

走高跳における助走の定量化

Quantification of the approach in the high jump

松 下 陸* 横 山 慶 子** 山 本 裕 二**

Riku MATSUSHITA * Keiko YOKOYAMA ** Yuji YAMAMOTO **

Abstract

On jumping events of track and field, the run-up approach is one of the most important phases for determining a jumper's performance. Among the jumping events, the high jump event has a unique approach that has no constraints regarding the take-off position and is combined with the straight and curved approach. Thus, the optimal way to regulate the run-up approach for high jumping is unclear. The aim of this research is to examine the variables which can quantitatively evaluate the high jump approach. The candidate variables were the footfall position, step length, and step direction. The variables regarding the footfall positions were defined based on the absolute coordinate referenced by the position of bar, and the relative coordinates referenced by the distribution of the trials. The variables for the step lengths were defined as the straight distance and curved distance between two footfall positions. The variables for the step directions were the absolute angle as the direction of steps against the bar and the relative angle as the direction of following step against a previous one. A total of 34 trials at six different heights of one high jump athlete were analyzed. The two-dimensional data for eight footfall positions in the run-up approach were extracted from the movie clips recorded by video camera by using the two-dimensional direct linear transformation method. The values of the mean and standard deviation among the trials on each height for each variable were calculated by using the data of the footfall position. A few possibilities were discovered for the proposed variables to evaluate the quantification of the high jump approach. First, the ratio between the standard deviations of the footfall positions of the two axis directions on the absolute coordinate might reveal the method for the regulation on the two-dimensional take-off position. Second, both the variables for the straight and curve step length might verify the regulation for the approach immediately before the take-off which has been suggested in a previous study about the long jump. Third, the value of the absolute angle might help evaluate the change of the approach angle against the bar right before the take-off, and the value of relative angle might help evaluate the beginning of the curved approach. The analysis of these variables has revealed that the trajectory of the run-up approach of the high jump has redundancy and that would include an ill-posed problem.

1. 緒言

陸上競技には大別すると、トラック種目とフィールド種目の2種目があり、フィールド種目はさらに跳躍種目と投擲種目に分かれる。現在の跳躍種目には、どれだけ遠くへ跳べるかといった跳躍長を競う競技として、走幅跳と三段跳があり、どれだけ高く跳べるかといった跳躍高を競う競技として、走高跳と棒高跳がある。阿江(1996)が示した広義の跳躍の分類によると、これらの4

種目は共通して、跳躍するために助走を用いる。現代の跳躍種目において、走幅跳、三段跳、棒高跳は、その助走軌道は直線であるが、走高跳で現在主流となっている背面跳を用いる競技者は、助走の前半では直線、後半では曲線を描くような軌道を描く。このような特徴の現れる背面跳は、1968年メキシコオリンピックにおいてアメリカ合衆国の Dick Fosbury が初めて競技会で用いて優勝したことを契機に用いられている。しかしながら、背面跳の以前に主流であったベリーロールは、直線的な軌

* 名古屋大学大学院教育発達科学研究科
** 名古屋大学総合保健体育科学センター
* Graduate School of Education and Human Development, Nagoya University
** Research Center of Health, Fitness and Sports, Nagoya University

道であり、直線路と曲線路を組み合わせた助走は、跳躍種目の中でも背面跳に特有のものといえる¹⁾。

走高跳でより高い跳躍を実現するためには、踏切時にそれまでの助走で得た身体重心の水平速度を鉛直速度へ転換することが求められる。阿江 (1996) によれば、走高跳で現在ほとんどの競技者に用いられている背面跳の踏切においては、身体を後傾させることにより、身体重心の鉛直移動距離を大きくすることで得られる回転運動によって、より大きな鉛直速度を獲得する必要性を指摘しており、この回転運動で跳躍に必要な身体重心の鉛直速度の60~70%が獲得されると述べている。しかし踏切に入る瞬間に、急に後傾するのは困難であるため、事前に膝関節の屈曲や助走の後半でカーブを描くような軌道で走ることにより、身体を内傾させることで重心を下げるのが有効であると指摘している。特に、走高跳の踏切4歩前あたりから行われるカーブを描くような助走は、先に紹介した直走路を走る3種目や、背面跳び以前に主流な跳躍方法であったベリーロールのような走高跳の跳躍方法での助走とは異なる特徴といえる。ただ、助走によって身体重心の水平速度が得られなければ、鉛直速度に上手く転換できたとしても高く跳ぶことはできない。つまり、助走において、いかに水平速度を得ながら踏切時の回転運動に繋げていくかという点において、直線路のみの他の跳躍種目と比較して走高跳における助走は、接地位置やステップ長だけでなく、バーに対する進入角度やそれを左右するステップの方向など複雑な調整が必要とされると考えられる。

跳躍種目の助走到に着目した研究としては、Lee, Lishman, & Thomson (1982) の走幅跳の研究がある。彼らは、走幅跳の競技者が踏切直前の局面において、それ以前に蓄積されていた接地位置のばらつきを減少させる一方で、ストライド長のばらつきを増加させることから、ストライド長の調整を行っていることを報告している。この結果は、走幅跳には踏切板という、踏切位置の制約が、競技ルールに含まれるために生じている。Leeらは、Gibsonの提唱した生態学的知覚論 (Gibson, 1979) に基づき、光流の変化から行為の分節化に使われる情報を、接触までの残り時間 (time-to-contact) として特定している (Lee & Reddish, 1981)。上述した走幅跳の研究 (Lee et al., 1982) では、これを助走における歩幅調整に援用し、競技者が助走で踏切板に到達するまでの時間を、接触までの残り時間として見積もり、助走の踏切を合わせていると考えている。同様の研究は、他の跳躍競技でも確かめられている。例えば、田村・湯浅・石村・磨井 (2012) は、棒高跳では、踏切の数歩前までに蓄積されたストライド長の誤差を踏切に至るまでに調整することを確認し、自己記録が高い選手ほど踏切2歩前ま

でのストライド調整率が高いことを報告している。

このように、これまでの跳躍競技の助走の特徴を定量化する指標として、Lee et al. (1982) や田村他 (2012) の研究では、片側の足のつま先の接地位置から反対側の足のつま先の接地位置までの距離 (ストライド長) と、各助走における接地位置と踏切板あるいはボックスまでの距離を用いている。また歩幅調整を検討するために、これらの標準誤差あるいは標準偏差を算出することによって、踏切に至るまでのばらつきの減少あるいは増加を助走の歩幅調整機構の指標としている (Lee et al., 1982; 田村他, 2012)。これは走幅跳と棒高跳の助走が直線で次元であるために、ステップ長および踏切板もしくはボックスまでの距離を歩幅調整の指標とすることができることを示している。

走高跳における助走の研究は、これまで踏切における身体重心の鉛直速度にかかわる内傾角度や後傾角度のような踏切準備局面に関する研究 (戸邊・莉山・林・木越・尾懸, 2019) や、曲線助走におけるカーブの半径と接地位置との関係 (Becker, Kerin, & Chou, 2013) は報告されている。しかしながら、走高跳の助走における試技ごとの接地位置やストライド長のばらつきなど、助走における歩幅調整を検証した研究は見当たらない。その理由は、走高跳に特有のルールや助走の特徴が、助走における歩幅調整の検討を困難にしているためと考えられる。第一の理由は、踏切位置の制約がないことが挙げられる。走幅跳と三段跳では、踏切板があり、跳躍距離は踏切板の砂場先端から着地の最も近い位置までが計測される。このルール上の制約から、走幅跳と三段跳の競技者には、ファウルをしない範囲で出来る限り踏切板の砂場先端に近い位置で踏み切ることが要求される。また、棒高跳では、ポールをかけるボックスが決まった位置にあり、跳躍を行う上での最終的な支点の位置が固定されていて、全競技者の最終的なポールの位置は同じであるため、この場合も踏切位置の制約があるといえる。他方、走高跳の場合は、跳躍するバーの位置は固定であるものの、踏切位置には制約がない。そのため、踏切位置については熟練の競技者の間でも個人差がみられ (赤井・村木・阿江, 2006)、その調整を検証することは簡単ではない。また第二の理由は、前述したように、背面跳を行う走高跳の競技者は、直線と曲線を組み合わせた助走を行うことである。つまり、他の跳躍種目のように1次元のみで歩幅調整を検討するのではなく、2次元平面で曲線部分も含めた歩幅調整を検討する必要がある。このことは、単に歩幅という1次元上の長さのみを問題にするだけでは不十分であることを意味するので、本研究では助走調整と呼ぶ。また第三の理由は、走幅跳と三段跳という跳躍長を競う競技と、走高跳と棒

高跳という跳躍高を競う競技では、その競技形式が異なる点が挙げられる。跳躍長を競う競技では、3回あるいは6回の試技で最も長い距離が記録となるため、すべての跳躍において全力で跳躍を行う。他方、跳躍高を競う競技では、同じ高さを3回まで挑戦でき、最終的にどの高さまで跳躍できたかを競うため、必ずしもすべての試技において全力で跳躍する必要はない。このことは、助走における調整は、単にバーに対する踏切位置の調整だけでなく、バーの高さにも依存して助走が調整されている可能性がある。

背面跳の助走調整を検討するため、本研究においても直線路での助走の歩幅調整の先行研究と同様に、走高跳の助走調整について、2次元平面上において分析することが可能な接地位置とストライド長（本研究ではステップ長と呼ぶ）を指標とする。ただし、助走が直線だけでなく、曲線も含まれるために、バーを基準とした絶対座標系と進行方向に対する相対座標系での接地位置や歩幅の算出が必要となる。さらに、曲線路での助走の調整を評価するために、バーに対する進入角度、あるいは曲線の曲がり具合を評価するために進行方向に対する助走角度を検討する必要がある。

以上のことから本研究では、走高跳の助走を定量的に評価するための指標を検討することを目的とする。そのために、1名の走高跳選手の跳躍試技を題材として候補指標を検証し、バーの高さに応じた助走の調整機構について考察する。

2. 候補指標の定義

2.1 接地番号とステップ番号

本研究では、合計で8つの接地位置からなる助走を対象とした。この際の助走の最も始めの接地は右足であり、その後、左右交互に接地を繰り返し、8番目の接地位置において、跳躍動作に入るための踏み切り動作を左足で行う。本研究では、これらの8つの接地位置に接地番号 (FN: Footfall Number) を定義する。具体的には、図1に示すように、最終の接地位置である踏切の接地番号を0 (FN₀) とし、その1歩前の接地番号を-1 (FN₋₁)、2歩前の接地番号を-2 (FN₋₂) といったように順に番号を付与する。つまり本研究では、踏切 (FN₀) から踏切7歩前 (FN₋₇) までの合計で8つの接地位置を対象とする。

さらに、これらの接地位置を繋ぐ動作、すなわち、助走における片側の足の接地から反対側の足の接地に至る動作をステップと呼び、各ステップの番号をステップ番号 (SN: Step Number) として定義する。このステップ番号に関しては、ステップに関わる2つの接地位置のうち、接地位置の小さい番号と一致するように定義する。例えば、図1に示すように、踏切1歩前の接地位置 (FN₋₁) から踏切の接地位置 (FN₀) へのステップの番号は、FN₋₁と同様の番号の-1 (SN₋₁) とする。同様に、踏切2歩前の接地位置 (FN₋₂) から踏切1歩前の接地位置 (FN₋₁) へのステップの番号は-2 (SN₋₂) といったように順に番号を付与する。つまり本研究では、踏切1歩前

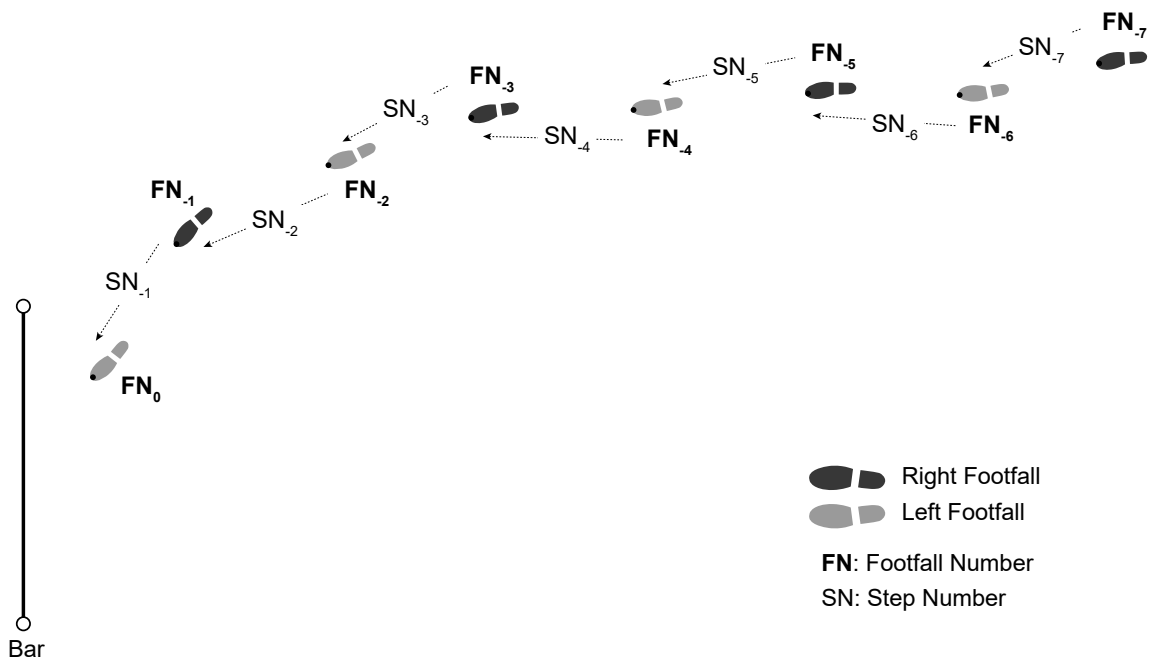


図1. 接地番号 (Footfall Number) とステップ番号 (Step Number) の定義。

(SN₁) から踏切7歩前 (SN₇) までの合計7つのステップを対象とする。

2.2 接地位置

助走における合計8つの接地位置 (FN₀~FN₇) に関して、試技間の平均とばらつきを定量化する(図2)。まず、バーとの位置関係に基づいて定義された絶対座標系に基づいて、接地位置の平均とばらつきを評価する。次に、試技間の分布から算出した相対座標系に基づいて、接地位置のばらつきを評価する。

2.2.1 絶対座標系

絶対座標系では、競技場内に設置されているバーと平行の方向を Y 軸方向、バーに対して垂直の方向を X 軸方向とする (図2A)。8つの接地位置 (FN₀~FN₇) のそれぞれに関して、試技間の平均とばらつきを X 軸方向と Y 軸方向のそれぞれで算出する。具体的には、接地番号 j の接地位置 FN_j の平均位置 (\bar{x}_j, \bar{y}_j) は、i 番目の試技の接地位置の座標を (x_i, y_i)、その試技数を n としたとき、以下のように定義できる。

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

さらに、FN_j の接地位置のばらつきは、試技間の標準偏差 (SDx_j, SDy_j) として以下のように定義できる。

$$SDx_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_j)^2}{n}}$$

$$SDy_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_j)^2}{n}}$$

この指標は、バーに対する平行方向と垂直方向の両方向について、助走における各接地位置の平均とばらつきを評価するものである。

2.2.2 相対座標系

相対座標系では、各接地位置における全試技の分布に基づいて座標系を定義する(図2B)。具体的には、8つの接地位置 (FN₀~FN₇) のそれぞれに関して、全試技の接地位置の分布に基づいて、等確率楕円を算出し(水野、1996)、楕円の長軸方向と短軸方向を座標系とする。そして、各座標系について、分布の標準偏差を求め、その長軸方向の長さ、短軸方向の長さを相対座標系でのばらつきと定義する。この指標は、図2Bから分かるように、助走の進行方向に対するばらつきが、長軸方向で評価でき、それに直交するばらつきが短軸方向として評価できる。

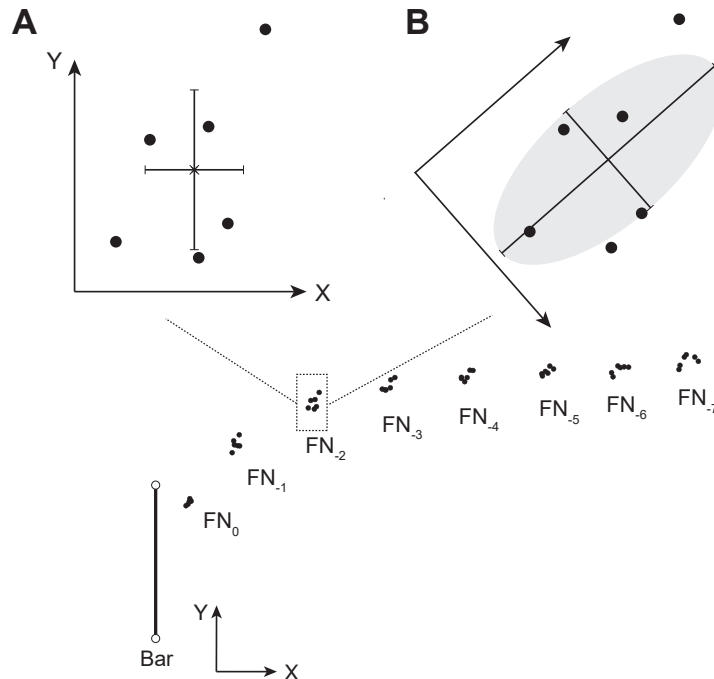


図2. 接地位置を評価する2指標の定義 (FN₀~FN₇). A: 絶対座標系による指標, B: 相対座標系による指標 (FN₂の場合を例示す).

2.3 ステップ長

助走におけるステップの長さ、すなわちステップ長 (step length) を直線距離と曲線距離の2種類の方法で定義する (図3)。具体的には、接地位置 FN_j と接地位置 FN_{j+1} を繋ぐステップ (SN_j) のステップ長について、直線距離に関しては、2つの接地位置 (FN_j, FN_{j+1}) に基づいて定義し、曲線距離に関しては、4つの接地位置 ($FN_{j-1}, FN_j, FN_{j+1}, FN_{j+2}$) に基づいて定義する。

2.3.1 直線距離

図3Aに示すように、 SN_j の直線距離のステップ長は、2つの接地位置 (FN_j, FN_{j+1}) を結ぶ直線距離とする。具体的には、 FN_j および FN_{j+1} の位置座標を (x_j, y_j) および (x_{j+1}, y_{j+1}) とし、直線距離を L_j としたとき、以下のように定義できる。本研究では、合計7つのステップ ($SN_1 \sim SN_7$) における直線距離のステップ長を算出する。

$$L_j = \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2}$$

2.3.2 曲線距離

図3Bに示すように、 SN_j の曲線距離のステップ長は、4つの接地位置 ($FN_{j-1}, FN_j, FN_{j+1}, FN_{j+2}$) に基づいて定義した。具体的には、 FN_j と FN_{j+1} を含む2種類の3つの接地位置 (FN_j, FN_{j+1}, FN_{j+2}) および (FN_{j-1}, FN_j, FN_{j+1}) に基づき、それぞれで SN_j の円弧の長さを求める。そして、これら2種類の円弧の長さの平均をとった。なお、 SN_1 および SN_7 については、それぞれ一つ前、一つ後の FN が存在しないため、3つの接地位置、すなわち、 SN_1 については FN_0, FN_1, FN_2 を通る円弧、 SN_7 については FN_5, FN_6, FN_7 を通る円弧からのみ求めた。

2.4 ステップ方向

助走におけるステップの向き、すなわちステップ方向 (step direction) を絶対角度と相対角度の2種類の方法で定義する (図4)。具体的には、 j 番目の接地位置 FN_j のステップ方向の絶対角度は、1歩前の接地位置 FN_{j-1} とバーとの角度に基づいて定義する。また、 FN_j のステップ方向の相対角度に関しては、その前後の2つの接地位置を含む3つの接地位置に基づいて定義する。

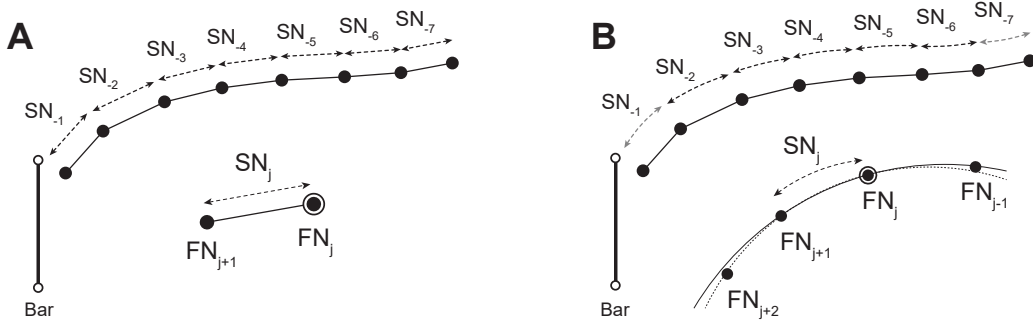


図3. ステップ長を評価する2指標の定義 ($SN_1 \sim SN_7$). A: 直線距離, B: 曲線距離 (SN_1 および SN_7 のみ3点に基づいて算出).

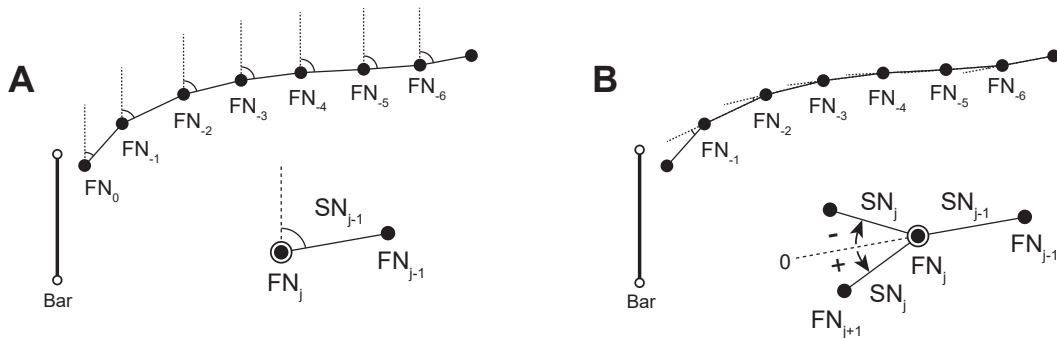


図4. ステップ方向を評価する2指標の定義. A: 絶対角度 ($FN_0 \sim FN_6$), B: 相対角度 ($FN_1 \sim FN_6$).

2.4.1 絶対角度

図4Aに示すように、接地位置 FN_j の絶対角度は、その1歩前の接地位置 FN_{j-1} から FN_j へのステップ (SN_{j-1}) の方向と跳躍すべきバーの方向 (Y 軸) がなす角度と定義する。つまり、1歩前の接地位置を含んだ2つの接地位置からなる1つのステップから算出される。本研究では、合計7つのステップ ($SN_1 \sim SN_7$) に基づき、合計7つの接地位置 ($FN_0 \sim FN_6$) について、絶対角度を算出する。

2.4.2 相対角度

図4Bに示すように、接地位置 FN_j の相対角度は、その前後の2つの接地位置を含んだ3つの接地位置 (FN_{j-1}, FN_j, FN_{j+1}) からなる2つのステップ (SN_{j-1}, SN_j) の方向に基づいて定義する。具体的には、接地位置 FN_{j-1} から接地位置 FN_j へのステップ (SN_{j-1}) の延長線と次の接地位置 FN_{j+1} へのステップ (SN_j) の成す角度とし、進行方向に対して左方向へ接地した場合、それに伴う相対角度は正の値で表す。一方で、右方向へ接地した場合、それに伴う相対角度は負の値で表すこととする。つまり、接地位置 FN_j の相対角度は、その前後の2つの接地位置 (FN_{j-1}, FN_{j+1}) から求められるため、助走の最終および開始の接地位置 (FN_0 および FN_7) における相対角度は算出しない。つまり本研究では、合計6つの接地位置 ($FN_1 \sim FN_6$) について、相対角度を算出する。

3. 分析対象

3.1 参加者

本研究における参加者は、大学陸上競技部所属の走高跳選手1名である。参加者は、20代の男性、自己最高記録は2m07cm、競技歴10年である。なお本研究は、名古屋大学総合保健体育科学センターにおける健康・スポーツ系研究倫理委員会の承認を得て実施された(承認番号: 21-04)。

3.2 実験試技

実験は、連続しない3日間で行われた。実験試技の進行は、走高跳の公式競技会のルールを参考にしながらも、十分なデータを確保するために、独自のルールを定めた。まず実験試技の開始の高さを1m70cmとし、成功した場合に5cm刻みでバーの高さを上げることとした。各バーの高さに対して、2回の試技を実施するが、2回の試技内で成功しなかった場合に限り、3回目の試技を行い、成功すれば次の高さのバーに挑戦し、失敗すればすべての実験試技を終了とする。これらのルールが公式競技会と異なる点としては、2回の試技は1回目で成功した場合であっても、再度、同じ高さに挑戦する点と、2回のうちどちらかで成功試技があれば次の高さへと挑戦する点が挙げられる。

本実験における試技は3日間で合計34試技であり、実施したバーの高さは1m70cmから1m95cmの6種類であった。各高さにおける試技の回数と成功と失敗の内訳を表1に示した。

3.3 撮影および分析方法

1台のデジタルビデオカメラ (SONY 社製、HDR-CX630) を用いて、実験参加者の助走開始前の静止状態から踏切までの動作を固定映像として撮影した。そのため、助走の1歩目の接地から踏切までのつま先の接地が映るように画角を決め、つま先の接地が鮮明に映るようにシャッタースピードを1/4000秒とした。撮影した映像から、2次元平面上における実験参加者のつま先の接地位置データを収集するためのコントロールポイントは、図5に示す配置で、計15点に設置した。

撮影した映像を動作解析システム (ディケイエイチ社製、Frame-DIAS V) を用いて、実験参加者のつま先が地面に接地した位置を、1/60秒の時間分解能でデジタル化し、2次元 DLT 法により実座標に変換し (Walton, 1979)、助走における全試技の全接地位置データを算出した。得られた接地位置データを用いて、定義した各

表1. 本研究で対象とした実験試技の内訳

バーの高さ	1日目		2日目		3日目		総試技数			成功率 [%]
	成功	失敗	成功	失敗	成功	失敗	成功	失敗	合計	
1m70cm	1	1	2	0	2	0	5	1	6	83.3
1m75cm	2	0	1	1	1	1	4	2	6	66.7
1m80cm	2	0	1	1	2	0	5	1	6	83.3
1m85cm	2	0	0	3	1	1	3	4	7	42.9
1m90cm	0	3	-	-	1	2	1	5	6	16.7
1m95cm	-	-	-	-	0	3	0	3	3	0.0
合計	11		9		14		18	16	34	

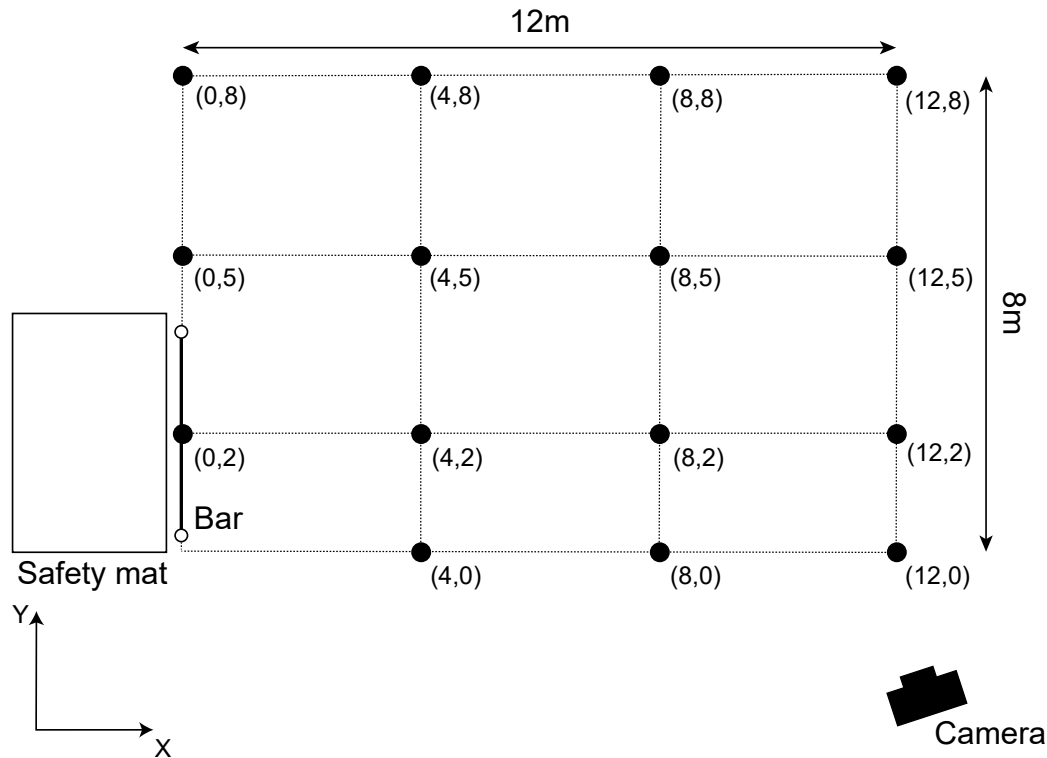


図5. 撮影におけるコントロールポイントの配置.

指標を算出した。なお、3日間におけるコントロールポイントのX、Y軸方向の標準誤差はそれぞれ、1日目は0.7cm、2.1cm、2日目は1.3cm、2.4cm、3日目は1.4cm、2.4cmであった。

4. 結果

4.1 接地位置

全跳躍における助走の開始 (FN₇) から踏切 (FN₀) までの接地位置座標をプロットしたのが、図6Aである。6種類の高さのバーに関して、接地位置を線で繋いだ結果を示しているのが図6Bから図6Gである。これらの6種類の高さの試技について、助走の開始 (FN₇) から踏切 (FN₀) までの接地位置に関して、絶対座標系で求めた全試技の平均および標準偏差と、相対座標系で求めた標準偏差を示したのが図7である。

まず、図7Aに示すX軸方向の接地位置の平均をみると、FN₇からFN₀となるに従って減少している。このことは、助走の開始から踏切にかけて、バーに接近していく状況を示している。X軸方向は、バーに対して垂直の方向であるため、当然の結果といえる。一方で、図7Bに示すY軸方向の接地位置の平均については、まずFN₇からFN₆においてわずかに減少している。Y軸方向

は、バーに対して平行の軸であり、実験参加者からみてバーの左側の位置ほど、Y軸の値は小さくなる。つまり、助走の進行方向がバーに垂直 (X軸と平行) とするならば、FN₇は右足で接地し、FN₆は左足で接地するため、FN₆がFN₇よりもY軸方向の値が小さい結果は理解できる。しかしながら、次の右足接地のFN₅をみると、ほとんどFN₆と変わらない値を示している。実験参加者によると、FN₇~FN₅までは助走の直線部分と認識している区間に当たるため、FN₅はFN₆より大きな値を示すことが予想されたが、結果はこの参加者の認識と異なっていた。つまり、FN₆からFN₅へのステップは、バーに対して垂直方向に接地していたのではなく、バーの中央に向けて、やや斜め方向に接地をしていたことになる。さらに、FN₅~FN₀にかけて徐々にY軸方向の平均の値が減少するのは、FN₅の接地を境に実験参加者の助走が曲線部分に差しかかるためである。つまり、バーに対し右側の位置から開始した助走が、カーブを描きながらバーの中央に近づく様子を示している (図6)。特に、踏切1歩前 (FN₁) から踏切 (FN₀) にかけて、接地のY軸方向の値が大きく減少している傾向が見られた。このことは、助走の最後の一步で、それ以前の区間よりもバーの中央に近い位置に接地し、踏切動作を行っていることがわかる。

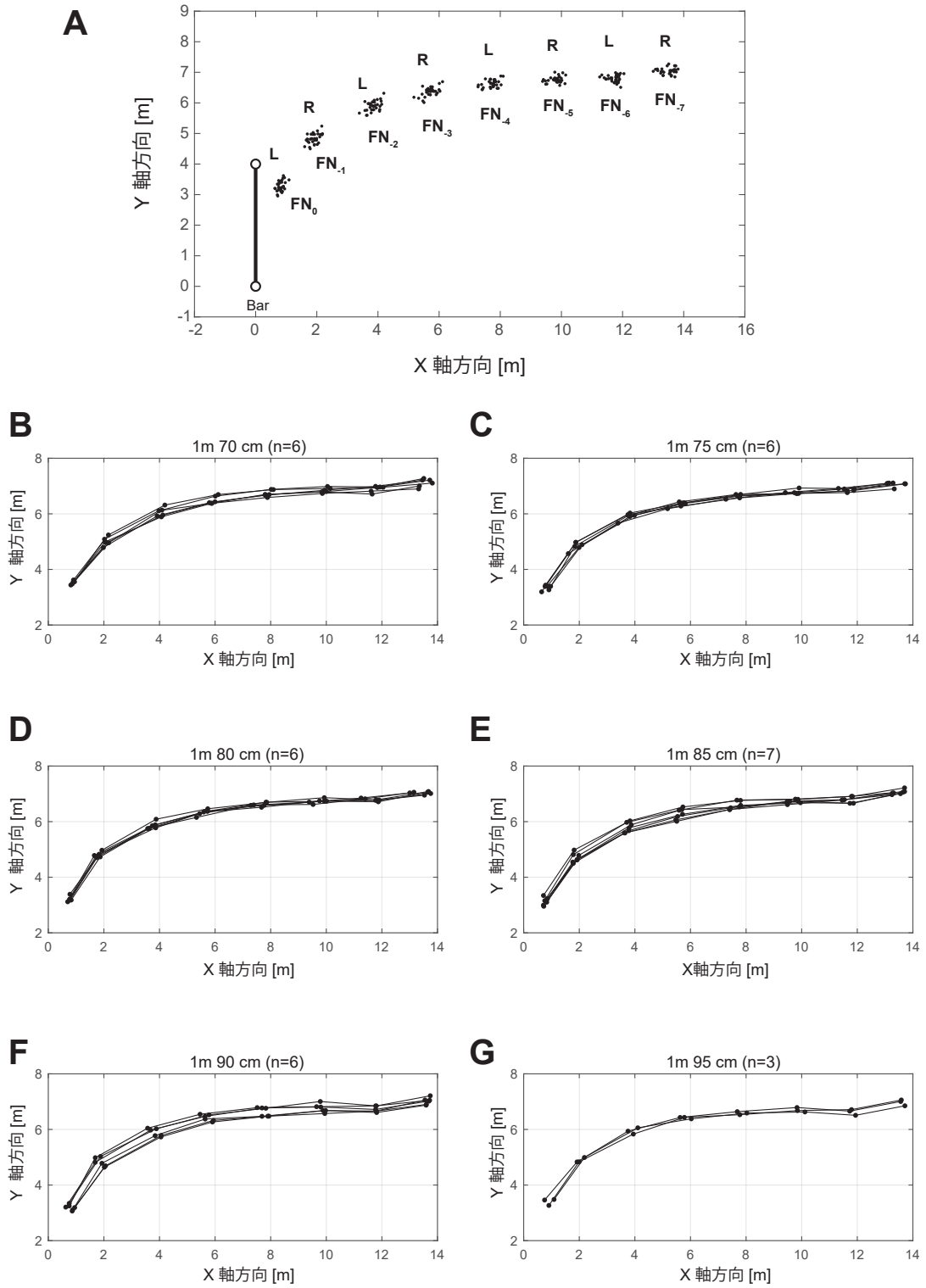


図 6. 助走の開始 (FN₇) から踏切 (FN₀) までの接地位置. A: 全試技の接地位置. B ~ F: それぞれ1m70cm, 1m75cm, 1m80cm, 1m85cm, 1m90cm, 1m95cm の高さの試技の接地位置の軌跡.

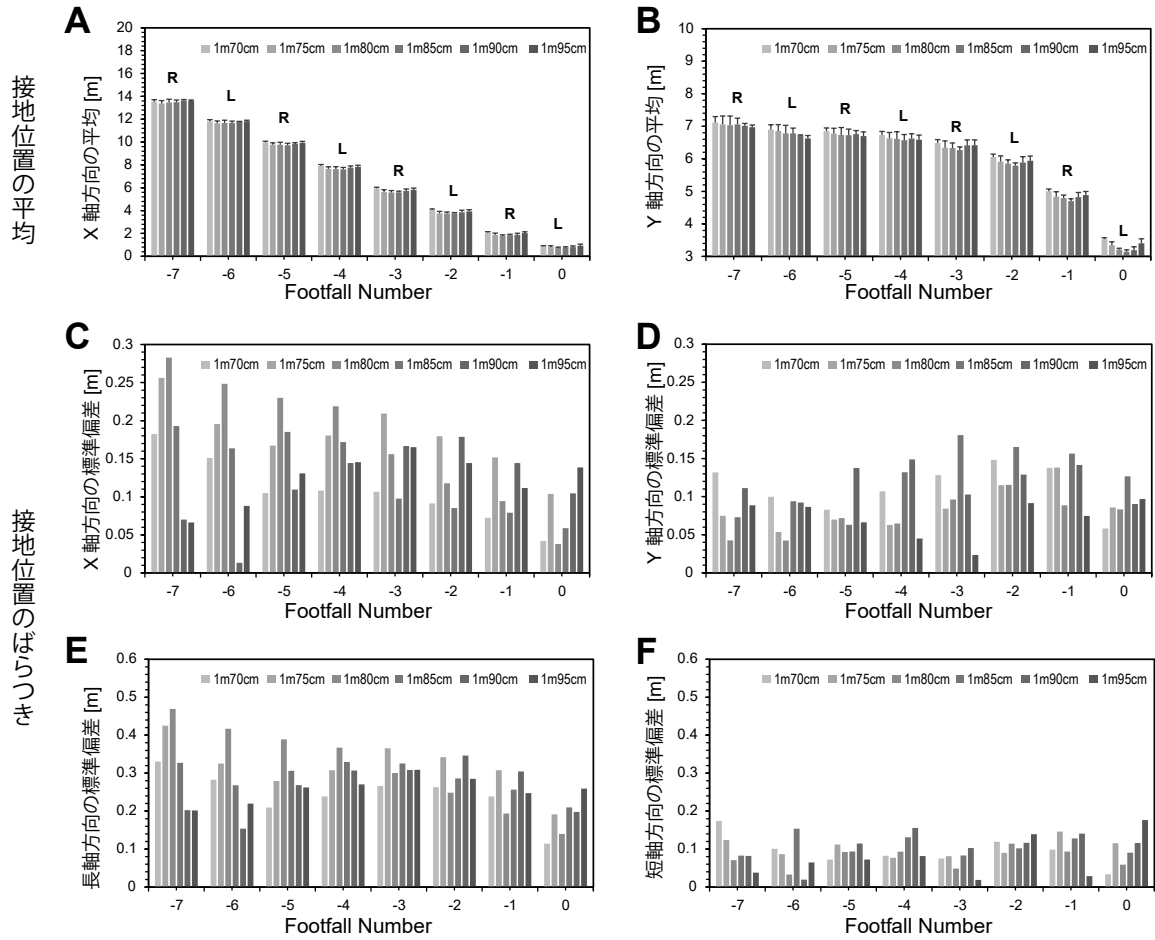


図7. 6種類のバーの高さで実施した試技における各接地位置の平均および標準偏差。A: X軸方向の平均位置, B: Y軸方向の平均位置, C: X軸方向の標準偏差, D: Y軸方向の標準偏差, E: 長軸方向の標準偏差, F: 短軸方向の標準偏差。

これら絶対座標系のX軸方向およびY軸方向に関して、各接地位置の試技間のばらつきを示した結果が、それぞれ図7Cおよび図7Dである。まず、X軸方向の標準偏差(図7C)に関して、バーの高さ別についてみると、1m70cm~1m85cmの高さについて、FN₇からFN₀にかけて徐々に小さくなる傾向が確認できる。一方、1m90cmおよび1m95cmの高さではそれぞれ、FN₇から徐々にばらつきが増加し、FN₃、FN₂において最大を迎えたのちに、再度ばらつきが減少する傾向が確認できる(ただし、1m95cmの場合は、FN₁からFN₀で再び増加する)。さらに、踏切(FN₀)について着目すると、1m75cmの場合を除き、バーの高さが高いほど、ばらつきが大きい傾向といえる。一方で、Y軸方向の標準偏差(図7D)については、各高さの各接地位置にみられる傾向がX軸方向とは異なる。例えば、1m70cmの高さでは、最初の接地位置(FN₇)からFN₅まではばらつきは減少し、その後FN₂にかけて増加し、再度FN₀に向けばらつきが減

少している。一方で、1m80cmの高さでは、他の高さと比べて、どの接地位置においても比較的小さなばらつきで助走している。これらのことから、バーの高さとY軸方向の接地位置のばらつきとの一貫した関係は見いだせない。ただし、全体の傾向を見ると、FN₃からFN₁にかけてY軸方向の接地位置のばらつきが増加し、踏切時(FN₀)には、そのばらつきが減少しているようである。ここで踏切の接地位置に着目して整理すると、X軸方向はバーに対し垂直方向にどのくらい離れているかを示し、Y軸方向はバー中央からバーに対して平行の方向にどのくらい離れているか(バーの長さのどのあたりで踏み切るか)を示している。したがって、踏切に至る曲線路(FN₃~FN₁)で、バー中央に対する距離にばらつきが生じているが、最終的な踏切位置(FN₀)は直前の曲線路よりはばらつきが小さいということになり、走幅跳の歩幅調整のような踏切位置への調整が行われていると考えられる。また、最後の3歩程度(FN₃~FN₀)

は、X 軸方向と Y 軸方向のばらつきは概ね同程度であり、バーに対する距離だけでなく、2次元平面上での踏切位置の調整を行っていると考えられる。

そこで、X 軸方向のばらつきと Y 軸方向のばらつきを比較するために、X 軸方向と Y 軸方向の接地位置の標準偏差の比を求めたのが図 8 である。実際には、Y 軸方向の標準偏差を X 軸方向の標準偏差で除しているため、1 以上であれば Y 軸方向のばらつきの方が X 軸方向のばらつきよりも大きく、1 以下であれば X 軸方向のばらつきの方が大きいことを示す。高さ別にみると、1m70cm ~ 1m85cm の高さでは、助走前半では標準偏差の比が 1 以下で、後半では 1 以上か 1 に近い値を示している。他方、1m90cm、1m95cm の高さでは、助走前半では 1 以上で、後半では 1 以下の値を示している。つまり、助走の開始から踏切にかけて、低い高さのバーでは、助走前半では X 軸方向の調整を行い、後半に Y 軸方向の調整へと切り替わる。逆に高い高さのバーでは、助走前半では Y 軸方向の調整を行い、後半で X 軸方向の調整へ切り替わっていると考えられる。踏切に至る助走の後半に着目すると、高い高さの場合にはバーから垂直方向にどれだけ離れた位置で踏み切るかを調整しているが、低い高さではバーに平行方向の位置（バーの長さのどのあたりで踏み切るか）を調整していると考えられる。走高跳においては、2次元平面上での助走路を自由に選択できることから、X 軸と Y 軸のばらつきを別々に見るのでは

なく、X 軸方向のばらつきと Y 軸方向のばらつきの比を見ることによって、助走における調整の方法を評価できる可能性がある。

相対座標系の接地位置の分布にみられる試技間のばらつきを長軸方向（進行方向）と短軸方向で示した結果が、それぞれ図 7E および図 7F である。まず、長軸方向の標準偏差（図 7E）については、1m80cm の高さに関してのみ、助走の開始から踏切（ $FN_7 \sim FN_0$ ）にかけて徐々にばらつきが小さくなる傾向がみられるが、それ以外の高さでは一度ばらつきが減少したのち増加し、再度踏切前に減少している傾向がみられる。また、短軸方向の標準偏差（図 7F）については、踏切（ FN_0 ）において、1m75cm を除き低い高さほどばらつきが小さく、高くなるにつればらつきが大きくなる傾向が見られる。1m75cm の接地位置の軌跡を示す図 6C をみると、ある一回の試技における踏切（ FN_0 ）の接地位置が、他の試技の分布から外れており、1m75cm の高さが先に述べた高さ順にばらつきが大きくなる傾向から外れていることは、この逸脱した一回の試技が原因であると考えられる。また、これらのことから、相対座標系におけるばらつきについては、明確な結果は得られず、助走調整を定量化する指標としては適切ではないと考えられる。

4.2 ステップ長

助走の開始から踏切までのステップ（ $SN_7 \sim SN_1$ ）に

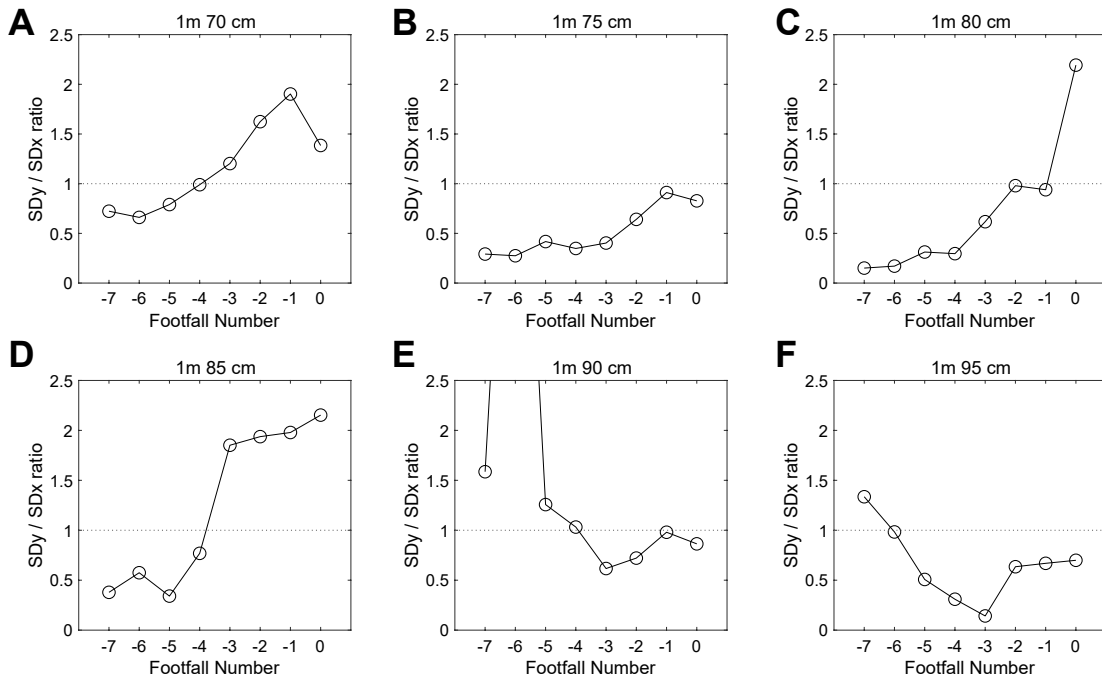


図 8. 接地位置の絶対座標系における 2 軸方向の標準偏差の比（縦軸が 1 以上の場合：Y 軸方向の標準偏差 \geq X 軸方向の標準偏差）。

関して、ステップ長を直線距離と曲線距離として求め、各高さにおける平均と標準偏差について示したのが図9である。まず、直線と曲線で求めたステップ長の平均については、図9Aおよび図9Bに示すように、どちらの方法で求めた場合でもSN₂において最大となり、踏切に至る最後のステップ(SN₁)においてSN₃に近い値まで減少する。このことは、踏切の2歩前のステップで大きく踏み込み、その後の最後の1歩では再度、ステップ長を短くしているといえる。しかしながら、走高跳においては、踏切2歩前から踏切1歩前へのステップ長が逆に小さくなることが報告されているが(Leite, 2013)、その理由に関して明確には記述されておらず、さらなる検討が必要である。

また、直線と曲線で求めたステップ長の標準偏差については、それぞれ図9Cおよび図9Dに示すように、最後のステップ(SN₁)においてのみ、バーの高さが低いほどばらつきが大きく、バーの高さが上がるにつれ徐々にそのばらつきが小さくなる傾向が確かめられた。この傾向についても、ステップ長の算出方法による違いは認められなかった。このことは、低い高さでは試技ごとに踏切1歩前のステップ長が異なるが、高さが上がるにつれ、決まったステップ長を維持して踏切へと至る傾向があるといえる。この踏切2歩前の歩幅調整は走幅跳で報告された特徴(Le et al., 1982)と同様の結果であると考えられる。

なお、直線距離と曲線距離の2通りの計算によって得られるステップ長の差分は、表2に示す通りである。SN₇からSN₃にかけては、その差分はすべて1cm未満であるが、SN₂およびSN₁ではすべてが1cm以上である。踏切前の2つのステップは曲線路であることから、曲線距離の方が直線距離よりも長く算出されており、その算出方法は正しかったことを示している。しかしながら、6種類の高さについて、全ステップの試技間の平均値の差をみると、最も大きい差分であっても、1.77cmであり(1m90cmのSN₁の場合)、双方の計算から得られる数値の差は無視できるものと考えられることから、ステップ長は直線距離で算出してよいと考えられる。

4.3 ステップ方向

助走におけるステップ方向の平均とばらつきについて、絶対角度および相対角度によって求め、高さ別に平均と標準偏差を示したのが図10である。まず、絶対角度の平均(図10A)に着目すると、まずFN₂までは70度を超える値を示しており、FN₁で60度、FN₀で40度以下と、踏切2歩前から急激に減少している。つまり、曲線路とはいうものの、踏切2歩前までは緩やかな曲線を描き、最後の2歩で急激にバーに対して平行に進入するように曲線を描いている。このことは、相対角度の平均(図10B)が徐々に大きくなり、FN₁で20度近い値を示していることからわかる。相対角度の定義からは、曲率が一

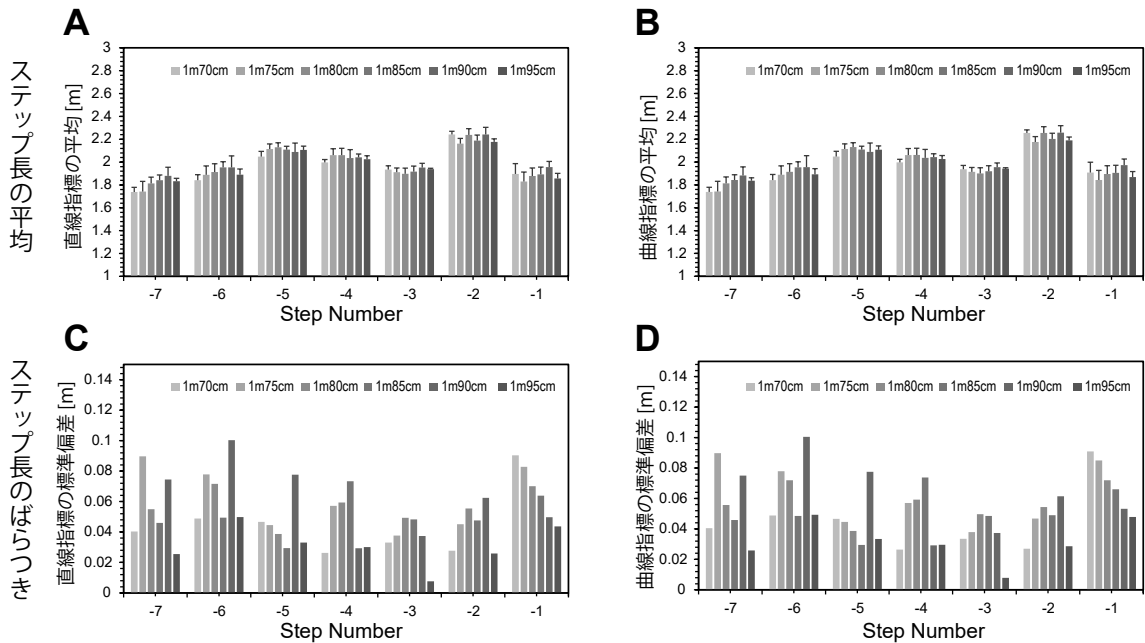


図9. 6種類の高さで実施した試技におけるステップ長の平均および標準偏差。A: 直線距離の平均, B: 曲線距離の平均, C: 直線距離の標準偏差, D: 曲線距離の標準偏差。

表2. ステップ長の曲線距離と直線距離の差分 (単位は cm).

SN	バーの高さ					
	1m70cm	1m75cm	1m80cm	1m85cm	1m90cm	1m95cm
-7	0.10	0.05	0.12	0.15	0.27	0.40
-6	0.07	0.04	0.10	0.10	0.20	0.25
-5	0.03	0.04	0.09	0.07	0.08	0.06
-4	0.08	0.07	0.13	0.11	0.17	0.16
-3	0.31	0.33	0.27	0.32	0.30	0.40
-2	1.31	1.45	1.77	1.42	1.57	1.33
-1	1.10	1.24	1.72	1.33	1.77	1.19

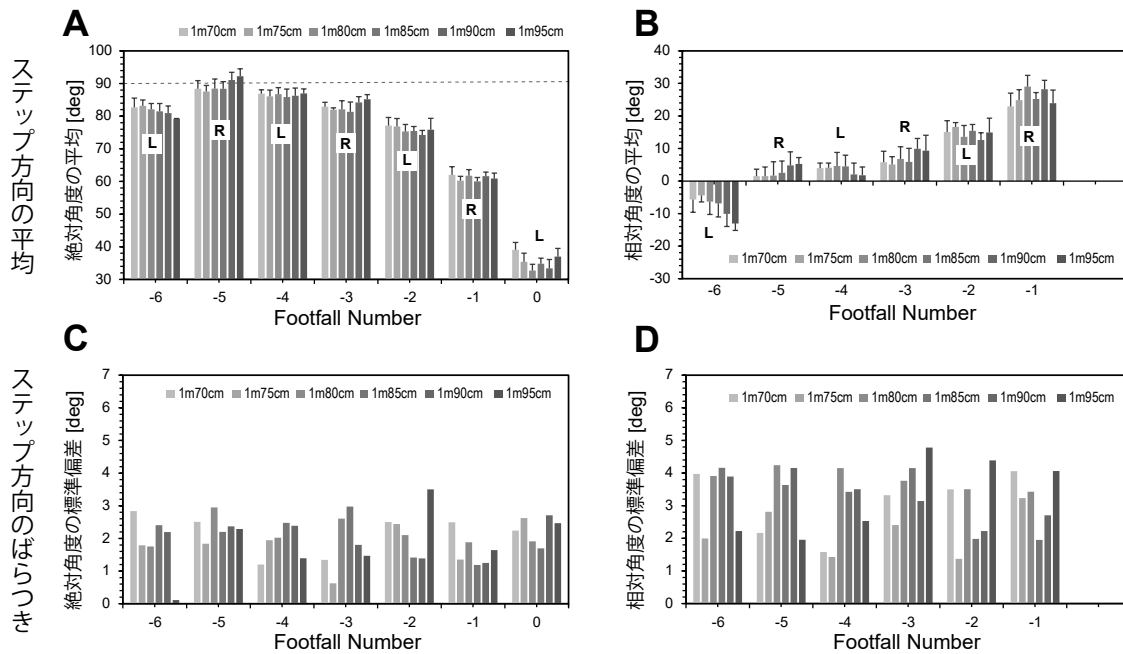


図10. 6種類のバーの高さで実施した試技におけるステップ方向の平均および標準偏差. A: 絶対角度の平均, B: 相対角度の平均, C: 絶対角度の標準偏差, D: 相対角度の標準偏差.

定で、ステップ長が同じであれば、相対角度も一定になるはずである。しかしながら、この相対角度が徐々に大きくなっているということは、曲率が徐々に大きくなっていることを意味する。ただし、ステップ長のところで述べたように、ステップ長はSN₂において最大値を示していることから、さらなる検討が必要である。

またさらに、絶対角度の平均(図10A)をみると、FN₆からFN₅にかけてその値が大きく、特にFN₅では90度に近い値を示している。これはFN₆の左足接地からFN₅の右足接地へのステップ方向がバーに対して垂直に近いことを意味する。1m90cm~1m95cmの高さでは特にFN₅における絶対角度の値が90度を上回っている。左右の足の歩隔があるため、バーに対して垂直方向に直線的に走った場合には、左足から右足を踏み出す際には、絶

対角度は90度を上回ると考えられることから、高い高さにおいては、踏切5歩前まで直線で助走をしていたと考えられる。このことは、相対角度(図10B)からも確認できる。FN₆においてすべての高さにおいて相対角度の値が負であるが、バーの高さが高い試技ほどその値は大きい。相対角度は、現在の接地位置とその一歩前の接地位置を結ぶ延長線に対し、次の接地位置を左に踏み出した場合に正の値、右に踏み出した場合を負の値となるように定義した。したがって、FN₆の値が負であるということは、右足接地(FN₇)から左足接地(FN₆)、そして次の右足接地(FN₅)といった3つの接地を跨ぐ2つのステップにおいて、後半のステップ(FN₆からFN₅)が、前半のステップ(FN₇からFN₆)の進行方向に対して、右側に接地していることを示している。直線路を助

走した場合には、左右の接地位置に歩隔が生じることから、相対角度は右足から左足へのステップ方向が正、左足から右足へのステップ方向が負となり、この正負を繰り返すと考えられる。しかしながら、FN₄では、左足から右足接地にも関わらず正の値を示している。このことは、ステップ方向が左に向かっていることを表し、曲線路の内側に接地していることを示している。また、FN₅では正の値を示してはいるものの、FN₆の値と比較してその絶対値は小さいことから、直線路を左右対称に進んでいるというよりは、少し曲線路の方に接地しているようである。これは接地位置のY軸方向の平均において、FN₆からFN₅にかけて、バーに対して垂直方向に助走していなかったこととも一致する。しかしながら、直線路の助走データが少ないため、確認する必要があるが、ステップ方向の相対角度は助走が直線であるか曲線であるかを判別するのに有効であることを示唆している。

一方、絶対角度のばらつき(図10C)については、FN₀のばらつきがFN₁よりも大きい傾向が多くの高さの試技で確認された。これは、踏切一步前から踏切にかけてバーに対する進入角度を調整していると考えられるが、1m70cmのバーの高さでは、FN₀とFN₁のばらつきが同程度であり、さらなる検討が必要である。また、相対角度のばらつき(図10D)については、顕著な傾向を見いだせなかったが、両指標のばらつきを比較すると、相対角度のばらつきの方が絶対角度のばらつきに比べて、どのステップにおいても角度が大きい傾向が確かめられた。この結果は、算出方法に起因すると考えられる。つまり、絶対角度は一步前を含む2つの接地点を用いて算出しているのに対し、相対角度は一步前と次の一步を含む3つの接地位置から算出している。したがって、相対角度のばらつきが絶対角度のばらつきが約2倍の値となっているのは当然であろう。

以上の結果から、ステップ方向に関しては、絶対角度でバーに対する進入角度を評価でき、相対角度で助走の直線路と曲線路を判別できると考えられる。

5. 考察

本研究では、跳躍種目の中でも、踏切位置の制約がない走高跳を対象に、直線路と曲線路を組み合わせた背面跳の助走に注目して、その特徴を定量的に評価するための指標を検討することを目的とした。指標としては、接地位置、ステップ長、ステップ方向の3つとした。そして、接地位置についてはバーを基準とした絶対座標系と接地位置の分布に基づく相対座標系に基づき定義した。また、ステップ長についてはステップの長さを直線距離と曲線距離で定義し、ステップ方向についてはバー

に対する絶対角度と進行方向に対する相対角度で定義した。男子走高跳選手1名を対象に、6種類の高さのバーに対する全34試技の助走をビデオカメラで撮影し、2次元DLT法で実座標に変換した。そして、各接地位置のデータから定義した指標を算出し、各高さにおける平均と標準偏差を求め、背面跳の助走調整について検討可能な指標について検証した。バーの高さ別に検証した理由は、走高跳では、走幅跳や三段跳の跳躍競技と異なり、常に全力で跳躍を行うわけではないため、バーの高さにも助走が影響されると考えたからである。

接地位置に関して、バーを基準とした絶対座標系の結果をみると、バーに対して垂直方向(X軸方向)の踏切時の標準偏差が、バーの高さが高いほど大きい傾向であった。このことは、助走最後の踏切において、バーの高さが高い方が、バーに対して垂直方向の接地位置を試技間で調整していると考えられる。一方で、バーに平行な方向(Y軸方向)の標準偏差については、バーの高さの違いは見られなかったが、全体的な傾向として、踏切の3歩前から1歩前までにかけて大きな値を示していた。これは、踏切3歩前からバーの中央で踏切を行うために試技間で調整しているとも考えられるが、今後詳細な検討が必要である。また一方で、接地位置の分布から等確率楕円を求めた相対座標系について、その長軸方向と短軸方向のばらつきを検証したものの、バーの高さや接地位置と関連した明確な特徴はみられず、助走調整を定量化するための指標としては、絶対座標系の方が有効であると考えられる。

特に、背面跳の助走は、他の跳躍種目と異なり、直線路と曲線路を組み合わせた助走を行うため、絶対座標系の2軸の方向を考慮して検討する必要がある。なぜならば、バーに垂直な方向だけではなく、バーに平行な軸方向の調整を同時に行っている可能性があるためである。つまり、助走経路にはいくつも想定できる冗長性があり、平面上の腕の運動軌道生成と同様に、解は一意に決まらない不良設定問題を抱えているといえる(川人、1996)。したがって、運動制御におけるUCM(Uncontrolled manifold)解析(Scholz & Schöner, 1999; Latash, Scholz, & Schöner, 2001)のような共変構造を仮定した方が良いと考えられる(阿部、2014)。そこで、X軸方向とY軸方向の接地位置の標準偏差の比を取ってみると、バーの高さが低い場合には、助走前半のX軸方向の調整から、助走後半のY軸方向の調整へと変化していたが、バーの高さが高い場合には、逆に助走前半でY軸方向の調整を行い、助走後半でX軸方向の調整を行っていることが明らかになった。つまり、バーの高さが低い場合には、バーに対して垂直方向の調整から平行方向への調整を行い、バーが高くなると、その逆の調

整を行っていたということである。この調整の仕方の違いは、今回の実験参加者にのみ観察された結果かもしれないが、少なくとも2次元平面上を自由に移動できる背面跳の助走における冗長解を評価する指標としては有効かもしれない。

ステップ長に関しては、直線距離で求める方法と曲線距離で求める方法を比較したが、3歩前まででは1cm未満の差であったが、踏切に至る最後のステップと、その前のステップのステップ長においては1cmの差を超えていた。ただし、最大でも1.77cmであったことから、直線距離で求めても問題ないと考えられる。ステップ長の平均は、バーの高さにかかわらず、踏切2歩前から踏切1歩前へのステップが最も長くなっていた。これは走幅跳の助走における歩幅調整の結果と同じである (Lee et al., 1982; 柴田・小山, 2017)。しかしながら、走高跳の背面跳の助走を分析した研究では、逆に踏切2歩前から踏切1歩前へのステップ長が、その前後のステップ長よりも短いことが報告されている (Leite, 2013)。しかしながら、その理由については明記されていない。

また、ステップ長のばらつきに関しては、踏切に至る最後のステップ長のばらつきが、バーの高さが高くなるほど小さい傾向が確かめられた。このことは、接地位置のばらつきに関わる歩幅調整の可能性があるが、本研究においては、1名のみを対象としており、なおかつ、試技数も少ないため、さらなる検討が必要である。また、ステップ長のばらつきに関して、踏切直前の数歩をみると、踏切への最後のステップは、概ね多くの高さの試技で、それ以前の2つのステップよりもそのばらつきが大きい傾向であった。一方で、走幅跳の歩幅調整の報告では、踏切に至る2歩前のステップのばらつきの方が、1歩前のステップのばらつきよりも大きいことが報告されており (Lee et al., 1982)、踏切板という制約の有無による違いの可能性が考えられる。

本研究では1歩にかかる時間 (ステップ時間) については検討していないが、ステップ長やばらつきは、ステップ時間、いわゆる助走のリズムとも関連があると考えられる。バーの高さが高くなるほど、踏切1歩前のステップ長のばらつきが小さくなっていることは、リズムを一定にしようとした結果かもしれない。したがって今後はステップ時間、あるいはピッチ (ステップ時間の逆数) と合わせて検討していくことが必要であると思われる。

ステップ方向に関しては、絶対角度は1歩前の接地位置から現在の接地位置への方向とバーとの関係を求めたもので、バーに対する進入角度と考えられる。この絶対角度の平均値からは、曲線路での曲率の変化がうかがえる。特に、踏切に至る最後の1歩で大きくバーと平行

になるステップの傾向が、バーの高さにかかわらず確認された。したがって、このステップ方向の絶対角度は、各競技者の曲線路での助走の曲率の違いを評価できる可能性がある。Becker et al. (2013) は、踏切および踏切5歩前といった2つの接地点と、踏切位置から着地位置へ向かう線分とバーとの成す角度から、曲走路の半径を算出し、そこで仮定される曲線から、実際の接地位置がどれだけ離れるかを検証している。また、接地位置から正確な曲率を求めるには、少なくとも3つの接地位置が必要となる。しかしながら、左右の歩隔があることを考えると、接地位置は離散的であるため曲率を正確に求めることは困難であると考えられる。これらのことから、本研究での絶対角度で評価された進入角度の変化は、曲走路での助走の特徴をより正確に検討することができると思われる。

また、1歩前の接地位置と現在の接地位置から進行方向を定義し、次の接地位置の方向を求めた相対角度は、直線路であれば、進行方向に対して左右交互に正負が現れるはずであった。しかしながら、踏切4歩前で直線であれば負となる値が正の値を示しており、曲線路の内側に接地していたことが明らかになった。また、踏切5歩前の値は右足から左足へと接地するため左側への接地を示す正の値ではあったが、その絶対値は踏切6歩前よりも小さく、曲線路への前兆のようにもみえる。つまり、この相対角度は、直線路と曲線路を判別することが可能な指標となると思われるが、直線路のみで相対角度を算出し、確認することが今後必要となる。一方で、ステップ方向のばらつきに関しては、絶対角度においても相対角度においても一定の傾向が認められず、助走調整の指標としては不要であると考えられる。

以上をまとめると、背面跳の助走の特徴を定量化する指標としては、1) 接地位置のX軸方向とY軸方向のばらつき、2) 直線距離で求めたステップ長とそのばらつき、3) ステップ方向の絶対角度と相対角度が有効な指標となると考えられる。ただし、本研究では、1名の競技者のみを対象としていたため、本研究で用いた指標から得られた傾向が、参加者個人の特性を表すものなのか、他の競技者にも共通する普遍的な特徴であるのかは、不明である。今後は、より多くの競技者および試技を対象に、上述した指標を用いて助走調整の特徴を明らかにしていくことが必要である。

本研究で、改めて分かったことは、背面跳の助走には、踏切位置の制約がなく、背面でバーを跳び越えるために助走後半で曲線路を取る必要があるため、2次元平面上での助走軌道は無数に存在するという点である。つまり、腕の運動軌道生成の問題と同様に、解に冗長性のある不良設定問題である。したがって、走幅跳におけ

る歩幅調整とは異なり、各競技者が採用する最適解(助走軌道)の違いを明らかにし、その中で歩幅調整がいかに行われているのかを検討する必要がある。言い換えれば、助走軌道が異なれば、その歩幅調整も異なることを前提に今後検討を進めていく必要があると考えられる。

注

- 1 はさみ跳びの助走でも、曲線路が含まれる場合もある。

参考文献

- 阿部 匡樹 (2014). 冗長解に対する運動制御系の方略を探る. *バイオメカニズム*, 22, 59-68.
- 阿江 通良(1996). 陸上競技の高く跳ぶ動作と遠く跳ぶ動作: How they jump. *バイオメカニズム学会誌*, 20, 57-62.
- 赤井 裕明・村木 有也・阿江 通良 (2006). 走高跳における助走終盤のコース取りと踏切準備動作との関係. *陸上競技研究紀要*, 2, 122-128.
- Becker, J., Kerin, D., Chou, L.-S. (2013). Consequences of deviation from the curve radius in the high jump approach. In T.-Y. Shiang, W.-H. Ho, P. C. Huang, & C.-L. Tsai (eds.) *Proceedings of 31st International Conference on Biomechanics in Sports*, (B11-2 ID67). Taipei, Taiwan. (<https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/issue/view/ISBS2013>)
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Milton. (古崎 敬・古崎 愛子・辻 敬一郎・村瀬 旻 共訳 (1985). *生態学的視覚論: ヒトの知覚世界を探る*. 東京: サイエンス社.)
- 川人 光男 (1996). *脳の計算理論*, 東京: 産業図書.
- Latash, M. L., Scholz, J. P. & Schöner, G. (2002). Motor control strategies revealed in the structure of motor variability, *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 30, 26-31.
- Lee, D. N., & Reddish, P. E. (1981). Plummeting gannets: a paradigm of ecological optics *Nature*, 293, 293-294.
- Lee, D. N., Lishman, R. J., & Thomson, J. A. (1982). Regulation of gait in long jumping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 448-459.
- Leite, W. (2013). Biomechanical analysis of running in the high jump. *Pedagogy, Psychology, Medical-biological Problems of Physical Training and Sport*, 2, 99-105.
- 水野 欽司 (1996). *多変量データ解析講義*, 東京: 朝倉書店.
- Scholz, J. P. & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: Identifying control variables for a functional task, *Experimental Brain Research*, 126, 289-306.
- 柴田 篤志・小山 宏之 (2017). 男子走幅跳の助走における踏切4歩前からの接地位置および助走スピードの分析—日本ランキング上位選手の事例—. *陸上競技研究紀要*, 13, 214-219.
- 田村 雄志・湯浅 景元・石村 和博・磨井 祥夫 (2012). 棒高跳びの助走におけるストライド調整様式: ストライド調整開始位置に着目して. *体育学研究*, 57, 47-57.
- 戸邊 直人・荻山 靖・林 陵平・木越 清信・尾縣 貢 (2019). 走高跳の曲線助走における踏切準備動作の検討. *陸上競技学会誌*, 17, 17-22.
- Walton, J. S. (1979). Close-range cine-photogrammetry: Another approach to motion analysis. In Terauds, J. (Ed.) *Science in biomechanics cinematography* (pp. 69-97). Del Mar, CA: Academic Publishers, 69-97.