日本陸上競技選手権大会の男女棒高跳決勝で1～3位に入賞した7名であり、分析試技は、各対象者の最終有効試技とした。なお、男子決勝では、無効試技が同数だったため、3位が2名いた。

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およびGH-6, 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(Touch-down, 以下「TD」と表記)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軸に5.0 m, Y軸に9.2 m, Z軸に7.0 mの範囲で行い(図1)、標準誤差の平均値はX軸で0.015 m, Y軸で0.010 m, Z軸で0.009 mだった。踏切2歩前から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60Hzで手動デジタル化した。デジタル化した身体分析点の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(Winter, 1980)によって最適遮断周波数(3.72 - 6.24Hz)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、対象者の身体を頭部・体幹・左右の上腕・前腕・手・大腿・下腿・足からなるリンクセグメントモデルにモデル化することで、跳躍動作を分析した。なお、本測定は、科学研究費助成事業(研究課題: 21K21276)の一部として実施した。

先行研究(景行ほか, 2020; 高松, 1998; 武田ほか, 2006; 武田ほか; 2007)に基づき、跳躍に関するキネマティクス変数として、以下の変数を算出した(図2a)。

- 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2a)。
- 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、上グリップ側の第3中手骨頭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2a)。
- ③ポール湾曲量: グリップ高からポール弦長を差し引いた長さ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。
- ④ポール湾曲率: グリップ高に対するポール湾曲

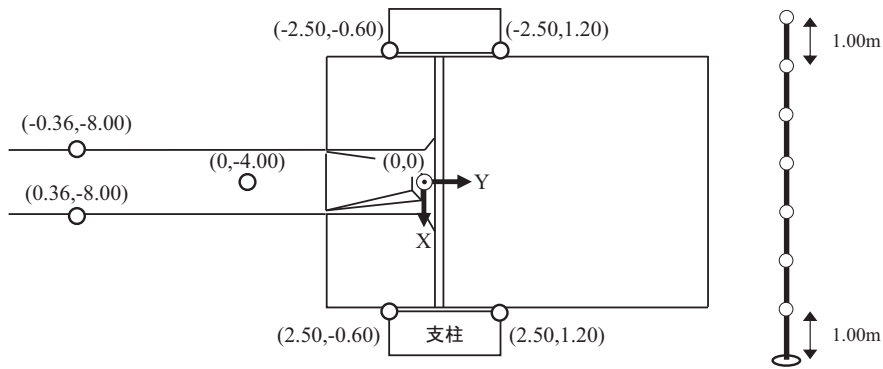


図1 キャリブレーションのコントロールボリューム

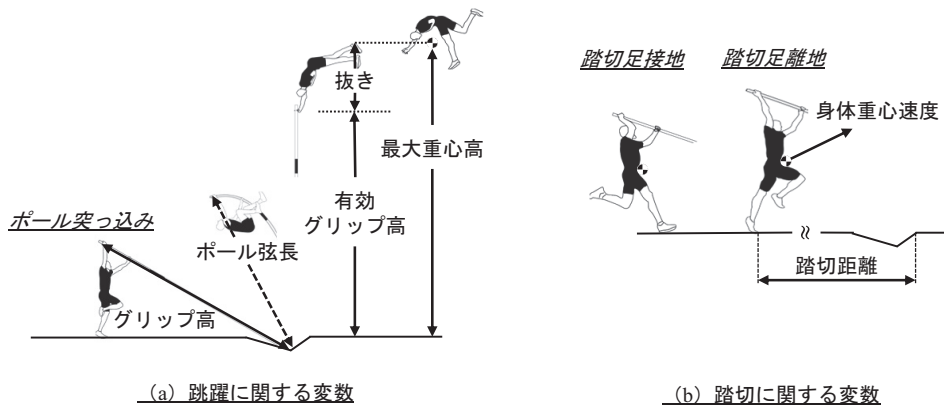


図2 跳躍および踏切に関するキネマティクス変数

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。

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

- ⑤ 身体重心の最大鉛直速度：身体重心の座標値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 Z 成分の最大値を最大鉛直速度と定義した。
- ⑥ 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きと定義した (図 2a)。

同様に、踏切に関するキネマティクス変数として、以下の変数を算出した (図 2b)。

- ⑦ TD 時および踏切足離地 (Take-off, 以下「TO」と表記) 時の身体重心速度：TD 時および TO 時における身体重心速度を抽出した (図 2b)。
- ⑧ TD 時から TO 時まで (以下、「踏切局面」と表記) における身体重心速度変化量：TO 時の身体重心速度から、TD 時の身体重心速度を差し引くことで、踏切局面における身体重心速度変化量を算出した。
- ⑨ 踏切距離：TO 時における踏切足側つま先の Y

座標を踏切距離と定義した (図 2b)。

3. 結果

図 3 には、男子棒高跳決勝で上位入賞した 4 名が行った跳躍動作のスティックピクチャーを示した。3 位の石川選手のみ左手が上グリップとなる姿勢で跳躍し、他の 3 名は右手が上グリップとなる姿勢で跳躍した。

図 4 には、男子棒高跳決勝で優勝した柄澤選手のポール湾曲率の経時変化を示した。ポール湾曲率は、山なりの軌跡を描いた。

同様に、図 4 には、男子棒高跳決勝で優勝した柄澤選手の身体重心速度の経時変化を示した。身体重心速度 Y 成分は、TD 時からポールが最大に湾曲するまで減少し続け、ポールが最大に湾曲した後は、速度が維持された。身体重心速度 Z 成分は、踏切局面で大きく増加し、TO 後一時的に増加が緩やかになった。その後、ポールが最大に湾曲する直前で再度大きく増加し、ポールが完全に復元する付近で身体重心速度 Z 成分は最大値を迎えた。身体重心速度 X 成分は、他の 2 成分と比較して、緩やかな変化を示した。

他の 3 名についても、柄澤選手と同様の身体重心

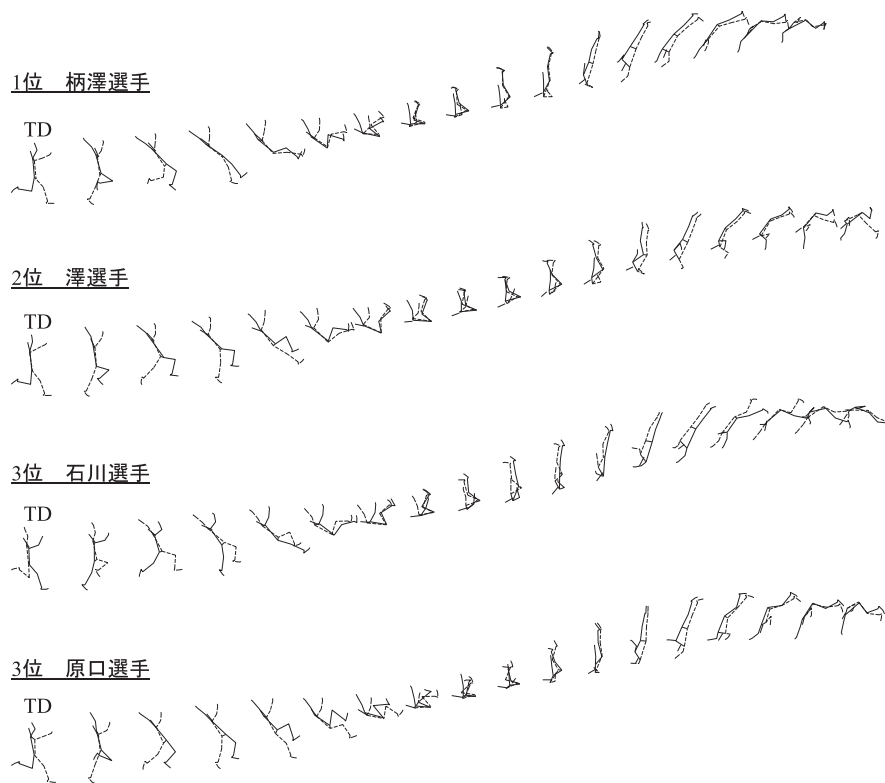


図3 日本一流男性棒高跳競技者の跳躍動作
TD時を基準にして、0.1sごとのスティックピクチャーを図示
実線は右半身，破線は左半身

速度およびポール湾曲率の経時変化を示した。

表1には、男子棒高跳決勝で上位入賞した4名の公式記録と跳躍に関するキネマティクス変数を示した。柄澤選手は、対象者の中で最も高い最大重心高を記録した。加えて、対象者の中で柄澤選手は、グリップ高が最も低かったのに対し、抜きは最も高かった。一方、石川選手は、対象者の中でポール最大湾曲量が最も大きく、ポール最大湾曲率が最も高かった。

表2には、男子棒高跳決勝で上位入賞した4名の踏切に関するキネマティクス変数を示した。対象者の中で石川選手は、TD時およびT0時の身体重心速度Y成分が最も大きく、踏切局面における身体重心速度Y成分の変化量が最も小さかった。一方、柄澤選手の踏切距離は、対象者の中で最も短かった。

図5には、女子棒高跳決勝で上位入賞した3名が行った跳躍動作のスティックピクチャーを示した。3名とも、右手が上グリップとなる姿勢で跳躍した。

図6には、女子棒高跳決勝で優勝した諸田選手の身体重心速度およびポール湾曲率の経時変化を示した。女性競技者についても、男性競技者と同様の身体重心速度およびポール湾曲率の経時変化を示した。

表3には、女子棒高跳決勝で上位入賞した3名の

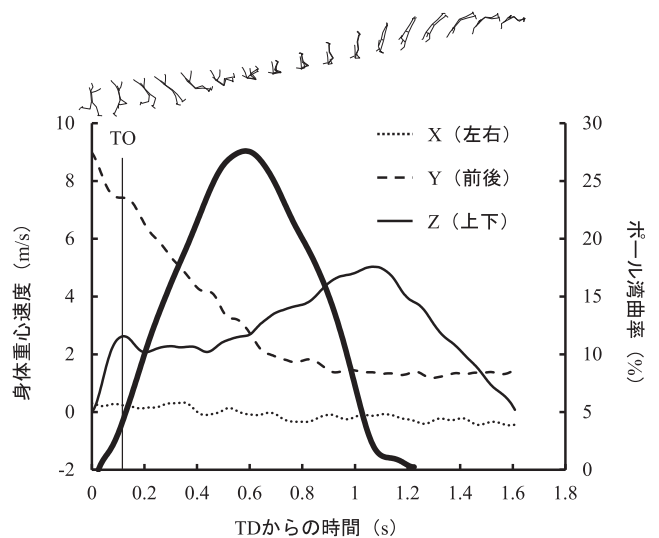


図4 柄澤選手の身体重心速度およびポール湾曲率の経時変化

細線：身体重心速度の経時変化，太線：ポール湾曲率の経時変化

公式記録と跳躍に関するキネマティクス変数を示した。諸田選手は、対象者の中で最も高い最大重心高を記録した。加えて、諸田選手は対象者の中で、グリップ高が最も高く、ポール最大湾曲量が最も大きかった。

表4には、女子棒高跳決勝で上位入賞した3名の

表1 日本一流男性棒高跳競技者の公式記録と跳躍に関するキネマティクス変数

競技者	公式記録 (m)	最大重心高 (m)	グリップ高 (m)	ポール最大湾曲量 (m)	ポール最大湾曲率 (%)	身体重心 最大鉛直速度 (m/s)	抜き (m)
1位 柄澤選手	5.41	5.67	4.75	1.31	27.59	5.03	1.12
2位 澤選手	5.41	5.55	4.90	1.44	29.47	4.58	0.86
3位 石川選手	5.31	5.60	4.81	1.61	33.44	4.87	0.99
3位 原口選手	5.31	5.49	4.78	1.31	27.44	4.54	0.90

表2 日本一流男性棒高跳競技者の踏切に関するキネマティクス変数

競技者	TD時における 身体重心速度 Y成分 (m/s)	TO時における 身体重心速度 Y成分 (m/s)	踏切局面における 身体重心速度の Y成分変化量 (m/s)	踏切距離 (m)
1位 柄澤選手	8.98	7.42	-1.56	3.77
2位 澤選手	9.00	7.46	-1.53	4.09
3位 石川選手	9.45	7.95	-1.50	4.34
3位 原口選手	8.98	7.20	-1.78	4.02

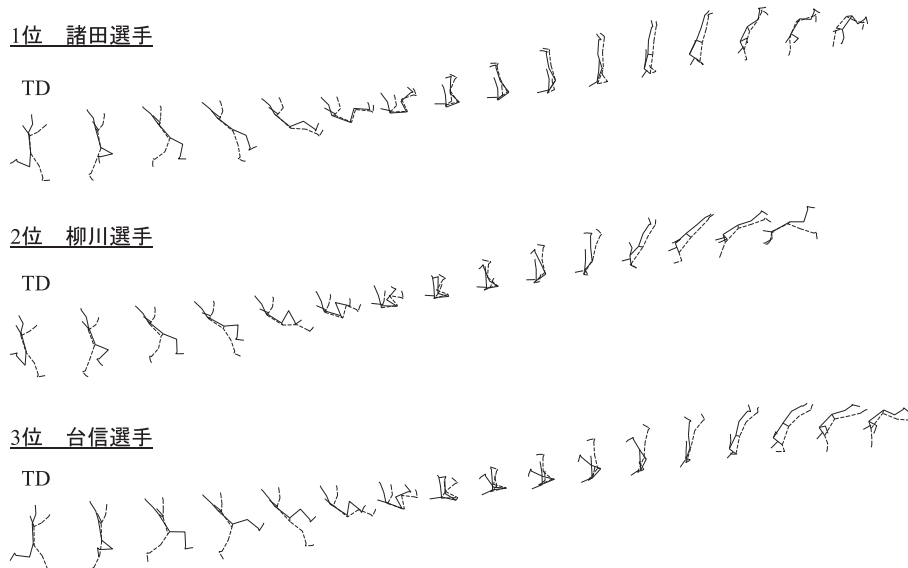


図5 日本一流女性棒高跳競技者の跳躍動作
TD時を基準にして、0.1s ごとのスティックピクチャーを図示
実線は右半身，破線は左半身

踏切に関するキネマティクス変数を示した。対象者の中で諸田選手は、踏切局面における身体重心速度Y成分の変化量が最も小さく、踏切距離が最も遠かった。

4. 考察

棒高跳は、ポールを用いて跳び越えたバーの高さを争う種目であるため、身体を高く上昇させること

は、パフォーマンスの高低に強く影響する。そこで、以下では、棒高跳の最大重心高と強く関係する変数について、先行研究を踏まえながら男女に分けて考察する。

4.1 男性競技者について

Schade et al. (2004) は、オリンピック競技大会の男子棒高跳決勝の試技を分析し、決勝進出者の最大重心高が 5.93 ± 0.09 m (5.77 - 6.05 m)、グ

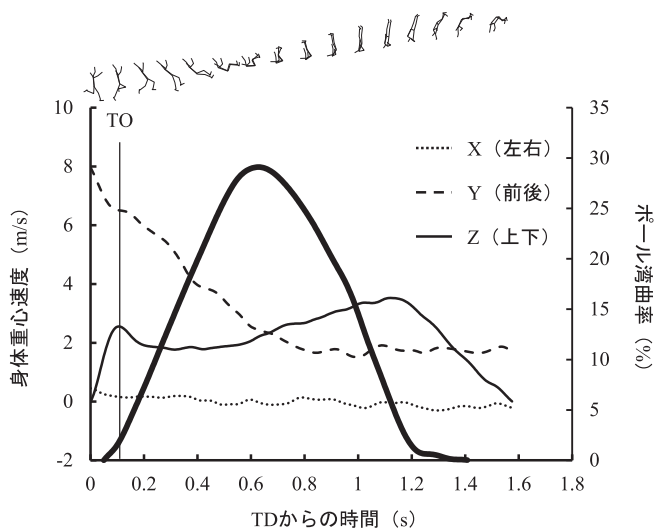


図6 諸田選手の身体重心速度およびポール湾曲率の経時変化
細線：身体重心速度の経時変化，太線：ポール湾曲率の経時変化

リップ高が 5.00 ± 0.07 m (4.85 - 5.10 m)，ポール最大湾曲量が 1.40 ± 0.15 m (1.28 - 1.76 m)，ポール最大湾曲率が 28.0 ± 2.80 % (25.5-34.5 %)，抜きが 1.13 ± 0.05 m (1.05 - 1.21 m) だったことを報告している。そこで表1を見ると，日本一流男性棒高跳競技者の4名は，世界一流男性棒高跳競技者と同程度のポール最大湾曲量およびポール最大湾曲率を記録した(表1)。特に，石川選手はポール最大湾曲量が1.61 mを記録し，世界一流男性棒高跳競技者と比較しても，大きくポールが湾曲した(表1)。加えて，澤選手のグリップ高(4.90m)や，柄澤選手の抜き(1.12m)も世界一流男性棒高跳競技

者と同程度であり，日本一流男性棒高跳競技者は世界一流レベルの能力を要していることが分かる(表1)。

一方，対象者の中で澤選手は最も抜きが低く，柄澤選手はグリップ高が最も低いことは注目すべき点である(表1)。すなわち，世界に近づくためには，グリップ高は4.90m程度，抜きは1.10m程度を両立する必要があり，澤選手は抜きの向上が，柄澤選手はグリップ高の向上が技術的な課題であることが逆説的に示唆された。

さらに，原口選手と石川選手はポール最大湾曲量が0.30m異なるにも関わらず，グリップ高の差が0.03mと同程度であることも注目すべき点である(表1)。高松(1998)は，ポールを大きく湾曲させてポール伸展局面の身体重心鉛直速度が大きい“ポール反発型”と，あまりポールを湾曲させずにポール湾曲局面の身体重心鉛直速度が相対的に大きい“起こし回転型”の跳躍タイプを提案している。これを踏まえると，ポールを大きく曲げた跳躍をする石川選手はポール反発型，ポールの湾曲が対象者の中で最も小さい原口選手は起こし回転型に該当すると考えられる。ただし，高松(1998)は，ポール反発型の跳躍は，最大重心高を高くするには有効である一方，クリアランスの技術が難しくなること，起こし回転型の跳躍は，クリアランスを行いやすい一方，バー上の重心高が低くなる傾向にあることに言及している。すなわち，ポール反発型・起こし回転型ともに一長一短があることを理解した上で，両跳躍タイプの良い点を相補的に跳躍に組み込むことが，グリップ高と抜きの向上を図る上で重要になる

表3 日本一流女性棒高跳競技者の公式記録と跳躍に関するキネマティクス変数

競技者	公式記録 (m)	最大重心高 (m)	グリップ高 (m)	ポール最大湾曲量 (m)	ポール最大湾曲率 (%)	身体重心最大鉛直速度 (m/s)	抜き (m)
1位 諸田選手	4.20	4.42	4.18	1.22	29.10	3.52	0.43
2位 柳川選手	4.10	4.20	3.99	0.97	24.35	3.50	0.41
3位 台信選手	4.10	4.28	4.17	1.13	27.10	3.07	0.31

表4 日本一流女性棒高跳競技者の踏切に関するキネマティクス変数

競技者	TD時における身体重心速度 Y成分 (m/s)	TO時における身体重心速度 Y成分 (m/s)	踏切局面における身体重心速度の Y成分変化量 (m/s)	踏切距離 (m)
1位 諸田選手	7.96	6.50	-1.46	3.41
2位 柳川選手	7.90	6.21	-1.68	3.23
3位 台信選手	7.83	6.06	-1.77	3.21

と考えられる。ただし、異なる跳躍タイプを取り入れることは、跳躍の破断を引き起こすリスクがあるため、十分な注意が必要となる。

他方、棒高跳は助走で獲得した運動エネルギーを、ポールを介して位置エネルギーへと変換する競技である(高松, 2003)。そのため、最大重心高が高いほど、ポールの湾曲が大きく、T0時の身体重心速度が高いことが報告されている(景行ほか, 2020; 武田ほか, 2006; 武田ほか, 2007)。すなわち、踏切に関するキネマティクス変数は、棒高跳のパフォーマンスに強く影響する。そこで、続いては、踏切に関する変数に着目する。

Gravestock and Bissas (2018a) は、2017年世界選手権の男子棒高跳決勝の動作を分析し、決勝進出者のT0時における身体重心合成速度が 8.31 ± 0.58 m/s (7.43 - 9.37m/s) であり、TD時における身体重心速度ベクトルと地面とがなす角度が $17 \pm 4^\circ$ ($14 - 24^\circ$) だったことを報告している。そこで、Gravestock and Bissas (2018a) の報告を基に筆者が計算したところ、2017年世界選手権の男子棒高跳決勝に進出した世界一流男性棒高跳競技者のT0時の身体重心速度Y成分は、 7.91 ± 0.64 m/s (6.98 - 9.05 m/s) だった。そこで表2を見ると、対象者の中で石川選手は、T0時の身体重心速度Y成分が 7.95 m/s と最も高く、世界一流男性棒高跳競技者の平均と同程度だった。このように、高い身体重心速度を保持して踏切れることが、石川選手が大きくポールを湾曲できる要因であると考えられる。

一方、柄澤選手・澤選手・原口選手は、石川選手と比較してT0時の身体重心速度Y成分が低かった(表2)。特に、柄澤選手は石川選手と比較して、TD時およびT0時の身体重心速度Y成分が約 0.5 m/s 低かったにも関わらず、記録した最大重心高は、柄澤選手が石川選手と比較して 0.07 m 高かったことは特筆すべき点である。先述の通り、棒高跳の跳躍では、ポールを介して、身体の運動エネルギーが位置エネルギーへと変換される。ただし、淵本ほか(1994) は、世界一流男性棒高跳競技者を対象にした場合、T0時における身体の運動エネルギーから最高点における身体の位置エネルギーへのエネルギー変換率と助走速度との間に有意な負の相関関係が認められたことを報告している。そして、その原因として、助走速度の増加に伴って、ポールがボックスにぶつかる際の衝撃が大きくなり運動エネルギーがロスすることや、T0後に競技者が発揮できるエネルギー(筋の能動的な仕事量)が低下することが考えられる(Arampatzis et al., 2004; 淵本, 1994)。すな

わち、柄澤選手は石川選手と比較して、身体の運動エネルギーを位置エネルギーへと変換する技術が優れている可能性がある。しかしながら、本報告では、エネルギー変換の過程やエネルギー変換と関係する具体的な動作まで言及することができなかつたため、それらの可能性の提示に留める。裏を返すと、助走速度の高い石川選手は、運動エネルギーから位置エネルギーへの変換率を高めることができれば、さらに高く跳ぶことのできる可能性を有している。したがって、効果的なエネルギー変換と関係する要因の解明を今後していく必要がある。

4.2 女性競技者について

続いて、女性競技者に着目する。Schade et al. (2004) は、オリンピック競技大会の女子棒高跳決勝の試技を分析し、決勝進出者の最大重心高が 4.58 ± 0.08 m (4.45 - 4.71 m)、グリップ高が 4.25 ± 0.09 m (4.13 - 4.38 m)、ポール最大湾曲量が 1.03 ± 0.15 m (0.78 - 1.26 m)、ポール最大湾曲率が 24.2 ± 3.60 % (18.8 - 30.0 %)、抜きが 0.53 ± 0.10 m (0.35 - 0.67 m) だったことを報告している。加えて、2017年世界選手権の女子棒高跳決勝の動作を分析したGravestock and Bissas (2018b) は、決勝進出者の最大重心高が 4.77 ± 0.09 m (4.61 - 4.94 m)、グリップ高が 4.22 ± 0.11 m (4.05 - 4.42 m)、抜きが 0.75 ± 0.12 m (0.61 - 1.04 m) だったことを報告している。そこで表2を見ると、日本一流女性棒高跳競技者は、世界一流女性棒高跳競技者と同程度のポール最大湾曲量およびポール最大湾曲率を記録した(表3)。特に、諸田選手と台信選手は、世界一流女性棒高跳競技者と比較して、大きくポールが湾曲した(表3)。加えて、諸田選手および台信選手のグリップ高は、世界一流女性棒高跳競技者と同程度だった(表3)。

一方、2017年世界選手権の女子棒高跳決勝に進出した世界一流女性棒高跳競技者と比べて、対象者3名の抜きは低かった(表3)。抜きと身体重心の最大鉛直速度との間には有意な正の相関関係が認められている(高松, 1998)。加えて、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いこと、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)。よって、日本一流女性

棒高跳競技者のグリップ高やポール湾曲量が世界一流女性棒高跳競技者と同程度だったことを踏まえると、硬いポールを用いることが日本一流女子棒高跳競技者の共通した技術的な課題であると考えられる。

他方、柳川選手は台信選手と比較してグリップ高が0.19m低かったにも関わらず、記録した最大重心高の差は0.08mだった(表3)。前節で言及した跳躍タイプに鑑みると、柳川選手は起こし回転型の跳躍タイプの可能性がある。柳川選手は、インターハイ優勝、鹿児島国体成年の部で2位に入賞するなど、2023年度は安定かつ好成績をおさめている。このような活躍も、クリアランスの行いやすい起こし回転型の跳躍タイプが一因である可能性が考えられる。

続いて、踏切に関する変数に着目する。2017年世界選手権の女子棒高跳決勝の動作を分析したGravestock and Bissas (2018b)は、決勝進出者のT0時における身体重心合成速度が 6.98 ± 0.52 m/s (5.96 - 7.68 m/s)であり、TD時における身体重心速度ベクトルと地面とがなす角度は $20 \pm 4^\circ$ ($14 - 26^\circ$)だったことを報告している。そこで、Gravestock and Bissas (2018b)の報告を基に筆者が計算したところ、2017年世界選手権の女子棒高跳決勝に進出した世界一流女性棒高跳競技者のT0時の身体重心速度Y成分は、 6.56 ± 0.51 m/s (5.73 - 7.17 m/s)だった。そこで表4を見ると、対象者の中で諸田選手がT0時の身体重心速度Y成分が6.50 m/sと最も高く、世界一流女性棒高跳競技者の平均と同程度だった。対象者の中で、最もT0時の身体重心速度Y成分が低かった台信選手も、世界一流女性棒高跳競技者と比較して、顕著に低くはなかった(表4)。したがって、硬いポールを扱うことができるよう、女性競技者も男性競技者と同様に、身体の運動エネルギーを位置エネルギーへと効果的に変換する技術や体力の習得が期待される。

5. まとめ

本報告では、2023年日本選手権の男女棒高跳決勝で上位入賞した7名(男性4名、女性3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が低かったのに対し、ポール湾曲量やポール湾曲率は同程度だった。一方、世界一流棒高跳競技者と比較して、日本一流男性棒高跳競技者はグリップ高または

抜きが低かったのに対し、女性日本一流棒高跳競技者は抜きだけが低かった。踏切に関して、世界一流棒高跳競技者と比較して、男女の日本一流棒高跳競技者は、踏切足離地時の身体重心速度Y成分に顕著な違いは見受けられなかった。この結果は、踏切足離地後に行う身体の運動エネルギーから位置エネルギーへの変換に、世界との差があ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: 155-162.
- Arampatzis, A., Schade, F., and Brüggemann, G.-P. (2004) Effect of the pole-human body interaction on pole vaulting performance. *Journal of Biomechanics*, 37(9): 1353-1360.
- 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一棒高跳ポールの場合一. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 11(3): 183-193.
- 淵本隆文・高松潤二・阿江通良 (1994) 棒高跳の動作学的力学的分析. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班(編) 世界一流陸上競技者の技術(第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書). ベースボールマガジン社, 東京, pp.193-204.
- Gravestock, H. and Bissas, A. (2018a) Biomechanical report for the IAAF World Championships London 2017 - Pole Vault Men's, IAAF: Monaco.
- Gravestock, H. and Bissas, A. (2018b) Biomechanical report for the IAAF World Championships London 2017 - Pole Vault Women's, IAAF: Monaco.
- 景行崇文・松林武生・浅井武・大山卞圭悟・木越清信 (2020) 棒高跳におけるポールの曲がりとおのりグリップの動きとの関係. *体育学研究* 65: 415-426.
- 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の研究: 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

高松潤二 (2003) 棒高跳びの動作. 体育の科学, 53
(1) : 31-37.

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.