

走り高跳びの基礎理論 ver.1.0.1

真鍋 周平

トヨタ自動車 陸上競技部

目次

第 1 章	走り高跳びの概要	5
1.1	走り高跳びの基礎理論	5
1.2	走り高跳びのルール	6
1.3	走り高跳びの歴史	7
第 2 章	物理の基礎知識	11
2.1	物理の法則	11
2.2	曲線助走で働く力	12
2.3	踏み切り動作中に働く力	13
2.4	重心	14
2.5	クリアランス中の重心の動き	15
2.6	回転運動	16
2.7	クリアランス中の回転運動	17
2.8	クリアランスにおける慣性モーメントと角速度の関係	18
2.9	関節モーメントとパワー	19
第 3 章	助走	23
3.1	助走のポイント	23
3.2	助走の組み立て	24
3.3	内傾動作	26
3.4	後傾動作	27
3.5	踏み切り前後の内傾動作と後傾動作	28
3.6	アームアクションと跳躍タイプ	29
第 4 章	踏み切り動作	33
4.1	踏み切り動作における起こし回転	33
4.2	高跳び選手の踏み切り動作の特徴	34
4.3	踏み切り動作の定量的目標値	35
第 5 章	クリアランス	37
5.1	空中の回転成分の調整	37
5.2	姿勢調整	38

走り高跳びの概要

1.1 走り高跳びの基礎理論

高跳びは大きく「助走」「踏み切り」「クリアランス」の三要素に分解して考えることができる。高跳びの基本技術は以下の要素に集約される。

- 助走
 - ① 曲線助走では重心の軌道の高さを低く一定に保って速く走る
 - ② 適度な内傾姿勢，後傾姿勢を作り，踏み切り動作に繋げる
- 踏み切り
 - ③ 身体を後傾させて関節をブロックする。踏み切り後は身体を起こし回転させながら真っ直ぐ持ち上げて上昇姿勢をつくる
 - ④ 短い踏み切り時間で地面からの反発を受け取る
 - ⑤ 高さに応じて踏み切り位置を速くする
- クリアランス
 - ⑥ 内傾動作，後傾動作，振り上げ脚動作で空中の回転を調整する
 - ⑦ バーに触れないように空中で姿勢を調整する。空中で頭と膝を下げて体を反れば腰が浮く，大きく反れば速く回転する。



図 1.1: 走り高跳びの基礎理論

1.2 走り高跳びのルール

走り高跳びとは人が跳び越えられる高さを競う競技である

国際陸連 (IAAF) の *web* サイトでは走り高跳びのルールが以下のように定められている。

選手は自力で片足で踏み切り、4m の地面と平行なバーを跳び越える。選手はバーを地面に落とさないように最も高く跳べるように競う。

全ての選手は、例えパスを選んだ者であっても、一つの高さを3回まで試技できる。すなわち今の高さを跳んでいなくても、より高い高さに進むことができる。同じ高さ、もしくは複数の高さの組み合わせで、3回連続で失敗した競技者は失格となる。

もし、競技者の競技結果が同じ高さとなった場合は、同じ高さで失敗数が少ない者を勝者とする。それでも勝者が決まらない場合は、競技全体で最も失敗の少ない競技者を勝者とする。それでも勝者が決まらない場合は、勝者を決めるためにジャンプオフを行う。

競技規則の詳細を知りたい場合は、IAAF の公式 *web* サイトに掲載されている公式文書を参照すること。

1.3 走り高跳びの歴史

背面跳びの跳躍技術を理解する上で、過去どのような技術的変移を経て、背面跳びという跳躍方法が誕生したか知ることは大変有意義である。

高跳びのクリアランス動作は歴史的には

- 重心をできるだけ高い位置に持ち上げる
- 重心の最高到達点でできるだけバーに触れない姿勢を作る

ように進化してきた。そして最終的には背面跳びに行き着いた。

18世紀後半は図1.2の最初に示すように膝を曲げて跳ぶだけの単純なテクニックが用いられていた。空中での重心の位置は変わらないが、脚を曲げないで跳ぶよりは高く跳ぶことができた。この跳躍方法は図1.2に示しているように、 h_1 より高い h_2 の高さを跳ぶことができた。

19世紀になり高跳びが競技として普及し始めると「はさみ跳び」と呼ばれる跳躍方法が開発された。この跳び方は跳躍が頂点にきたときにバー越した脚をバーより下側に配置することで、空中でバーに触れやすい臀部（お尻）を更に持ち上げて跳ぶことができた。はさみ跳びは図1.2に示しているように、 h_2 より高い h_3 の高さを跳ぶことができた。こうした跳躍方法は1874年頃までには既に用いられていた。

はさみ跳びに代わり、イースタンカットオフと呼ばれる跳躍方法が用いられるようになったのは1892年頃である。イースタンカットオフでは図1.2に示すように重心位置が頂点に来たときに体幹部が水平になるように身体を回転させることで、はさみ跳びよりもさらに臀部（お尻）を高く持ち上げて跳ぶことができた。イースタンカットオフは図1.2に示しているように、 h_3 より高い h_4 の高さを跳ぶことができた。

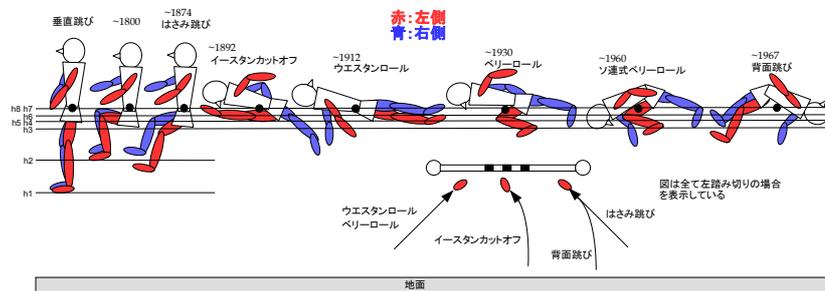


図 1.2: クリアランス動作の歴史的变化

イースタンカットオフに代わりウェスタンロール（ロールオーバー）と呼ばれる跳躍方法が用いられるようになったのは1912年頃である。ウェスタンロールは踏み切り脚を体の下側に配置して、バーを横向きに跳び越える跳躍方法である。また、ウェスタンロールの中でバーを越えるときに背中を下向きにしたものを特に「ロールオーバー」と呼ぶこともある。ウェスタンロールは図 1.2 に示しているように、 h_4 と同じ高さの h_5 を跳ぶことができた。

ウェスタンロールに次ぐ跳びかたとして生まれたのがペリーロール（ストラドル）である。ペリーロールは1919年頃には既に行われていた。図 1.2 に示すようにペリーロールは下向きにバーを見るようにして、地面と体を平行にしてバーを超えていく跳びかたである。重心が頂点にきたときに体の一部分をバーより下側に下げることができるとウェスタンロール（ロールオーバー）より効率的なクリアランスが可能となった。ペリーロールは図 1.2 に示しているように、 h_4 や h_5 より高い h_6 の高さを跳ぶことができた。

1960年代にソ連の選手が台頭すると、ペリーロールを更に進化させたソ連式ペリーロールとかダイブ・ストラドルと呼ばれる跳躍方法が生まれた。図 1.2 に示すようにソ連式ペリーロールでは重心が頂点にきたときにバーに対して体をバーの奥に傾けて倒し、頭と上半身の位置をバーより下に下げることによって旧来のペリーロールより更にお尻を高く持ち上げることが可能になった。ソ連式ペリーロールは図 1.2 に示しているように、 h_6 より高い h_7 の高さを跳ぶことができた。

1960年代の中盤になると着地位置に安全なマットが用いられるようになった影響もあり、全く新しい跳躍テクニックである「背面跳び」が生まれた。背面跳びは図 1.2 に示すようにバーを背面を下向きにして越え、体と地面は平行であり、真上から見るとバーと体が直角になるようにクロスした空中姿勢を持つ跳躍ホームであった。2017年現在、男子の世界記録は2.45m、女子の世界記録は2.09mである。いずれの記録も背面跳びによって達成されている。背面跳びは図 1.2 に示しているように、 h_7 と同じ高さの h_8 を跳ぶことができた。背面跳びとソ連式ペリーロールは同等の高さを跳べる跳躍方法とされてるが、背面跳びのほうが跳躍技術の習得が容易であり、現在主流の跳び方となっている。

年	記録[m]	年	記録[m]	年	記録[m]
1912	2.00	1960	2.195	1984	2.39
1914	2.01	1960	2.22	1985	2.40
1917	2.02	1961	2.23	1985	2.41
1924	2.03	1961	2.24	1987	2.42
1933	2.04	1961	2.25	1988	2.43
1934	2.06	1962	2.26	1989	2.44
1936	2.07	1962	2.27	1993	2.45
1936	2.07	1963	2.28		
1937	2.08	1970	2.29		
1937	2.09	1971	2.29		
1941	2.09	1973	2.30		
1941	2.10	1976	2.31		
1941	2.105	1976	2.32		
1941	2.11	1977	2.33		
1953	2.12	1978	2.34		
1956	2.15	1980	2.35		
1957	2.16	1980	2.35		
1960	2.17	1980	2.36		
1960	2.17	1983	2.37		
1960	2.18	1983	2.38		

図 1.3: 男子走り高跳びの世界記録の推移 (表)

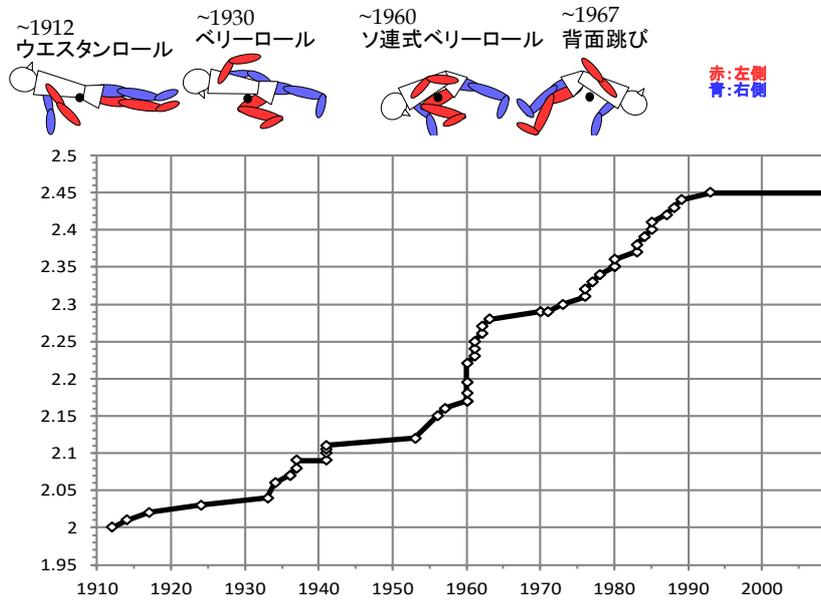


図 1.4: 男子走り高跳びの世界記録の推移 (グラフ)

年	記録[m]	年	記録[m]	年	記録[m]
1922	1.46	1956	1.76	1976	1.96
1923	1.485	1957	1.76	1977	1.96
1923	1.485	1957	1.77	1977	1.97
1925	1.524	1958	1.78	1977	1.97
1926	1.552	1958	1.80	1977	2.00
1926	1.58	1958	1.81	1978	2.01
1928	1.58	1958	1.82	1978	2.01
1928	1.595	1958	1.83	1982	2.02
1929	1.605	1959	1.84	1983	2.03
1932	1.62	1960	1.85	1983	2.03
1932	1.65	1960	1.86	1983	2.04
1932	1.65	1961	1.87	1984	2.05
1939	1.66	1961	1.88	1984	2.07
1941	1.66	1961	1.90	1986	2.07
1941	1.66	1961	1.91	1986	2.08
1943	1.71	1971	1.92	1987	2.09
1951	1.72	1972	1.92		
1954	1.73	1972	1.94		
1956	1.74	1974	1.94		
1956	1.75	1974	1.95		

図 1.5: 女子走り高跳びの世界記録の推移 (表)

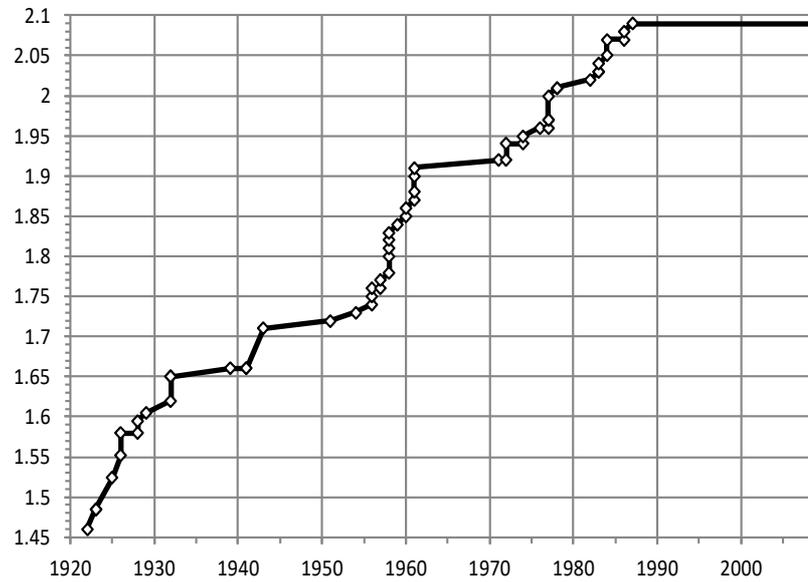


図 1.6: 女子走り高跳びの世界記録の推移 (グラフ)

物理の基礎知識

2.1 物理の法則

世の中に存在する万物の運動が満たす普遍的な法則を理解することは、人間の運動の原理を知る上で大変有意義なことである。

助走し、踏み切り、マットに着地するまでに人間に働く力は3種類である。

1. 重力

地上の物体に作用する力。地面に向かって引っ張られる力。例えばアスリートが地球から引っ張られる力。

2. 反力

接触した物体から受ける力。作用・反作用の法則でいうところの反作用の力。例えばアスリートが地面から受ける力。

3. 慣性力（遠心力）

加速する物体（座標系）に発生するみかけ上の力。例えばアスリートが曲線助走で受ける遠心力。

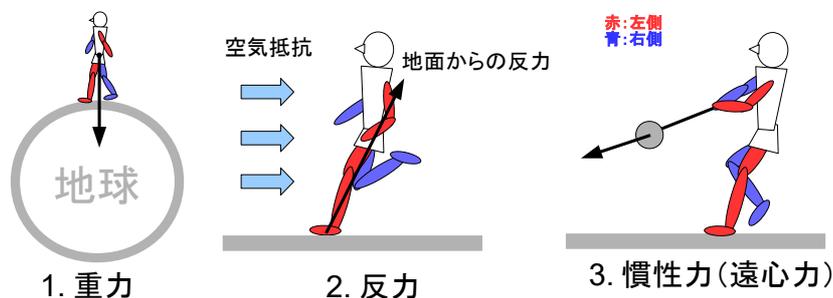


図 2.1: 物体に作用する力

2.2 曲線助走で働く力

- 曲線助走中にアスリートに働く力は重力、地面からの反力、遠心力である
- 遠心力は曲線助走の半径が短くなるほど、助走速度が上がるほど大きくなる。
- 曲線助走中の遠心力が大きくなれば容易に内傾姿勢を作ることができる。曲線助走で内傾姿勢が作れば、重心を低く下げた、速い助走がやりやすくなる。

曲線助走中にアスリートに働く力は重力、地面からの反力、遠心力である(図 2.2)。

等速円運動する物体の遠心力 F は、物体の質量を M 、動いている速度を v 、回転半径を r とすると以下の式で表される。

$$F = \frac{Mv^2}{r} \quad (2.1)$$

この方程式は遠心力は、曲線助走の回転半径が小さくなるほど、また助走速度が速くなればなるほど大きくなることを示している。曲線助走中の遠心力が大きくなれば容易に内傾姿勢を作ることができる。曲線助走で内傾姿勢が作れば、重心を低く下げた、速い助走がやりやすくなる。

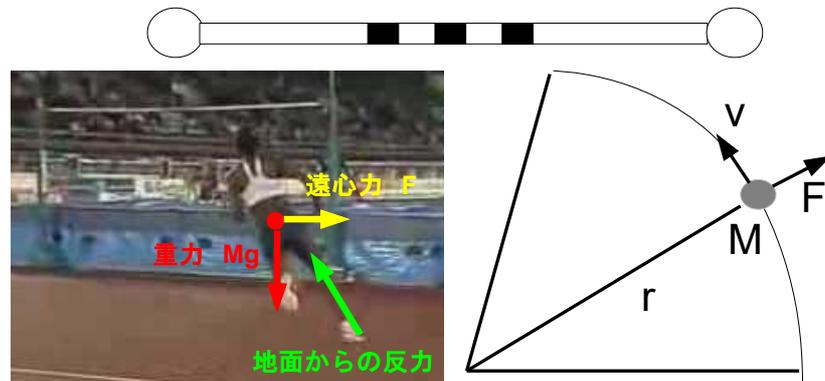


図 2.2: 曲線助走中にアスリートに働く力

2.3 踏み切り動作中に働く力

高跳び選手は踏み切り動作で発生する地面からの反力を使って空中に跳びあがる。

踏み切り動作で発生する地面からの反力は、主に以下の3つの要素から生まれている。

1. 足と地面の衝突によって発生する地面反力
2. 踏み切り脚の伸展運動で発生する地面反力
3. 上肢・振り上げ脚（自由脚）の振り上げ動作で発生する地面反力

一つ目の反力はパッシブ（受動的）に発生する力である。この力は棒を地面に投げつけたときに棒と地面との間で発生する地面反力と同じである。

二つ目と三つ目の反力は人が筋力によって発生させるアクティブ（能動的）な力である。アクティブな力は体幹部、腕や脚といった「重量物」を踏み切り動作で上方に引き上げたときに、作用・反作用の法則によって体の他のパーツは地面の方向（下方）に同じ力で押されることによって発生する。「重量物」を引き上げるアクティブな力は最終的に地面を押す力となり、身体が地面からの反作用の力を受けることで上昇力が生み出される。

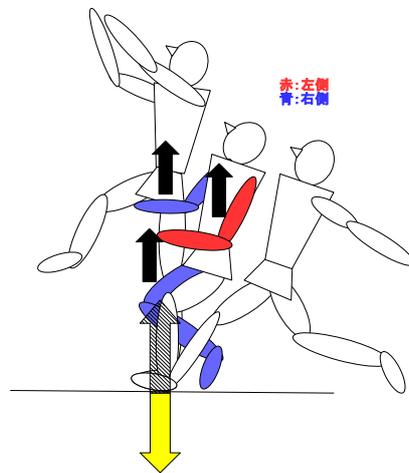


図 2.3: アームアクションと振り上げ脚動作によって発生する地面反力

図 2.3 にはアームアクションと振り上げ脚動作によって発生する地面反力を示している。腕や脚を持ち上げる（図中赤青色部分）ことによってその他の体の部分（図中白抜き部分）は作用・反作用の法則で地面方向に押される。この力が地面を押すことによって（図中黄色部分）、地面からの反発力（図中斜線矢印）が得られ、体の上昇力が生み出される。

脚の重量は腕の重量の3倍以上であるため、脚の動作のほうが腕の動作よりも強い地面反力を生み出すことができる。

2.4 重心

- 重心は自分の体重の中心点である
- 重心は各質点の位置に質量の重みをつけて平均した位置である
- 重心は物体を一点で支えたときにちょうど釣り合う点の位置である

均質な材料でできた真っ直ぐの棒の重心は棒の中央にある。成人男性の平均的な重心位置は床面から凡そ 56% の高さにある。体の体勢によっては（例えばクリアランス中など）、必ずしも重心が体の内部にあるとは限らない。

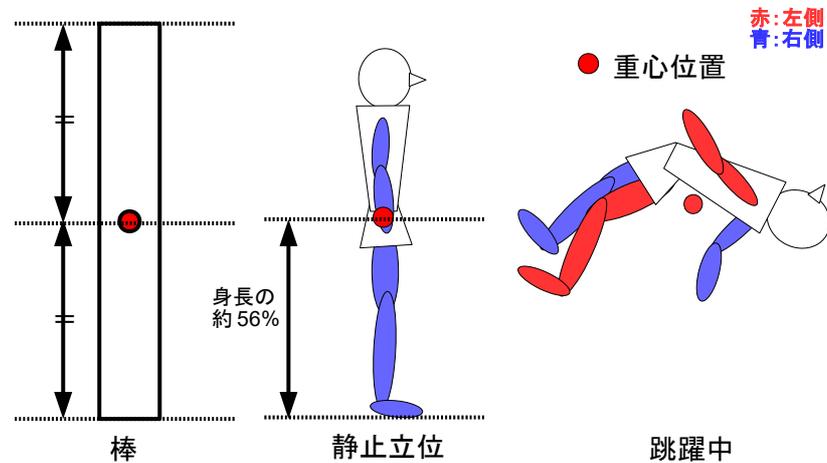


図 2.4: 物体の重心位置

各質点の質量をそれぞれ m_1, m_2, \dots, m_N とし、その位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N$ とすると重心位置 \mathbf{R} は以下の式で表される。ただし、質点の質量の合計を M としている。

$$\mathbf{R} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{r}_i}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{r}_i}{M} \quad (2.2)$$

モーションキャプチャで動作を計測すれば、重心の位置を計算して求めることができる。一般的に人間の重心運動を分析する場合は、体をいくつかのセグメント（体のパーツ）に分けて計算することが多い。こうした体のセグメントごとの重量や重心位置は、多くの研究によって詳しく調べられている。

2.5 クリアランス中の重心の動き

- 重心は空中で放物線軌道を描く
- 重心の放物線軌道は踏み切り動作で地面から離れた瞬間に決まる
- クリアランス中にどのように動いても重心の放物線軌道は変化しない
- 重心の最高到達点は踏み切り動作で地面から離れた瞬間に決まる

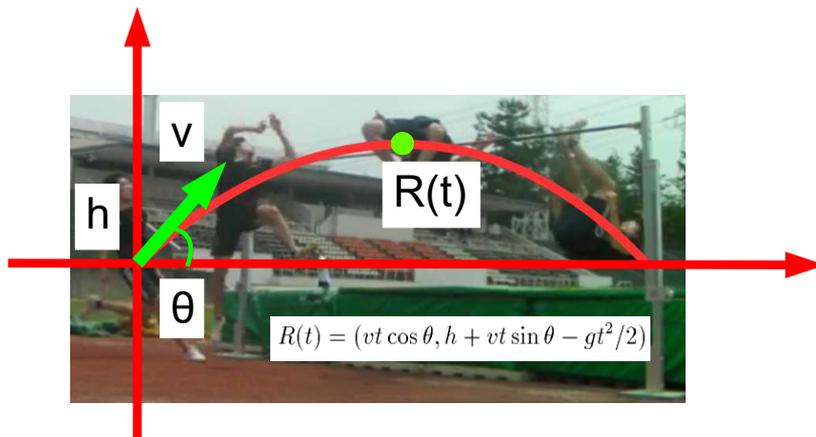


図 2.5: クリアランス中の重心の放物線軌道

体中の質点の合計の重さを $M = \sum_i^N m_i$, 重心位置を \mathbf{R} と定義する. 質点にかかる全ての外力を $\mathbf{F}^{(ex)} = \sum_i^N \mathbf{F}_i^{(ex)}$ と定義する. ここで N は体中の質点の数を表している.

このとき, 重心位置 \mathbf{R} と外力 $\mathbf{F}^{(ex)}$ の関係は以下の式で表される.

$$M \frac{d^2 \mathbf{R}}{dt^2} = \mathbf{F}^{(ex)} \quad (2.3)$$

この式は「空中の重心の運動は外力の影響を受けるが, 内力の影響は受けない」ことを表している. つまり, 筋肉の力 (内力) によっていかに空中姿勢を変更しようが, 空中で重心の放物線軌道が変化することはない. 空中で身体に働く外力は重力と空気抵抗である.

時刻 t の重心位置を $\mathbf{R}(t)$, 重心が空中に飛び出す速さを v , 角度を θ , 高さを h , 重力加速度を g と定義すると, 空気抵抗を無視した場合の $\mathbf{R}(t)$ は以下の式で表される.

$$\mathbf{R}(t) = (vt \cos \theta, h + vt \sin \theta - gt^2/2) \quad (2.4)$$

この式はクリアランス動作中の重心の軌道は必ず t の 2 次式で表される放物線軌道となることを示している.

2.6 回転運動

- 回転力は「力のモーメント」の作用によって生み出される
- 回転中心の近くに重量が分布しているほど回転しやすい

物体を回転させる力の作用は「力のモーメント」と呼ばれ以下のように定義される。

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (2.5)$$

\mathbf{M} は力のモーメントを表し、 \mathbf{r} は物体の位置を表す。 \mathbf{F} は力を表す。 \mathbf{M} は \mathbf{r} と \mathbf{F} の外積となる。モーメントは \mathbf{F} が大きいほど、物体から力の作用線までの距離が離れているほど大きな値になる。

物体に作用する力のモーメントを \mathbf{M} 、物体の回転のしやすさをあらゆる慣性モーメントを \mathbf{I} 、物体の角加速度を β とすると以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} \cdot \beta \quad (2.6)$$

ここで、慣性モーメントとは物体の質量分布によって決まる値である。例えば、全質量が同じであっても重心から近い位置に多くの質量が分布している物体は回転しやすい。このとき、慣性モーメントは小さな値を取る。

物体の回転の勢いを表す量は「角運動量」と呼ばれ以下のように定義される。

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} \quad (2.7)$$

角運動量 \mathbf{L} は物体の位置 \mathbf{r} と運動量 \mathbf{p} の外積となる。

また、角運動量 \mathbf{L} の時間変化とモーメント \mathbf{M} の間には以下の関係が成り立つ。この式は角運動量の時間変化が力のモーメント \mathbf{M} の大きさによって決まることを表している。モーメント \mathbf{M} が大きくなれば角運動量の増加も大きくなり（回転が強くなり）、モーメント \mathbf{M} が小さくなれば角運動量の増加も小さくなる（回転が弱くなる）。

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{M} \quad (2.8)$$

角運動量 \mathbf{L} と角速度 ω の間には以下の関係が成り立つ。

$$\mathbf{L} = \mathbf{I} \cdot \omega \quad (2.9)$$

2.7 クリアランス中の回転運動

- クリアランスに必要な角運動量は踏み切り動作によって生まれる
- 空中で姿勢を変えることで、身体を速く回転したり、遅く回転したりすることができる

体中の i 番目の質点の質量を m_i 、位置を \mathbf{r}_i とする。 j 番目の質点が i 番目の質点に及ぼす力（内力）を $\mathbf{F}_{ij}^{(in)}$ とおく。質点 i に外部から加えられた力（外力）を $\mathbf{F}_i^{(ex)}$ とする。 N は体中の質点の数を表している。このとき質点系の全角運動量 \mathbf{L} は以下の式で与えられる。

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \sum_i^N (\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i^{(ex)}) \quad (2.10)$$

この式は空中にいる間に人間の筋肉の収縮によって発生する力（内力） $\mathbf{F}_{ij}^{(in)}$ は人体の角運動量の変化 $\frac{d\mathbf{L}}{dt}$ とは無関係であることを示している。

人間が空中にいる間に作用する外力は空気抵抗を除けば「重力」のみである。空中での重心を基準にした外力（重力）の全モーメント $\mathbf{N}_G^{(ex)}$ は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{N}_G^{(ex)} = \sum_{i=1}^N \{(\mathbf{r}_i - \mathbf{R}) \times m_i \mathbf{g}\} = 0 \quad (2.11)$$

ただし、 $\mathbf{R} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{r}_i}{M}$ は重心の位置ベクトルを表している（ M は質点系の全質量）。この式は人間の体が地面から離れば、重心回りの角運動量は重力によって変化しないということを表している。

クリアランス動作中は内力（筋力）によっても外力（重力）によっても重心回りの角運動量は変化しない。クリアランスに必要な角運動量は踏み切り動作によってのみ生み出される。

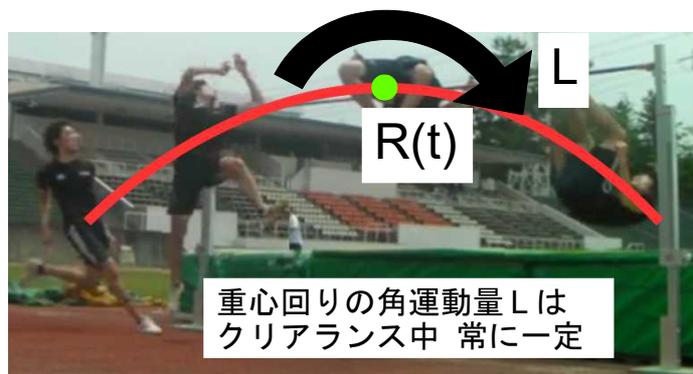


図 2.6: クリアランス中の角運動量

2.8 クリアランスにおける慣性モーメントと角速度の関係

空中で回転中心に質量を集めると（身体を反って丸めると），
体の回転速度が速くなる

角運動量 L が一定であっても，空中で姿勢を変えて慣性モーメント I を変化させれば，身体を遅く回転したり，速く回転したりすることができる。

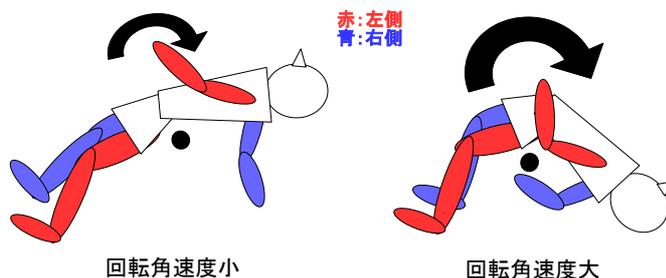


図 2.7: クリアランス姿勢の違いと回転速度の違い

図 2.7 右のように膝を曲げ身体を反ることで，図 2.7 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ることができる。その結果，同じ角運動量で，同じ重心の放物線軌道を持つ選手でも，右の選手のほうが左の選手よりも空中で体を速く回転させることができる。

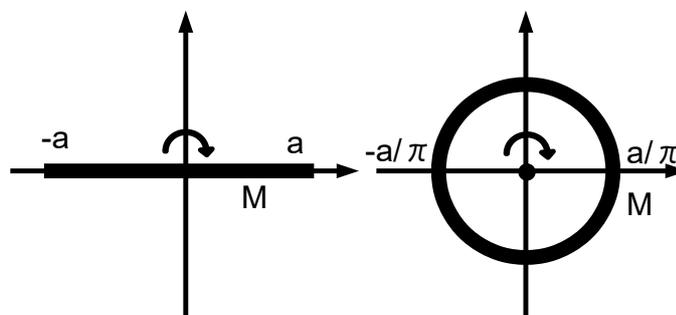


図 2.8: 慣性モーメントの計算例

図 2.8 のように選手の体を長さ $2a$ で質量 M の細長い棒と想定する。このとき，体が真っすぐの棒状の場合の回転軸回りの慣性モーメントの大きさは $I = \frac{1}{3}Ma^2$ となる（図 2.8 左）。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の大きさは $I = \frac{M a^2}{\pi}$ となる（図 2.8 右）。

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 $L = I\omega$ で表わされるため，同じ角運動量の体を空中で棒状から円形に近づけると回転速度（角速度）は約 3 倍になる。

2.9 関節モーメントとパワー

関節モーメント

- 関節モーメントとは関節にかかる力のモーメントを表す
- 関節モーメントが正なら関節を底屈・伸展する方向に、負なら背屈・屈曲する方向にモーメントの力がかかる
- 関節モーメント分析用の計測器やソフトウェアが数多く市販されており、様々なスポーツの筋負荷が詳細に分析されてきた
- 関節モーメントは、脚が地面に着いているときは地面からの反力の影響が大きく、脚が地面から離れているときは脚の慣性力の影響が大きい

パワー

- パワーとは関節モーメントに関節角速度をかけたものである
- パワーが正の場合は筋は求心性収縮を起こしている
- パワーが負の場合は筋は遠心性収縮を起こしている

関節モーメントとは筋張力によって発生する関節軸回りのモーメントのことである。通常、関節が底屈・伸展する方向を関節モーメントの正、背屈・屈曲する方向を関節モーメントの負方向と定義する。

M を関節モーメント、 ω を関節角速度とすると、パワー P は以下の式で与えられる。パワーは「速度×力」で表される物理量になっており、アスリートが感覚的に理解しやすい。

$$P = M\omega \quad (2.12)$$

パワーが正の場合は筋は求心性収縮を起こしており、パワーが負の場合は筋は遠心性収縮を起こしている。筋肉は遠心性収縮のほうが求心性収縮よりも強い力を出すことができる。

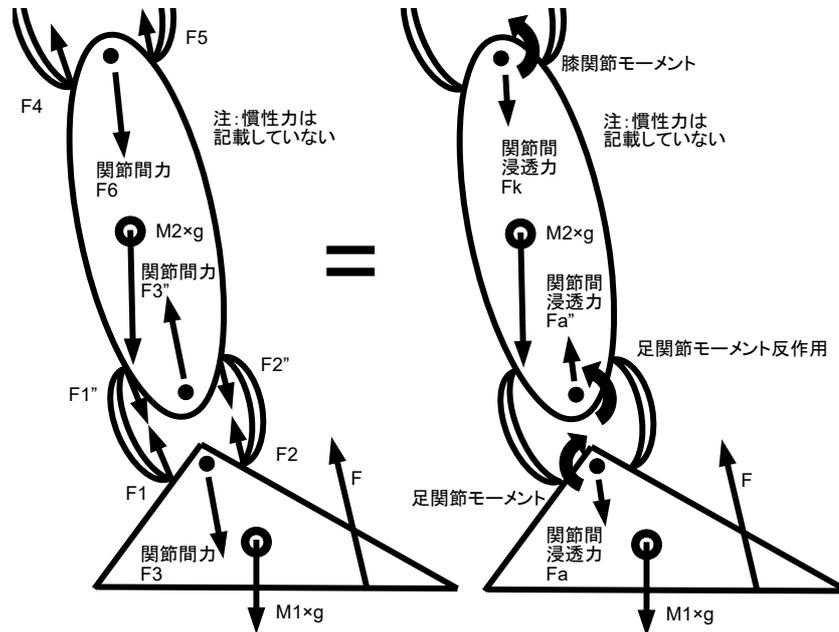


図 2.9: 関節にかかる力と関節モーメント

関節モーメントは以下の手順で計算することができる。まず、足関節を回転中心として足部に加わる力のモーメントを考える。足部加わる力は地面からの反力 F 、足部の重力 M_1g 、下腿部が足関節を通じて足部を押し力（関節間力） F_3 、底屈筋の筋張力 F_1 、背屈筋の筋張力 F_2 である。また、足部が加速度を持つことによる慣性力 M_1a などが加わる。

足部の慣性モーメントを I_1 、角加速度を β_1 とすると $I_1\beta_1$ は、地面からの反力 F による力のモーメント、重力 M_1g による力のモーメント、慣性力 M_1a による力のモーメント、底屈筋の筋張力 F_1 による力のモーメント、背屈筋の筋張力 F_2 による力のモーメントの和で表される。関節間力 F_3 は足関節中心を通るため、力のモーメントの影響を考慮する必要はない。

$I_1\beta_1$ は既に文献によって調べられた I_1 の値や運動計測（モーションキャプチャなど）によって得られる β_1 の値から計算できる。地面からの反力・重力・慣性力は運動計測（モーションキャプチャなど）や地面からの反力の計測値、身体重量 M_1 （文献値から推定する）などから計算できる。従って底屈筋と背屈筋によって発生する足関節モーメントを計算することができる。

足関節モーメントが計算されれば膝関節モーメントも計算することができる。膝関節を回転中心として下腿部に加わる力のモーメントを考えると下腿部に加わる力は重力、慣性力、関節間力 F_3'' （関節間力 F_3 の反力）、足関節の底屈筋と背屈筋の筋張力の反力 F_1'' と F_2'' 、大腿部からの関節間力 F_6 、膝の伸展筋の筋張力 F_5 、屈曲筋の筋張力 F_4 である。

足部から下腿部に加わる力 F_1'' 、 F_2'' 、 F_3'' による力のモーメントは、足関

節モーメントの反作用による力のモーメントと、 F_1'' , F_2'' , F_3'' を合成した力 (F_a'') による力のモーメントにまとめることができる。この小さな力 F_a'' は体節間浸透力と呼ばれ、足部の運動方程式から計算することができる。

このように考えれば足関節の場合と同様に、下腿部の慣性モーメントを I_2 、角加速度を β_2 とすると $I_2\beta_2$ と下腿部に作用する力のモーメントの総和が等しくなることから、膝の伸展筋の筋張力 F_5 、屈曲筋の筋張力 F_4 による膝関節モーメントの総和を計算することができる。

今では関節モーメント分析用の計測器やソフトウェアが数多く市販されており、様々なスポーツ動作の筋負荷が詳細に分析されている。

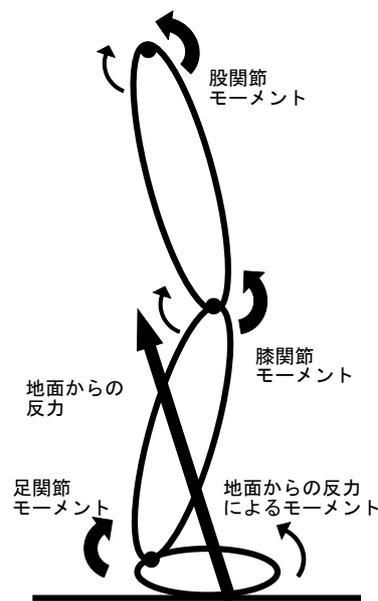


図 2.10: 立脚中の関節モーメント

地面に足が接地している歩行動作やランニング動作においては地面からの反力によるモーメントが関節モーメントに与える影響が大きいことが知られている。

例えば歩行中の足関節において、地面からの反力のベクトルが足関節の前方を通る場合には、足関節まわりの地面からの反力によるモーメントは足関節を背屈させる方向に働く。このとき人間は足関節を底屈させる方向に筋肉を動かして関節モーメントを発生させる。

膝関節まわりでも同様に、地面からの反力のベクトルが膝の後方を通る場合は、地面からの反力によるモーメントは膝関節を屈曲させる方向に働く。このとき人間は膝関節を伸展させる方向に筋肉を動かして関節モーメントを発生させる。股関節についても同様である。

地面からの反力の方向が関節軸から離れるほど、力が強くなるほど関節にかかるモーメント（負荷）は大きくなるため、地面からの反力が関節に対し

てどの位置に働いているか考えることは非常に重要なことである。

例えば踏み切り動作で地面からの反力の方向が関節軸（膝や腰）から大きく離れる方向を向いていれば関節負荷が高くなり、踏み切り動作で潰れたり、関節を怪我したりする原因になる。

一方でランニング動作において地面から脚が浮いているときには地面からの反力は存在せず、慣性力が関節負荷に与える影響が大きくなる。慣性力は身体各部の加速度に比例して大きくなるため、動きの速い走行中の遊脚期には大きな慣性力が脚の関節に作用する。

関節モーメントは、足が地面に着いているときは地面からの反力の影響が大きく、脚が地面から離れているときは慣性力の影響が大きい。

助走

3.1 助走のポイント

助走のポイント

- 速く走る
- 重心を低く保つ
- 重心を一定の高さに保つ

助走方法は選手によって様々だが、高く跳ぶ選手にはいくつかの共通点が見られる。

一つ目の共通点は速く走ることだ。踏み切り動作では水平方向の速度エネルギーが鉛直方向の位置エネルギーに変換される。このため、助走速度が速いほど高く跳ぶのに有利となる。

一般的には自分の最高速度の8割程度がリラックスして走れる良い速度とされている。一流選手の踏み切り時の助走速度は $7.8(m/s)$ 程度と非常に速い。

二つ目の共通点は重心を下げることだ。高く跳ぶためには大きな力を長い時間地面に伝えることが必要である。つまり、力積(力×時間)が大きくなるような踏み切り動作がよい。重心を低くして踏み切り動作を開始して、踏み切り動作中にできるだけ大きな鉛直方向の移動幅を得ると高く跳べる。

三つ目の共通点は重心の高さをなるべく一定に保つことだ。曲線助走では重心の軌道をなるべく一定の高さにコントロールすることが重要だ。更に踏み切り動作では重心が滑らかな曲線軌道を描きながら上昇していくのが良い。ストライドが短く、対空時間の短い助走を行うと重心の高さをコントロールしやすくなる。

3.2 助走の組み立て

助走の組み立てのポイントは以下の通り

- 右踏み切りの選手はバーに向かって左側から助走し、
左踏み切りの選手はバーに向かって右側から助走する
- 直線助走と曲線助走を組み合わせた J 型の助走を行う
- 直線助走に補助助走を加えてもよい

高跳びの助走は大きく三つの部分に分かれる。

1. 補助助走

直線助走の前に行う補助的な助走（数歩歩く、軽くスキップする等）。
助走の開始タイミングが取りやすく、助走が安定しやすくなる

2. 直線助走

直線を走る助走。曲線助走に必要な助走スピードを得るために行う

3. 曲線助走

曲線を走る助走。踏み切り動作に入るときの重心の位置と速度をコントロールするために行われる

初心者は直線+曲線のオーソドックスな助走が安定するまで、徹底的に助走練習を行うことを強く奨励する。助走練習では自分の感覚に合うストライド長やリズムを見つけていくことが重要となる。図 3.1 を参考に、直線助走 6 歩程度、曲線助走 5 歩程度の設定で練習を始めてみるとよい。

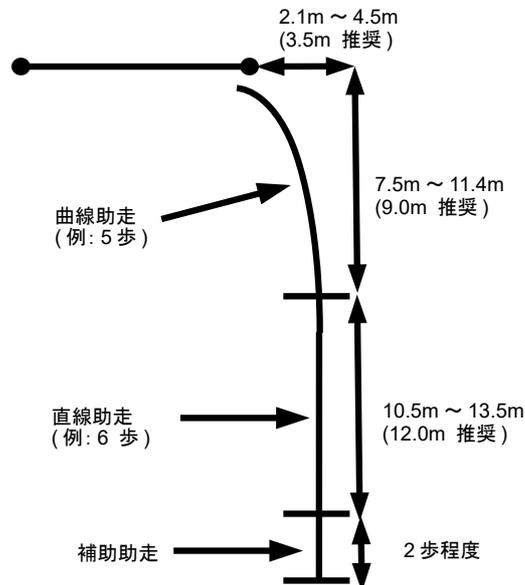


図 3.1: 助走の目安

3.3 内傾動作

内傾動作を用いると、助走速度を落とさずに、重心を低く保って助走することができる

内傾動作とは、曲線助走の遠心力を利用して、体を内側に傾けて助走する技術である。

助走動作が自然なランニングフォームに近づくほど、アスリートは速く走ることができる。曲線助走の遠心力を利用して体を内側に傾けて走れば、自然なランニングフォームのまま速くて重心の低い助走ができる。

速く走るか、小さなカーブで曲がれば、曲線助走中の遠心力は強くなる。大きな遠心力が得られる曲線助走を行えば、内傾姿勢を作りやすくなる。速く走る場合は体が助走中に前傾しすぎないように注意すること。

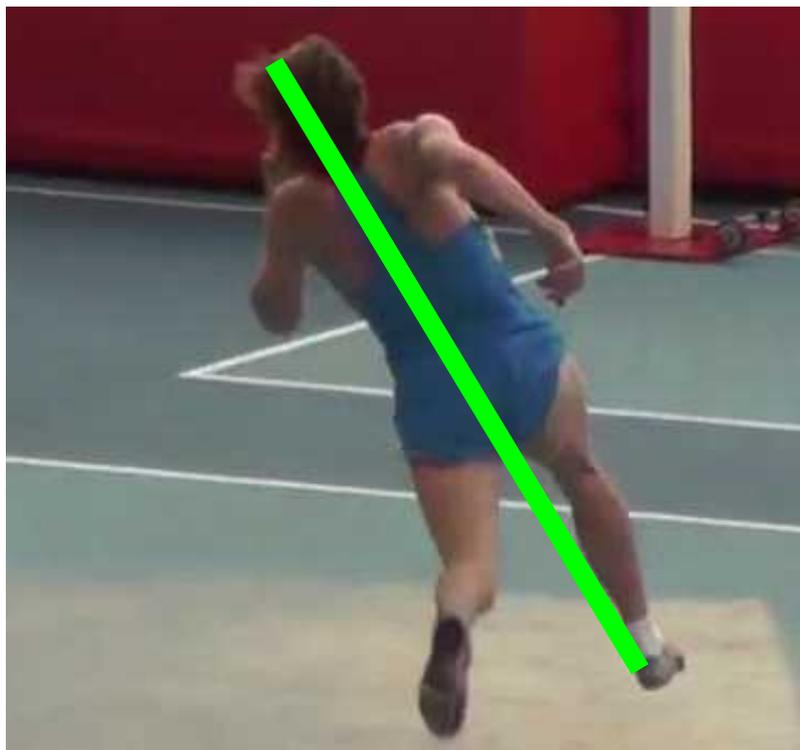


図 3.2: 曲線助走における内傾動作

3.4 後傾動作

後傾した踏み切り姿勢を作ると、踏み切り動作で、重心の鉛直方向の移動距離を大きくできる（大きな力積を得やすい）

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。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こと」と理解しておけば良い。

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。



図 3.3: 踏み切り動作における後傾姿勢

3.5 踏み切り前後の内傾動作と後傾動作

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
- 離地の瞬間には体幹部が垂直方向より前方に傾いていない

内傾動作



後傾動作



図 3.4: 内傾動作と後傾動作

図 3.4 に示した値は平均的な値である。跳躍タイプによっては、最適値はこの値よりも小さかったり大きかったりする。

一般的に内傾角度は踏み切り二歩手前で最大となる。踏み切り一歩手前になると内傾動作と後傾動作が重なって重心の高さが最も低くなる。そこから離地に向けて重心は大きな曲率を描いて滑らかに上昇していく。

3.6 アームアクションと跳躍タイプ

- 踏み切り動作の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」の3種類がある
- 跳躍タイプはスピードタイプとパワータイプに大きく分かれる

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種類がある。

スピードタイプの跳躍選手はランニングアームを用いることが多い。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、パワータイプの跳躍選手は以下に示す特徴を持っている。

スピードタイプの跳躍の特徴

- 助走が長い
- 助走スピードが速い
- 手や脚の振り上げ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

パワータイプの跳躍の特徴

- 助走が短い
- 助走スピードが遅い
- 手や脚の振り上げ動作が大きい
- 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

ここでは典型的なアームアクションとその動作について説明する。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の手足の左右を入れ替えて読んでほしい。図は右腕と右脚が青色、左腕と左脚が赤色で描かれている。

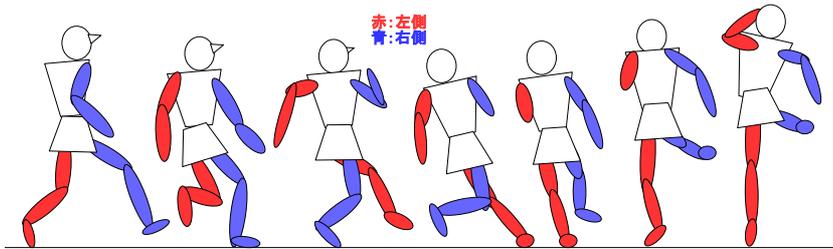


図 3.5: ランニングアームでの腕使い

図?? 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。

ランニングアームの特徴としては、踏み切り動作において、振り上げ脚（右脚）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。

ランニングアームの欠点

- 離陸動作において、腕や脚を高く引き上げた姿勢が作りにくいいため、重心位置が低くなる
- 踏み切り動作で、腕や脚を使った大きな力を地面に伝えにくい
- 後傾動作が小さくなるため、空中で回転力不足になりやすい
- 回転力不足が原因で空中で大きく反ることが難しい

ランニングアームの利点

- ランニングに近い自然な腕使いで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
- 助走速度が速く、踏み切り位置を遠くしやすい。

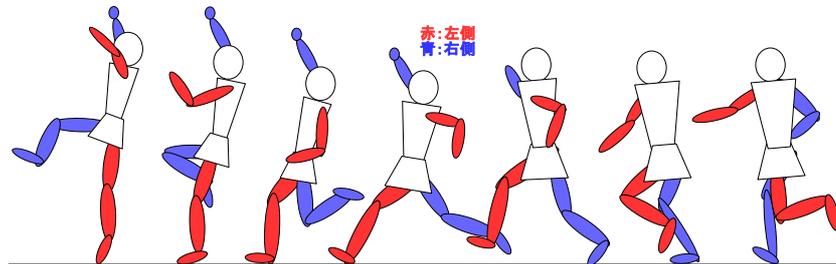


図 3.6: シングルアームでの腕使い

図 3.6 はシングル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。

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選手が多い点にある。

シングルアームは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い。また、ランニングアームに比べれば助走速度が落ちるが、後傾姿勢が取りやすいという利点もある。シングルアームは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。

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。また、ダブルアームの動作は大きく分けて二種類ある。

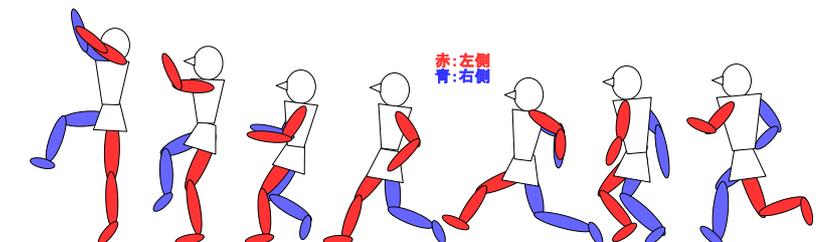


図 3.7: ダブルアームでの腕使い -a-

図 3.7 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の右足が接地したとき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。踏み切り動作の一步手前の右足が接地したとき左腕は前方に出て、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。次に踏み切り脚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。

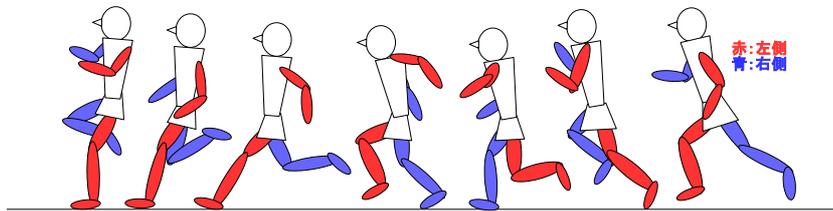


図 3.8: ダブルアームでの腕使い -b-

図 3.8 は図 3.7 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、踏み切り脚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。

ダブルアームの欠点

- 腕の使い方が通常のランニングと違い不自然な形になるため助走速度が減速しやすい
- 助走速度が遅く、踏み切り位置を遠くすることが難しい

ダブルアームの利点

- 離陸動作において腕や脚を引き上げた姿勢が作りやすいため重心位置を高くできる
- 踏み切り動作で腕や脚を使った大きな力を地面に伝えやすい
- 大きな後傾姿勢が取りやすいため、空中の回転力を得やすい
- 回転力が得やすいため空中で大きく反りやすい

踏み切り動作

4.1 踏み切り動作における起こし回転

踏み切り動作の起こし回転動作によって強い上昇力と回転力が得られる。

図 4.1 のように真っすぐな棒を斜めに地面に投げつけると、水平方向の速度が上昇速度と回転運動に変換されて、棒が回転しながら跳ね上がる。このとき速く低く投げつけた棒のほうが高く跳び上がる。また、後傾させバーから離れた位置で接地させたほうが大きな弧を描きやすい。

高跳び選手の場合もこれと同様に踏み切り動作を行うことで、助走速度が上昇速度と回転運動に変換され、高く跳び上がることができる。



図 4.1: 踏み切り動作における起こし回転

効果的な起こし回転を行うためには以下の点が重要となる。

- 速く、低い姿勢で踏み切りに入る
- 体を後傾させ、なるべく速くで踏み切る
- 踏み切り中は地面からの反力で膝が屈曲しないようにこらえる
- 接地時間をなるべく短くする
- 一本の棒のような軸を体の中心に作って踏み切り、真っすぐ上へ上がる姿勢で離陸する（すぐにクリアランス動作に移らない）

4.2 高跳び選手の踏み切り動作の特徴

踏み切り前半部分で、下半身の関節を屈曲させようとする力に対抗して筋力を発揮しているときに、大きな体の上昇力が生み出されている。

踏み切り動作の前半部分では、脚部の伸展筋群が伸張性収縮によって大きな筋力を発生させている。伸張性収縮によって生み出される爆発的な力が、高跳び選手の上昇力を生み出す。

図 4.2 は踏み切り動作における膝の屈曲角度と重心の鉛直速度の変化を示している。図 4.2 より、膝が屈曲していく踏み切りの前半部分で重心の鉛直速度が急上昇しており、膝が伸展していく踏み切りの後半部分ではあまり鉛直速度が上昇していないことが分かる。

走り高跳びの踏み切り動作では、踏み切り脚の膝が最大屈曲するまでに約 80% の鉛直初速度が生み出されることが知られている。これは高跳びにおける跳躍方法が垂直跳びとは根本的に異なることを意味している。

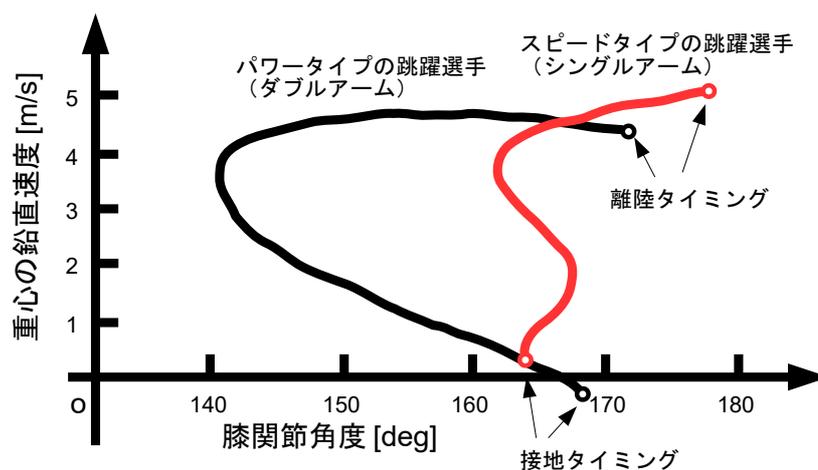


図 4.2: 踏み切り動作における膝の屈曲角度と重心の鉛直速度の関係

また、高跳びの踏み切り動作の接地時間はおおよそ 0.1 秒から 0.25 秒とされている。これは他のジャンプ系スポーツと比べれば、極めて短い接地時間である。高く跳ぶ者ほど踏み切り時間が短いとする研究もある。

踏み切り動作では「踏み切り時間を短くすること」「踏み切り動作で膝をあまり屈曲させないこと（膝が曲がらないようにこらえること）」を意識するとよい。

4.3 踏み切り動作の定量的目標値

- 最後の一步は 0.2 秒程度で、間延びせずに素早く接地する
- 踏み切り足とバーの間の角度を 30 度程度にする
- バーから約 1m 以上離れた位置で踏み切る

これまで多くの一流選手の助走が調査されてきた。

一流選手の助走の、最後の一步の歩幅は、平均して 2.1m と短い。また、踏み切り一步前の足が着地してから踏み切り足が着地するまでの時間は、平均して 0.2 秒と極めて短い。一流選手の多くは間延びしない、コンパクトな踏み切り動作を行っている。

一流選手の踏み切り角度は平均して 30 度程度である。よく年少の競技者でほぼバーと平行になるような角度で踏み切る選手を見かけるが、こうした踏み切り動作では足首に負荷がかかり、足首を痛めやすくなる。また、速い助走速度で踏み切ることが難しい。

一流選手の多くは 1m 以上バーから離れた位置で踏み切る。また、高く跳ぶ選手ほど遠くで踏み切る傾向が強い。

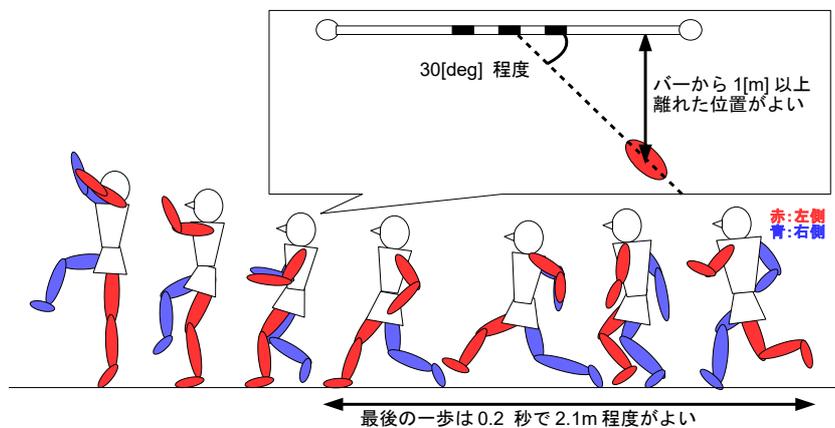


図 4.3: 踏み切り動作の定量的目標値

クリアランス

5.1 空中の回転成分の調整

クリアランスに必要な空中の回転成分は踏み切り動作によって生み出される。

踏み切り動作によって生み出される空中の回転成分（角運動量）は以下の3つである

- 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
主に内傾動作から生み出される
- 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
主に後傾動作から生み出される
- ヨー回転
地面と垂直な軸周りの回転
脚と肩と腕の振り上げ動作から生み出される

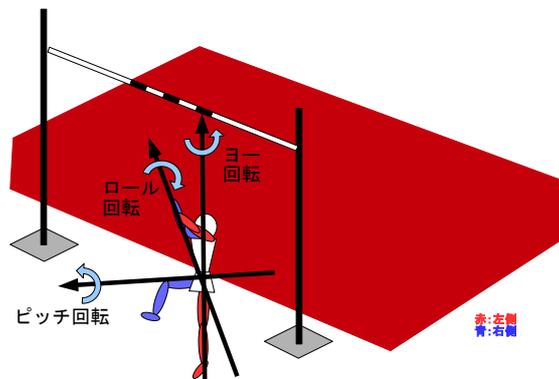


図 5.1: クリアランス中の回転成分

空中でうまく反れない場合や、お尻がバーに当たりやすい場合はバー方向への回転成分（ピッチ回転とロール回転の合成成分）が不足している場合が多い。このときは内傾動作や後傾動作が不足していないか確認する。

ピッチ回転成分が他の選手よりも強い選手（後傾動作の大きい選手）は、より多くのヨー回転がクリアランスに必要となる。ヨー回転が足りない場合は、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る。こうした問題が起きるときは振り上げ脚の動作が小さくなっていないか確認する。

ピッチ回転成分が他の選手よりも弱い選手（後傾動作の小さい選手）は空中でうまく反れない場合が多い。この場合は単純に踏み切り位置を遠くして、空中で回転できる時間を長くすることで対処する選手が多い。

女性選手は男性選手に比べて跳躍時間（滞空時間）が短い。このため、女性選手は男性選手より大きなロール・ピッチ・ヨー回転成分がクリアランスに必要になる。女性選手は男性選手が行わない特殊な内傾動作、後傾動作、アームアクション、振り上げ脚動作がクリアランス動作のために必要になる場合がある。

5.2 姿勢調整

クリアランス中の姿勢の調整

- 頭や膝の位置を下げて体を反れば、腰を浮かせることができる
- 身体を反るほど回転速度が速くなる
- 空中で作用・反作用の力を使って姿勢を整えることができる
（ただし、空中における角運動量は変化しない）

空中の重心軌道が変化することはないが、体のある部分を下げることで別の部分を持ち上げることができる。例えば頭を下げて、膝を曲げて足を下げれば、腰が持ち上がる。

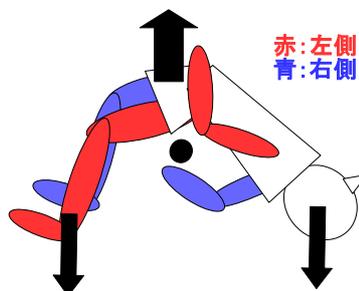


図 5.2: クリアランス中のアーチ調整

空中の角運動量が変化することはないが、体の姿勢を変えて全体の慣性モーメント（回転しやすさ）を調整すれば、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。例えば踏み切り動作で得られる角運動量が小さな選手や対空時間が短い選手は、空中で慣性モーメントの小さい姿勢（体を反った姿勢）を取ると、空中での回転が速くなりクリアランスに有利になる。

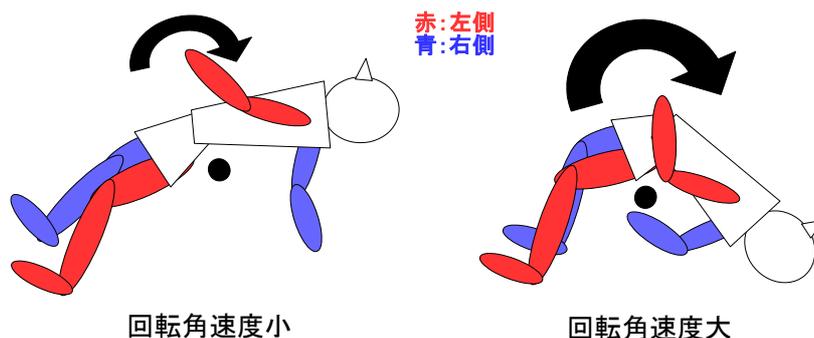


図 5.3: クリアランス中の回転角速度調整

空中での角運動量や重心軌道は変化しないが、空中で作用・反作用の力を使って姿勢を整えることはできる。例えば図 5.4 のように右腕と右脚を時計回りに回転させると、体の残りの部分は反時計回りに回転する。



図 5.4: クリアランス中の姿勢調整

一流選手になるほど様々なテクニックを駆使して、空中でバーに触れないように姿勢を調整する。