

踏み切り前後の助走技術

高く跳ぶためには踏み切り動作で大きな鉛直速度を得る必要がある。この鉛直速度は「起こし回転」「腕・脚の振り込み」「体幹・踏み切り脚の伸展動作」などで生み出される。

このうち起こし回転による鉛直速度への貢献度は最も高いといわれており一流選手では60%~80%に及ぶとされている。

起こし回転をうまく利用するためには踏み切り動作で後傾姿勢を作ることが重要である。後傾姿勢を作り、踏み切り動作の前後で重心位置を低く保つ必要がある。

起こし回転による上昇力を得るためにはある程度速い助走が必要となる。後傾させた体を回転して持ち上げる最も大きな原動力は踏み切り足が接地したときの運動量であるため、助走スピードが速いことが跳躍に有利に働く。

「速度を落とさず」に、「重心を低く下げて」助走するためには内傾動作の技術が重要となる。内傾動作が低い重心位置を生み出し、低い重心位置が後傾動作を生み出す。一連の動作は繋がっているため、内傾動作と後傾動作のつながりやバランスに注意を払う必要がある。

第4章ではこうした踏み切り動作に繋がる「重要な周辺技術」として、後傾動作・内傾動作の技術と、アーム動作について解説する。

本来、後傾動作や内傾動作は跳躍選手のタイプによって技術が異なるが、ここではその基本的な動作について説明する。

4.1 内傾動作

内傾動作の効果

- クリアランスに必要な、助走の進行方向軸回りの回転力を生み出す
- 助走速度を落とさずに重心を低く保ち助走することができる

内傾動作とは曲線助走部分において体を進行方向内側に傾ける動作のことである。これは主に「クリアランスに必要な空中の回転力（助走の進行方向の軸回り）を生み出す」「助走速度を落とさずに重心を低く保ち助走する」ことを目的に行われる。

既に述べたように高跳びの踏み切り動作では助走で得た水平方向の速度を鉛直方向の速度に変換する。このとき速度のロスを最小限にして方向変換するためには、踏み切りにおいて身体重心が低い位置から大きく滑らかに上昇する必要がある。

内傾動作とは踏み切り動作の前後で助走速度を落とさずに重心を低く下げることができる助走技術である。助走中に重心を下げるためには他にも「膝を曲げる」「ストライドを大きくする」などの手段を考えることができるが、助走速度を落とさずに効率よく重心を下げるためには内傾動作が最も適した助走技術である。

4.1.1 膝を曲げて接地して走る

膝を曲げることによって重心を下げようとする後傾動作や腕の振り込み動作は行いやすくなるが助走速度をロスしやすい。これは膝を曲げることによって脚部の筋力への負荷が高まり、脚の蹴りだしの動作の負担が高くなるためと考えることができる。

膝の屈曲角度が0度で立っている状態では大腿部の筋力負荷はほとんどないが、膝を屈曲させて空気イスのような状態を作ると角度が大きくなるほど大腿部への筋力負荷は増大する。このとき、地面からの反力の矢印が関節から離れた場所を通っているため、膝や大腿部への負荷が大きくなっている。これと同じ現象が助走中に膝の屈曲角度を大きくしても起こる。

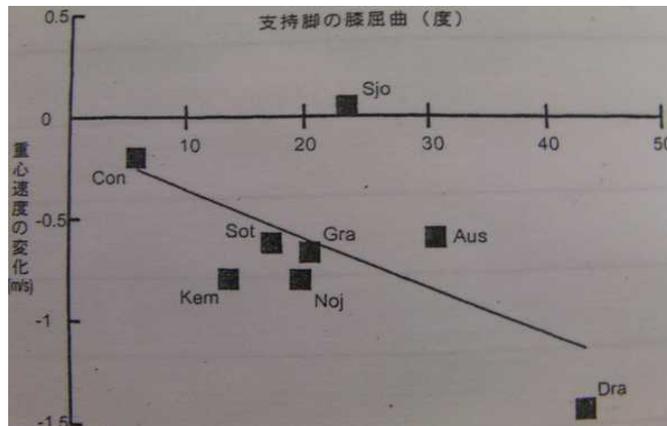


図 4.1: 踏み切り一歩手前における支持脚膝角度と助走速度の変化の関係 [41][42]

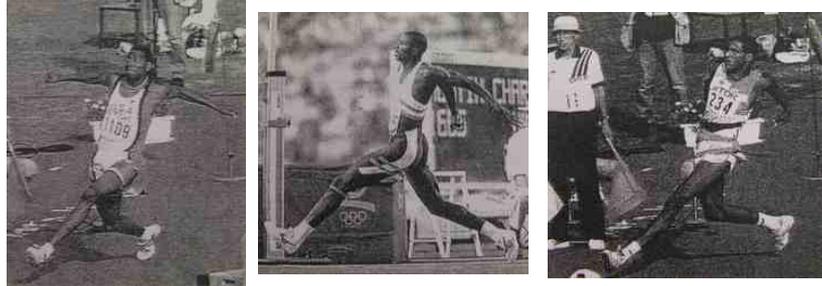


図 4.2: コンウェイ選手, オースティン選手, ソトマヨル選手の踏み切り動作 [41][42]

図 4.1 は踏み切り一歩手前の膝関節屈曲角度とそのときの助走速度の変化の関係を世界一流の男性選手について調べたものであり, 図 4.2 はその一流選手の踏み切り動作を表す写真である [41].

図 4.1 より一歩手前の膝関節屈曲が大きい選手ほど助走速度の減速が大きい傾向にあることが分かる.

踏み切り動作を行う際に重心を下げることは重要であるが, 膝関節を屈曲することで重心を落とそうとすると助走速度の低下を招くため注意が必要である [42].

4.1.2 ストライドを広げて重心を下げる技術

助走中にストライドを伸ばして重心を落とす方法もあるが、助走中に無理にストライドを伸ばそうとすると、通常のランニングフォームより足が前に出すぎた接地姿勢となる。このため、地面接地前半のブレーキ作用によって助走の減速が大きくなってしまふ。

身体重心から接地足までの水平距離が遠くなるほど、接地瞬間におけるブレーキ方向の力は大きくなり、減速方向の力が作用する時間が長くなる。このことは地面に足が接地する前後の力の加わり方を考えることで分かる。

図 4.3 に示したように足が地面に着地したときには足から「地面に対して」進行方向と同じ矢印 1 の力が加わる。同様に足が地面を離れる場合は足から「地面に対して」進行方向とは逆の矢印 2 の力が加わる。

また、足が地面を押すときには作用・反作用の法則によって地面から足に対しても反対向きの全く同じ力が加えられる（図 4.3）。足が地面に着地した場合には、地面から足に対して進行方向とは逆の矢印 3 のブレーキ力が加わり、走るスピードは減速する。また、地面から足が離れるときは、地面から「足に対して」進行方向に矢印 4 の力が加わり、走るスピードが加速する。

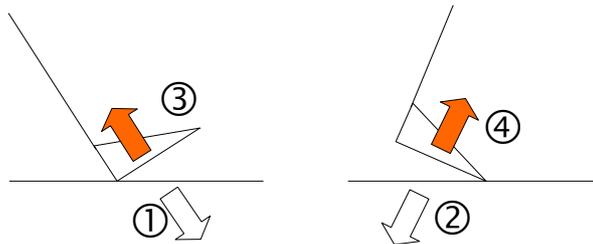


図 4.3: 着地の前後で足に加わる力

助走中にストライドを大きくしようと意識すると足を前方に振り出しすぎた接地姿勢となる。こうなってしまうと、接地前半におけるブレーキ作用（図中矢印 3）が大きくなることで助走スピードが減速し、踏み切り動作前に十分な助走速度が得られなくなる。

ただし、ストライドを広くした助走では助走スピードが上げにくいというデメリットや、助走の安定性を確保しにくいというデメリットがあるが、踏み切り準備動作（後傾姿勢やアーム動作）を行いやすくなるというメリットもある。

4.1.3 内傾動作によって重心を下げる技術

助走スピードを下げずに重心下げた助走する技術として「内傾動作」が利用される。これは曲線助走を行うことで発生する遠心力を利用し、体を内側に傾けて助走する方法である。自然な走行フォームに近い助走で重心を下げることができるため、比較的助走スピードの減速が少ない助走技術である。

助走中に内傾姿勢をとることで重心が下がる様子を図 4.4 に示す。図中の a は普通に直線助走を行った場合の身体重心の高さを表し、 c は内傾姿勢をとって曲線助走を行った場合の重心の高さを表している。また、 b は内傾動作によって下がる重心の高さを表し、 θ は内傾角度を表す。

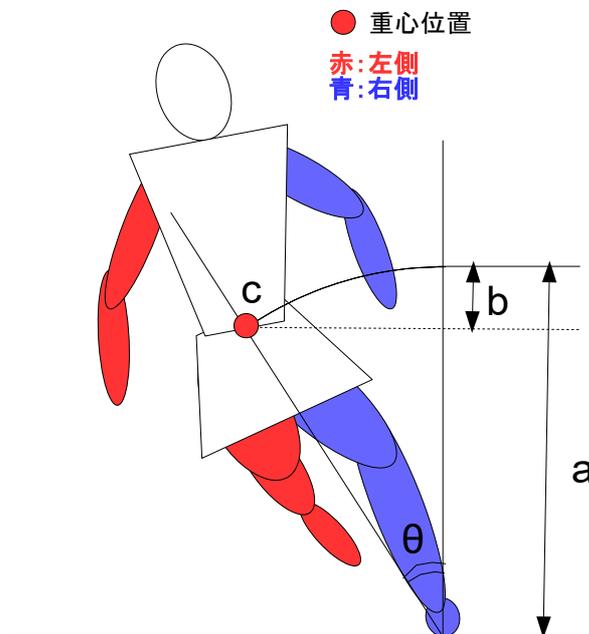


図 4.4: 助走中の内傾姿勢（左踏み切りの助走を後ろから見た図）

内傾動作は日本では特に力を入れて指導されることが多いが、いくつか注意点がある。内傾動作とはあくまで曲線助走を行うことで「自然に体を内傾させる」という気持ちで練習してほしい。

内傾動作を自然に行うためには助走中の遠心力がポイントとなる。その遠心力は助走スピードや曲線助走の半径によって調整する。助走軌道も助走スピードも変えずに、体を無理やり内傾させるような助走をすると、動作がバラバラになってぎこちない助走になってしまうため注意が必要である。

曲線助走で頑張って加速しようとしすぎると、助走中に体が前傾してしまい十分な踏み切り姿勢（後傾姿勢）を作れないことがある。競技会でも肝心な跳躍のときに力んで助走してしまうと起こりやすい。

体が進行方向に前傾してしまえば、図 4.5 に示すように前傾姿勢姿勢から後傾姿勢を作るために大きな上半身の起こし動作が必要となる。このため、踏み切りのタイミングが遅れて失敗跳躍になってしまう。助走後半で加速するイメージが強すぎても体の前傾を招きやすいので注意が必要である。

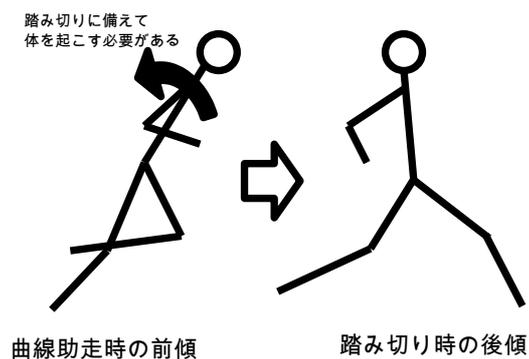


図 4.5: 助走時の前傾の問題点

また、「踏み切り動作の最後まで内傾動作を意識するように」という指導がしばしば聞かれるが、図 4.6 に示すように実際の内傾動作の内傾角度は踏み切りの二歩手前で最大となり、その後は後傾動作が始まる。踏み切り足が接地する最後まで内傾を続ける必要はない。

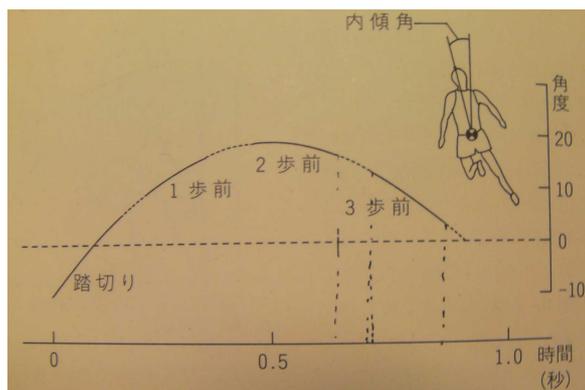


図 4.6: 助走時の内傾角度の変化 [4]

高跳びの踏み切り動作では助走で得た水平方向の速度のロスをも最小限にし、鉛直方向の速度に変換するためには、踏み切り動作の前後で身体重心が大きく滑らかに移動する必要がある。このため図 4.6、図 4.7 に示すように、実際の内傾角の変化と踏み切り前後の重心の高さを調べると、内傾角度は踏み切り二歩手前に最大となり、重心の高さは踏み切り動作一歩手前で最も低くなる [43][4]。

図 4.7 より、曲線助走では踏み切り二歩手前まで内傾動作によって重心高が下げられ、踏み切り一歩手前になると内傾動作と後傾動作が重なり重心の高さが最も低くなる。そこから大きな円弧を描いて重心の高さが滑らかに上昇している。

踏み切り前後では重心が大きく滑らかに上昇することが好ましいため、踏み切り動作の指導を行う際にはしばしば「駆け上がるように助走して踏み切りに移る」と指導されることがある。

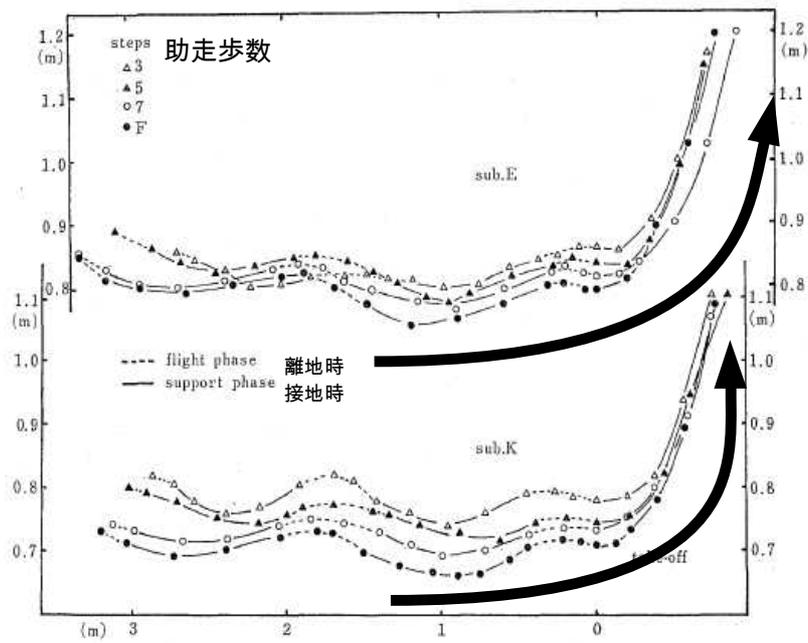


Fig.2 Comparisons of C.G. movement in preparatory and take-off phase.

図 4.7: 踏み切り前後の重心高の変化 [43]

4.2 後傾動作

後傾動作の効果

- クリアランスに必要な進行方向横軸回りの回転力が生まれる
- 踏み切り動作において重心の鉛直方向の移動距離を大きくすることができ、大きな力積がかせげる

後傾動作とは助走の最終局面において体を進行方向後方に傾ける動作のことである。後傾動作には「クリアランスに必要な進行方向横軸回りの回転力を生み出す」「踏み切り動作において重心の鉛直方向の移動距離を大きくすることができ、大きな力積がかせげる」という効果がある。

大きな鉛直速度を得る（高く跳ぶ）ためには力学的には踏み切り動作における力積（力×時間）を大きくする必要がある。これを現実の動作と結びつけて考えるときは「踏み切り動作において重心の鉛直方向の移動距離を大きくする」と同義であると理解しておけば良い。

膝を大きく屈曲させて踏み切ることで、踏み切り動作において重心の鉛直方向の移動距離を大きくすることもできる。しかし、脚の伸展力は膝の屈曲角度が大きくなりすぎると小さくなる性質を持っているため、踏み切り動作における膝の屈曲角度は小さくする（140度程度）ことが好ましい。選手の間接感覚としては「棒足」にして突っ張って踏みきるくらいの感覚で踏み切ることが好ましい。

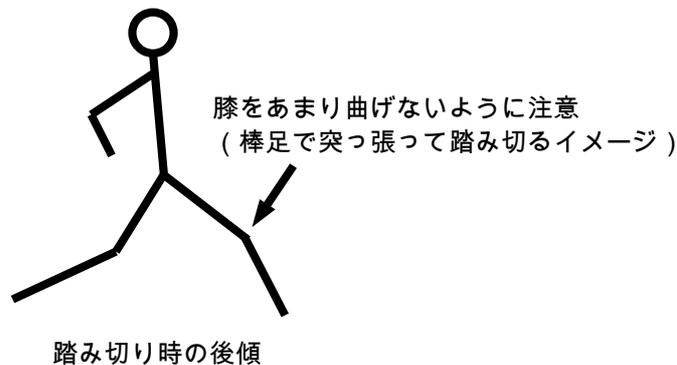


図 4.8: 踏み切り動作での膝の角度

高跳びの踏み切り動作では踏み切り脚の膝をあまり曲げないで、しかも身体重心の鉛直移動距離を大きくすることが要求される。このため、体を後傾させて膝をあまり屈曲させないで踏み切ることが良いとされている。

体が後傾して踏み切り脚を接地させると、助走で生み出された速度（運動量）によって身体は脚と地面との接地位置を中心に起こし回転を始め、身体重心が鉛直方向に動かされ始める。この起こし回転が重心の水平方向の速度を鉛直方向の速度に変換する大きな役割を担っている。

起こし回転を効果的に行う後傾姿勢を作るためには以下の点が重要となる。

1. 助走速度に応じた適正な後傾角度で踏み切る
助走速度が小さいにもかかわらず後傾角度が大きいと体が素早く起き上がらない。助走速度に合った後傾角度で踏み切ること。
2. 跳び込むように後傾姿勢を作らない
跳び込むように後傾動作に移れば鉛直下向きの運動量が大きくなり、踏み切り動作で身体重心の移動方向の急激な変更が必要になる。このため、踏み切り脚に大きな負荷がかかり、踏み切り動作で潰れてしまう。
3. 助走速度がなるべく低下しないように後傾姿勢を作る
助走速度が速ければ起こし回転で大きな鉛直速度を得やすい。このためアームアクションも含めて、助走速度がなるべく低下しないように後傾動作を行うこと。
4. 重心が低くなるような後傾姿勢を作る
身体を後傾させ身体重心と踏み切りポイントとの距離を小さくし（重心を低くし）、慣性モーメントの小さな姿勢を作ることで、踏み切り動作で起こし回転しやすくなる。

4.3 内傾動作と後傾動作の分析

「体幹部」を首の付け根からお尻の中央まで結ぶラインと考えたとき

内傾動作の基本姿勢（平均的な姿勢）

- 踏み切り足が接地した瞬間に内側に体幹部が15度程度傾いている
- 離地する瞬間はバーに近づく側に体幹部が10度以上傾かない

後傾動作の基本姿勢（平均的な姿勢）

- 踏み切り足が接地した瞬間に体幹部は後方に15度程度傾いている
- 離地の瞬間は体幹部が垂直方向より前方に傾いていない

良いクリアランスを作るためには空中での回転力を踏み切り動作で十分に生み出すことが重要である。クリアランスに必要な空中の回転は、内傾動作からの起こし回転による進行方向軸回りの回転（ロール回転）と後傾姿勢からの起こし回転による進行方向横軸回りの回転（ピッチ回転）、振り上げ脚の動作によって生まれる鉛直軸回りの回転（ヨー回転）の合成によって生まれている。踏み切り動作からクリアランスに移る間の起こし回転動作で生まれるこうした回転運動は、背面跳びのクリアランスを行う上で重要な役割りを果たしている。ここでは内傾動作と後傾動作をビデオカメラを用いて簡易的に分析する方法と合わせて、内傾動作と後傾動作がクリアランス動作に果たす役割を説明する。

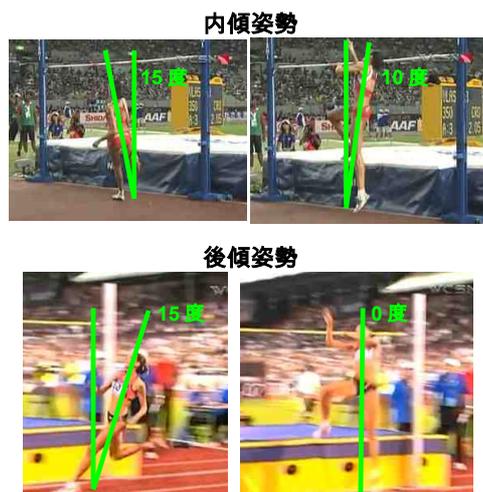


図 4.9: 基本的な内傾姿勢と後傾姿勢（着地時と離陸時） [44][45]

4.3.1 ビデオカメラを用いた内傾・後傾動作の確認方法

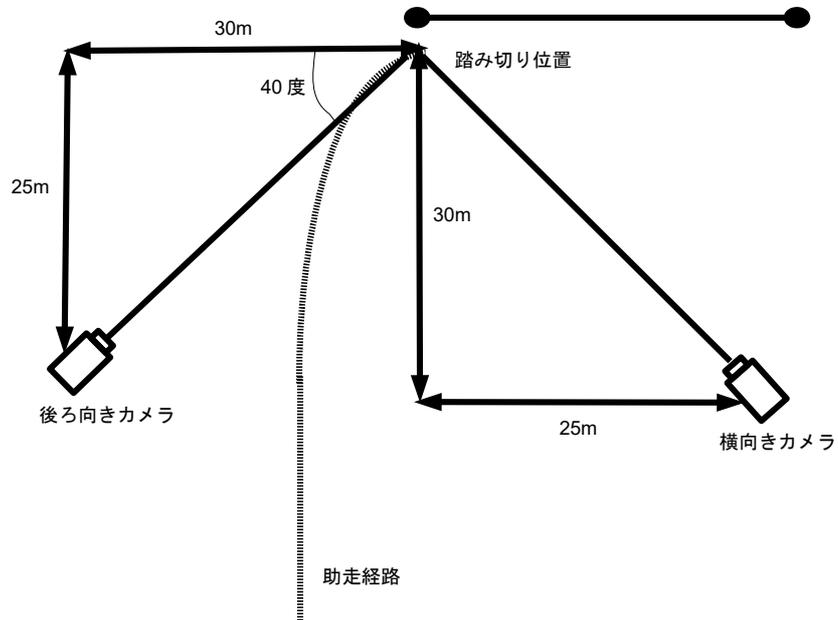


図 4.10: 内傾動作と後傾動作の確認方法

図 4.10 に示すように横向きカメラと後ろ向きカメラを設置する。こうしたカメラ設置することで内傾動作と後傾動作を別々に確認することができる。

後ろ向きカメラは助走の最終方向を後ろ側から撮影する。ただし、助走の最終方向とは踏み切り足が接地する直前に重心が動いている方向であり、一般的な選手であれば、図 4.10 に示すように 40 度の方向を目安にしてビデオを設置すれば問題ない。横向きカメラは後ろ向きカメラに垂直な方向で選手の踏み切り動作を真横から撮影できる位置に配置する。

後ろ向きカメラからは体の内傾動作を分析することができる。「体幹部」を首の首の付け根からお尻の中央まで結ぶラインと考えると、踏み切り足が地面に接地した瞬間には内側（バーから離れる側）に体幹部が 15 度程度傾いており、踏み切り足が離地する瞬間にはバーに近づく側に体幹部が 10 度以上傾かない踏み切り動作が良いとされている（これはあくまで基本的な姿勢（平均的な姿勢）と考えてほしい、本来は選手の跳躍タイプによって適正な内傾角度は異なる）[46][47]。

初心者にありがちな内傾動作の問題点をまとめると以下のようになる。

1. 踏み切り足が接地した瞬間と離地する瞬間の体幹部の傾きが小さい
→内傾不足で回転力不足となり，クリアランスの姿勢が作りにくい
2. 踏み切り足が接地した瞬間の体幹部の傾きが小さく，離地時に体幹部が10度以上バー側に傾いてしまっている
→跳躍がバーの方向に流れてしまい，十分な高さが生まれず身体が上昇中にバーに当たることが多い。また，低い重心の位置で離地することになり，跳躍の高さを損ずる。
3. 内傾も十分で踏み切り足が接地した瞬間の体幹部の傾きよいが，離地する瞬間の体幹部のバー側への傾きが小さい
→高い重心位置で離地できるという利点はあるが，回転力不足となり，クリアランスの姿勢が作りにくい

クリアランスに必要な十分な回転力を生み出すためには，接地の瞬間にバーから離れる方向へ体幹部が15度程度傾いていることが必要であり，その傾きは曲線助走での内傾動作によって生み出される。

もし内傾角度が足りないなら，もっと曲線助走の半径を小さくして助走中の内傾動作を促したり，助走速度を上げて内傾動作をしやすくするなどの工夫が必要となる。

また，曲線助走で脚や頭部だけが傾くのではなく，体全体がきちんと内傾しているかどうか確認することが必要だ。初心者は身体の一部だけ（例えば首だけ）内側に傾けて内傾動作がうまくできていると錯覚しやすい。指導者は体幹部が地面に対して傾いているか特に注意して観察してほしい。

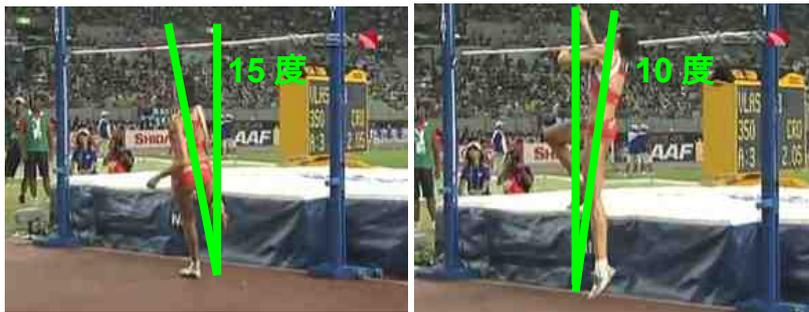


図 4.11: 基本的な内傾動作（着地時と離陸時） [44]

横向きカメラからは体の後傾動作を確認することができる。後傾動作の場合は踏み切り足が接地した瞬間に体幹部は後方に15度程度傾いており離地の瞬間には垂直方向より前方には傾かないことが良いとされている。

初心者にありがちな後傾動作の問題点をまとめると以下ようになる。

1. 踏み切り動作で体幹部が垂直姿勢になるかなり手前で離地してしまう
→回転力不足になり、クリアランスの姿勢が作りにくくなる
2. 後傾不足の状態ですり足で踏み切り動作に入り、離地の時に体幹部が垂直状態より前に倒れてしまう
→十分な回転力は生み出されるが、跳躍が流れてしまい十分な高さが生まれず、また、低い重心の位置で離地することになり跳躍の高さを損ずる。

クリアランスに必要な回転力を生み出すためには十分な後傾姿勢が必要となる。踏み切り足が接地すれば体を前方に回転させ、離地するときには真横から見て体幹部が地面と垂直になっているとよい。



図 4.12: 基本的な後傾動作（着地時と離陸時） [45]

クリアランスに必要な空中の回転力を生み出すために腕や脚の振り上げ動作を工夫することもできる。腕や脚の振り上げ動作を大きくすれば踏み切り足から地面に力を伝えやすくなり、より高い跳躍を生み出すことに繋がる。その反面、やりすぎるとクリアランスに必要な進行方向横軸の回転力を打ち消す方向に大きな力が働き、回転力不足になる。こうした弊害を回避するために、踏み切り動作で進行方向からバーから離れる方向に肩を開くような形で腕や脚を振り上げることで、回転力の減少を最小限に抑えるテクニックなどが用いられる。

4.3.2 内傾動作と後傾動作の確認（例）

ここでは具体的に著者である私の跳躍をビデオ撮影して動作分析した結果を紹介する。撮影したビデオカメラの配置を図 4.13 に示す。ビデオは市販品のものを用いて、1 秒を 30 コマで撮影した。

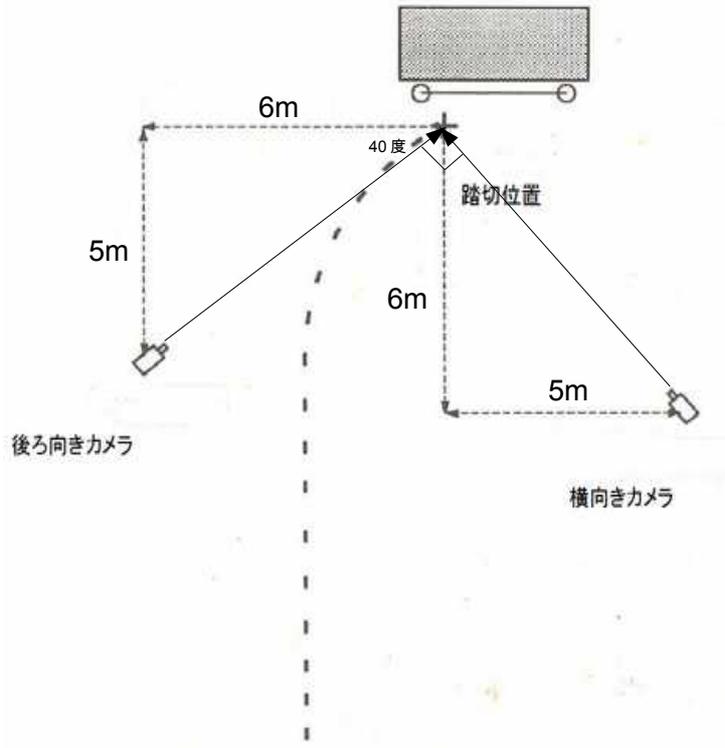


図 4.13: ビデオの配置

分析の一例として横向きカメラの画像から踏み切り足が接地した瞬間の画像を切り出しものを図 4.14, 踏み切り足が離地した瞬間の画像を切り出したものを図 4.15 に示す。



図 4.14: 横向きカメラから撮影した踏み切り足接地の瞬間

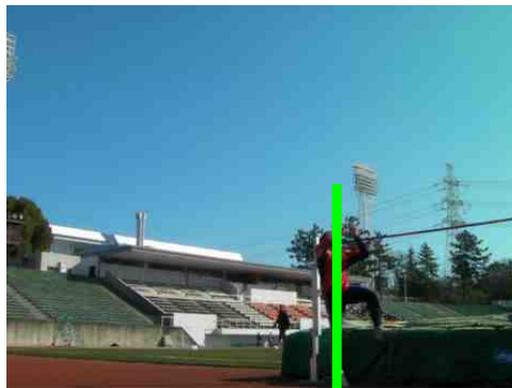


図 4.15: 横向きカメラから撮影した踏み切り足離地の瞬間

図 4.14 より踏み切り足が地面に接地した瞬間の体幹部の傾き（首の付け根からお尻までの体幹の傾き）は $\arctan(1/4)$ を計算すると大凡 14 度となっている。後傾動作では踏み切り足が接地した瞬間に体幹部は後方に 15 度程度傾けば良いとされているため写真の選手（著者）は理想的な踏み切り姿勢といえる。また、図 4.15 より踏み切り足が地面から離地した瞬間の体幹部は、地面に対してほぼ垂直になっていることが分かる。後傾動作では離地の瞬間に体幹部は垂直方向より前方には傾かないことが良いとされているためこれも良い離地姿勢といえる。

次に横向きカメラの画像から助走速度について分析してみる。図 4.16 の写真 1 は後向きカメラと踏み切り位置を通る鉛直平面上においた支柱とバーである。バーの長さは $4m$ で高さは $2m$ に設定している。横向きカメラでこうした静止画像を撮影しておけば映像内で体が動いたときの、距離や高さを知ることができる。写真 1 から画像の横方向 360 ピクセルが距離 $4m$ に相当することが分かる。

写真 2 は踏み切り一步手前の足が地面に接地した瞬間の画像であり、写真 3 は踏み切り足が地面に接地した瞬間の画像である。ここで写真 2 から写真 3 まではコマ送りで 7 コマかかっていることから $\frac{7}{30}$ 秒の時間が経過している。この時水平方向の移動距離は 140 ピクセルであるため $\frac{140}{90} m$ 移動している。よってこの時の助走速度はおおよそ $6.69m/s$ であることが分かる。

図 4.16 は筆者が 190 の高さを跳んでいる時の画像である。3.1.2 項の議論を応用して著者の身長が $187cm$ であるので目標記録を 190 と設定すると $V_{zt0} = 3.40m/s$ となり、図 3.3 から目標助走速度は $6.5m/s$ と計算される。従って図 4.16 の助走速度はこの目標助走速度よりも十分速い助走速度であることが分かる。実際にこの映像を撮影したときの跳躍では 190 を余裕を持って跳ぶことができた。

しかし、目標記録を 220 と設定すれば必要となる助走速度の目安は $7.3m/s$ 、 230 と設定すれば $7.5m/s$ となる。このままの助走速度では不十分であり、更なる助走速度アップが必要であることが映像の分析から分かる。



図 4.16: 横向きカメラから撮影した踏み切り動作

4.3.3 補足説明：真後ろからの撮影

多くの選手は踏み切り動作に移る際に重心がバーに対して 40 度程度の角度で進入するため、選手の踏み切り動作を真横から撮影するためには図 4.10 と図 4.13 に示したように、横向きカメラの視線とバーのなす角度が 60 度となるようにカメラを設置すればよい [35].

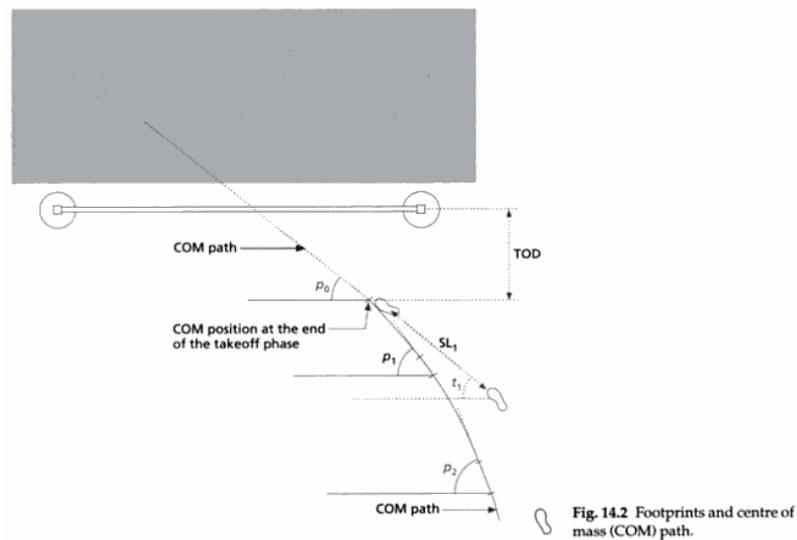


図 4.17: 踏み切り動作前後の脚と重心の動き [35]

踏み切り動作前後の脚と重心の動きを分析した例を図 4.17, 図 4.18 に示す。図中の t_1 は最後の一步とバーがなす角度, p_2 は踏み切り 1 歩前の重心軌道とバーがなす角度, p_1 は踏み切り動作に入ったときの重心軌道とバーがなす角度, p_0 は踏み切り動作後に重心が空中に跳び出す軌道とバーがなす角度をそれぞれ表している。

Athlete	t_1 (°)	p_2 (°)	p_1 (°)	p_0 (°)	e_1 (°)	e_2 (°)	e_3 (°)	SL_1		TOD (m)
								(m)	(%)	
<i>Men</i>										
Avdeyenko	33	54	44	39	23	21	25	2.27	112	0.96
Conway	15	47	30	34	-9	39	36	2.11	115	0.94
Forsyth	26	46	39	38	17	21	22	2.18	111	0.91
Paklin	32	50	40	33	4	36	43	2.16	113	0.86
Partyka	28	51	41	33	16	25	35	1.83	96	1.01
Sjöberg	26	48	37	29	11	26	35	2.10	105	0.77
Sotomayor	31	-	41	31	11	30	40	2.31	119	0.84
Stones	32	55	44	38	-5	50	56	2.00	102	0.99
Zvara	33	55	43	44	23	20	20	2.11	111	0.67
<i>Women</i>										
Acuff	23	50	36	33	18	18	22	1.69	90	0.53
Astafei	32	-	39	34	21	18	24	2.00	109	0.88
Beyer-Helm	29	50	42	40	24	18	20	1.80	101	1.04
Dragieva	33	47	41	40	31	10	11	1.85	109	0.82
Henkel	30	55	41	38	42	-1	4	1.91	105	0.94
Kostadinova	34	51	43	37	26	16	24	2.06	114	0.98
Quintero	30	51	42	34	27	14	24	1.91	106	0.75
Sommer	23	44	36	33	30	6	11	1.72	98	0.90

図 4.18: 踏み切り動作前後の脚と重心の動き [35]

ここで p_1 の角度は選手によらずおよそ 40 度という角度になっていることが分かる. このため図 4.10, 図 4.13 のようにカメラを設置することで, おおよそ選手の踏み切り動作を真後ろと真横から撮影することが可能になる.

4.3.4 補足説明：真横からの撮影

助走の速度や重心の動きを正確に分析するためにはカメラで選手を真横から撮影しなければならない。次にこの理由について説明する。

カメラは現実には3次元内の運動を2次元のスクリーン面に投影して撮影している。投影には、視点が無限遠に存在すると仮定した平行投影と、視点を有限の位置にあると仮定した透視投影がある。平行投影とは対象物から十分遠くに距離をおき望遠レンズを使って撮影したときの画像に近く、透視投影とはピンホールカメラで撮影した画像に近い。現実のカメラによる撮影画像は透視投影による画像に近くなる。

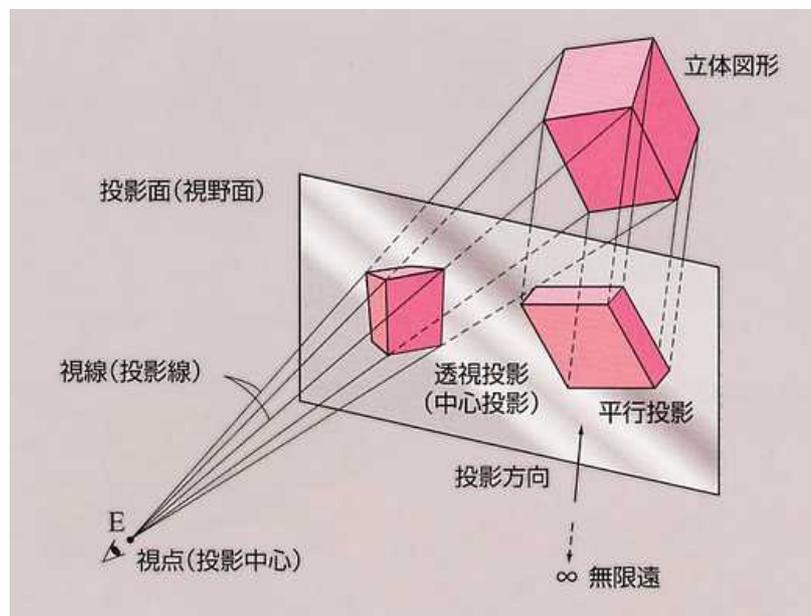


図 4.19: 透視投影と平行投影 [48]

例えばある基準座標系（世界座標系）で X 軸方向に速度 v で移動する物体をカメラで撮影することを考える（図 4.20）。ただし，物体の運動する世界座標系におけるカメラの視点の位置を $E(x_e, y_e, z_e)$ ， E から投影面に下ろした垂線の交点を $T(x_t, y_t, z_t)$ とする．投影面は原点を T とする右手座標系 $T-XYZ$ を持つ座標系と定義し， Y 軸は xy 座標面と平行であるとする（図 4.20）．視点 E は X 軸上の有限の位置に存在するものとする．

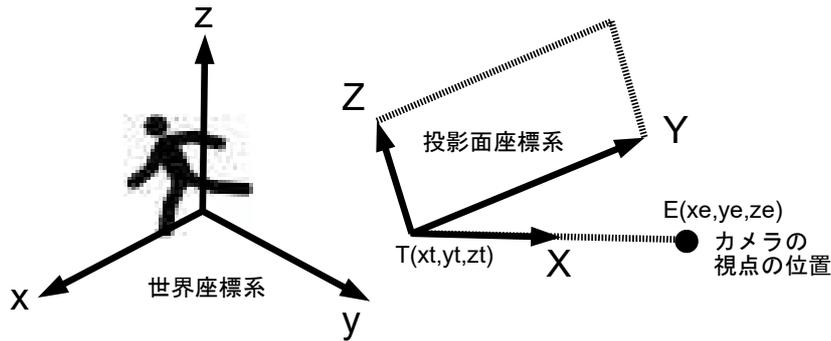


図 4.20: ビデオカメラの投影面に映し出される画像

ここで投影面座標系は世界座標系に重なった状態から原点を (x_t, y_t, z_t) 方向に平行移動し， Z 軸まわりに θ 回転し Y 軸まわりに $-\phi$ だけ回転させたものであるとする．このとき，座標系 $O-xyz$ の撮影対象の運動を以下の式で座標系 $T-XYZ$ の運動に変換することができる．

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_t \\ 0 & 1 & 0 & -y_t \\ 0 & 0 & 1 & -z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

ただし，軸方向に対して右回りを回転角度の正として考え，座標の平行移動や回転を行列の乗算だけで扱うために，同次変換形式で式を記述している．

計算結果を見やすくなるようにまとめると

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & \sin \phi & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ -\sin \phi \cos \theta & -\sin \phi \sin \theta & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_t \\ y - y_t \\ z - z_t \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

次に座標系 $T - XYZ$ の運動を投影面に映す射影変換を考える。図 4.21 に示すように撮影の視点を座標系 $T - XYZ$ の座標で $E(X_E, 0, 0)$ とし、点 $P(X, Y, Z)$ を投影面に投影したときの座標を $P_S(0, Y_S, Z_S)$ とする。

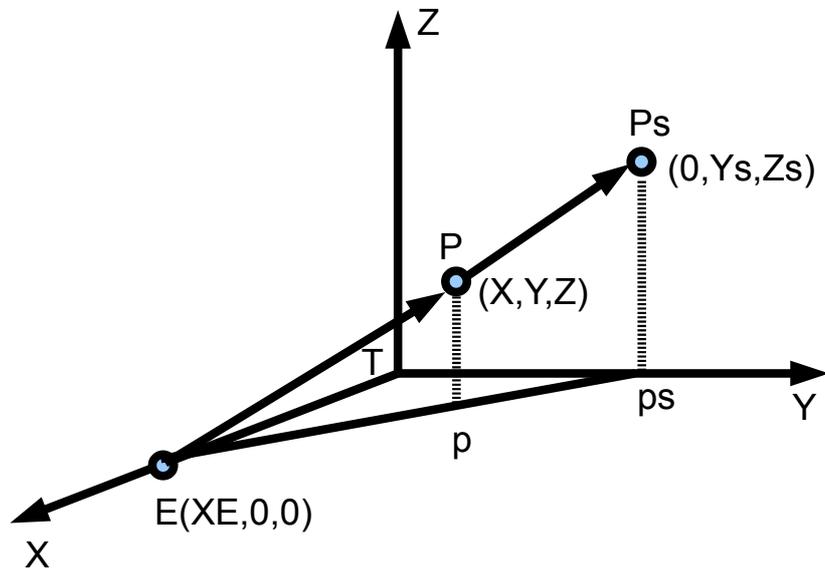


図 4.21: 透視投影

ここで三角形の相似条件を考えれば $Y_S/Y = X_E/(X_E - X)$, $Z_S/Z = X_E/(X_E - X)$ であるので、この関係を同時座標変換で表すと

$$\begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_E & 0 \\ -1 & 0 & 0 & X_E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

となる。ただし X_E は以下の式で表される。

$$X_E = \sqrt{(x_e - x_t)^2 + (y_e - y_t)^2 + (z_e - z_t)^2} \quad (4.4)$$

ビデオカメラの撮影角度が世界座標の運動面を真横からとらえている場合、つまり $(x_t, y_t, z_t) = (0, y_T, 0)$, $(x_e, y_e, z_e) = (0, y_E, 0)$ とした場合は世界座標系 $O-xyz$ で動く運動 $(x, y, z) = (vt, 0, h)$ は投影面に対して

$$\begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{vt(y_T - y_E)}{y_E} \\ \frac{h(y_E - y_T)}{y_E} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

で表され、投影面（撮影画像）内でも倍率の違いはあるが水平方向の等速直線運動として撮影されることが分かる。つまり、ビデオカメラの撮影角度が世界座標の運動面を真横からとらえている場合は、4.3.2 項の分析方法によって正しい助走速度が分析できることになる。そうでない場合は正しい助走速度を得るために複雑な補正演算が必要になる。

4.4 踏み切り準備動作での腕・振り上げ脚の使い方

- 腕の使い方にはランニングアーム・シングルアーム・ダブルアームがある
- スピードタイプの選手はランニングアームをよく使う
- パワータイプの選手はダブルアームをよく使う
- シングルアームはランニングアームとダブルアームの中間的な特徴を持つ
- 一般的にバーより遠い側の腕の動作のほうが跳躍への貢献度が高い
- 振り上げ脚の動作は腕部の動作に比べて跳躍への貢献度が高い

踏み切り動作を効果的なものにするためには、助走の最終局面における腕や脚の振り上げ動作が重要である。腕の振り上げ動作（アームアクション）は「ランニングアーム」「シングルアーム」「ダブルアーム」に大別される。ここでは、踏み切り前後の腕や脚の動作について、その種類や役割、注意点について概説する。

4.4.1 振り上げ脚とアームアクションの役割と貢献度

腕と脚の振り上げ動作は、踏み切り動作で地面に伝える力を強くすることのできる有効な手段である。ここでは腕の振り込み動作と振り上げ脚動作について過去の分析例を取り上げ、その役割と跳躍への貢献度を説明する。

紹介する分析例は *USATF,NCAACHampionships,USOlympicTrials,WorldIndoorChampionships* に参加した選手の跳躍を画像分析して得られた結果である [35]。

腕や脚の動作がどれほど跳躍に貢献しているか示す値として「(踏み切り動作中の腕・(脚)部の重心の移動距離/身長)×腕部の重量」で計算される値を参考値として算出する。これは腕(脚)部の動作によって重心が持ち上がる度合いを身長当たりの値として計算したもので、重心が鉛直方向に引き上げられる速度や時間を反映した値となっている。この値が高ければ高いほど跳躍高への貢献度が高いと考えられる。

ここで、踏み切り時にバーに近い側の腕に対してこの値を計算したものを *AAN* とし、バーに遠い側の腕に対して計算した値を *AAF*、両腕に対して計算した値を *AAT*、振り上げ脚について計算した値を *LLA*、踏み切り脚以外の手足の合計値を *FLA* とする。

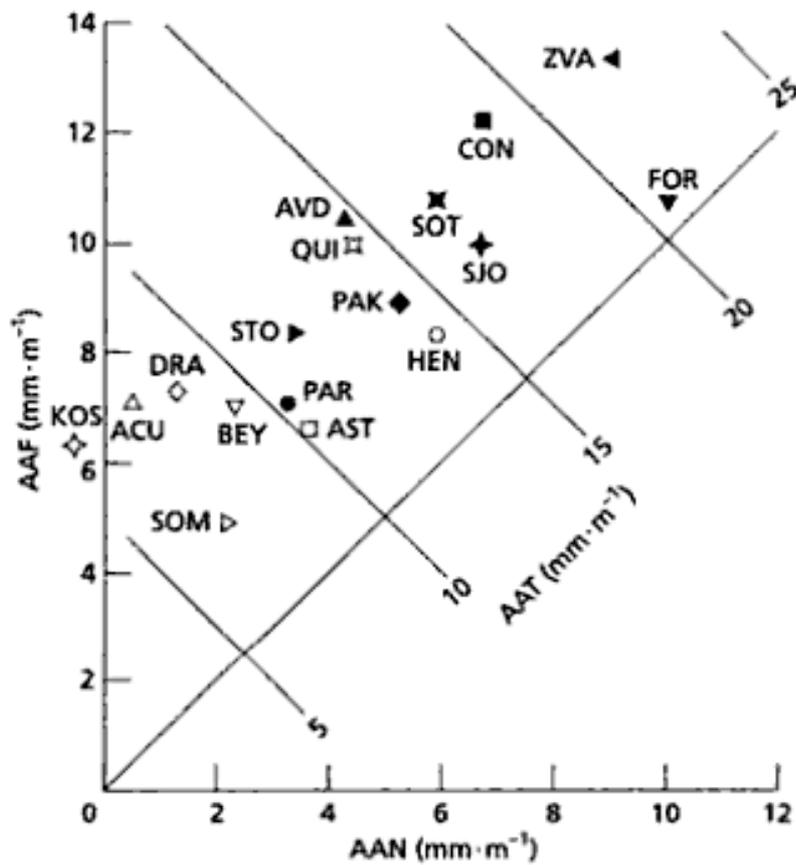


図 4.22: 跳躍における上肢動作の貢献度 [35]

図 4.22 は踏み切り動作における腕部の動作の貢献度を示した図である。グラフの右上に行くほど、値が大きくなり踏み切り動作における腕部の跳躍への貢献度が高い。ここで、図中の斜め線は AAN と AAF の値が等しいラインを表す。

多くのジャンパーのプロットはこのラインよりも上にある点に注意してほしい。これは一般的にバーより遠い側の腕の動作のほうが跳躍への貢献度が高いことを示している。多くの一流選手はバーに近い側の腕の動作はクリアランスをリードすることに利用し、バーから遠い側の腕で身体を引き上げる動作を行っていることが分かる。

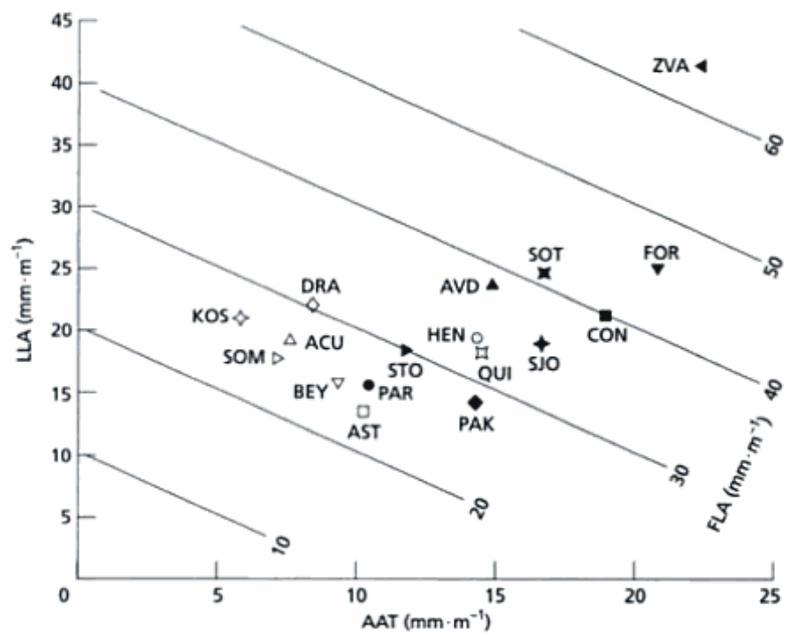


図 4.23: 跳躍における上肢・下肢動作の貢献度 [35]

次に LLA , AAT , FLA の値の関係を表したものを図 4.23 に示す。ここで、腕部の合計値 AAT より、振り上げ脚の値 LLA の方が大きい傾向にあることに注意してほしい振り上げ脚動作は軽視されがちであるが、腕部の振り上げ動作よりも跳躍における貢献度が高い点に注目してほしい。

松井の数学リンクモデルを使い日本人成人男女の各部分の質量比の計測を行った報告によれば [29], 上腕・前腕・手を含む腕部が身体重量に占める割合が両腕で約 10.2% であるのに対して, 脚部は振り上げ脚 1 本だけでも 17.3% と重量が大きい. 重量の大きな振り上げ脚の動作が跳躍の重心上昇に及ぼす影響は両腕の動作よりも大きい.

日本人成人男女の身体部分係数(松井, 1958)

部分	質量比		重心位置比	
	男	女	男	女
頭部	7.8	6.3	46.0	45.0
胴体	47.9	48.7	52.0	52.0
上腕	2.7	2.6	46.0	46.0
前腕	1.5	1.3	41.0	42.0
手	0.9	0.6	50.0	50.0
大腿	10.0	11.2	42.0	42.0
下腿	5.4	5.4	41.0	42.0
足	1.9	1.5	50.0	50.0

図 4.24: 松井の身体部分係数表 [29]

余談になるが走行中に地面から浮いている間は身体の角運動量は保存されている. 短距離走や跳躍種目の助走のような高速疾走においては, 質量の大きな脚が空中で振り回されると大きな角運動量を持つことになる. このため体幹の軸をぶれさせないようにするため(バランスをとるため)には, 脚の角運動量を打ち消す方向の角運動量を生み出さなければならない. このため, 高速疾走が必要な場面では腕を大きく伸ばして速く腕ふりを行う選手が多くなる.

100m 走などの短距離選手になればこの傾向が顕著になり, 上肢の質量を大きくしなければ疾走が不安定になる. このため, 上半身の筋力トレーニングが欠かせなくなる. 高跳び選手は短距離選手ほどの速い助走速度は要求されないが, 上肢のトレーニングを疎かにすれば高速疾走や腕の振り上げ動作で不利になる.

4.4.2 アームアクション

踏み切り動作準備動作における腕の使い方を大別すると「ランニングアーム」「シングルアーム」「ダブルアーム」の3種類に分かれる。いずれも世界のトップ選手が用いる代表的なアームアクションである。一般的にスピードタイプの跳躍選手はランニングアームを用いて、パワータイプの跳躍選手はダブルアームを用いることが多い。また、中間タイプの選手はシングルアームを用いることが多い。

スピードタイプの跳躍（ランニングアーム系）の特徴

- 助走距離が長い
- 助走スピードが速い
- 振り上げ振り込み動作が小さく素早い
- 接地時間が短い
- 後傾姿勢が小さい
- 踏み切り位置が遠い
- 跳躍角度が小さく流れ気味の跳躍になる
- バークリアランスのときの体の反りが小さい
(体の回転力をそのまま使う)

パワータイプの跳躍（ダブルアーム系）の特徴

- 助走距離が短い
- 助走スピードが遅い
- 振り上げ振り込み動作が大きい
- 接地時間が長い
- 後傾姿勢が大きい
- 踏み切り位置が近い
- 跳躍角度が大きく垂直に近い跳躍になる
- バークリアランスのときの体の反りが大きい
(体を丸めて慣性モーメントを調整しバーを超える)

アームアクションでは腕部が上方に大きく加速されることが好ましい。踏み切り動作で腕を大きく使うためには、踏み切りの一歩手前で腕が適切な場所に準備されてなければならない。また、水平方向のスピードが減速するようなアームアクションにならないように注意しなければならない。

アームアクションの選択は基本的には助走して踏み切り動作を行い、どのアームアクションに近いかを判断し選択すればよい。スピード系の跳躍選手はランニングアーム、パワー系の跳躍選手はダブルアームが多い。

ここでは代表的なアームアクションを紹介し、それぞれにどんな利点・欠点があるか説明するので、自分のアームアクションの参考にしてほしい。説明は左踏み切りの選手について行うので、右踏み切りの選手は文章を手足の左右を入れ替えた説明に置き換えて理解してほしい。

踏み切りの二歩手前の脚が接地したとき左踏み切りの選手の場合は左脚と右腕を前側に、そして右脚と左腕を後方に下げている。ここまでの基本動作は全ての選手に共通である。そこから踏み切り足を接地するまでの右腕の動作はアームアクションによって大きく異なる（左腕のアームアクションはどのアームアクションでも大きな差はない）。

まず、ランニングに近い自然な腕使いで最後の二歩を行うランニングアームについて説明する。ランニングアームは図 4.25 に示すように、踏み切り足が接地したときに右腕を前に出し、右脚と左腕を後ろに下げた状態からアームアクションが始まる。

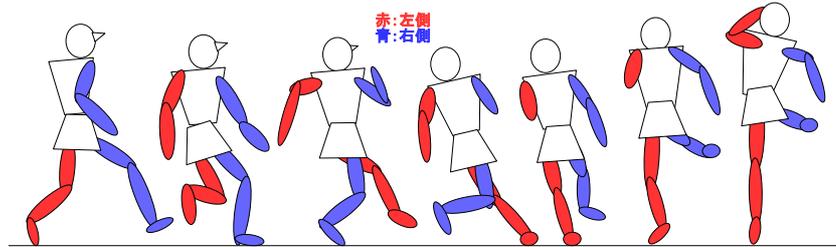


図 4.25: ランニングアームでの腕使い

図 4.25 はランニングアームと呼ばれるアームアクションを示した図である。ランニングアームはフォスベリーによって利用されたテクニックであり、最も古典的なアームアクションといえる。

ランニングアームでは踏み切り動作を行うとき左腕を前方に振り出し、右腕を後方に下げる。こうすることで腕と脚がランニング動作の延長線の自然な動きになる。ランニング動作と同じ腕の動きをすることを特徴としており、左足が上がる瞬間（右足接地時）は右腕を上げ、右足が上がる瞬間（左足接地時）は左腕を上げながら踏み切り動作を行う。バー側の肩が下がった踏み切り姿勢となるため、他のアームアクションに比べて跳躍が流れやすい。

ランニングアームの特徴としては、踏み切り動作で振り上げ脚と左腕で体を引き上げ、右腕をやや後方に引くところにある。また、このとき左側の肩を上方に引き上げるような形で踏み切りの姿勢を作る。

ランニングアームは他のアームアクションに比べて離陸時の重心が低くなってしまうという欠点があるが、ランニングに近い自然な腕使いによって踏み切り動作に移れるため、助走の減速を小さくすることができるという利点がある。ランニングアームは日本人選手に多い腕の使い方であり、特に女性選手に多いアームアクションである。

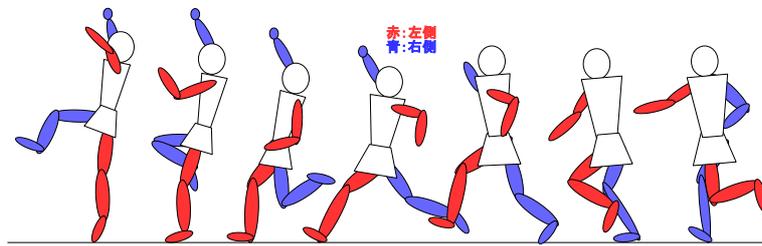


図 4.26: シングルアームでの腕使い

シングルアームは図 4.26 に示すように、踏み切り足が接地したときに右腕を前に出し、右脚と左腕を後ろに下げた状態からアームアクションが始まる。ランニングアームと同様、踏み切り動作で左腕を前方に振り出すが、右腕も前方に上げて残したままにしておく。北欧の男性選手によく見られるアームアクションである。

右腕の動作が踏み切り動作にあまり貢献しないため、あまり良いテクニックとされていないが、踏み切り動作からクリアランスへの体のコントロールが行いやすく、助走スピードの速い選手に好まれて使われる傾向がある。ランニングアームとの違いは左肩よりも右肩を上方に引き上げた姿勢で踏み切りを行う点にある。また、ランニングアームに比べれば後傾姿勢が取りやすいという利点もある。

次にダブルアームと呼ばれるアームアクションについて説明する。ダブルアームでは踏み切り動作の開始時点で左脚を前に右脚と両腕を後ろ側にする姿勢が作られる。このダブルアームの動作は大きく分けて二種類ある。

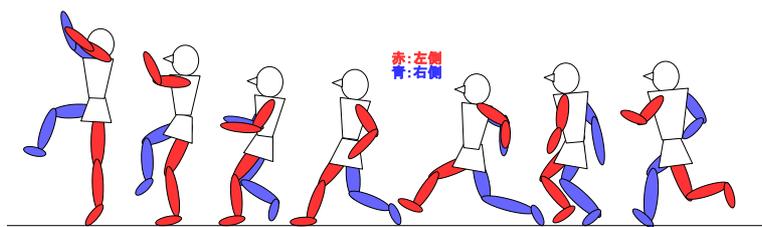


図 4.27: ダブルアームでの腕使い-a-

図 4.27 はダブルアームの動作の一つを表したものである。踏み切りの二歩手前まではランニング動作に近い自然な腕と脚の動作が維持されている。踏み切り足一步手前の右脚が接地したとき左腕が前方に出て右腕は後方に下げられる。そして最後の一步が踏み出されるとき、左腕は自然に後方に下げられ右腕はそのまま後方に残される。次に踏み切り足が接地してから離陸するまでの動作で、両腕が後ろに下げられた状態から前方に勢いよく振り出される。

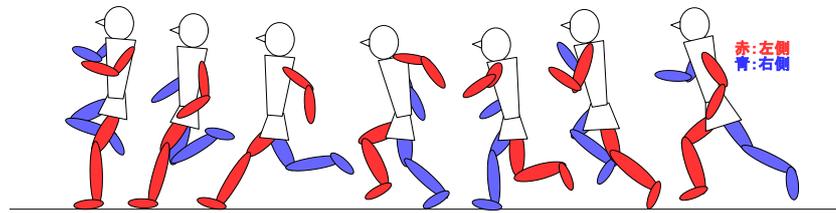


図 4.28: ダブルアームでの腕使い-b-

図 4.28 は図 4.27 と別のパターンのダブルアームを表している。踏み切りの二歩手前で右腕は前方に出したまま保たれ、左腕は自然に前方に出されていく。踏み切り一歩手前の右脚が接地したとき両腕が前方に残されている。最後の一步が出されるときに両腕が後ろに引かれ、踏み切り足が接地してから離陸するまでの動作で両腕が後ろに下げられた状態から前方に勢いよく振り出される。先ほどのダブルアームと比較するとアームアクションの前半で右腕が前方に残される点が大きく異なる。

ダブルアームの選手は腕の使い方が、通常のランニングと比べて不自然な形になるため、助走スピードが減速しやすい。ダブルアームはランニングアームやシングルアームに比べて助走スピードがどうしても減速してしまうが、離陸時の重心を高くしやすいという利点がある。また、ダブルアームでは大きな振り込み動作を使って地面に大きな力を伝えることができる。