

クリアランス

高跳び選手がバーを越えるときの空中姿勢のことをクリアランスと呼ぶ。クリアランスをうまく行うためには「踏み切り動作によって調整する要素」と、「空中動作によって調整する要素」の2つの要素が重要となる。

第5章でも述べたように踏み切り動作が完了すればクリアランスに必要な回転力（角運動量）と、空中での重心の放物線軌道は全て決まってしまう。空中動作でいかに姿勢を調整しようがこうした物理量は変化することはない。

一方で重心の軌道や角運動量が決まった後でも、空中動作で調整できる要素がある。例えば、全体の重心軌道は変化しないが、体のある部分を下げることによって別の部分を持ち上げることができる。

また、全体の角運動量は変化しないが、体のある部分をゆっくり回転させることで別の部分を速く回転させることもできる。体の姿勢を変えて全体の慣性モーメント（回転しやすさ）を調整することで、空中で速く回転したり遅く回転したりすることも可能である。

第6章ではこうしたクリアランスにおけるテクニックと初心者へのアドバイスを述べる。

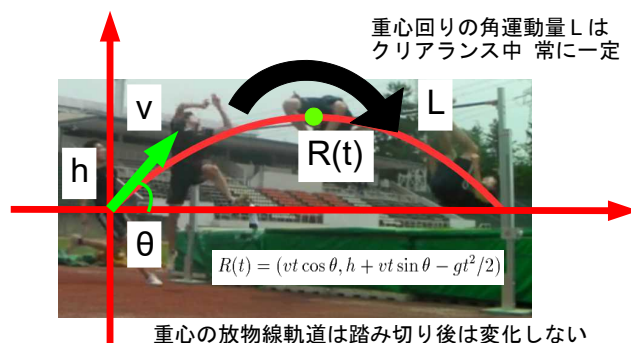


図 6.1: 空中動作で変化しない物理量

6.1 クリアランスのポイント

クリアランス中のアーチ動作におけるテクニック

- 脚部を下げることで腰部を浮かせることができる
- 体の一部をゆっくり動かすと別の一部を速く回転できる
- 回転中心に質量を集めると（身体を反ると）回転速度が速くなる

踏み切り動作が完了し空中に体が投げ出されると、着地までの重心の放物線軌道は決まってしまう。また、角運動量も空中で変化することはない。

しかし、重心の放物線軌道は変化しないが、選手は空中で体の姿勢を変化させることは可能である。例えば、頭部や脚部を下げることで腰を浮かせ、身体を反ったアーチ姿勢を作ることができる。

アーチ動作では頸（首）の背屈（アゴを持ち上げる動き）や腹屈（アゴを引く動き）動作が先行して、それに続いて体幹部の動きが追従する形で実現される。この頸部と体幹部の動きの時間のズレから、背面跳びの空中フォームは頸反射の一種であるとされている [4]。

頸反射では、頭部を背屈する（アゴを上げる）と体幹が背中側に湾曲する（体が反る）とともに、上肢は伸展緊張が高まり下肢は緊張が弱まる一方で、頭部を腹屈する（アゴを引く）と体幹が腹部側に湾曲する（体の反りを返す）とともに、上肢の緊張が弱まり下肢の緊張が高まるという特徴がある。

つまり、体を空中で反りたい場合にはアゴを持ち上げ頭部と脚部を下げることでうまく空中で身体を反ることができるし、バーを超えて反りを返したい場合にはアゴを引くことを意識することで脚がバーに当たらないように反りを返す動作がうまくできる。

また、空中で角運動量は変化しないが、体の一部をゆっくり動かすことで別の一部を速く回転させることができる。また、体の姿勢を変えて全体の慣性モーメント（回転しやすさ）を変化させることで空中で回転する速度を調整することも可能である。例えば、回転中心に質量が集まるように身体を反れば、空中での回転速度は速くなる。

空中で回転速度を調整する一例を紹介する。一般的にクリアランス動作では図 6.2 左に示すように、踏み切り直後に踏み切り脚をゆっくりと反時計回りに回して、体幹部分は素早く時計回りに回転し地面と平行な姿勢を作る。

次に図 6.2 右に示すように、バーを超えた後、体幹部分を反時計回りに回転させることによって、脚が時計回りに回転速度を速めてバーをクリアする。このとき、反りを返すタイミングが遅すぎればふくらはぎがバーに当たってしまう、タイミングが早すぎればお尻がバーに当たってしまう。

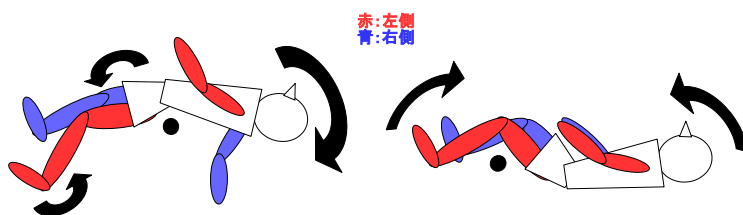


図 6.2: クリアランス中の回転速度の調整

次に空中で体の姿勢を変え慣性モーメントを変化させることで回転速度を調整する例を紹介する。基本的に身体の回転軸に近い位置に体のパーツが集まると、慣性モーメントは小さくなり空中での回転は速くなる。また、身体の回転軸から遠い位置に体のパーツが集まると、慣性モーメントは大きくなり回転は空中での回転は遅くなる。この現象はスケート選手のスピンの様子を想像すれば直感的に理解できると思う。スケート選手が手や脚を広げてスピンしている場合は回転速度は遅く（図 6.3 左）、腕や脚をたたんで縮めてスピンすると回転速度が速くなる（図 6.3 右）。

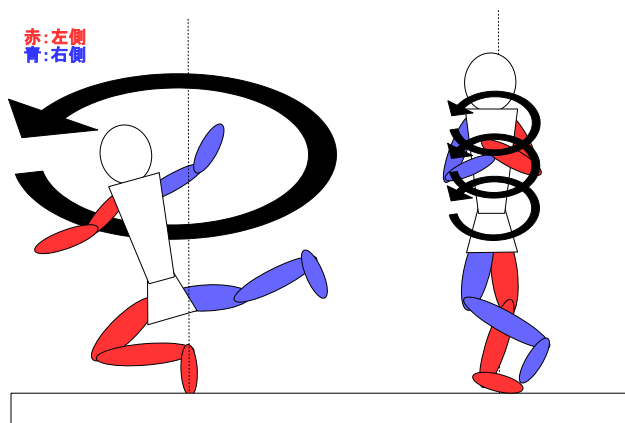


図 6.3: スケート選手のスピン

不思議に思われるかもしれないがスケート選手が腕や脚をたたんで縮めてスピンしたときに、角運動量が一定であっても、運動エネルギーが増加することがある。

例えば図 6.4 のような簡易的なスケート選手の物理モデルを考える。議論を簡略化するため、腕を伸ばしているスケート選手を長さ l の棒の両端に質量 m の質点をつけた回転子モデルで考える（図 6.4 左側）。

次に腕や縮めたスケート選手を長さ $\frac{l}{2}$ の棒の両端に質量 m の質点をつけた回転子モデルで考える（図 6.4 右側）。このときスケート選手は遠心力に逆らって腕を縮める力を発生させるが、その力の方向は質点の重心を通過するため、腕を縮める力による力のモーメントは発生しないものとする（つまり角運動量は保存される）。

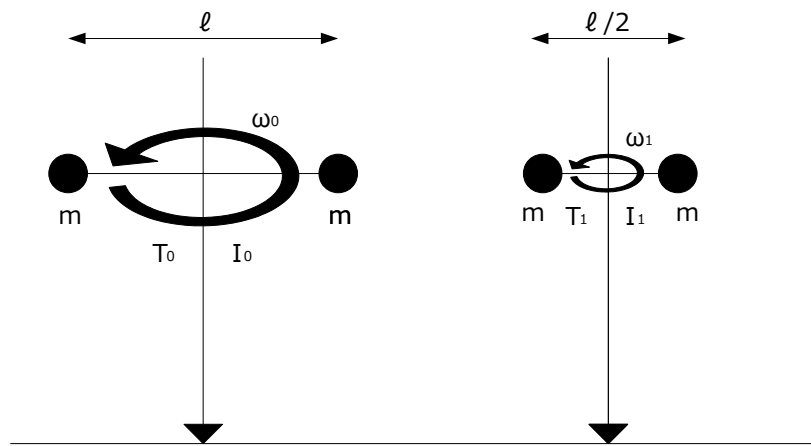


図 6.4: スケート選手のスピンの物理モデル

腕を伸ばしているときの慣性モーメントを I_0 、縮めているときの慣性モーメントを I_1 とすると

$$I_0 = 2m \left(\frac{l}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} m l^2 \quad (6.1)$$

$$I_1 = 2m \left(\frac{l}{4} \right)^2 = \frac{1}{8} m l^2 \quad (6.2)$$

となる。

このとき腕を伸ばしているときの角速度を ω_0 , 縮めているときの角速度を ω_1 とすると, 系の角運動量は保存され $I_0\omega_0 = I_1\omega_1$ であることから

$$\omega_1 = \frac{I_0}{I_1}\omega_0 = 4\omega_0 \quad (6.3)$$

となり, スケート選手の角速度は腕を縮めると 4 倍になっている.

慣性モーメントが I , 角速度が ω の物体の回転運動のエネルギーは $\frac{1}{2}I\omega^2$ であるので, 腕を伸ばしているときの運動エネルギー T_0 は

$$T_0 = \frac{1}{2}I_0\omega_0^2 = \frac{1}{4}ml^2\omega_0^2 \quad (6.4)$$

であり, 腕を縮めているときの運動エネルギー T_1 は

$$T_1 = \frac{1}{2}I_1\omega_1^2 = ml^2\omega_0^2 \quad (6.5)$$

となり, スケート選手の運動エネルギーは腕を縮めると 4 倍になっている.

次にスケート選手が腕を縮めるときに遠心力に逆らって行った仕事 W を考える. 半径 r の地点で角速度 ω_r の質点 m にかかる遠心力の大きさは $m r \omega_r^2$ なので

$$W = -2 \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{4}} m r \omega_r^2 dr \quad (6.6)$$

となる.

ここで半径 r の地点における慣性モーメントを I_r とすると $I_r = 2mr^2$ であり, 系の角運動量は保存されることから $I_0\omega_0 = I_r\omega_r$ なので

$$\omega_r = \frac{I_0}{I_r}\omega_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{l}{r} \right)^2 \omega_0 \quad (6.7)$$

となる. これを W の積分式に代入して整理すると

$$\begin{aligned} W &= -2 \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{4}} m r \left(\frac{1}{4} \left(\frac{l}{r} \right)^2 \omega_0 \right)^2 dr \\ &= \frac{ml^4\omega_0^2}{16} \left[\frac{1}{r^2} \right]_{\frac{l}{2}}^{\frac{l}{4}} = \frac{3}{4} ml^2\omega_0^2 = T_1 - T_0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

となることが分かる. 従ってスケート選手が腕を縮めることで増加した系全体の運動エネルギー ($T_1 - T_0$) は, スケート選手が遠心力に逆らって腕を縮めた仕事 W によって発生したことが分かる.

図 6.5 は同じ角運動量で同じ重心の放物線軌道を持つ選手のクリアランス姿勢の例を表している。図 6.5 右は膝を曲げ身体を反ることで図 6.5 左の選手よりも慣性モーメントが小さくなる体のポジションを取っている。このため、右のクリアランス姿勢のほうがバーに対して身体が速く回転する。

空中の角運動量が小さい選手の場合には図 6.5 左のようなクリアランス姿勢では回転不足で脚にバーを引っかけて落としてしまうため、慣性モーメントの小さい図 6.5 右のようなクリアランス姿勢を取らなければならない。ただし、このときお尻がバーを超えた後で短い時間の中にアーチを返す動作が必要になるため、空中でアーチを返すタイミングの取り方は難しくなる。

逆に空中の角運動量大きい選手の場合には図 6.5 右のクリアランス姿勢では回転が速くなりすぎて身体の上昇中に背中からバーに当たってしまう。こうした選手は図 6.5 左のように敢えて慣性モーメントの大きな姿勢を取り、空中での回転運動をゆっくりにしたほうがよい。

空中ではできるだけ身体を反った方が跳躍に有利と考える選手が多いかもしれないが、踏み切りで得られる各運動量の大きさに応じて、選手に適したクリアランス動作は違う。

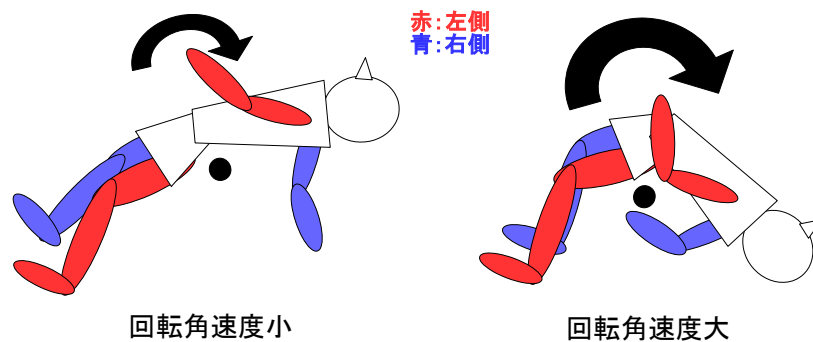


図 6.5: クリアランス姿勢の違いによる空中動作の比較

空中で姿勢を変えることで慣性モーメントが変化すると述べてきたが、ここでは真っ直ぐな棒状の体を反って回転軸に対して円形に近づけることで慣性モーメントがどのように変化するか議論する。

図 6.6 に示すように選手の体を長さ $2a$ で質量 M の細長い棒として考える。空中で全く反らない姿勢で回転する場合と、体を反って回転軸に対して円形にした場合の、それぞれの慣性モーメントの大きさと角速度を計算する。

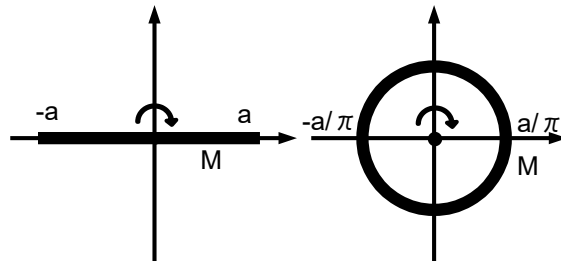


図 6.6: 慣性モーメントの計算

まず、体が棒状の場合の、回転軸回りの慣性モーメントの大きさを考える。このとき、棒の微小部分の長さを dx 、質量を M と考えると、線密度は $\rho = \frac{M}{2a}$ となり微小部分の質量は $\frac{M}{2a}dx$ となる。よって回転軸回りの慣性モーメント I は $dI = \frac{M}{2a}x^2dx$ となることから

$$I = \frac{M}{2a} \int_{-a}^a x^2 dx = \frac{1}{3}Ma^2 \quad (6.9)$$

となり、回転軸回りの慣性モーメントは $I = \frac{1}{3}Ma^2$ となる。

次に棒が丸まって円形になった場合の回転軸回りの慣性モーメントを考える。長さ $2a$ の棒が円形になっていると考えると、円の半径は $\frac{a}{\pi}$ である。円周は $2a$ なので円輪の綿密度は $\rho = \frac{M}{2a}$ となり、角度変数 θ の微小部分長は $a d\theta$ となる。

これによって微小部分の質量は $\frac{M}{2\pi a} a d\theta = \frac{M}{2\pi} d\theta$ となり、回転軸回りの慣性モーメント I は $dI = \frac{M}{2\pi} \left(\frac{a}{\pi}\right)^2 d\theta$ となることから

$$I = \frac{Ma^2}{2\pi^3} \int_0^{2\pi} d\theta = \frac{Ma^2}{\pi^2} \quad (6.10)$$

となり、回転軸回りの慣性モーメントは $I = \frac{Ma^2}{\pi^2}$ となる。つまり、大雑把に計算すると棒状の体を円形に丸める（反る）ことで、慣性モーメントは約 $\frac{1}{3}$ になる。

慣性モーメント I と角運動量 L 、角速度 ω の関係式は $L = I\omega$ で表わされる。既に述べたように空中では角運動量が変化しないことから、空中で体を棒状から反って円形にすることで回転速度（角速度）は約 3 倍になる。つまり、3 倍回転しやすくなる。

6.2 クリアランスの失敗例と対処方法

クリアランスの失敗例で多いパターンの対処方法として

- 下半身の回転不足 (a)
踏み切り位置を遠くする。クリアランス中に深く膝を曲げる。
- バーの上に座りに行ってしまう (b)
踏み切り動作でバーに対してピッチ方向の回転成分を生み出すことを意識する。後傾姿勢を作って踏み切る。
- 反るタイミングが合わない (c)
「立ち高跳び」「3歩両脚踏み切り」などの跳躍練習を行う。
- 地面に対して傾いた空中姿勢になってしまう (d)
踏み切り角度をバーと平行に近づけてみる。内傾・後傾のバランスを調整する。

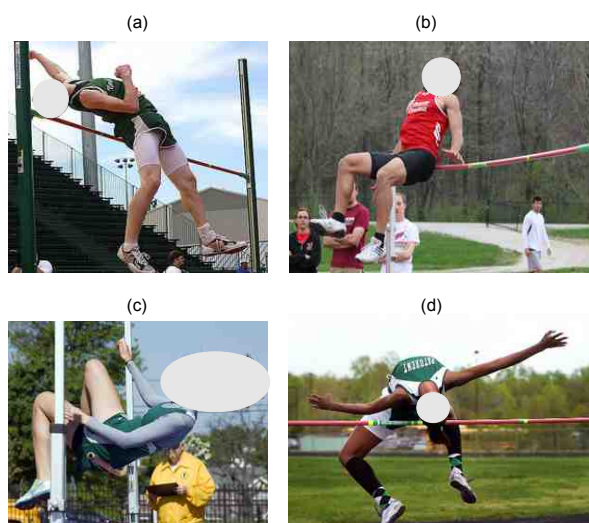


図 6.7: クリアランスのバランス

これまでの議論をまとめると、クリアランスで膝を曲げて体を反った姿勢を作れなければ、空中で回転不足に陥り図 6.7(a) のように下半身が十分に回転しないままバーに体を当ててしまう。これは、クリアランス中に膝を曲げて体の慣性モーメントを小さくして回転速度を速くしたり、単純に踏み切り位置を遠くして回転する時間の猶予を生み出すことで対処できる。

また、バーに対する回転成分そのものが不足しているときは、体があまり

回転せずそのままバーに座りこんでしまう図 6.7(b) のような失敗跳躍になる。これは踏み切り動作でさらに強いピッチ回転を生み出す必要がある。そのためには踏み切り動作で後傾姿勢を意識するとよい。

空中の反りと返しのタイミングがずれたり、頸反射を使ったアーチがうまく作れないと図 6.7(c) のように空中でうまくアーチの作れない失敗跳躍になる。空中でアーチを作る練習はいくつか考えられるが、一般的によく行われる練習方法に「立ち高跳び」と「3 歩両脚踏み切りでの跳躍練習」がある [65]。

立ち高跳びとは図 6.8 に示すように、バーに近づき過ぎないように背中を向け立ちそのままその場で跳びあがりバーを超えて着地する。着地位置がバーに近くなりすぎないように注意が必要である。あまりバーを高くする必要はない。

こうした練習は選手が背中からマットに着地する恐怖感に慣れる意味合いもあり、高い台の上に乗って立ち高跳びを行うと効果的に練習できる。

しかし、こうした練習ではアーチを作る練習にはなるが、踏み切り動作でピッチ回転やロール回転、ヨー回転を生み出す練習にはならない点に注意が必要である。立ち高跳びがうまくできるようになったからといって、助走して踏み切って、うまくアーチが作れるとは限らない。

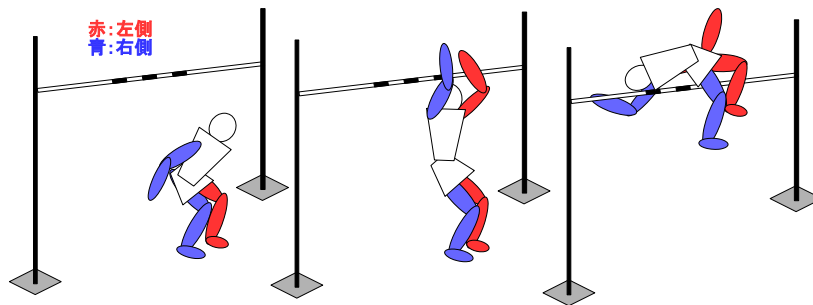


図 6.8: 立ち高跳び

3歩両脚踏み切りの跳躍練習は立ち高跳びに比べれば少し難易度が高くなるが、踏み切り動作でピッチ回転やロール回転、ヨー回転を生み出しながら空中でアーチを作るという練習が可能となる。これは3歩助走し、両脚で踏み切り背面跳びを行うという単純な練習である。場合によっては5歩や6歩の助走で同様の練習を行っても良い。練習中には踏み切り位置が近くなりすぎないように注意が必要である。クリアランス中に腰を高く浮かせるイメージで練習を行うと良い。

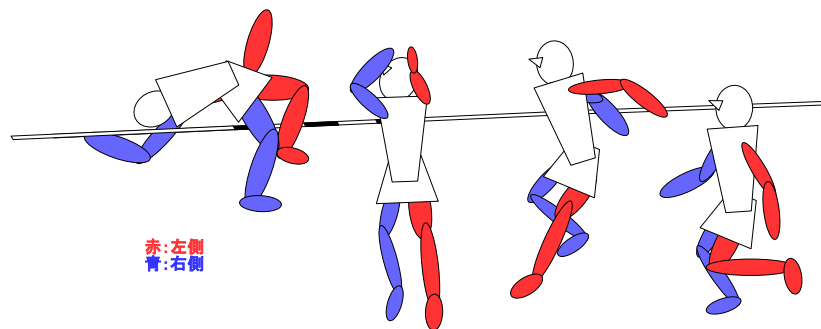


図 6.9: 3歩両脚踏み切りの跳躍練習

空中でアーチを作る練習としてはまず最初に立ち高跳びを行い、慣れてくれば3歩両脚踏み切りでの跳躍練習を行うとよい。最終的には短い助走で踏み切り、空中でアーチ姿勢が作れるように練習していくと良い。

ヨー回転の調整不足やピッチ回転、ロール回転力の調整がうまくいかないと同図 6.7(d) のように空中で地面に対して傾いた空中姿勢になってしまう。

こうした跳躍姿勢になった場合は、踏み切り動作で振り上げ脚の動きを工夫したり、踏み切り入る角度をバーと平行に近づけて必要なヨー回転の量を小さくしたり、内傾・後傾動作でピッチ回転・ロール回転を調整することで、空中での傾きが改善される。

6.3 クリアランス中の回転成分

クリアランスに必要な空中の回転成分は以下の3つである

- 振り上げ脚と肩や腕の動作によって生まれるヨー回転
地面と垂直な軸周りの回転
- 後傾姿勢からの起こし回転によって生まれるピッチ回転
踏み切り動作の進行方向と直角な水平面上の軸周りの回転
- 内傾姿勢からの起こし回転によって生まれるロール回転
踏み切り動作の進行方向と平行な水平面上の軸周りの回転

既に踏み切り動作の章でも述べたように高跳びの踏み切り動作で得られる回転運動は大きく「ヨー回転」「ピッチ回転」「ロール回転」の3つに分解して考えることができる。

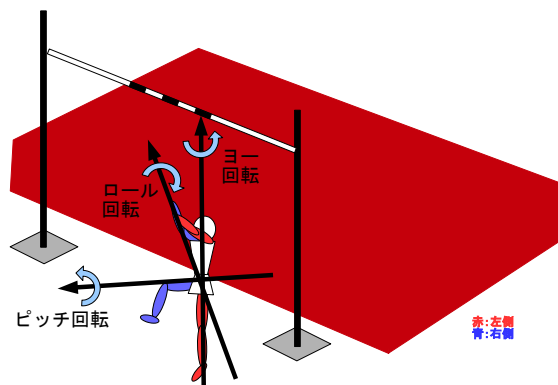


図 6.10: 回転成分の説明

ヨー回転成分とは、地面と垂直な軸周りの回転成分で振り上げ脚動作と肩や腕の動作によって作りだされる。ピッチ回転成分とは、後傾姿勢からの起こし回転によって生まれる踏み切り動作の進行方向と直角な水平面上の軸周りの回転を表す。ロール回転成分とは、内傾姿勢からの起こし回転によって生まれる踏み切り動作の進行方向と平行な水平面上の軸周りの回転を表す。

ピッチ回転成分とロール回転成分が合成されてバー方向の身体の回転成分になり、一般的にはピッチ回転よりもロール回転成分が寄与する割合のほうが高いといわれている。

また、女性選手は男性選手に比べて短い跳躍時間（滞空時間）の間に、男性と同じ体の回転量を確保する必要があるため、クリアランスを行うために大きな角運動量が必要になるといわれている。

6.4 クリアランス中の体の傾き

空中で体幹部が地面に平行な仰向けの状態を作るためには

- ヨー回転で十分なクリアランス姿勢が作れるようにピッチ回転成分，ロール回転成分の角運動量のバランスを調整する
- 作用・反作用の力で空中姿勢を調整する

クリアランスを効率よく行うためには，重心の軌道が空中で頂点にきたときに，図 6.11(a) のように体幹部が地面に平行な仰向けの状態を作る必要がある．図 6.11(b) のように地面に対して傾いた姿勢のままクリアランスを行えば，体が傾いている分だけ余計に高く跳ばないとバーを超えることはできない．

図 6.11(a) のホルム選手は，うまく体幹部が地面と平行となる姿勢を作れている．しかし，図 6.11(b) の選手は空中で体幹部が傾いてしまっているためクリアランス効率が低下している．こうしたクリアランス姿勢の問題点は初心者競技者によく見られる．

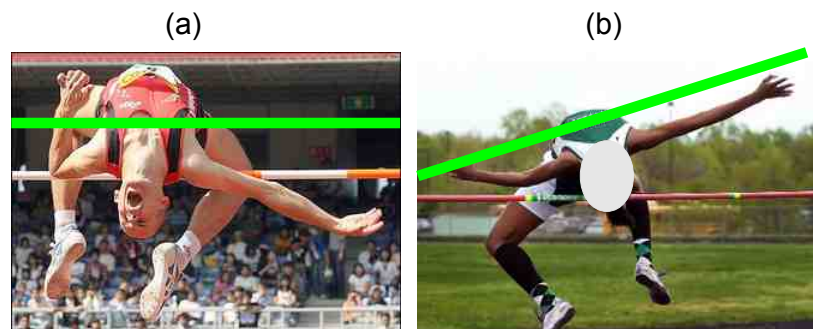


図 6.11: クリアランスの例 [66]

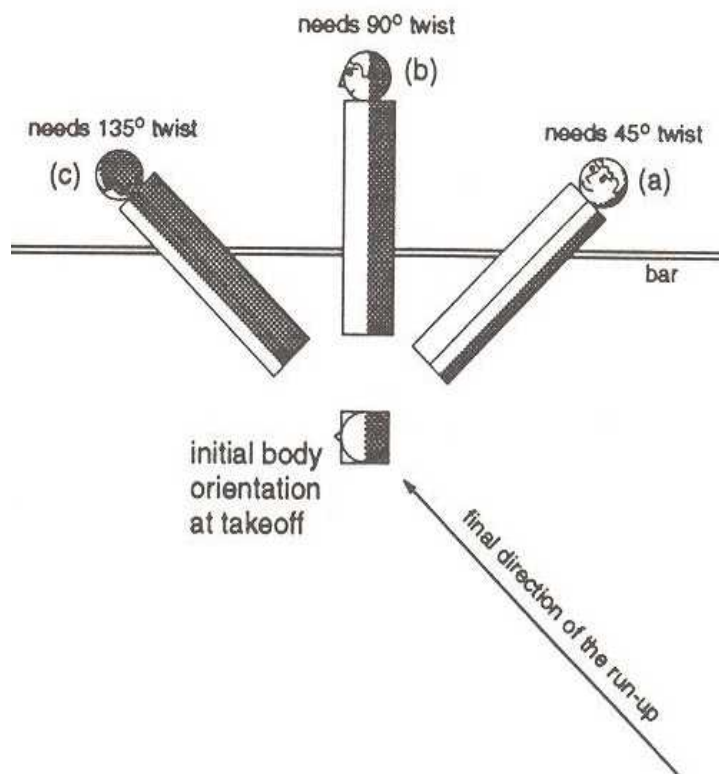


図 6.12: クリアランス中の傾き [35]

空中での体幹部の傾きは、ピッチ回転成分やその他の回転成分要素のバランスによって決まる。図 6.12 に示すような、単純なクリアランスのモデルを考える。ここで踏み切り入る角度は斜め 45 度、踏み切った瞬間の体の向きはバーと平行な向きであり、ヨー回転の角運動量は 0 であると仮定する。

図 6.13 に示すように、平均的な高跳び選手のピッチ回転とロール回転の割合はほぼ等しい。このとき、図 6.12 の競技者は重心がバーの上で頂点にくる瞬間に (b) の姿勢になっており、身体を仰向けの状態にするために 90 度のヨー回転が必要になる。

ここでもし競技者がロール回転のみを踏み切り動作で生み出した場合、図 6.12 の競技者は空中で (a) の姿勢になり、身体を仰向けの状態にするために 45 度のヨー回転が必要になる。ピッチ回転のみ生み出した場合には空中姿勢は (c) になり、必要なヨー回転は 135 度になる。

このことからピッチ回転成分が他の選手よりも強い選手は、より多くのヨー回転がクリアランスに必要となることが分かる。ヨー回転が足りない場合は図 6.11(b) のように、空中で振り上げ脚側のお尻が踏み切り脚側のお尻より下に傾いた姿勢になり、バーを落としやすいクリアランスになってしまう。

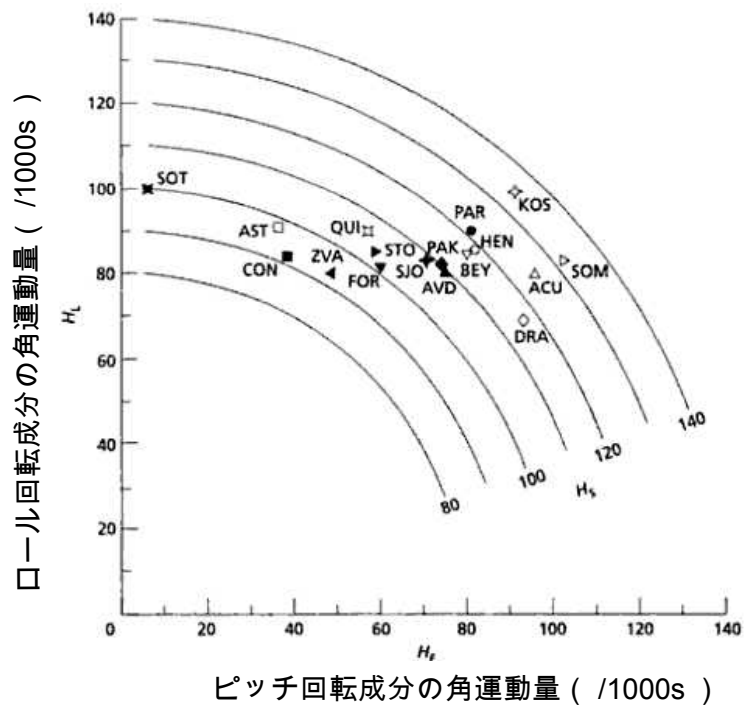


図 6.13: クリアランス中のピッチ回転とロール回転の割合 [35]

一方でロール回転成分が他の選手より強い選手は、少ないヨー回転でクリアランスを行える。もしこうした場合にヨー回転が大きくなりすぎると、空中で踏み切り脚側のお尻が振り上げ脚側のお尻より下に傾いた姿勢になり、バーを落としやすいクリアランスになってしまう（ただし、こうした状況は現実的にはほとんど起こらない）。

以上のことから重心の軌道が空中で頂点にきたときに、体幹部が地面に平行な仰向けの状態を作るためには、ヨー回転とは別にピッチ回転成分、ロール回転成分の角運動量の調整が重要であることが分かる。

ヨー回転がさらに必要かどうか判断するためにはクリアランス中の体の傾きをチェックすれば良い。クリアランス中に振り上げ脚側のお尻が踏み切り脚側のお尻より下になるように体が傾いていればヨー回転がさらに必要となる。

では次に空中で体の傾きを修正するためにヨー回転を作り出す方法を考える。既に述べたように通常の踏み切り動作を行った場合、選手は90度程度のヨー回転が空中で必要になる。このうち約半分の回転は踏み切り動作で発生する角運動量によって生み出され、残り半分の回転は空中動作で生み出される [46][47]。

空中動作でヨー回転を生み出す方法として踏み切り脚と逆側の腕をクリアランス中にバーと水平方向に伸ばし、バーを超えた後に地面の方に下げるような動作をすれば空中動作でヨー回転を生み出すことができる（このとき角運動量は変化しない）。

他にも振り上げ脚の反作用を使う方法もある。振り上げ脚の反作用を使う場合には、踏み切り後に脚を高く上げてキープしたまま少し外側に開き、空中で反るときにアーチの後方に膝を倒せばよい。図 6.14 の動作を参考にしてほしい。

大きな腕と脚の振り上げ動作を敢えて行うことでピッチ回転を小さくする方法もある。敢えて進行方向逆向きの回転を生み出す大きな腕と脚の振り上げ動作を行い、ピッチ回転を打ち消すことで、ロール回転を相対的に高くすることができる。こうしたテクニックを用いる選手は最近では希になったが、助走速度が遅く内傾動作がうまく作れない年少の選手や、一部の女性選手などに見られるテクニックである。



図 6.14: クリアランス中のヨー回転の調整（左踏み切りの選手の場合） [66]

6.5 クリアランスにおける頂点位置

- クリアランスの頂点がバーよりも手前にあれば踏み切り位置をバーに近付ける
- クリアランスの頂点がバーよりも奥にあれば踏み切り位置をバーから遠ざける
- 「流れ気味の跳躍」になっている場合は踏み切りでのブロック動作を指導する

クリアランス中の頂点の位置は、選手も指導者も非常に関心の高い項目である。初心者のクリアランスを指導する際に、「空中での頂点の位置」を指摘することは多くある。選手にとって、自分の空中での頂点位置がどこにあるのかは跳んでいても把握しにくい。踏み切りが近いか遠いか、空中での頂点の位置が手前になっているか奥になっているかというやりとりは競技中でもよく見かける。

以下、特に断りのない限り「重心軌道が空中で最も高くなる位置」を「頂点」と呼び議論することにする。

一般的には指導者は選手のクリアランスの頂点がバーよりも手前にあれば踏み切り位置が遠いと伝え、バーよりも奥にあれば踏み切り位置が近いと伝える。

特に年少の選手は踏み切り位置が近くなりすぎる傾向があるため「踏み切り位置を下げろ」と指導する指導者が多い。敢えて遠すぎるくらいの踏み切り位置で跳躍練習を行うように指導する指導者もいるくらいである。これは年少の選手が練習よりも速い助走速度で試合に臨んだときに、助走速度に対して近すぎない踏み切り位置で違和感なく踏み切れるようにするための指導である。

こうした指導方法は走力があり、基礎体力の高い選手には有効な指導方法だが、基礎体力の低い選手や女性選手に対しては逆効果を招く場合もあるので、指導者は慎重に判断する必要がある。

ここではクリアランスの中の頂点の位置について、指導者や選手はどのように考える必要があるのかについて簡単に説明する。

6.5.1 頂点位置の不思議

クリアランス中に明らかに頂点が手前や奥にあるときは、踏み切り位置を近づけたり遠ざけたりするように指導することが多い。頂点の位置をなるべくバーに近付けたほうが高さのロスが少ないため、この指導は理にかなっている。

では「頂点の位置とバーの位置が常に一致していれば良いか?」といわれると実はそうでもない。世界の一流といわれる選手を比較しても、跳躍の放物線軌道の頂点がバーの手前であったり奥であったり、様々な選手が存在する。

経験的には図 6.15 の太線に示すように踏み切り位置がバーに近く、跳躍軌道がヘアピンの形に近い選手ほど、クリアランスの頂点の位置はバーより手前になる傾向が強い。また、点線に示すように踏み切り位置がバーから遠く、幅の広い跳躍軌道の選手ほど、クリアランスの頂点の位置はバーの奥になる傾向が強い。

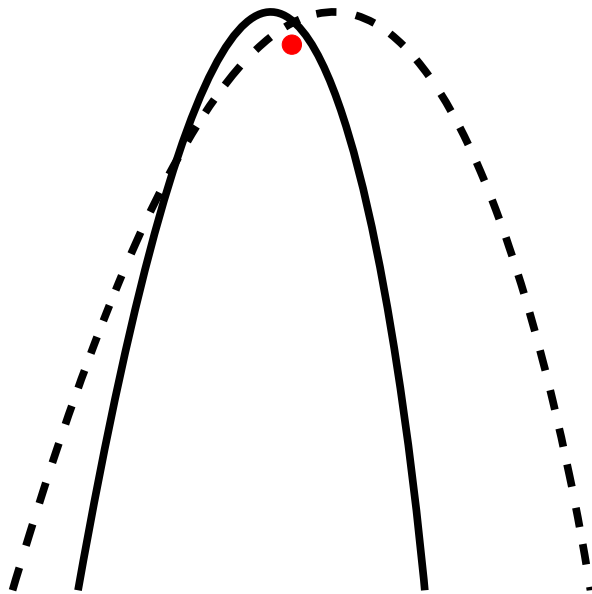


図 6.15: クリアランス中の頂点の位置の比較

具体例として、同じスウェーデンの選手であり共にオリンピックのメダリストであるホルム選手とベリークイスト選手のクリアランスを比較してみる。

図 6.16 に示すようにホルム選手のクリアランスはバーより若干奥側に頂点があり、ベリークイスト選手のクリアランスはバーより若干手前側に頂点がある。



図 6.16: ホルム選手とベリークイスト選手のクリアランス [67][68]

両者の跳躍の特徴を更に詳しく分析してみる。まずはベリークイスト選手のクリアランスを図 6.17 に連続写真で示す。

写真 1 に示すように肩がバーを超えたタイミングで腰を素早く浮かせてアーチ姿勢を作られている。次に写真 2 に示すようにバーよりやや手前でクリアランスの頂点をむかえて、落下しながらバーをこえていく。また、ホルム選手に比べれば踏み切り位置はバーに近く、写真 3 から分かるようにマットへの落下地点もバーに近い。

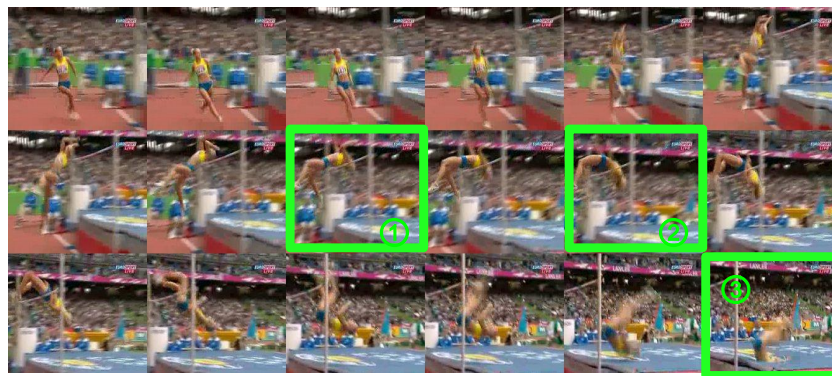


図 6.17: ベリークイスト選手のクリアランス [69]

これに対してホルム選手のクリアランスを図 6.18 に連続写真で示す。
 写真 1 に示すようにホルム選手の踏み切り位置は遠い。また、写真 2 のようにバーを超えた少し奥側に跳躍の頂点が来ており、写真 3 から分かるようにマットへの落下地点はバーから遠い。
 別の角度からの連続写真図 6.19 から分かるように、写真 1 の姿勢から緩やかにアーチの姿勢を作り始め、写真 2 のバーを少し超えた奥の地点でアーチが完成されている様子が分かる。
 次にこの両者の違いがなぜ発生するか、簡単なシミュレーションで示したいと思う。



図 6.18: ホルム選手のクリアランス [70]



図 6.19: ホルム選手のクリアランス（別角度から） [70]

6.5.2 クリアランスシミュレーション

頂点がバーより手前にあっても奥にあっても、クリアランスに不利にならないことが現実に起こりえる。一見、不思議なことに思えるかもしれないが、簡単な物理シミュレーションを用いてこの事実を示したいと思う。

シミュレーションの前提として計算を簡単にするために、バーと真横から見た二次元平面上でクリアランスを考えるものとする。また、人は空中で姿勢をコントロールすることで慣性モーメントを自由に変化させれるが、シミュレーションでは慣性モーメントの時間変化が一定になるように、中央で120度に折れ曲がった棒を回転させる。この棒が空中で放物線運動を行うときに、どのような軌跡を描きながら運動するかを考える。

図6.20にシミュレーションに用いる座標系を示す。図中の O は原点を表し時刻0での重心位置であるとする。また、 P は棒の重心位置を表し、 S は足首位置、 Q は腰位置、 E は頭の位置をそれぞれ表す。

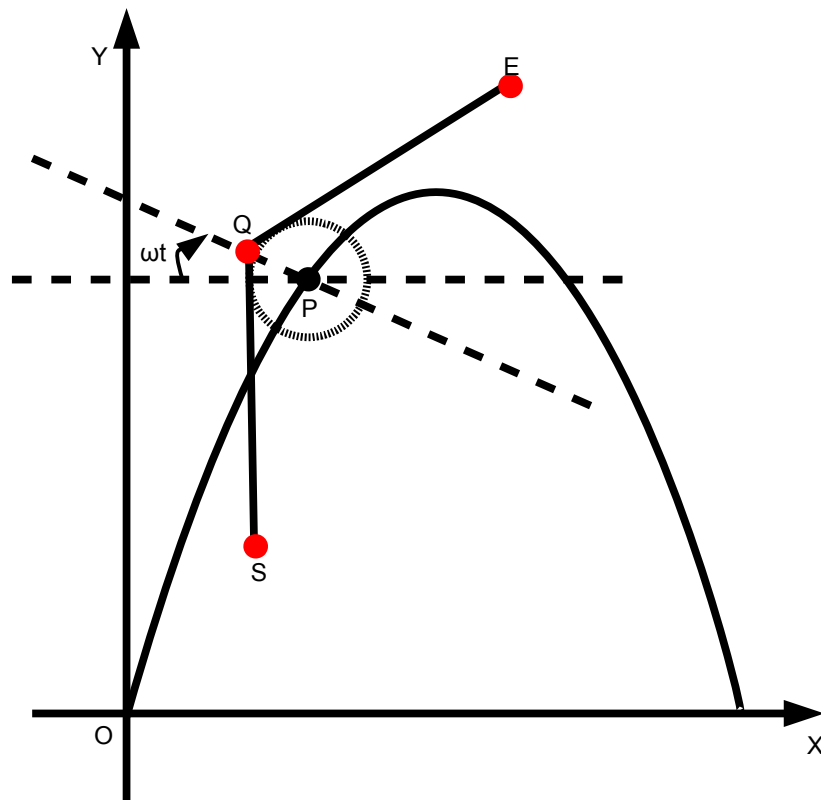


図 6.20: シミュレーションの座標系

P は重心位置を表すため、時刻 t での P の座標は、離地したときの X 軸方向の速度を v_x , Y 軸方向の速度を v_y , 重力加速度を g として放物線の式を考えると

$$\overrightarrow{OP} = \left(v_x t, v_y t - \frac{1}{2} g t^2 \right) \quad (6.11)$$

となる。また、空中で人間の姿勢は変化しないと仮定していることから、身体の慣性モーメントは時刻によらず一定であるため、重心回りの角速度 ω は一定となる。従って、人間の身長を $4a$, クリアランス中の反り角度を 2θ とすると

$$\overrightarrow{PQ} = (-a \cos \omega t \cos \theta, a \sin \omega t \cos \theta) \quad (6.12)$$

$$\overrightarrow{QE} = (2a \cos(\theta - \omega t), 2a \sin(\theta - \omega t)) \quad (6.13)$$

$$\overrightarrow{QS} = (-2a \cos(\pi - \omega t - \theta), -2a \sin(\pi - \omega t - \theta)) \quad (6.14)$$

となり、原点 O から見た腰位置 Q , 頭位置 E , 足首位置 S の位置座標はそれぞれ

$$\overrightarrow{OQ} = \left(v_x t - a \cos \omega t \cos \theta, v_y t - \frac{1}{2} g t^2 + a \sin \omega t \cos \theta \right) \quad (6.15)$$

$$\overrightarrow{OE} = \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QE} \quad (6.16)$$

$$\overrightarrow{OS} = \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QS} \quad (6.17)$$

となる。本来はここで、棒が描く直線群の包絡線を数学的に求めればよいのだが、式が煩雑であるためここでは数値シミュレーションにその結果を示す。

シミュレーションに利用するパラメータの値は Biomechanical Analysis of High Jump [36] の、1991 と 1997 年の世界陸上の時に収集された各選手のデータの平均値をもとに設定する。

重力加速度は $g = 9.8m/s^2$ とする。選手の踏み切り直後の水平方向の平均速度が $4.31m/s$ であることと、バーに対して 30 度程度の角度で離地し、重心の放物線運動が開始されていることから、 $v_x = 2.155$ とする。同様に踏み切り直後の鉛直方向の平均速度が $4.30m/s$ であることから $v_y = 4.30$ とする。

また、平均身長が $192cm$ であることから $a = 0.48$ とする。空中での反り角度は 120 度で一定とするため $\theta = \frac{\pi}{3}$ とする。離地直後の重心の高さは $1.37m$ とする。

シミュレーションは時刻 $0sec$ から時刻 $1.5sec$ まで行い、回転角度速度 $\omega(rad/sec)$ の値の変化によって空中のクリアランス軌道がどのように変化するか計算して求める。重心の初期速度と角度は共通であるため、 ω が変化しても重心の軌道は変化しない。

まず地面から離地した直後の姿勢を図 6.21 に示す。離地した直後は身体が折れ曲がっているだけで、まだ回転はしていない。

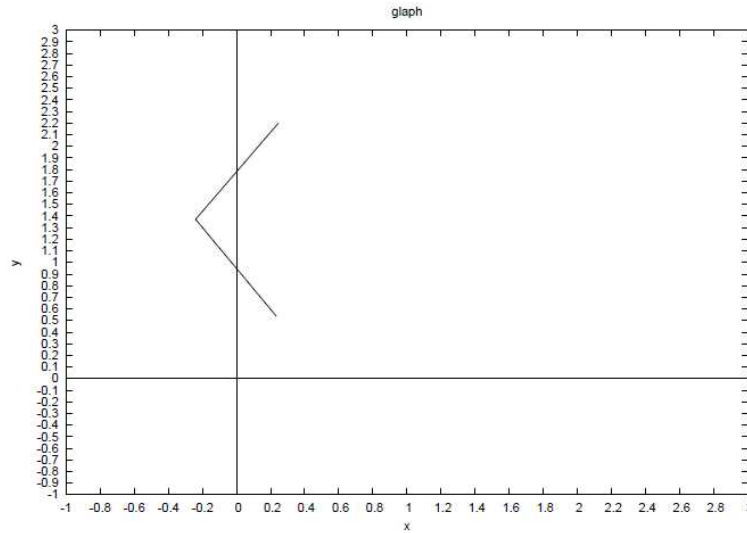


図 6.21: 離地の瞬間の姿勢

では次に、空中でどのようなクリアランスの軌跡が描かれるか考えていく。まず、踏み切り直後から 0.075sec おきの空中姿勢を描写したものを図 6.22 に示す。このとき、空中での回転角速度は 1.14rad/s に設定されている。

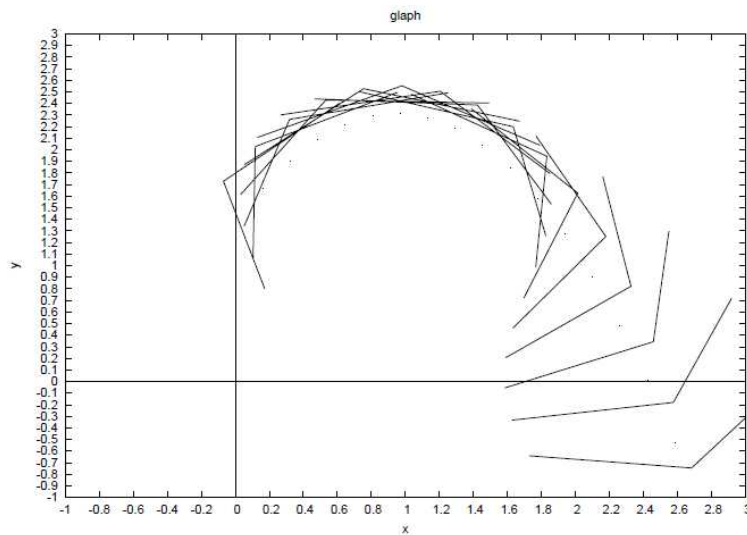


図 6.22: 重心軌道の頂点とクリアランスの頂点が一致する跳躍軌道

図 6.22 の描画時刻をどんどん細かく刻んで描画すると、人間が空中で通過する領域が黒く塗りつぶされていき図 6.23 のようになる。図 6.23 には参考のために重心の軌道を細線で加えている。

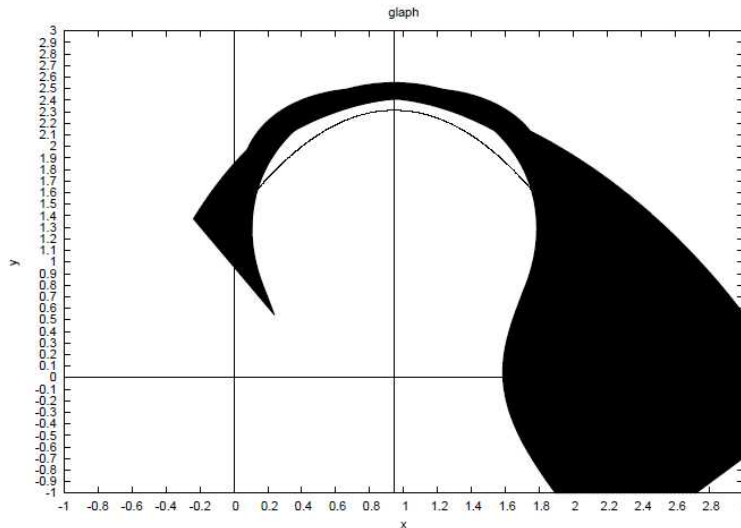


図 6.23: 重心軌道の頂点と選手の最高到達点が一致する跳躍軌道

ここで注意してほしいことは、身体が通過する黒で塗りつぶされた領域の内側で、最も Y 座標が大きい位置（高い位置）が選手の最高到達点となる。つまり、この位置にバーがあるときに選手の記録は最高となる。

図 6.23 から分かるように、空中で身体を反ることによって身体が空中で通過する領域の頂点位置は、重心軌道の頂点位置よりも高くなっている。実際に一流選手の動作を分析してみると、重心の頂点よりも高い高さの跳躍に成功している選手は珍しくない。

また、図 6.23 には重心の頂点位置の X 座標を点線で、選手の最高到達点の位置の X 座標を実線で表わしている。空中での回転角速度が 1.14rad/s の場合は、重心の頂点位置の X 座標は 0.95m で、選手の跳びこせる最高到達点の X 座標も 0.95m であり両者の位置は一致している。ちなみにこの場合の重心の頂点位置の Y 座標は 2.31m であり、選手の最高到達点の Y 座標は 2.41m である。

重心の頂点位置（X 座標）と選手の最高到達点位置（X 座標）が一致している場合は、選手の重心軌道の頂点がバーの手前にある場合には踏み切り位置をバーに近く修正し、バーの奥にある場合は踏み切り位置が遠くなるように修正すれば高く跳べる。

次に空中での回転角速度を 1.14rad/s からわずかに遅くした 1.13rad/s でシミュレーションを行った結果を図 6.24 に示す。

空中での回転角速度が 1.13rad/s の場合は、重心の頂点位置の X 座標は 0.95m で、選手の飛びこせる最高到達点の X 座標は 0.90m であり、重心の頂点位置よりも手前に最高到達点がくる。

ちなみにこの場合の重心の頂点位置の Y 座標は 2.31m であり、選手の最高到達点の Y 座標は 2.41m である。

図 6.24 から分かるように、重心の頂点位置 (X 座標) より選手の最高到達点位置 (X 座標) が手前にある場合は、重心軌道の頂点がバーより奥側になるようにしたほうが選手は高く跳ぶことができる。

これは、図 6.18 に示したホルム選手の跳躍に似ている。踏み切り位置が遠い選手は、バーに到達するまでに十分な回転時間が確保できる。このため、水平方向の速度に対するブレーキが少なくなるように踏み切る傾向がある。それに伴って空中での回転角速度が遅くなる。こうした選手は、バーよりやや奥に重心の頂点がくるようなクリアランスをしても、不利な跳躍にならない。

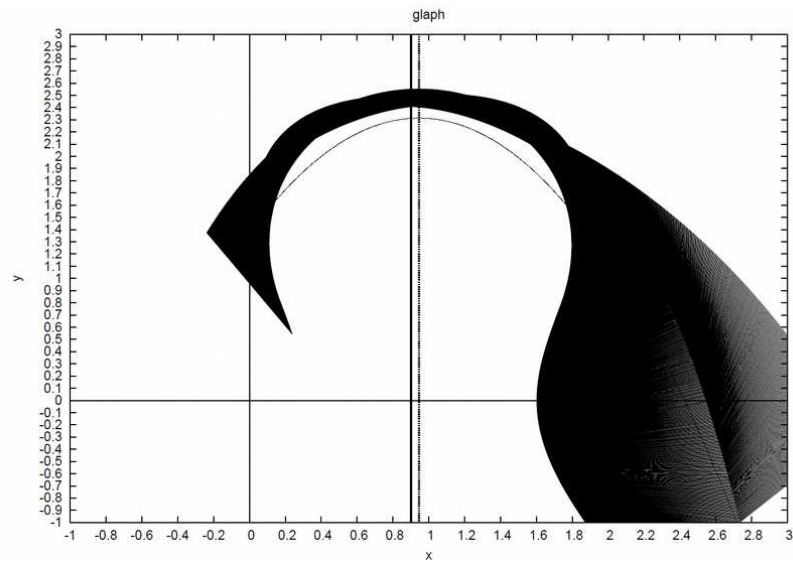


図 6.24: 重心軌道の頂点より、選手の最高到達点の手前にある跳躍軌道

次に空中での回転角速度を 1.14rad/s からわずかに速くした 1.15rad/s でシミュレーションを行った結果を図 6.25 に示す。

空中での回転角速度が 1.15rad/s の場合は、重心の頂点位置の X 座標は 0.95m で、選手の跳びこせる最高到達点の X 座標は 1.0m であり、重心の頂点位置よりも奥に最高到達点がかかる。ちなみにこの場合の重心の頂点位置の Y 座標は 2.31m であり、選手の最高到達点の Y 座標は 2.41m である。

図 6.25 から分かるように、重心の頂点位置 (X 座標) より選手の最高到達点位置 (X 座標) が奥にある場合は、重心軌道の頂点がバーより手前になるようにしたほうが選手は高く跳ぶことができる。

これはちょうど図 6.17 に示したベリクイスト選手の跳躍に似ている。踏み切り位置に近い選手は、バーに到達するまでに十分な回転時間が確保できないため、水平方向の速度に対してブレーキが大きくなるように踏み切る傾向がある。それに伴って空中での回転角速度は速くなる。こうした跳躍の選手はバーよりやや手前に頂点がかかるような跳躍をしても、不利な跳躍にならない。

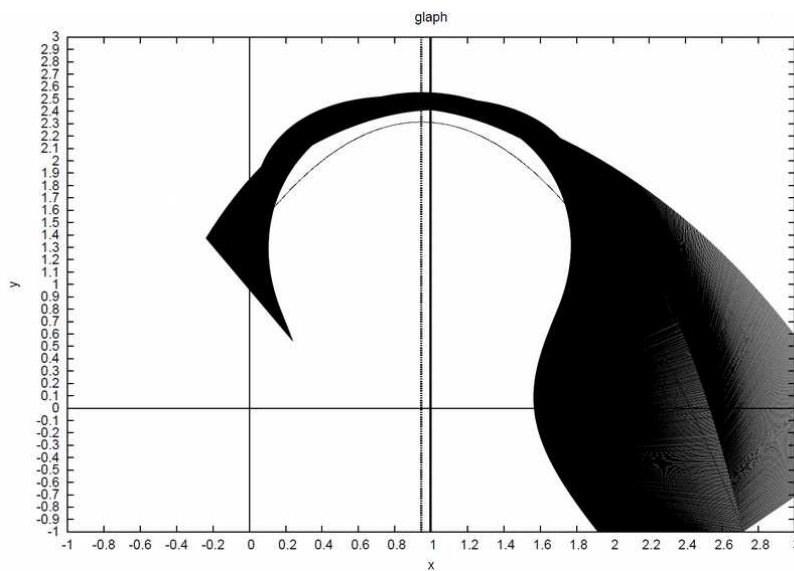


図 6.25: 重心軌道の頂点より、選手の最高到達点が奥にある跳躍軌道

6.5.3 頂点位置に関するアドバイスのまとめ

クリアランスの頂点（重心軌道の頂点位置）がバーよりも手前にあれば踏み切り位置を近づけ、バーよりも奥にあれば踏み切り位置を遠ざけるという指導は一般的には正しい。

ただし図 6.15 に示すように、踏み切り位置がバーに近く、側面から見た場合に幅の狭い跳躍をする選手の場合は、クリアランスの頂点がバーよりもやや手前にあるほうが跳躍に有利にはたらく場合がある。また、踏み切り位置がバーから遠く、側面から見た場合に幅の広い跳躍をする選手の場合は、クリアランスの頂点がバーよりもやや奥にあるほうが跳躍に有利にはたらく場合がある。

選手がいわゆる「流れ気味の跳躍」になっている場合は、踏み切り位置の変更によるクリアランスの頂点の調整よりも、踏み切りでのブロック動作を指導したほうが有効である場合が多い。踏み切りでのブロック動作が不十分である選手は、空中での回転角速度が小さくなってしまう。

角回転角速度が 1.00rad/s とかなり小さくなってしまった場合のクリアランスのシミュレーション結果を図 6.26 に示す。この場合、重心の頂点位置の X 座標は 0.95m で選手の飛びこせる最高到達点の X 座標は 0.73m であり、重心の頂点位置よりもかなり手前に最高到達点の位置がくる。

このとき、一見すれば重心の頂点位置がバーの奥になるように、踏み切り位置を修正すればよいように思えるかもしれないが、そうではない。図 6.23, 図 6.24, 図 6.25 の選手は最高到達点が 241 なのに対して、図 6.26 の選手の最高到達点は 2.27m とかなり低くなっている。つまり、「流れ気味の跳躍」に対しては、踏み切り位置を修正するよりは、踏み切りでのブロック動作を意識し、空中での回転角速度を大きくしたほうが好記録が望める。それができないなら頂点が奥になるように跳躍を流したほうが高く跳べる。

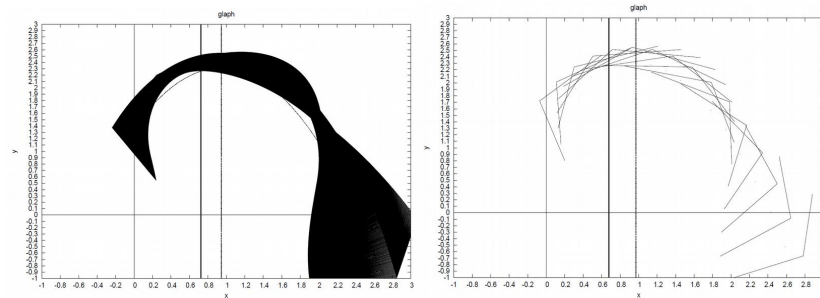


図 6.26: 流れ気味の跳躍

理想の放物線軌道とは？という疑問は多くの選手が一度は考えることだろう。ここで紹介したのはあくまでクリアランスの物理モデルの一例を紹介しただけであり参考程度に考えてほしい。

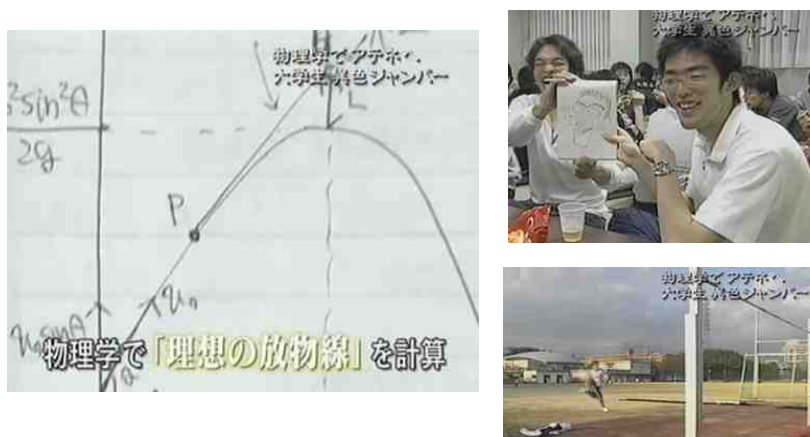


図 6.27: ニュースステーションでの筆者の特集 その 2

図 6.27 は筆者がニュースステーションのスポーツ特集で紹介されたときのものである。左は筆者のクリアランスの物理モデル導出過程のメモが紹介されたときの映像である。当時は単なる放物線軌道だけではなく、踏み切り姿勢による慣性モーメントの変化や空気抵抗の変化も考慮に入れた、かなり複雑な物理モデルを考えていた。

右上図は高知の春野で行われた春合宿の様子である。宴会の席で友人が描いた似顔絵が映されており、当時、著者がはまっていた麻雀用語の「ツモ」も描かれている。

右下図は私が学生時代に練習に勤しんだ大阪大学吹田キャンパスのグラウンドである。殺風景で恵まれた環境とは言えないが、多くの仲間達に支えられ刺激的な競技生活を過ごせたグラウンドは、今でも私の大切な思い出の場所である。

