

女子棒高跳選手の跳躍動作のバイオメカニクスの分析

吉原 礼¹⁾ 武田 理¹⁾ 小山 宏之¹⁾ 阿江 通良²⁾
1) 筑波大学大学院 2) 筑波大学体育科学系

Biomechanical analysis of the pole vaulting for woman vaulters

Aya Yoshihara¹⁾ Osamu Takeda¹⁾ Hiroyuki Koyama¹⁾ Michiyoshi Ae²⁾
1) Master's Program in Health and Physical Education, University of Tsukuba
2) Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

Abstract

The purpose of this study was to analyze pole vaulting motion for woman pole vaulters. The subjects were sixteen vaulters including elite woman vaulters, man and woman student vaulters. They were videotaped in official competitions with a VTR camera for two dimensional DLT technique. The result were as follows;

- 1) There were significant relationships of the record to CG velocity ($r = 0.90$, $p < 0.001$) and takeoff angle at the takeoff ($r = -0.80$, $p < 0.01$).
- 2) There was significant relationship in woman vaulters between CG velocity ratio (average CG vertical velocity in the pole straightening phase to that in the pole bending phase) and the maximum pole bending ratio ($r = 0.92$, $p < 0.001$).
- 3) Vaulting types were classified into two: a pole recoiling type was characterized by a great pole bend and recoil, and a pole rotation type was by a smaller bend. Most of woman vaulters analyzed belonged to the pole rotation type.
- 4) The woman vaulters with the elbow angle less than 120° at the takeoff showed great trunk angular velocity immediately after the takeoff. However, their trunk angle of swinging was smaller at the maximum pole bending and at the pole straight than other vaulters.

I. 緒言

女子棒高跳が世界レベルで競われるようになったのは近年であり、1999年に世界選手権、2000年にオリンピックの正式種目となった。それ以来、女子棒高跳の記録の向上はめざましく、現在の女子の世界記録はイシンバエワ選手（ロシア）の樹立した5m01である。日本においては2004年に中野選手が4m31の日本記録を、次いで近藤選手が4m35の日本記録を樹立した。日本の女子棒高跳に関しては今後、更なる記録の向上が期待される。

棒高跳に関するバイオメカニクスの研究には、男子一流選手を対象にした技術分析や、最大重心高に

影響を及ぼす要因を検討したものが多い。淵本ら（1994）、高松ら（1997a）はそれぞれ1991年の世界選手権、1994年のアジア大会に出場した国内外の男子一流棒高跳選手の動作を分析し、さらに、高松（1997b）は棒高跳選手の跳躍動作中のボックス反力を推定し、3次元関節トルクなどを算出している。そして、淵本ら（1994）、高松ら（1997a）の研究では最大重心高と助走速度との間に正の相関がみられたことから、大きな助走速度が最大重心高を増加させるために重要であり、また、ポールを大きく湾曲させ、ポールの反発を生かすためには上半身の筋力に優れている必要があるとされている。男子選手に比べて助走速度や筋力に劣る女子選手には、男子選

手と異なる跳躍の特徴があると考えられ、女子選手に特有の技術やトレーニング方法を検討することも必要であろう。しかし、上述した研究はすべて男子選手に関するもので、女子棒高跳選手の跳躍動作に関する研究はこれまで見られない。

本研究の目的は、競技レベルの異なる女子棒高跳選手の跳躍動作をバイオメカニクスの的に分析して比較し、女子棒高跳のトレーニングへの示唆を得ることである。

II. 方法

1. データ収集

2005年に行なわれた公認陸上競技会に出場した国内外の女子一流棒高跳選手および男女学生選手、計16名を分析対象者とした。分析対象者の身長、体重はそれぞれ女子 $1.67 \pm 0.06\text{m}$, $55.9 \pm 4.4\text{kg}$, 男子 $1.74 \pm 0.04\text{m}$, $67.4 \pm 7.8\text{kg}$ であった。VTR撮影はデジタルビデオカメラ (VX-2000, SONY社) 1台を用い、ボックスから助走路側に6m, マット側に2mの範囲を撮影し、2次元DLT法を用いて2次元座標を算出するためにボックス先端(0m)から助走路側に2m, 4m, 6m, 8mの各地点に順次キャリブレーションポールを立てて撮影した。撮影スピードは毎秒60フィールド、露出時間は1/1000秒であった。なお、本研究で用いたVTRテープの一部は、日本陸上競技連盟科学委員会バイオメカニクス班の活動により撮影されたものである。

2. データ処理

撮影したVTR画像から、踏切1歩前接地5コマ前からポール伸展後5コマまでの動作を、ビデオ画像解析システム(Frame-DIAS II, DKH社)を用いて1コマごとにデジタル化し、身体計測点23点の座標を得た。得られた身体計測点23点の座標は2次元DLT法を用いて実座標に換算した。次に、得られた実座標をButterworth low-pass digital filterを用いて平滑化した。最適遮断周波数はWells and Winter (1980)の方法により計測点の座標成分ごとに決定した。なお、その最適遮断周波数は、2.4Hz ~ 5.4Hzの範囲であった。

3. 測定項目と測定法

身体計測点の2次元座標から阿江ら(1996)の身体部分慣性係数を用いて、身体および部分の重心位置を算出し、身体重心速度は身体重心変位を時間微分して求めた。

次いで以下の項目を算出した。

1) 踏切局面における身体重心水平速度減速率: 踏切足接地から踏切足離地までの身体重心水平速度減速率(DR)は以下の式で算出した。

$$DR = (VX_{off} - VX_{on}) / VX_{on} \times 100$$

ここで、 VX_{on} は踏切足接地時の身体重心水平速度、 VX_{off} は踏切足離地時の身体重心水平速度を示している。

2) 跳躍角: 踏切足離地時の身体重心速度ベクトルが水平面となす角度を跳躍角とした。

3) グリップ高と抜きの高さ: ポール伸展時における上側のグリップとポール下端までの距離からボックスの深さ(0.2m)を引いた値をグリップ高とし、バーの高さからグリップ高を引いた値を抜きの高さとした。

4) ポール湾曲率および最大ポール湾曲率: 上側のグリップとポールの下端を結んだ線分の長さを弦長とし、ポール伸展時の弦長に対する各時点の弦長の割合をポール湾曲率として以下の式により算出した。最も湾曲率が大きい時点を最大ポール湾曲時とし、そのときの湾曲率を最大ポール湾曲率とした。
ポール湾曲率 = $100 - (各時点の弦長 / ポール伸展時の弦長) \times 100$

5) 身体重心鉛直速度比: ポール湾曲局面およびポール伸展局面における身体重心鉛直速度の平均値をそれぞれ算出し、以下の式により算出した。本研究では、ポール湾曲局面を踏切足離地時から最大ポール湾曲時まで、ポール伸展局面をポール最大湾曲時からポール伸展時までとした。

身体重心鉛直速度比 = $ポール伸展局面の平均身体重心鉛直速度 / ポール湾曲局面の平均身体重心鉛直速度$

6) 関節角度, 身体部分角度および角速度: 身体計測点の2次元座標から肩関節角度(上腕と体幹のなす角度), 肘関節角度(上腕と前腕のなす角度)および体幹の角度(体幹と肩から下ろした鉛直線のなす角度)を算出した。体幹角度は、鉛直線に対して反時計まわりを正とした。また角変位を時間微分して角速度を求めた。

分析項目間の相関関係を調べるため、ピアソンの相関係数を算出し、統計的有意水準は5%以下とした。

III. 結果

1. パフォーマンスに関係する基礎的要因

表1は分析記録とパフォーマンスに関係する基礎

表 1 パフォーマンスに関する基礎的要因

	分析記録(m)	踏切足接地		踏切足離地		減速率(%)	跳躍角(deg)	変換率(%)	グリップ高(m)	抜きの高さ(m)	湾曲率(%)
		水平(m/s)	鉛直(m/s)	水平(m/s)	鉛直(m/s)						
A	4.50(失敗)	7.89	0.61	6.98	2.62	11.6	20.57	116.7	4.10	0.40	27.5
B	4.10	7.64	0.11	6.19	2.56	19.0	22.47	107.8	4.10	0.00	24.0
C	4.10	7.69	0.24	6.07	2.41	21.0	21.66	111.9	4.01	0.09	23.1
D	4.20	7.49	0.38	6.18	2.55	17.4	22.45	116.2	3.80	0.40	25.8
E	4.20	7.46	0.19	6.59	2.57	11.6	21.29	121.0	3.93	0.27	30.7
F	4.00	7.66	0.24	6.46	2.38	15.7	20.21	108.0	3.89	0.11	27.1
G	3.80	7.12	-0.01	6.13	2.45	13.8	21.77	115.8	3.86	-0.06	24.6
学生A	4.00	7.68	-0.05	6.10	2.70	20.6	23.91	102.1	3.94	0.06	22.8
学生B	3.90	7.37	0.17	6.00	2.57	18.7	23.22	107.7	3.73	0.17	22.7
学生C	3.80	7.18	0.17	5.96	2.63	17.0	23.80	111.3	3.73	0.07	23.2
学生D	3.70	7.43	0.17	5.77	2.77	22.3	25.67	103.8	3.69	0.11	24.8
学生E	3.40	6.69	0.68	5.55	2.84	17.1	27.13	113.7	3.53	-0.13	20.1
学生F	4.80	8.68	0.18	6.47	2.99	25.4	24.76	104.7	4.17	0.63	24.0
学生G	4.80	8.07	0.30	6.71	2.89	16.9	23.28	119.6	4.15	0.65	23.8
学生H	4.60	8.59	-0.07	6.69	2.98	22.1	24.01	101.2	4.00	0.60	19.4
学生I	4.40	8.32	0.31	6.56	2.82	21.1	23.28	99.7	4.06	0.34	19.1
平均	4.36	7.68	0.23	6.27	2.67	18.2	23.09	110.1	3.92	0.23	23.9
標準偏差	±0.38	±0.53	±0.21	±0.38	±0.19	±3.9	±1.83	±6.7	±0.19	±0.25	±3.0
女子一流選手平均	4.07	7.56	0.25	6.37	2.51	15.7	21.49	113.9	3.96	0.17	26.1
標準偏差	±0.21	±0.24	±0.20	±0.32	±0.09	±3.6	±0.87	±4.9	±0.12	±0.19	±2.6
女子学生選手平均	3.76	7.27	0.23	5.87	2.70	19.2	24.74	107.7	3.72	0.06	22.7
標準偏差	±0.23	±0.37	±0.27	±0.22	±0.11	±2.3	±1.62	±4.9	±0.15	±0.11	±1.7
男子学生選手平均	4.65	8.41	0.18	6.61	2.92	21.4	23.83	106.3	4.09	0.56	21.6
標準偏差	±0.19	±0.28	±0.18	±0.11	±0.08	±3.5	±0.71	±9.1	±0.08	±0.14	±2.7

的要因などを示したものである。踏切足接地時の身体重心水平速度は男子学生選手が最も大きく (8.41 ± 0.28m/s), 次いで女子一流選手 (7.56 ± 0.24m/s), 女子学生選手 (7.27 ± 0.37m/s) であった。踏切足接地時の身体重心水平速度と記録との間には被験者全体で有意な正の相関がみられた (r = 0.90, p < 0.001)。踏切足離地時の重心水平速度は男子学生選手が最も大きく (6.61 ± 0.11m/s), 次いで女子一流選手 (6.37 ± 0.32m/s), 女子学生選手 (5.87 ± 0.22m/s) であった。踏切足離地時の身体重心水平速度と記録の間には有意な正の相関がみられた (r = 0.86, p < 0.001)。跳躍角は女子学生選手が最も大

きく (24.7 ± 1.6deg), 女子一流選手が最も小さかった (21.5 ± 0.9deg)。跳躍角と記録との間には, 女子選手で有意な負の相関がみられた (r = -0.80, p < 0.01)。また, 跳躍角と最大ポール湾曲率との間には被験者全体で有意な負の相関がみられた (r = -0.62, p < 0.01)。

2. ポール湾曲局面に対するポール伸展局面の身体重心鉛直速度比

図1は最大ポール湾曲率と身体重心鉛直速度比との関係を示したものである。図中の点線は女子選手の平均値を示す。最大ポール湾曲率と身体重心鉛直速度比との間には, 被験者全体 (r = 0.66, p < 0.01) でも女子選手 (r = 0.92, p < 0.001) でも有意な正の相関がみられた。また, 最大鉛直速度と抜きの高さには有意な正の相関がみられ (r = 0.85, p < 0.01), 女子選手では身体重心鉛直速度比と記録との間 (r = 0.67, p < 0.05), 最大ポール湾曲率と記録の間 (r = 0.68, p < 0.05) にも有意な正の相関がみられた。

3. 関節角度および体幹角度

図2は踏切後の体幹角速度ピーク値と踏切足離地時の左肘関節角度 (右足踏切の被験者Cは右肘) との関係を示したものである。左肘関節角度は120度から140度を示す選手が多かったが, 左肘関節角度

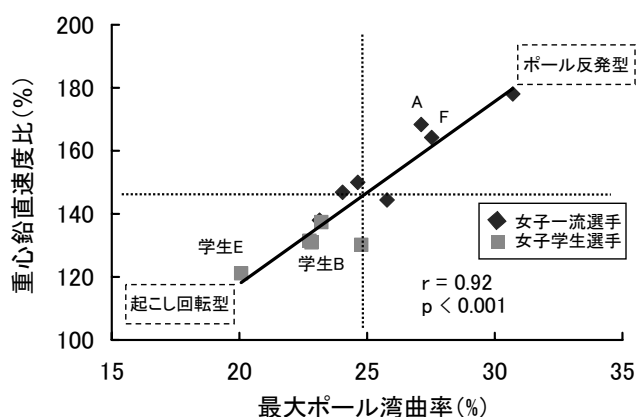


図1 最大ポール湾曲率と身体重心鉛直速度比との関係

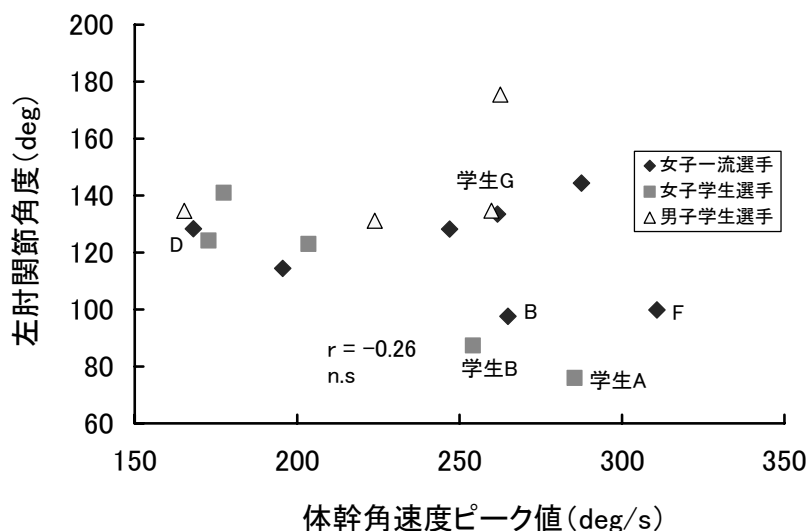


図2 踏切後の体幹角速度ピーク値と踏切足離地時の左肘関節角度との関係

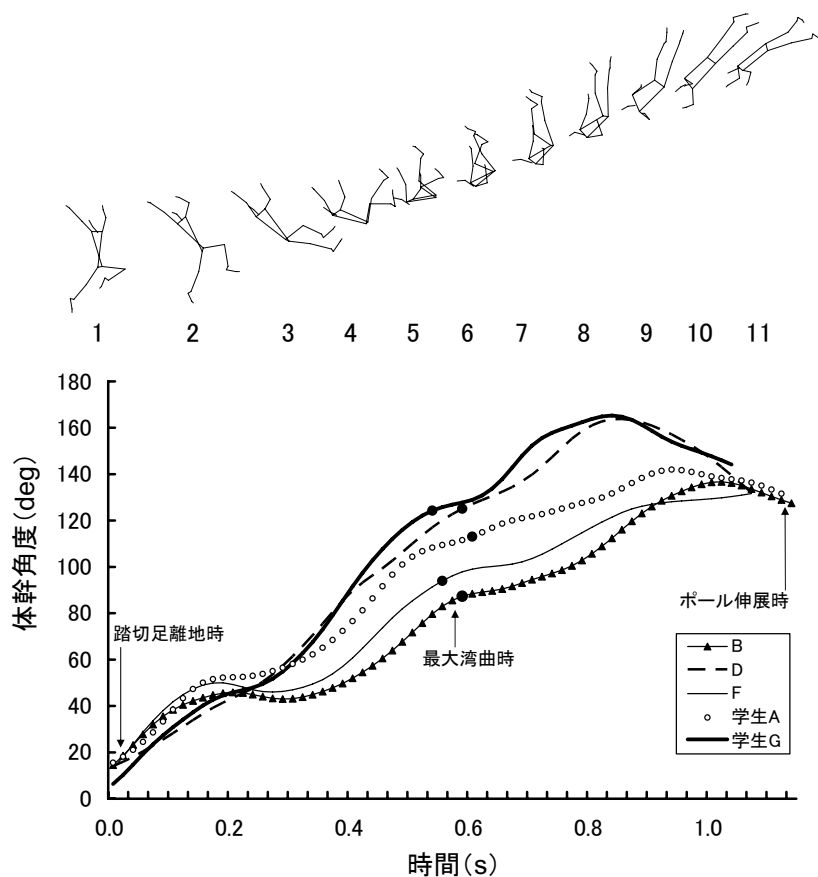


図3 踏切足離地時からポール伸展時における体幹角度の変化

が120度より小さい選手(被験者B, Fおよび学生A, B)もみられた。図3は被験者B, D, F, および学生A, Gの踏切足離地時からポール伸展時までの体幹角度の変化を示したものである。被験者Dや学生Gの体幹角度は踏切足離地後、約160度まで増加を続けた。被験者B, F, および学生Aの体幹角度は踏切足離地直後には一時的に急増するが、約40度から50度まで増加したところで停滞や減少する局

面がみられ、ポール伸展時では被験者Dや学生Gより20度近く小さかった。図4は図3で事例として示した被験者の左肘関節と左肩関節の角度について踏切足接地時、離地時、最大屈曲時(左肘)、あるいは最大時(左肩)の値を示したものである。左肘関節は被験者B, F, および学生Aは被験者Dおよび学生Gと比較すると踏切足接地から離地の間に著しく減少していた。左肩関節は被験者D, Fは踏切

足離地までに大きく増加していたが、学生 A は踏切足離地までの増加が少なく、最大値も小さかった。

4. ポール湾曲開始時のフォーム

図 5 はポール湾曲開始時（ポールがボックスについた時点と仮定）のスティックピクチャーと踏切足位置を示したものである。踏切足位置と上側グリップの関係を見ると、踏切足接地位置に対してグリップが身体より後方になる選手が多かったが、特に被験者 B, C, F でグリップ位置が身体に対して大きく後方であった。また、左腕について見ると、被験者 A は左手が前上方の高い位置に上げられているのに対し、被験者 F, および学生 A, B は左肘関節の屈曲が大きく、左手の位置が低かった。

IV. 考察

1. 記録と助走速度および跳躍角の関係

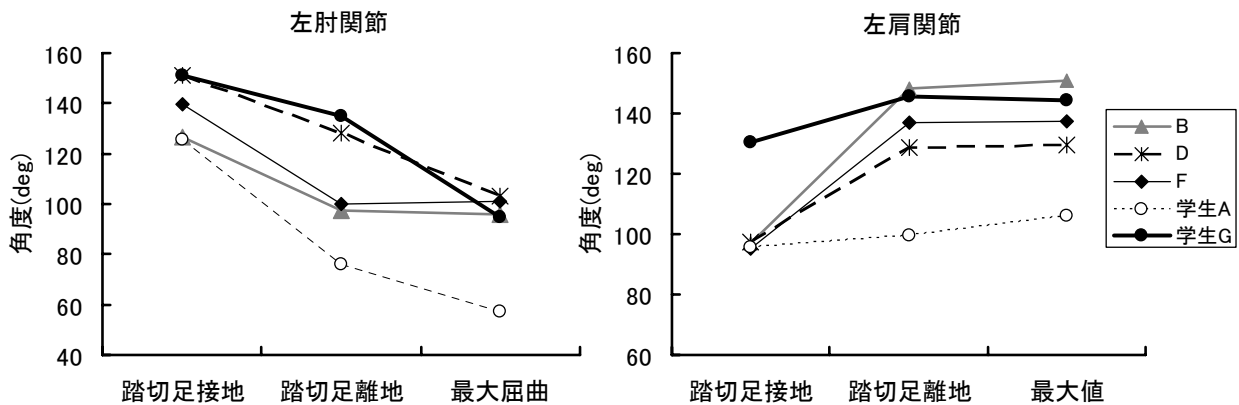


図 4 左肘関節角度と左肩関節角度の変化

2. 跳躍タイプについて

高松 (1997b) は、ポール湾曲の大きさと鉛直速

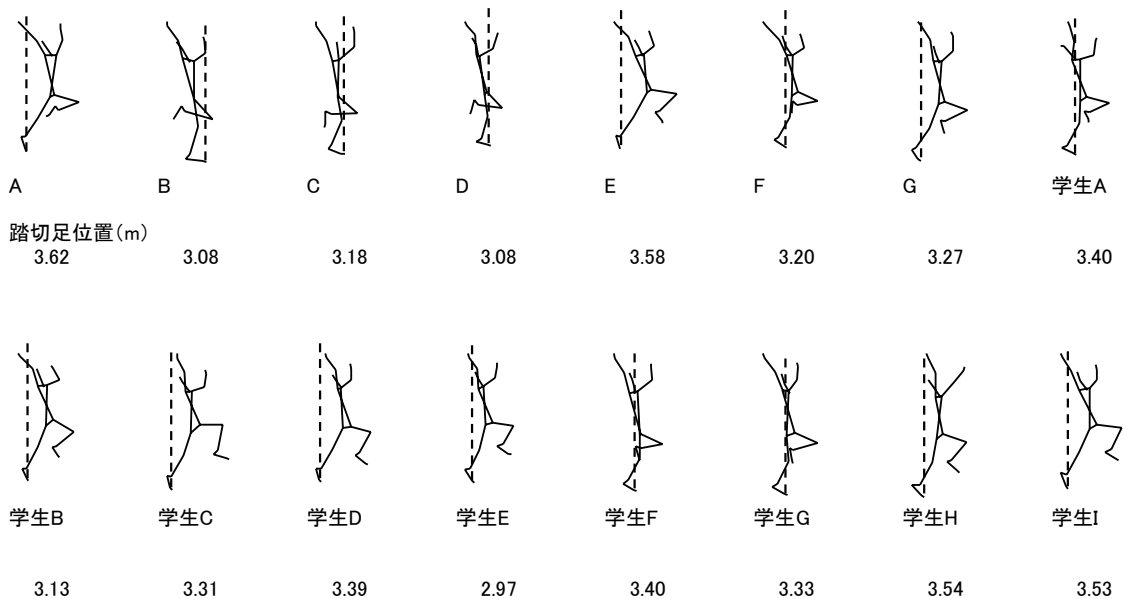


図 5 ポール湾曲開始時のスティックピクチャーと踏切足位置

度の関係から男子一流棒高跳選手の跳躍タイプを、ポールをより大きく曲げ、ポールの反発を生かしてポール伸展局面での鉛直速度を大きくする跳躍タイプ（ポール反発型）と、跳躍角をやや大きく（ポール湾曲局面での鉛直速度を大きく）してポールを垂直に立てることを強調したタイプ（起こし回転型）に分類している。この分類に従うと、図1で最大ポール湾曲率が大きく、鉛直速度比の大きい選手はポール反発型、最大ポール湾曲率が小さく、鉛直速度比の小さい選手は起こし回転型になると考えられる。図1では平均値かそれ以下の値を示す選手が多く、被験者AやFのように平均値より大きな値を示す選手は少なかった。このことから、女子選手は起こし回転型の跳躍タイプの選手が多いといえるであろう。最大鉛直速度と抜きの高さとの間($r = 0.85$, $p < 0.01$)に有意な正の相関がみられた。また、重心鉛直速度比と記録との間($r = 0.67$, $p < 0.05$)、最大ポール湾曲率と記録の間($r = 0.68$, $p < 0.05$)にも有意な正の相関がみられた。これらのことから、ポールを大きく曲げて、ポールの反発を利用できる女子選手がより高い記録を出していると考えられる。

そこで、ポールの湾曲に影響を及ぼす要因を考える。跳躍角と最大ポール湾曲率の間には有意な負の相関がみられ($r = -0.71$, $p < 0.01$)、跳躍角が小さい場合にポールを大きく湾曲させやすいと示唆される。また、高松(1997b)はポール湾曲局面において、下側の手がポールに加えた力の平均値と下側の手の仕事との間に有意な負の相関が見られたことから、ポール湾曲局面で積極的に下側の手でポールを押しすることによってより大きなエネルギーをポールに伝達できることを示唆している。一方、ポール起こし回転型の選手は、踏切後に身体のポール下端まわりの慣性モーメントを小さくして、ポールを垂直に立たせやすくする必要があるので、身体全体をポールに近づけるような動作や踏切足離地時に前上方へ振り上げたリード足を踏切足離地後に下げる動作が多くみられた。これらの動作は、ポールをより大きく湾曲させるより、ポール下端まわりの慣性モーメントを小さくしてポールを回転させ垂直に立たせるのに有効な動作であると考えられる。

3. 体幹角度の変化について

図2に示したように、多くの選手は踏切足離地時に左肘関節の角度が約120度から140度の間であったが、左肘関節が120度より小さい選手（被験者B, F, および学生A, B）はいずれも体幹角速度が高い

値を示した。このことから、これらの選手では左肘関節の大きな屈曲が生じたため（いわゆる、つぶれたため）、体幹が前方へ振り出されてしまっていたと考えられる。

踏切足離地時に左肘関節が120度より小さかった選手（被験者B, F, 学生A）の踏切足接地時からポール伸展時までの体幹角度は（図3）、踏切足離地直後に急増した後の変化が緩やかであり、体幹が水平（90度）に達するまでに時間を要した。その後の変化を見ると、被験者B, F, 学生Aは被験者D, 学生Gと比較して最大ポール湾曲時の体幹角度やポール伸展時の体幹角度がともに小さかった。このことから、ポール湾曲局面において体幹角度が減少する、あるいは増加が小さくなることで、最大ポール湾曲時やポール伸展時の体幹角度を大きくしにくくなると考えられ、クリアランスにむけて十分な倒立姿勢をとることが難しくなると考えられる。

上で述べたような体幹角度の変化を示した選手（被験者B, F, 学生A）は踏切足接地時に左肘関節角度が小さく、踏切足接地から離地の間に著しく減少していた（図4）。一方、左肩関節角度は学生Aを除くと、他の選手は踏切中に増加していたことから、いわゆる「つぶれる」という現象は踏切中に左肘関節が大きく屈曲することが原因と考えられる。

左肘関節が踏切中に屈曲するのは、ポールをボックスに突っ込む際の衝撃などによると考えられる。そこで、ポールの湾曲開始時（ポールがボックスについた時点と仮定）の各選手のフォーム（図5）を見ると、被験者B, Fは踏切足位置がグリップに対して近く、足が入った状態にあることがわかる。そのため、左肩関節は伸展するが、左肘関節が屈曲してしまったと考えられる。一方、被験者Aを見ると、グリップの位置が踏切足つま先のほぼ真上で、しかも、左肩関節および左肘関節が大きく伸展し、左手を高く上げた姿勢でポールの湾曲を開始させていることがわかる。このように見てくると、ポール湾曲開始時には、踏切足つま先の真上にグリップを保ち、左肩関節と左肘関節を伸展して左手を上げておくことが重要であると考えられる。

4. トレーニングへの示唆

女子選手では、ポール起こし回転型の選手が多いことがわかった。しかし、さらに記録を向上させるためには、これらの選手はより大きくポールを湾曲させて反発を利用するポール反発型に近い跳躍をすることが必要であると考えられる。試合と同じポールの硬さや長さをそのまま用いてポールを大きく湾

曲させるための動作を強調してトレーニングすることは難しいであろう。そこで、トレーニングにおいては試合で使用するポールよりも柔らかいポールを使用し、踏切では、前方へ低く跳び出す、下側の手を前上方に高く上げてポールを積極的に押していくことを強調することが役立つと考えられる。

また、女子選手では踏切後に体幹が振られ、スイング動作が十分でない選手が多かった。高松(1997)は、男子棒高跳選手の動作をキネティクスの的に分析し、右肩では踏切足離地直後に屈曲トルク（挙上した腕を後方へ回転させるトルク）を示していたと述べている。このような上肢のトルクは、胴体が前方へ振られるのを抑制するように作用する。したがって、本研究において体幹が前方へ振られる傾向にある選手は、このような肩関節のトルクが十分に発揮されていないと考えられる。鉄棒や吊り輪を用いた懸垂姿勢やあふり動作は棒高跳の運動と類似しているので、これらの運動において右肩関節でトルクを発揮し、身体を固定することを強調したトレーニングを行なうことは、技術トレーニングとしても、専門的筋力トレーニングとしても有効であると考えられる。

V. まとめ

本研究をまとめると、以下のようなになるであろう。

- 1) 踏切足接地時の重心水平速度と記録との間には有意な正の相関がみられた ($r = 0.90$, $p < 0.001$)。
- 2) 跳躍角と記録との間には、女子選手で有意な負の相関がみられ ($r = -0.80$, $p < 0.01$)、男子選手と同様であった。
- 3) 最大ポール湾曲率と重心鉛直速度比の間には女子選手で有意な正の相関が見られた ($r = 0.92$, $p < 0.001$)。
- 4) 跳躍タイプをポール反発型と起こし回転型に分類すると、女子選手には起こし回転型の選手が多かった。
- 5) 踏切足離地時に左肘関節が 120 度より小さい選手は、踏切後の体幹角速度が大きくなる傾向があった。また、このような選手は、最大ポール湾曲時およびポール伸展時における体幹角度が小さく、身体のスイング動作が不十分であった。

これらのことから、以下のような示唆が得られるであろう。

- 1) 踏切時の左肘の屈曲や、踏切後に体幹が前方へ振られてしまうのを抑制するには、ポール湾曲

開始時にグリップ位置を踏切足つま先上に保ち、左肘関節および左肩関節を伸展させて左手を高く上げることが重要であると考えられる。

- 2) 女子選手のトレーニングでは、より湾曲させやすい柔らかめのポールを使用した技術トレーニングや、鉄棒などで懸垂姿勢やあふり動作中に身体を固定する動作を強調したトレーニングを取り入れることが有効であると考えられる。

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関数係数. *Japanese Journal of Sports Science* 15 (3), 155-162.
- 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, 世界一流競技者の技術. ベースボールマガジン社, 東京, pp. 193-204.
- 高松潤二, 阿江通良, 飯干明, 藤井範久, 金高宏文, 結城匡啓, 森丘保典 (1997a) : アジア大会における棒高跳のバイオメカニクスの分析, アジア一流陸上競技者の技術～第 12 回広島アジア大会陸上競技バイオメカニクス研究班報告～, 財団法人日本陸上競技連盟, 東京, pp. 137-146.
- 高松潤二 (1997b) 棒高跳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 - 筑波大学大学院博士論文.
- 武田理, 村木有也, 小山宏之, 阿江通良 (2005) 身体重心速度およびポール湾曲度からみた男子棒高跳選手のバイオメカニクスの分析, 陸上競技研究紀要, 1, 30-35.
- Wells, R. P and Winter, D. A (1980) : Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Human Locomotion I*, pp. 92-93.