

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

武田 理¹⁾ 小山 宏之¹⁾ 吉原 礼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 study on the relationship between conversion of the mechanical energy and vaulting techniques in men's pole vaulters

Osamu Takeda¹⁾ Hiroyuki Koyama¹⁾ Aya Yoshihara¹⁾ Michiyoshi Ae²⁾
1) Graduate School, University of Tsukuba
2) Institute of Health and Sciences, University of Tsukuba

Abstract

The purpose of this study was to investigate the relationship between conversion of the mechanical energy and vaulting techniques in men's pole vault. Forty-four male pole vaulters who participated in official competitions were analyzed. Two dimensional coordinates of the vaulter's body and the pole were obtained by using a two dimensional DLT technique. The center of gravity (CG), conversion ratio of the kinetic energy at takeoff (TO) to the potential energy, pole bending ratio, and pole chord reaction force were calculated. (1) The maximal CG height was significantly related to the CG velocity at TO ($r=0.84, p<0.001$), the maximal pole bending ratio ($r=0.54, p<0.01$), and pole chord reaction force at the maximal pole bending (MPB) ($r=0.72, p<0.001$). (2) There was a significant relationship between the energy conversion ratio and the maximal pole bending ratio ($r=0.46, p<0.05$). However, there was no significant relationship between the energy conversion ratio and the maximal CG height. (3) The maximal pole bending ratio and the pole chord reaction force at MPB for high energy conversion group were significantly larger than those of the low energy conversion group ($p<0.05$). These results suggest that the maximal pole bending ratio is one of key factors to obtain the maximal CG height, and that the force exerted by stretching of the body during swing strongly affects the pole chord reaction force in the pole bending phase.

I. 緒言

棒高跳は、棒(以下、ポール)を用いて跳躍した高さを競う競技である。棒高跳の記録は様々な素材を用いたポールの開発とともに向上してきた。ヒッコリー材に始まり、スチール、ジュラルミンなどが用いられ、1962年にグラスファイバー製のポールを使用して16フィート(4m87)という世界記録が樹立された。その後、世界記録は次々に更新され、現在では6m14(S.ブブカ、ウクライナ)まで引き上げられた。

棒高跳に関する研究には跳躍者の動作を対象としたものが多い。Hay(1967)は、跳躍者の踏切離地時の水

平速度、鉛直速度、跳躍角、グリップと踏切足との水平距離、グリップ幅の5つのパラメータとポール湾曲の大きさとの相関係数を算出し、ポール湾曲に関係する要因を検討している。Steben(1970)は、跳躍高を従属変数とし、ポールと身体との距離、助走速度、踏切初速度、接地時間、下側の腕の肘関節角度を独立変数に重回帰分析を行い、踏切初速度が跳躍高と関係が大きかったことを報告している。これらの研究から、棒高跳の跳躍高には、選手の助走速度や踏切初速度が大きな影響を及ぼすことが明らかになっている。

一方、ポール湾曲と選手の動きとの関係については、先述のHay(1967)の研究があるが、これは40年近く

前のものである。淵本ら(1992)は、一流選手が競技会で使用したポールの反発力を実測するとともに、各選手の跳躍動作を分析している。また、高松(1997)は、実験により跳躍中のボックス反力を測定し、ポールの湾曲量とポールの反発力の関係、ポール反発に及ぼす選手の動作の影響、助走速度と最大湾曲率の関係などを検討した。そして、跳躍者の動作はポールの挙動に影響を与えること、最大重心高を大きくするためには、ポール伸展時のボックス反力の鉛直力積を大きくすることが重要なことなどを示し、ボックス反力の重要性を示唆している。しかし、これらの研究の多くは、一流選手を対象にしたものがほとんどである。また、高松(1997)の研究を除くと、実際の跳躍中のポールの湾曲と跳躍者の動作との関係を検討したもの、特に実際の競技会における選手を対象にしたものはほとんど見られない。

ポールを大きく湾曲させ、ポールを介して懸垂倒立状態で上方へ身体を投げ出す運動は棒高跳に特有のものである。したがって、ポールを大きく湾曲させ、ポールの動きと身体の動きを調和させるポール操作技術が必要とされる。そこで、本研究では、男子棒高跳選手の競技会における跳躍動作をバイオメカニク的に分析し、エネルギー変換率に着目して、ポール湾曲に影響を及ぼす要因、特に選手の動作とポール湾曲との関係を明らかにすることを目的とした。

II. 方法

1. VTR撮影

VTR撮影は、2003年から2006年に行われた公認陸上競技会における男子棒高跳に出場した国内外一流競技者、学生競技者、高校生競技者、計44名とし、Table 1は分析対象者の特性を示したものである。カメラ(SONY社製、VX-2000)はメインスタンド最前列に固定し、踏切1歩前からクリアランスまでを分析するためボックスの手前6mから奥2mまでを撮影範囲とした。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画像は日本陸上競技連盟科学委員会の活動として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歩前離地からクリアランスまでの身体分析点23点およびポール上の計測点15点の計38点をビデオ動作解析システム(Frame-DIAS II, DKH社製)によりデジタル化し、その座標を得た。得られた座標は2次元DLT法を用いて実座標に換算した。計測点の座標の平滑化は、座標成分ごとに最適遮断周波数を決定し(Wells and Winter 1980), Butterworth low-pass digital filterを用いて行った。最適遮断周波数は、X座標(水平)が4.2~8.4Hz, Y座標(鉛直)が4.2~8.6Hzの範囲であった。

3. 算出項目および算出方法

1) 身体重心高, 重心水平および鉛直速度, 跳躍角

計測点の2次元座標から、阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて身体重心位置を算出した。重心速度および重心加速度は、重心変位を時間微分して算出した。また、跳躍角は踏切離地時の重心速度ベクトルが水平面となす角度とした。

2) 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、各時点における弦長短縮量のポール伸展時(以下、ポールストレート)の弦長に対する割合をポール湾曲率として式(1)により算出した。そしてポール湾曲率が最も大きい時点のポール湾曲率を最大ポール湾曲率とした。

ポール湾曲率 =

$$\left(1 - \frac{\text{各時点の弦長}}{\text{ポールストレート時の弦長}} \right) \times 100 \quad (1)$$

3) ポール弦反力

高松(1997)の推定法を用いて、踏切離地からポールストレートまでのボックス反力(BRF)を算出し、ボックス反力をポールの弦方向に投影したものとした。

4) ポール弾性エネルギー

ポール弦反力は踏切離地からポールが最も湾曲した時点(以下、ポール最大湾曲時)まで、ほぼ直線的に変化したことから踏切離地時のポール弦反力($PCRF_{Toff}$)とポール最大湾曲時のポール弦反力($PCRF_{MPB}$)および湾曲量で作られる台形の面積を式(2)で算出し、ポール弾性エネルギーとした。

Table 1 Characteristics of the subjects

	Age(year) Max - Min.	Weight(kg) Max - Min.	Personal Best(m) Max - Min.
Subject(n=44)	22±5 32-15	66.1±7.8 86 - 52	5.08±0.61 6.05 - 3.60

ポール弾性エネルギー =

$$\frac{(PCRF_{Toff} + PCRF_{MPB}) \times (PL_{Toff} - PL_{MPB})}{2} \quad (2)$$

ここで, PL_{Toff} は踏切離地時の, PL_{MPB} はポール最大湾曲時のポールの弦長である.

5) スウィング力

ボウルターを上側のグリップと重心からなる2次元の振子にモデル化すると, ボウルターの重心の加速度 a_v は, 式(3)で表される.

$$a_v = a_u + a_{v/u} \quad (3)$$

a_u は上側のグリップの加速度, $a_{v/u}$ は上側のグリップに対する重心の相対加速度である. そして, スウィングによる力は, 次のような成分に分けることができる(ベアーとジョンストン, 1988).

$$ma_{r_v} = m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) \quad (4)$$

$$ma_{\theta_v} = m(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) \quad (5)$$

ここで, m はボウルターの質量, r は上側のグリップに対する重心の位置ベクトル, θ は位置ベクトルの静止座標系 X 軸に対する角度で, a_{r_v} はベクトル動径成分重心加速度, a_{θ_v} は横径成分重心加速度である. そして ma_{θ_v} は ma_{r_v} に比べて著しく小さかったので, 本研究では, $m\ddot{r}$ を伸縮スウィング力, $mr\dot{\theta}^2$ を回転スウィング力と呼ぶことにした.

4. 分析対象者の群分け

本研究では, 棒高跳の技術的要因について検討するため, 運動エネルギーの変換率の指標としてエネルギー変換率を式(6)で算出し, 分析対象者の群分け

を行った.

$$\text{エネルギー変換率} = PE_{\max.CGh} / KE_{Toff} \quad (6)$$

ここで, $PE_{\max.CGh}$ はボウルターの最大重心高獲得時の位置エネルギーを, KE_{Toff} は踏切離地時のボウルターの運動エネルギーを示す.

5. データの規格化と統計処理

時系列データは踏切足離地からポールストレートを基準(100%)として規格化し平均した. また, ポール最大湾曲時(MPB)を50%とした. なお, ポール弦反力およびスウィング力は各分析対象者の体重で除した.

各算出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た. また, エネルギー変換率の上位群と下位群間の差を検定するため, 対応のない両側検定の t 検定を行った. いずれも有意水準は5%以内とした.

Table 2 Kinematic and Kinetic results in the subjects

	All subjects(n=44)	
	Mean±S.D	Max. - Min.
Maximal CG height (m)	5.10±0.56	6.13-3.68
Horizontal CG velocity (m/s)	Touchdown	8.63±0.67
	Takeoff	7.00±0.58
Vertical CG velocity (m/s)	Touchdown	0.48±0.51
	Takeoff	2.58±0.33
Takeoff angle (deg)	20.5±2.8	27.6-15.7
Energy conversion ratio	1.35±0.08	1.49-1.18
Ratio of maximal pole vending (%)	21.9±5.7	35.1-14.3
Pole chord reaction force (N/kg)	Touchdown	8.14±1.69
	Takeoff	14.23±1.74
Pole elastic energy (J)	10.8±3.5	19.1-4.1

K.E : Kinetic energy P.E : Potential energy

Table 3 Correlation coefficients between selected kinematic and kinetic parameters

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
(1) MAX. CG height	1										
(2) Horizontal CG velocity (TD)	0.84***	1									
(3) Horizontal CG velocity (TO)	0.86***	0.87***	1								
(4) Vertical CG velocity (TD)	-0.33	-0.51**	-0.27	1							
(5) Vertical CG velocity (TO)	-0.25	-0.11	-0.13	0.29	1						
(6) Takeoff angle	-0.66**	-0.55**	-0.66**	0.29	0.81	1					
(7) % of max. polebend	0.54**	0.30	0.33	-0.40	-0.57**	-0.58**	1				
(8) Pole chord reaction force(TO)	0.26	0.21	0.29	0.14	-0.21	-0.34	-0.06	1			
(9) Pole chord reaction force(MPB)	0.72***	0.62**	0.55**	-0.54**	-0.45*	-0.59**	0.52**	0.31	1		
(10) Pole eladtic energy	0.78***	0.53**	0.60**	-0.33	-0.57**	-0.73***	0.86***	0.39	0.72***	1	
(11) Energy conversion ratio	0.21	-0.06	-0.29	-0.20	-0.26	-0.01	0.46*	-0.03	0.32	0.36	1

(* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001)

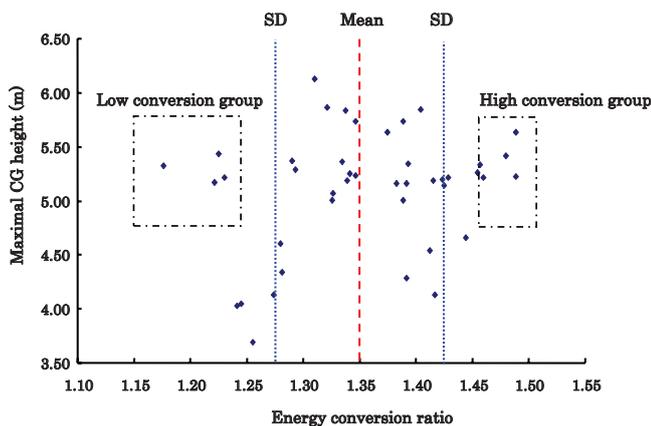


Fig. 1 Relationship between energy conversion ratio and maximal CG height

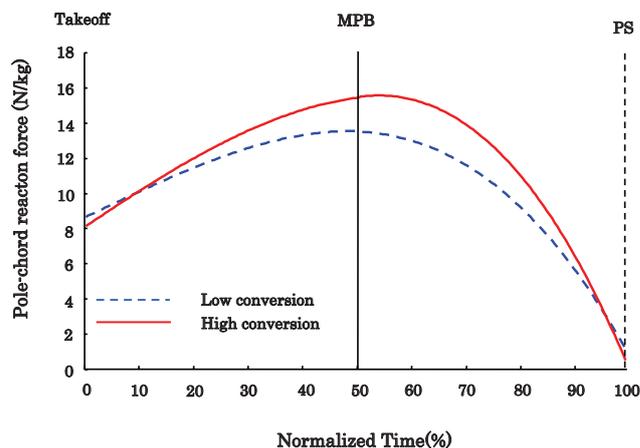


Fig. 2 Changes in the pole chord reaction force for H.C and L.C groups from the takeoff to the pole straightening

III. 結果

1. 身体重心およびポールに関して

1) 身体重心速度および跳躍角

Table 2 は本研究における分析対象者の身体重心のキネマティクスおよびポール湾曲に関する結果を, Table 3は算出項目間の相関関係を示したものである.

重心水平速度は, 踏切足接地時から踏切足離地時にかけて減少していた. また, 重心水平速度と最大重心高との関係を見ると, 踏切足接地時, 離地時ともに有意な正の相関を示した($r=0.84, p<0.001$; $r=0.86, p<0.001$). また, 跳躍角と最大重心高との間には有意な負の相関が見られた($r=-0.66, p<0.01$).

2) エネルギー変換率

Fig.1はエネルギー変換率と最大重心高との関係を示したものである. エネルギー変換率と最大重心

高との間に有意な相関は見られなかったが, 分析対象者全体の中で最大重心高の大きい選手は, エネルギー変換率の平均値(1.35)近くに集まる傾向が見られた. エネルギー変換率とポール最大湾曲率との関係を見ると, 有意な正の相関を示した(Table 2, $r=0.46, p<0.05$).

本研究では, エネルギー変換率が±標準偏差外の選手のうち, 同程度の記録水準の選手をエネルギー変換率上位群(上位群, $n=5$, 変換率, 1.43以上, 最大重心高, $5.37\pm0.19\text{m}$)と下位群(下位群, $n=5$, 変換率, 1.27以下, 最大重心高, $5.29\pm0.19\text{m}$)とした.

3) ポール湾曲および弦反力

Table 3は, ポールに関する項目と他の項目との相関を示したものである. ポール最大湾曲率, ポール弾性エネルギーと最大重心高との間には, いずれも有意な正の相関が見られた(ポール

Table 4 Kinematic and kinetic results on the high conversion and low conversion groups

		H.C	L.C	Difference	
Maximal CG height(m)		5.37±0.19	5.29±0.19		
Horizontal CG velocity (m/s)	Touchdown	8.87±0.24	9.34±0.29	***	H.C < L.C
	Takeoff	6.87±0.15	7.70±0.19	***	H.C < L.C
Vertical CG velocity (m/s)	Touchdown	0.38±0.33	0.59±0.55		
	Takeoff	2.48±0.28	2.72±0.41		
Takeoff angle (deg)		20.5±1.9	19.5±3.0		
Energy conversion ratio		1.47±0.02	1.21±0.01	***	H.C > L.C
Ratio of maximal pole bending (%)		26.7±7.1	20.5±1.9	*	H.C > L.C
Pole chord reaction force (N/kg)	Takeoff	8.13±2.18	8.66±1.69		
	MPB	15.45±0.43	13.53±0.84	**	H.C > L.C
Pole elastic energy (J)		13.9±3.9	8.9±0.8	*	H.C > L.C
Averaged max. pole bending point (%)		66.1±2.9	47.2±10.9	*	H.C > L.C

H.C : High conversion group L.C : Low conversion group

K.E : Kinetic energy P.E : Potential energy

*, **, *** : significant difference (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$)

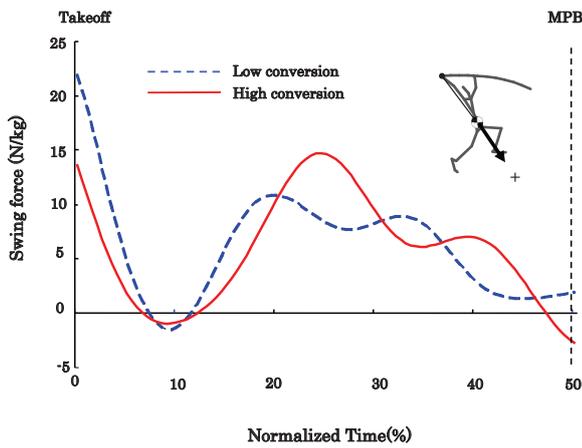


Fig. 3 Changes in the swing force for H.C and L.C groups from the takeoff to the MPB

最大湾曲率, $r=0.54, p<0.01$; ポール弾性エネルギー, $r=0.78, p<0.001$). また, ポール最大湾曲率とポール弾性エネルギーとの間にも, 強い正の相関が見られた ($r=0.86, p<0.001$). 跳躍角とポール最大湾曲率およびポール弾性エネルギーとの間には, いずれも有意な負の相関が見られた (ポール最大湾曲率, $r=-0.58, p<0.01$; ポール弾性エネルギー, $r=-0.73, p<0.001$). 各時点のポール弦反力と最大重心高との間には, 踏切離地時では有意な相関は見られなかったが, ポール最大湾曲時では有意な正の相関を示した ($r=0.72, p<0.001$). また, 跳躍角とポール弦反力との間には, 踏切離地時では有意な相関は見られなかったが, ポール最大湾曲時では有意な負の相関が見られた ($r=-0.59, p<0.01$).

2. エネルギー変換率の上位群および下位群の比較

1) 身体重心およびポール湾曲について

Table 4は, エネルギー変換率の上位群および下位群の各パラメータの平均および標準偏差を示したも

のである.

踏切足接地時, 離地時の重心水平速度は, 上位群が下位群に比べ有意に小さかったが ($p<0.001$), 鉛直速度, 跳躍角には有意差は見られなかった. ポール最大湾曲率は上位群が下位群に比べ, 有意に大きかった ($p<0.05$). ポール弦反力は, 踏切離地時では, 両群間に有意差は見られなかったが, ポール最大湾曲時では, 上位群の方が下位群に比べ有意に大きかった ($p<0.01$). また, ポール弾性エネルギーは, 上位群が下位群に比べ有意に大きかった ($p<0.05$).

2) ポール弦反力の変化

Fig.2は, エネルギー変換率の上位群および下位群の踏切離地からポールストレートまでのポール弦反力の変化を示したものである. なお, 図では0%時が踏切離地時である (図3,4も同様) 踏切離地時では, 両群間に有意な差は見られなかった. しかし, 15%時あたりから上位群の弦反力が下位群の弦反力を上回り, ポール最大湾曲時では上位群が有意に大きかった ($p<0.05$). また, 上位群はポール最大湾曲後もポール弦反力が増大し, ピーク値はポール伸展局面で出現していた. 一方, 下位群はポール弦反力の増加が上位群に比べ小さく, ピーク値もポール最大湾曲時付近で出現していた.

3) スウィング力の変化

Fig.3は, エネルギー変換率の上位群および下位群の踏切離地からポール最大湾曲時までのスウィング力の変化を示したものである. スウィング力は両群ともに踏切直後に大きな値を示し, その後急激に減少した後, 再び増加し, 最大湾曲時にかけて減少していく傾向が見られた. 上位群は, 踏切直後の値が下位群より小さく, ピーク値の出現が下位群より遅れて出現し (約25%時), 持続も長かった. 一方, 下位群は踏切直後に大きな値を示し, 10%~20%にかけて早期

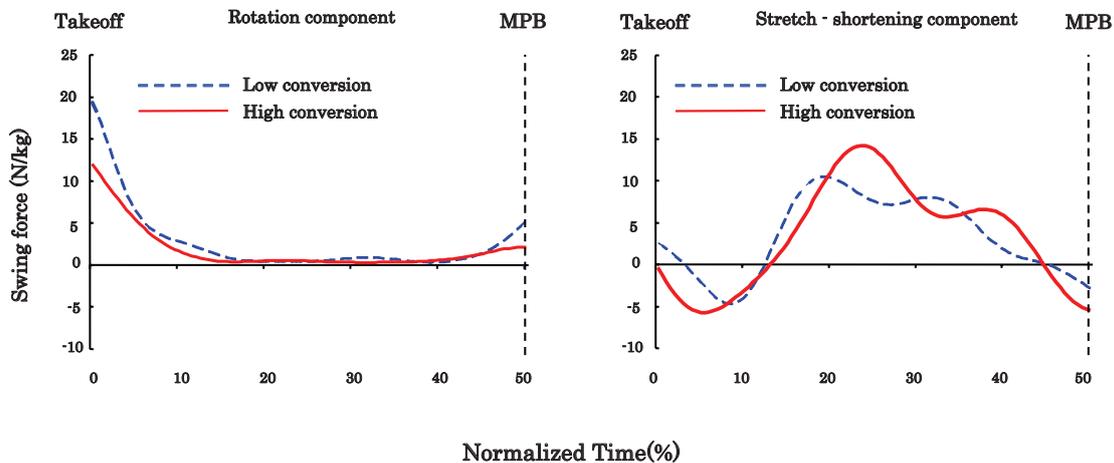


Fig. 4 Changes in the rotation (left) and Stretch - shortening (right) components of the swing force for H.C and L.C groups from the takeoff to the MPB

に上昇し、ピーク値は上位群に比べ小さく、35%時付近から急激に減少した。

Fig.4は、上位群および下位群の踏切離地からポール最大湾曲時までの回転スウィング力と伸縮スウィング力を示したものである。回転スウィング力では、踏切離地直後は下位群が上位群に比べ非常に大きな値を示した。その後15%時にかけて両群ともに急激に減少し、その後、ポール最大湾曲時まで、ほとんど変化はなく、40%時からポール最大湾曲にかけてやや増加した。伸縮スウィング力では、両群ともに踏切離地後に一度減少し、10%時付近で負のピークを示した後、急激に上昇し、負から正に移行した。しかし、下位群は20%時付近でピーク値が出現したのに対し、上位群は25%時付近で出現していた。また、ピーク値の大きさも上位群が下位群よりも大きく、持続も長い傾向が見られた。

IV. 考察

1. 最大重心高とポール弦反力との関係

Steben(1970)、淵本ら(1994)は、踏切離地時の重心水平速度と記録との間に強い正の相関が見られたことから踏切離地時の重心水平速度の重要性であると報告しており、本研究においても、踏切離地時の重心水平速度と最大重心高との間に強い正の相関が見られた($r=0.86, p<0.001$)。また、跳躍角と最大重心高との間に有意な負の相関が見られた($r=-0.66, p<0.01$)。これらのことから、棒高跳において記録を高めるためには、踏切離地時に大きな重心水平速度で低く跳び出すことが重要であると考えられる。

Table 2で示したように、最大重心高とポール最大湾曲率およびポール弾性エネルギー、ポール最大湾曲率とポール弾性エネルギーの間に正の相関が見られたことから、ポールの大きな湾曲は、大きな弾性エネルギーをポールに蓄え、結果として最大重心高の獲得につながると考えられる。

本研究において踏切足接地時、踏切足離地時の重心水平速度とポール最大湾曲率との間に有意な相関は見られなかった。このことは、踏切時の重心水平速度は小さいがポールを大きく湾曲させている選手などが見られることから、踏切離地時の重心水平速度そのものがポールの湾曲に関係するのではなく、選手の使用するポールの長さや硬さ、ポール操作技術が影響してこのような結果になったと考えられる。しかし、一般的には踏切離地時の重心水平速度が大きいことは、長く硬いポールが使用でき、より大きな弾性エネルギーの蓄積を可能にすると

考えられる。また、渋川(1969)は両手でポールに加える力によってポール反発力を変化させられると述べ、Hubbard(1980)、Walker and Kirmser(1982)、Dapena and Braff(1983)、Griner(1984)はポールに関するモデル解析的研究から、ポールに加わる曲げ・伸展モーメントによってポールの湾曲量やポールの曲がり方は変化すると述べている。これらのことから、ポールの湾曲は重心水平速度のみではなく、選手のポールへの力の加え方が影響すると考えられ、ポール操作技術が重要であると言える。

本研究では、踏切離地時のポール弦反力と最大重心高との間に有意な相関は見られなかったが、ポール最大湾曲時では強い正の相関が見られた($r=0.72, p<0.001$)。また、ポール最大湾曲時のポール弦反力とポール伸展局面の最大重心鉛直速度、最大重心鉛直速度と最大重心高との間にはそれぞれ強い正の相関がみられた($r=0.81, p<0.001$)($r=0.91, p<0.001$)。これらの結果は、踏切離地時よりもポール最大湾曲時にかけてポール弦反力を大きくすることにより、ポール伸展局面で、より大きな最大重心鉛直速度を獲得できることを示唆している。

これらのことから、大きな最大重心高を獲得するためには、ポール最大湾曲時にかけてポール弦反力を大きくすることが重要であり、そのためには、大きな反発力のポールを使用することが望ましいと考えられる。しかし、踏切離地時からポール弦反力を高めてしまうと、前後方向のボックス反力が大きくなるので、身体のパール方向への移動を妨げることにより、ポールが立たない可能性があることから、踏切離地時のポール弦反力はあまり大きくしない方が望ましいと考えられる。

2. エネルギー変換率から見た上位群と下位群のスウィング動作

棒高跳は、力学的エネルギーに着目すると、助走によって獲得した運動エネルギーをポールに弾性エネルギーとして一時的に蓄積し、そして位置エネルギーに変換するものと考えられる。したがって、エネルギー変換率が高いことは最大重心高の獲得に重要であり、ポール操作技術にも優れていることを示すと考えられる。

しかし、本研究においてエネルギー変換率と最大重心高との間には有意な相関は見られなかった。また、踏切離地時の重心水平速度とエネルギー変換率との間にも有意な相関は見られず、最大重心高が大きい選手は全被験者のエネルギー変換率の平均値付近に集まる傾向が見られた。淵本ら(1994)は、世界一

流競技者を対象とした研究において、助走速度とエネルギー変換率との間に有意な負の相関が見られたことを報告している。本研究の結果と淵本らの報告を合わせると、最大重心高や記録が最も良い選手が必ずしもエネルギー変換率が良いわけではなく、逆に踏切離地時の重心水平速度は小さいがエネルギー変換率が良く、大きな最大重心高を得た選手がいることを示す。また、本研究では、エネルギー変換率とポール最大湾曲率との間に有意な正の相関が見られたことから、エネルギー変換率を大きくするには、ポールを操作して大きく湾曲させる技術が必要であると考えられる。

Table 4に示したように、上位群の踏切離地時の重心水平速度は下位群より有意に小さく、鉛直速度、跳躍角および最大重心高に差はなかったが、ポール最大湾曲率は上位群が有意に大きかった。これらのことは、上位群はポールを湾曲させる技術に優れ、エネルギー変換率を高め、重心速度が小さくても同程度の最大重心高を獲得していたことを示すと考えられる。そして、ポール弦反力では、上位群および下位群間で踏切離地時に有意差はなかったが、ポール最大湾曲時では、上位群が有意に大きく、ポール最大湾曲率も上位群が有意に大きかったことから、上位群は踏切離地後からポール最大湾曲時にかけてポール弦反力、ポール湾曲を大きくできるポール操作技術を有していたと考えられる。また、棒高跳では、踏切離地からポール最大湾曲時にかけて、スウィング動作を行うことから、両群間に見られたポール弦反力の変化の相違はスウィング動作によるものと推察される。踏切離地からポール最大湾曲時までのスウィング力(Fig.3)を見ると、下位群が踏切離地直後に大きな値を示し、その後両群ともに一度大きく減少し、再び増加していた。そして、増加後のピーク値が上位群で遅れて出現し、かつ大きな値を示した。これは、上位群では下位群よりもスウィング動作のタイミングが遅かったことによると考えられる。

Fig.4に示したように、上位群および下位群の回転スウィング力(左)と伸縮スウィング力(右)は、踏切離地直後に回転スウィング力が両群ともに正の値を示しており、これは踏切直後において選手がポールから力を受け、上側のグリップ回りに回転したことによると考えられる。踏切直後に回転スウィング力が大きいことは棒高跳の指導現場において「振られる」と呼ばれる現象に相当すると考えられる。「振られる」とは、踏切直後にコントロールを失い身体がグリップ回りに急激に回転することをいい、有効ではないとされている。村木(1982)、Tidow(1991)

は、棒高跳では踏切離地直後にペネトレーション(Penetration, 踏切離地時の姿勢を一時的に保ち、前方に突き進む動作)を行うことによってスウィング動作開始のタイミングを遅らせ、ポールの起き上がりとのスウィング動作を同期させることができると述べている。これは、上述の「振られる」現象に防ぐ役割を持つと考えられるが、下位群が踏切直後に顕著に大きな値を示し、スウィング力全体でも早期にピークが出現したことは、下位群では踏切直後に身体が振られたため、大きな角速度を生じたと考えられる。そして、この場合には、その後のスウィング局面においてポールや身体の制御が困難になると考えられる。一方、上位群は下位群より、踏切離地時の回転スウィング力が小さく、上位群は伸縮スウィング力のピークが遅れて出現し、その値も大きく、持続時間が長かった。これらのことは、上位群は踏切離地直後に身体のグリップ回りの回転を抑えて、それにより身体のコントロールが容易になりスウィング動作の開始を遅らせるとともに、正の伸縮スウィング力、すなわち、グリップと身体重心の距離を大きくする動作を行うことでスウィング力をポールに大きくしたと考えられる。また、15%時付近からは、伸縮スウィング力がスウィング力の成分の大部分を占めており、スウィング動作において伸縮スウィング力が強く影響したと考えられる。さらに、ポール弦反力(Fig.2)に両群間に相違が現れる時点と、スウィング力(Fig.3)に相違が現れる時点がほぼ一致していた。また、スウィング力の各成分で見ると、踏切離地直後は回転スウィング力が、その後は伸縮スウィング力が大きかった。これらのことを考えると、スウィング力、特に伸縮スウィング力がポール弦反力に大きな影響をもつことがわかる。

これらのことから、ポール湾曲局面でポール弦反力を大きくするためには、選手のスウィング力が重要で、そのため踏切離地直後は、振られないようにして、身体のコントロールを容易にする必要があり、そのためいんはペネトレーションが有効であると考えられる。そして、伸縮スウィング力を大きくする、すなわち上側のグリップと重心の距離を大きく保つようなスウィング動作を行うことによって、ポール最大湾曲時にかけてポール弦反力を大きくできると考えられる。

V. まとめ

本研究では、男子棒高跳選手の競技会における跳躍動作をバイオメカニクスの分析し、ポール湾曲

に影響を及ぼす要因,特に選手の動作とポール湾曲との関係を明らかにすることを目的とした.本研究で得られた結果をまとめると,以下ようになる.

- ①大きな最大重心高を獲得するためには,ポール湾曲局面においてポール弦反力を大きくする必要がある.
- ②ポール湾曲局面におけるポール弦反力の大きさには選手のスウィング力が関係し,踏切離地直後は回転スウィング力が,その後は伸縮スウィング力がポール弦反力により大きな影響を及ぼす.
- ③エネルギー変換率の下位群では,踏切離地直後の回転スウィング力が大きかったが,上位群では踏切離地後に遅いタイミングで発揮された伸縮スウィング力が大きかった.

これらのことから,棒高跳の技術に関して,以下のことが示唆できる.

- ・踏切離地時には「ペネトレーション」,すなわち,踏切離地時の姿勢を一時的に維持することにより,スウィング動作開始のタイミングを遅らせることが有効である.そのためには,踏切離地後に身体を後方に反らし,能動的なスウィング動作を行うイメージを持つことが役立つと考えられる.
- ・能動的なスウィング動作を習得するための鉄棒によるドリルでは,後方から身体を大きくスウィングし,グリップの真下を足が通過するあたりで大きくあふり動作を行う,あるいは,「踏切足をムチのようにして地面を削るようなイメージ」を持って行くと良いと考えられる.
- ・スウィング動作では,早期に膝を抱え込んだり,下側の腕を大きく湾曲させることは避けるべきである.

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 Sciences*, 15 (3), 155 - 162.

ベアー・ジョンストン : 長谷川節 訳 (1988) 工学のための力学(上・下). ブレイン図書出版: 東京. <Beer, F.P. and Johnston, E.R. (1977) *Vector mechanics for engineers (Statics, Dynamics)*. McGraw-Hill : NewYork.>

Dapena, J. and Braff, T. (1983) Use of separate hand locations to calculate ground reaction force exerted on a vaulting pole. *Med. and Sci. in Sports and Exercise* 15 (4),

313 - 318.

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), 188 - 193.

淵本隆文, 高松潤二, 阿江通良 (1992) 世界一流棒高跳選手のバイオメカニクスの分析. *Japanese Journal of Sports Science*. 11(10), 650 - 653.

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.

Griner, G.M. (1984) A parametric solution to the elastic pole-vaulting pole problem. *ASME J. Appl. Mechanics* 51 (2), 409 - 414.

Hay, J.G. (1967) Pole vaulting : a mechanical analysis of factors influencing pole-bend. *The Res. Quart.* 38, 34 - 40.

Hubbard, M. (1980) Dynamics of the Pole Vault. *J. Biomechanics* 13, 965 - 976.

村木征人, 室伏重信, 加藤 昭 (1982) 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, 東京, pp. 380 - 443.

渋川侃二 (1969) 運動力学. 大修館書店 : 東京.

Steben, R.E. (1970) A cinematographic study of selective factors in the Pole Vault. *The Res. Quart.* 41 (1), 95 - 104.

高松潤二 (1997) 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-. 筑波大学大学院体育研究科博士論文

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 第1巻, 日本陸上競技連盟, 東京, pp. 30 - 35.

田代哲也 (1970) 棒高跳. 丸山吉五郎(他) 陸上競技入門. 講談社, 東京, pp. 103 - 122.

Tidow, G. (1991) Model technique analysis for the pole vault. *Track technique* 114 : 3642 - 3648, 3652.

Walker, H.S. and Kirmser, P.G. (1982) Biomechanical parametric analysis of pole vaulting and optimization of performance. In: Ghista, DN(Eds.) *Human Body Dynamics:*

Impact, occupational, and athletic aspects.
Oxford University Press : New York, pp. 444
- 481.

Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980)
Assessment of signal and noise in the
kinematics of normal, pathological and
sporting gaits. In : Human Locomotion I
(Proceedings of the first biannual conference
of the Canadian Society of Biomechanics) 1,
pp. 92 - 93.