

## 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

武田 理<sup>1)</sup> 村木有也<sup>1)</sup> 小山宏之<sup>1)</sup> 阿江通良<sup>2)</sup>  
1) 筑波大学大学院 2) 筑波大学体育科学系

### Biomechanical analysis on the velocity of the center of gravity and pole bending for men pole vaulters

Osamu Takeda<sup>1)</sup> Yuya Muraki<sup>1)</sup> Hiroyuki Koyama<sup>1)</sup> Michiyoshi Ae<sup>2)</sup>  
1) Graduate School, University of Tsukuba  
2) Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

#### Abstract

The purpose of this study was to analyze the center of gravity (CG) for men pole vaulters and the pole bending during the takeoff and swing phases. Fifteen men pole vaulters, including a Japan national record holder, and their poles were videotaped in official competitions with a VTR camera for two-dimensional DLT technique. The record at the competitions was significantly related to the horizontal CG velocities at the touchdown and takeoff, takeoff angle, and the decrease in the CG velocity during the takeoff phase. Although no significant relationships were found between the horizontal CG velocity and the pole bending, the vaulters with smaller decrease in the CG velocity during the second half of the takeoff phase were able to bend their poles greater than those with larger loss of the CG velocity. The results imply that less decrease in the CG velocity during the takeoff phase may help to bend the pole largely and to acquire excellent record, as well as the horizontal CG velocity. There was an optimum range of the maximum pole bending to obtain maximum record, i. e., 55 to 70 percent of the whole length from the tip of the pole.

#### 1. 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。ポールの素材には、弾性の少ないヒッコリー材に始まり、竹、スチール、アルミニウム、ジュラルミンなどが用いられていたが、1962年にグラスファイバー製のポールが用いられ、アメリカのユールセス選手が16フィート(4m87)という驚異的な世界記録を樹立した。その後、世界記録が次々に更新され、現在では6m14(S. ブヅカ, ウクライナ)まで引き上げられた。この1962年からの飛躍的な記録の伸びは、大きな弾性を持つグラスファイバー製のポールによるところが大きい。

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。その結果、踏切離地時の水平速度が大きいこと、跳躍角が小さいことがポール湾曲を大きくする要因であると述べている。Steben(1970)は、跳躍高を従属変数として、ポールと身体の距離、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に最も大きな影響を及ぼすと報告している。淵本ら(1994)は、国内外の男子一流選手の動作を分析し、助走速度と最大重心高に強い正の相関が見られたことを報告している。このように棒高跳の跳躍高や記録には、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

知られている。また、林ら(2003)は、国内外の一流女子棒高跳選手の踏切動作を分析し、踏切時の重心速度において外国の一流選手との間に大きな差は見られなかったことなどを報告している。しかし、この数年において記録の向上が著しい日本人棒高跳選手を対象としたバイオメカニクスの研究はまだ少ない。

一方、棒高跳において重要なポールの曲がりと選手との動きの関係については先述した Hay(1967)の研究があるが、これは40年近く前のものである。高松ら(1996)は、実験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、跳躍者の動作はポールに影響を与える、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であるなどと述べている。しかし、この研究を除くと、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としたものはほとんどない。

そこで、本研究では、公式競技会における国内外の男子一流棒高跳選手および学生選手計15名の踏切からスウィングまでの動作を身体重心、およびポール湾曲度に着目して分析し、これらと記録との関係を検討することを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1 VTR 撮影

VTR撮影は、2003年から2004年にかけて行われた公認陸上競技会における棒高跳に出場した国内外

一流選手および学生競技者計15名を分析対象者とした(表1)。VTRカメラは競技場のメインスタンド最前列に水平に固定し、踏切からクリアランスまでを撮影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テープの一部は日本陸連科学委員会が撮影したものである。

### 2.2 データ処理

撮影したVTR画像から、踏切2歩前離地からポール伸展後15コマまでの動作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、身体計測点23点、およびポール上の計測点9点の計32点の座標を得た。得られた座標は2次元DLT法を用いて実座標に換算した。分析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ら1980)、Butterworth low-pass digital filterを用いて行った。X座標(水平)が4.2~8.4Hz、Y座標(鉛直)が4.8~8.4Hzの範囲であった。

### 2.3 算出項目

- 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、阿江ら(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。重心速度は重心変位を時間微分して算出し、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踏切局面における重心水平速度減速率  
踏切脚の膝関節が最も屈曲した時点を踏切中間点(MKF)とし、踏切足接地(TD)から踏切中間点まで

表1 踏切接地時、中間点、離地時における重心水平および鉛直速度、跳躍角、記録

| 分析対象者   | 記録(m)     | 踏切足接地時    |             | 踏切中間点     |           | 踏切足離地時    |           | 跳躍角(deg)   |
|---------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
|         |           | 水平(m/s)   | 鉛直(m/s)     | 水平(m/s)   | 鉛直(m/s)   | 水平(m/s)   | 鉛直(m/s)   |            |
| A       | 5.50      | 9.63      | -0.53       | 8.56      | 1.78      | 7.52      | 2.19      | 18.24      |
| B       | 5.80      | 9.40      | 0.20        | 8.20      | 2.46      | 7.71      | 2.57      | 18.79      |
| C       | 5.40      | 9.11      | 0.11        | 8.16      | 2.04      | 7.50      | 2.17      | 16.96      |
| D       | 5.20      | 8.66      | -0.16       | 7.65      | 2.32      | 7.12      | 2.06      | 18.54      |
| E       | 6.04      | 9.31      | 0.49        | 8.34      | 1.97      | 8.13      | 2.37      | 16.25      |
| F       | 5.20      | 9.05      | -0.71       | 8.14      | 1.55      | 7.33      | 2.16      | 17.86      |
| G       | 5.20      | 9.05      | 0.26        | 7.59      | 2.35      | 6.96      | 2.29      | 19.51      |
| H       | 5.50      | 8.89      | 0.29        | 7.55      | 2.84      | 7.09      | 2.14      | 18.08      |
| I       | 5.40      | 8.94      | 0.28        | 7.62      | 2.55      | 6.81      | 2.39      | 19.90      |
| J       | 5.20      | 8.92      | -0.05       | 7.46      | 1.76      | 6.81      | 2.49      | 20.68      |
| 学生A     | 5.20      | 8.67      | -0.12       | 7.74      | 1.31      | 6.94      | 1.95      | 16.59      |
| 学生B     | 5.20      | 9.46      | -0.62       | 7.79      | 2.53      | 7.22      | 2.86      | 21.25      |
| 学生C     | 4.60      | 8.40      | 0.27        | 6.87      | 2.58      | 6.26      | 2.79      | 24.79      |
| 学生D     | 4.20      | 8.40      | 0.32        | 6.98      | 2.29      | 6.23      | 2.51      | 22.36      |
| 学生E     | 4.60      | 8.61      | -0.043      | 7.29      | 2.09      | 6.32      | 2.77      | 23.69      |
| 平均±標準偏差 | 5.21±0.47 | 8.96±0.38 | -0.001±0.37 | 7.73±0.48 | 2.16±0.43 | 7.06±0.54 | 2.38±0.28 | 19.57±2.56 |

(踏切前半)、踏切中間点から踏切足離地 (TO) まで (踏切後半)、TD から TO まで (踏切全体) の、各局面における重心水平速度減速率を以下の式で算出した。

$$\text{踏切前半の減速率} : \text{DRTD-MKF} = (\text{VMKF} - \text{VTD}) / \text{VTD} \times 100$$

$$\text{踏切後半の減速率} : \text{DRMKF-TO} = (\text{VTO} - \text{VMKF}) / \text{VMKF} \times 100$$

$$\text{踏切全体の減速率} : \text{DRTD-TO} = (\text{VTO} - \text{VTD}) / \text{VTD} \times 100$$

ここで、VMKF は踏切中間点の重心水平速度、VTD は踏切足接地時の重心水平速度、VTO は踏切足離地時の重心水平速度である。

### ③ポール湾曲率

ポールの上端と下端を結んだ線分の長さを弦長とし、湾曲開始から伸展終了までの弦長を算出した。ポール伸展時の弦長に対する各時点の弦長の比率をポール湾曲率 (以下の式) とし、最も湾曲率が大きい時点を最大湾曲時 (MBP) とした。

$$\text{ポール湾曲率} = 100 - (\text{各時点の弦長} / \text{ポール伸展時の弦長}) \times 100$$

### ④ポール最大湾曲点

最大湾曲時におけるポール各部分の曲率半径を次式で算出し、曲率半径の最も小さい点を最大湾曲点とした。そして、ポールの下端から最大湾曲点までの各部分長の総和を、最大湾曲時のポール長で除すことにより、最大湾曲点の相対位置を算出した。

$$R_i = L_i / (\theta_{i+1} - \theta_i)$$

ここで、 $R_i$  はポール部分  $i$  の曲率半径、 $\theta_i$  および  $\theta_{i+1}$  はポール各部分とが水平となす角度、 $L_i$  はポール部分  $i$  の部分長を示している。曲率半径が小さいと湾曲が大きいことを示す。

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、有意水準は 5% 以内とした。

## 3. 結果

### 3.1 重心速度および跳躍角

表 1 は分析対象者の踏切足接地時、中間点、離地時における重心速度、跳躍角などを示したものである。平均で見ると、重心水平速度は踏切足接地時が最も大きく ( $8.96 \pm 0.38 \text{ m/s}$ )、踏切足離地時 ( $7.06 \pm 0.54 \text{ m/s}$ ) にかけて減少した。鉛直速度は踏切足接地時 ( $-0.001 \pm 0.37 \text{ m/s}$ ) が最も小さく、中間点をへて、踏切足離地時 ( $2.38 \pm 0.28 \text{ m/s}$ ) にかけて増加していた。

図 1 は分析対象者の記録と踏切足接地時と離地時における重心水平速度および跳躍角の関係を示したものである。重心水平速度と記録との間には有意な正の相関が見られた ( $r = 0.91, p < 0.001$ )。また、跳躍角と記録との間にも有意な負の相関が見られた ( $r = -0.77, p < 0.001$ )。

### 3.2 重心水平速度減速率

表 2 は踏切局面における重心水平速度減速率および記録に対する相関係数を示したものである。平均では、踏切前半の減速率は後半より大きかったが (前半  $-13.8 \pm 2.9\%$  ; 後半  $-8.7 \pm 2.7\%$ )、一流選手 A, および E のように後半の減速率が大きい選手も見られた。一方、一流選手 E は後半の減速率が  $-2.5\%$  と小さい値を示した。踏切全体の重心水平速度減速率と記録との間には有意な正の相関が見られ ( $r = 0.83, p < 0.001$ )、踏切前半および後半においても有意な正の相関が見られた (前半  $r = 0.60, p < 0.05$  ; 後半  $r = 0.67, p < 0.01$ )。

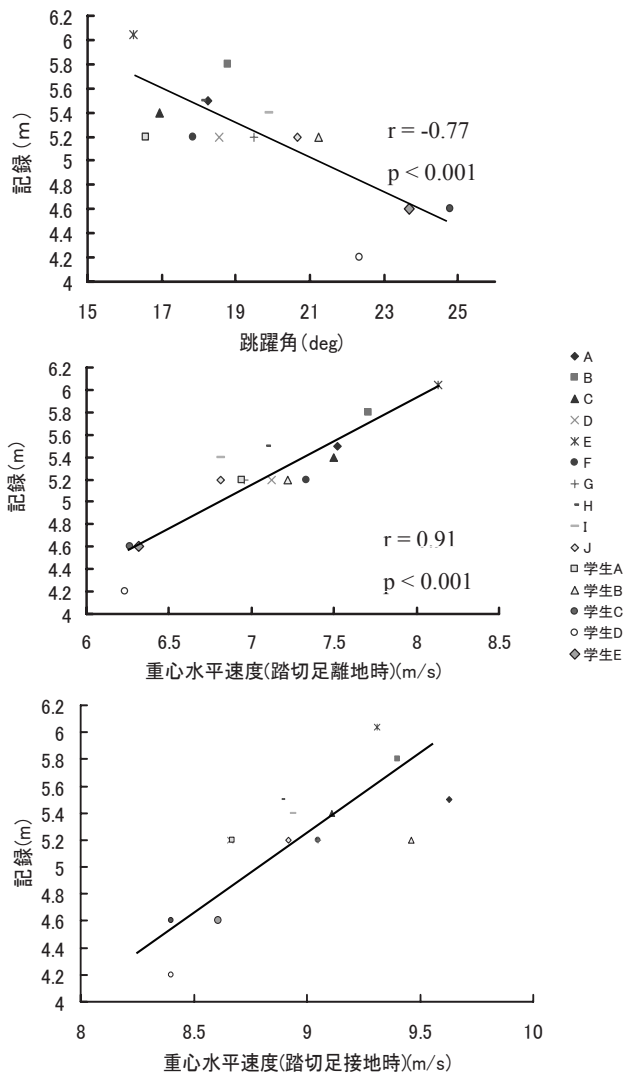


図 1 跳躍角および重心水平速度と記録の関係

表2 踏切局面における重心水平速度減速率および記録との相関係数

| 分析対象者   | DR TD-MKF(%)           | DR MKF-TO(%)           | DR TD-TO(%)             |
|---------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| A       | -11.1                  | -12.1                  | -21.9                   |
| B       | -12.8                  | -6.0                   | -18.0                   |
| C       | -10.4                  | -8.1                   | -17.7                   |
| D       | -11.7                  | -6.9                   | -17.8                   |
| E       | -10.4                  | -2.5                   | -12.7                   |
| F       | -10.1                  | -10.0                  | -19.0                   |
| G       | -16.1                  | -8.3                   | -23.1                   |
| H       | -15.1                  | -6.1                   | -20.2                   |
| I       | -14.8                  | -10.6                  | -23.8                   |
| J       | -16.4                  | -8.7                   | -23.7                   |
| 学生A     | -10.7                  | -10.3                  | -20.0                   |
| 学生B     | -17.7                  | -7.3                   | -23.7                   |
| 学生C     | -18.2                  | -8.9                   | -25.5                   |
| 学生D     | -16.9                  | -10.7                  | -25.8                   |
| 学生E     | -15.4                  | -13.2                  | -26.6                   |
| 平均±標準偏差 | -13.8±2.9              | -8.7±2.7               | -21.3±3.8               |
| 相関係数    | 0.60<br>( $p < 0.05$ ) | 0.67<br>( $p < 0.01$ ) | 0.83<br>( $p < 0.001$ ) |

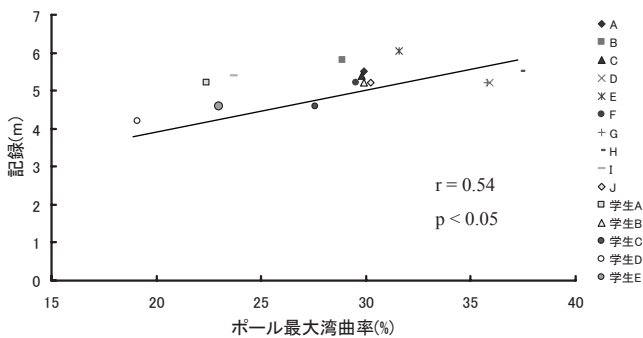


図2 ポール最大湾曲率と記録の関係

### 3.3 ポールの湾曲

図2は記録とポール最大湾曲率の関係を示したものである。記録とポール最大湾曲率との間には有意な正の相関が見られた ( $r = 0.54$ ,  $p < 0.05$ )。図3はポール最大湾曲率と跳躍角および重心速度との関係を示したものである。跳躍角、重心水平速度とポール最大湾曲率との間には有意な相関は見られなかった。

図4は踏切における重心水平速度減速率とポール最大湾曲率との関係を示したものである。踏切前半および踏切全体の重心水平速度減速率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が、踏切後半の重心速度減速率との間には有意な正の相関が見られた ( $r = 0.61$ ,  $p < 0.05$ )。

図5はポール最大湾曲点と記録との関係を示したものである。両者間には有意な関係は見られなかった。しかし、両者の関係は最大湾曲点が55～70%あたりで高い記録を示すものが多い2次曲線的傾向が見られた。

## 4. 考察

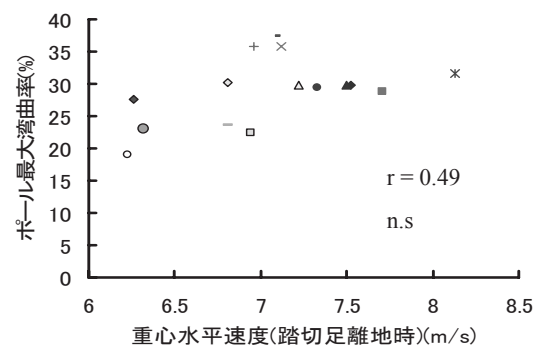
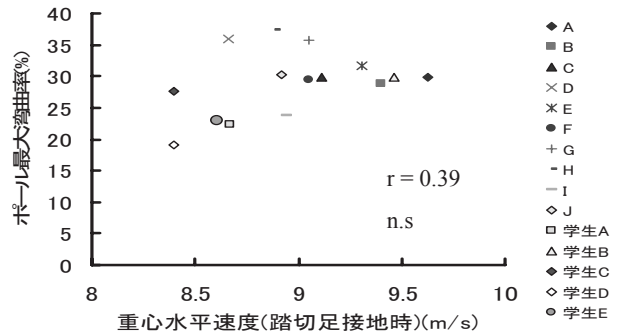
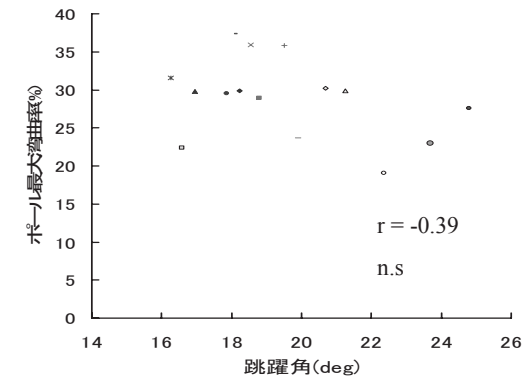


図3 重心速度および跳躍角とポール最大湾曲率の関係

### 4.1 身体重心の速度と記録

Steben(1970), 淵本ら(1994)は、踏切離地時の水平速度と記録の間に強い正の相関が見られたことを報告している。また、Hay(1967)は踏切離地時の水平速度とポール湾曲との間に有意な正の相関があることを報告している。本研究においても、踏切離地時の重心水平速度と記録の間に有意な正の相関が見られた。踏切離地時の重心水平速度が大きいと、長く、硬いポールの使用が可能となり、さらにHay(1967)の研究から、より大きな弾性エネルギーをポールに蓄積することができると考えられる。したがって、踏切離地時の水平速度は記録を決定する大きな要因と言える。

踏切離地時の水平速度を高めるためには、①助走速度を大きくすること、②踏切における減速を小さくすることが考えられる。図1に示したように、記録の良い選手ほど助走速度が大きい傾向が見られ、

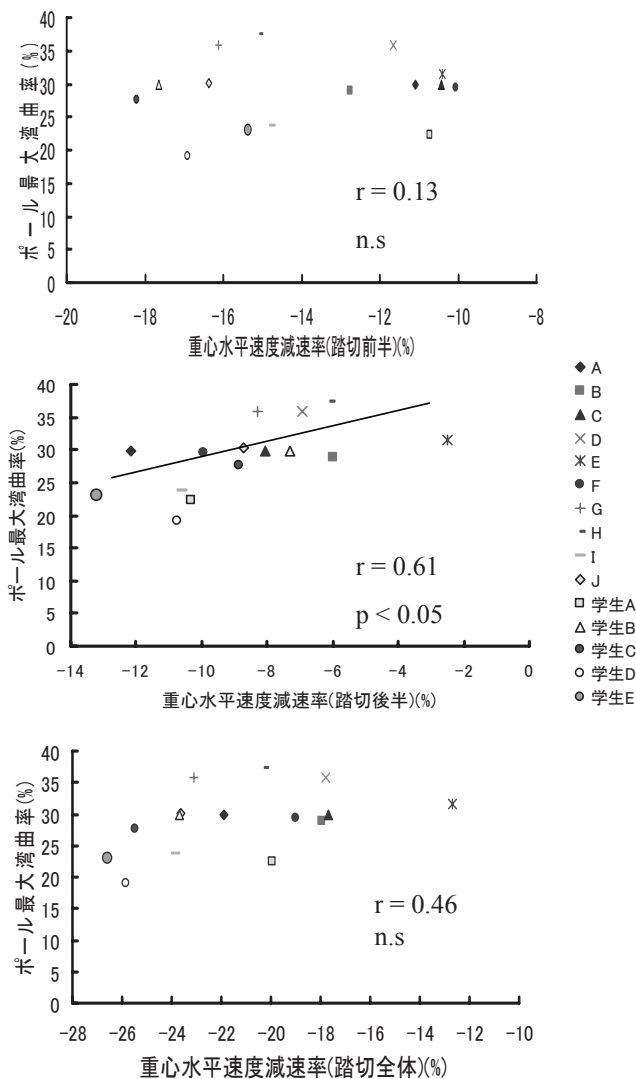


図4 重心水平速度減速率とポール最大湾曲率の関係

踏切における重心水平速度減速率と記録との間にも有意な正の相関が見られた(表2)。これらの結果は、競技水準の高い選手ほど、助走速度が大きいとともに、踏切局面における減速も小さいことを示している。また、跳躍角と記録との間には、有意な負の相関が見られた。この結果は、Hay(1967)の報告と一致していた。さらに、最も記録の良い選手Eの離地時の鉛直速度は全分析対象者の中で最も小さかった(表1)。これらのことから、棒高跳において、助走速度を高めること、踏切局面での水平速度の減速を小さくすること、さらに低く跳び出すことが良い記録につながることを示していると考えられる。

#### 4.2 ポールの湾曲と記録

棒高跳では、助走によって得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、再び選手の運動エネルギー、そして位置エネルギーに変換する。したがって、ポールを大きく湾曲さ

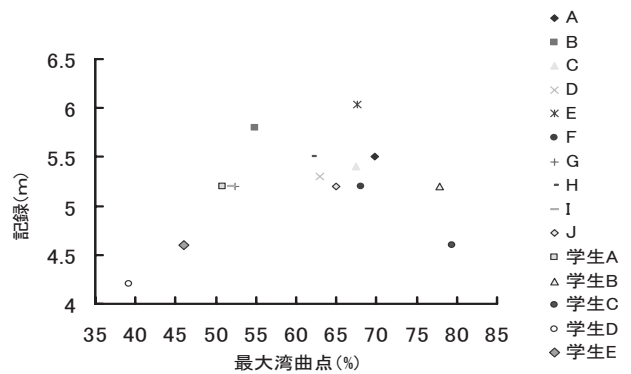


図5 ポール最大湾曲点と記録の関係

せることが良い記録につながると考えられる。記録とポール最大湾曲率の間には有意な正の相関が見られたが(図2)、重心速度や跳躍角とポール最大湾曲率の間には有意な相関が見られなかった(図3)。一方、踏切後半の重心水平速度減速率とポール最大湾曲率の間には有意な正の相関が見られた(図4)。これらのことと、踏切離地時の重心水平速度とポール最大湾曲率との間に正の有意傾向( $r=0.49, p<0.1$ )があったことを考え合わせると、踏切後半の減速率が小さいことの方が、ポールを大きく湾曲させるのに役立つと考えられる。また、この結果は棒高跳においても減速の小さい踏切を行うことが重要であることを示唆するものであり、今後さらに検討する必要があると考えられる。

ポールの最大湾曲点と記録の関係(図5)を見ると、ポールの最大湾曲点と記録の間には、ポール下端から55~70%の場合に良い記録が得られる傾向があり、ポール上端、あるいは下端に近い部分が最大に湾曲した場合には、記録が低下する傾向があるようである。さらに、ポール下端に近い部分の湾曲が大きい場合には、記録が良くなかった。また、ポールの下部が最も湾曲した学生選手DやEの場合(最大湾曲点39%, 46%)は、棒高跳の指導現場や選手の経験から言われている、いわゆる「下曲がり」という現象に相当すると考えられる。この結果は、ポールの最大湾曲点には最適な位置(下端から55~70%)が存在することを示し、ポールの最大湾曲点は、棒高跳技術の評価の観点の一つになると考えられる。

1991年の第3回世界陸上に出場した選手の踏切時の重心水平速度(淵本ら、1994)と本研究における日本一流選手7名(A, B, C, F, G, H, I)の値を比較すると(世界:  $9.52 \pm 0.37$  m/s vs. 日本:  $9.15 \pm 0.27$  m/s)、世界一流選手の方がやや大きい程度である。しかし、踏切離地時の重心水平速度を比較



すると ( $8.17 \pm 0.31$  m/s vs.  $7.27 \pm 0.27$  m/s)、世界一流選手との間には1 m/s 近い差があり、世界一流選手と日本一流選手の間には、踏切時の減速に差があると考えられる。これまで、日本選手は世界一流選手に比べ助走速度が小さいとされてきたが、この結果から現在の日本選手の助走速度は、世界一流選手と大差ないと言える。しかし、日本選手では、踏切局面において水平速度の減速が大きかったため、踏切離地時の速度が小さくなり、結果として高い記録につながらなかったのであろう。また、踏切後半の重心水平速度減速率とポール最大湾曲率との間に有意な相関が見られることから、踏切での大きな減速がポールの湾曲を小さくし、記録の差となって表れたものと考えられる。

本研究では、2次元分析を用いたため、ポールの横方向の湾曲については言及できなかったが、今後は3次元分析を行い、より詳細にポールの挙動を研究する必要がある。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- ① 踏切足接地時と離地時の重心水平速度および跳躍角と記録との間には有意な相関が見られた。
- ② 踏切における水平速度減速率と記録の間には有意な正の相関が見られた。
- ③ 重心水平速度とポール最大湾曲率の間には有意な関係はなかったが、踏切後半の重心水平速度減速率とポール最大湾曲率との間に有意な相関が見られた。
- ④ ポールの最大湾曲点の位置が55～70%で良い記録が得られていた。

以上のことから、棒高跳では、大きな踏切離地時の重心水平速度、低い跳躍角、ポールを大きく湾曲させることが重要であるが、ポールの湾曲を大きくするには踏切、特に後半における水平速度の減速を小さくすることが役立つと考えられる。また、ポールの最大湾曲点には最適な範囲が存在し、これはポール長の55～70%の位置であると考えられる。日本選手の助走速度は世界一流選手のものとは大きな差はなくなっているが、踏切局面での減速が大きいことを考えると、踏切技術の改善が必要であり、このことによってポール湾曲を大きくでき、記録も向上すると考えられる。

## 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係数. *Japanese Journal of Sports Science* 15(3), 155-162
- 林 忠男, 持田 尚, 阿江通良(2003) 2002 スーパー陸上女子棒高跳分析報告書, 日本陸連科学委員会研究報告, 第2巻1号, 17-29
- 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
- Hay JG(1967) Pole vaulting: a mechanical analysis of factors influencing pole-bend. *Res Quart* 38:34-40
- Steben RE(1970) A cinematographic study of selective factors in the Pole Vault. *Res Quart* 41(1):95-104
- 高松潤二(1996) 棒高跳に関するバイオメカニクス的研究 - ポールの挙動とボックス反力について - 筑波大学大学院体育科学研究科修士論文
- Wells, R.P and Winter, D.A(1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Human Locomotion*, 92-93