

第9回 跳のバイオメカニクス

教科書 金子公宥、福永哲夫編、バイオメカニクス、杏林書院 第8章

参考書 宮下充正監修、深代千之編著、跳ぶ科学、大修館書店

9.1 跳動作の種類

様々な跳動作が存在するが、スポーツにおいては以下のような分類が可能であろう。

高く跳ぶ 走り高跳び、棒高跳び、サッカーのヘディング、バレーボールのスパイク、バスケットボールのシュート、体操競技、トランポリン

遠くに跳ぶ 走り幅跳び、三段跳び、スキージャンプ、

華麗に跳ぶ フィギュアスケート、シンクロナイズドスイミング、飛び込み競技、スキーエアリアル

分類方法としては、こうしたもののほかにも参考書である、「跳ぶ科学」(宮下監、深代編著 pp.19)にあるように目的、方向、助走の有無等によってわけることも可能である。

9.2 跳動作のキネマティクスとキネティクス

跳動作には様々な種類があり、スポーツ競技における跳動作は合目的な動作であることが間違いないが、ここでは跳動作の基本ともいべき垂直跳びを最初の事例として取り上げ、跳躍の理解をしてもらいたい。

9.2.1 垂直跳びのキネティクス

ここでは垂直跳びにおいて、身体重心によってその運動を議論することにする。静止立位における身体重心位置 (H_0)、振り込み動作による沈み込んだ重心位置 (H_1)、離地時の重心位置 (H_2)、最大跳躍高における重心位置 (H_3) とおく。離地後には身体に作用する力は速度が小さいことを考えると重力のみと考えられるため、跳躍高は跳びだし時の初速度によって決定される。静止立位からいったん沈み込む間にはその沈み込みの初期において下向きの加速度が生じる。

離地時には爪先立ちの姿勢になるため、やや静止立位の重心高 (H_0) から高い位置 (H_2) の高さとなる。跳躍高 ($H_3 - H_0$) のうち、($H_2 - H_0$) は体格、とくに身長によって決まってしまうが、そ

表 9.1: スポーツの中の跳の分類 (跳ぶ科学より)

目的	方向	助走	踏切と着地	道具
距離志向動作	垂直	有	片足	有
距離有意動作	水平	無	両足	無

の貢献は跳躍高全体に対しては、25～30%程度である。離地後の跳躍高 ($H_3 - H_2$) が跳躍高のうち 70～75% である。

跳び出し時の上向き速度を v_0 とおくと真の意味での跳躍高、すなわち離地時の重心高と着地時の重心高との差は、以下の式によってあらわされる。

$$h = \frac{\sqrt{v_0^2}}{2g} \quad (9.1)$$

初速度 v_0 が決まれば跳躍高 h は決定される。では高く跳躍するためにはどのような条件が必要かと言えば、次の節の話題に関連するが動き始めから離地までの間に作用した力積が大きいことが必要である。これは次節で述べることとし、跳躍高に影響を及ぼすと言われる条件について紹介する。

まずどの跳躍においても、脚伸展力を発揮するうえで地面をける、その立ち位置が関係してくる。Martin と Stull [?] によれば、前後・左右に 0.13~0.25m 程度の幅に開くことが跳躍高の増加につながるとしている。

膝関節の屈曲度合いは垂直跳びの跳躍高に大きく関係している。膝関節最大屈曲角度が 60 度程度で、跳躍高が最大になることが知られているが、だいたい 60 度から 90 度の間が平均であるとされる。

9.2.2 垂直跳びのキネティクス

地面反力

垂直跳びにおける地面反力は筋収縮に伴って関節周りのトルクが発生し結果的に関節角度が変化することが原因で変化する。図 9.1 には垂直跳びにおける典型的な地面反力のパターンが描かれている。静止立位するときには重力と地面反力はつりあっているが、跳びあがる前の沈み込み動作においては地面反力が小さくなる (図中 a~b)。重心の速度はこれにより下向きとなり、下に凸のカーブを描き再び、速度ゼロ (0m/s) に戻る。このときが重心が最大沈み込んだ瞬間である (c)。その後さらに速度・変位は増加し、時刻 d において離地する。一般的にこのとき腕による振り込み動作を行うと図のように地面反力の正 (静止立位のことをゼロとすると) のとき、双峰性の波形がみられることが多い。

前節で述べたように、垂直跳びの跳躍高は跳びだしの初速度のみで決定される。その初速度を決めるのは地面反力の力積である。積分値を大きくするために振り込み動作が行われる。地面反力のピーク平均値は 1100~1700(N) 程度であるとされているが、体重による影響が強く体重当たりの値と比較すると約 2.7 倍であることが報告されている。

パワー

図 9.2 には垂直跳びにおける下肢関節の発揮トルクおよびパワーが描かれている。トルクのパターンは腰関節、膝関節、足関節で同様に変化を示す。

垂直跳びにおいて下肢で発揮される筋力のうち、準備動作である沈み込み動作においては図 9.3 に示したように下肢の筋放電が認められるが、速度が上向きに変化してからしばらくは筋放電が認められない。次節でも紹介するが、筋収縮によって得られたエネルギーを筋腱複合体 (Muscle Tendon Complex) が弾性エネルギーとして再利用していることが示唆される。

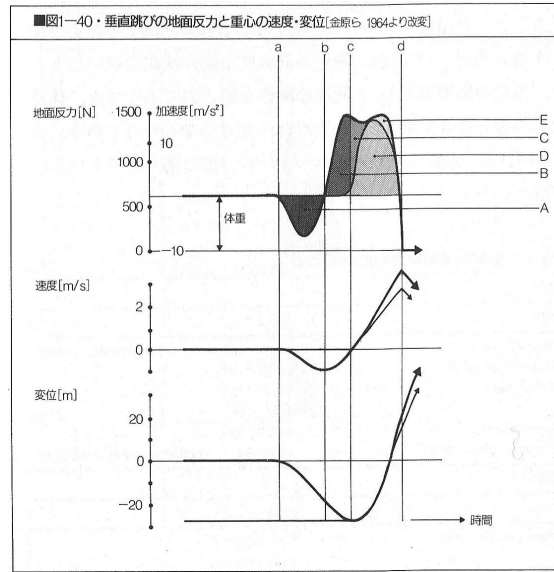


図 9.1: 垂直跳びにおける地面反力と重心位置・速度

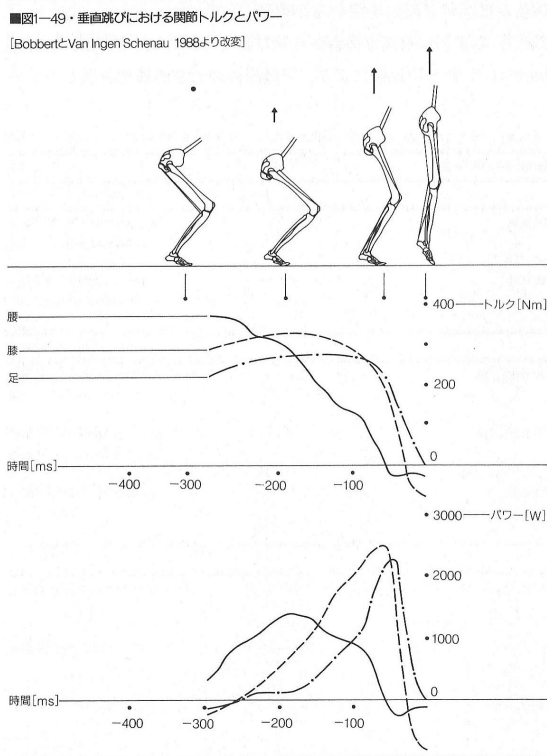


図 9.2: 垂直跳びにおける関節パワー

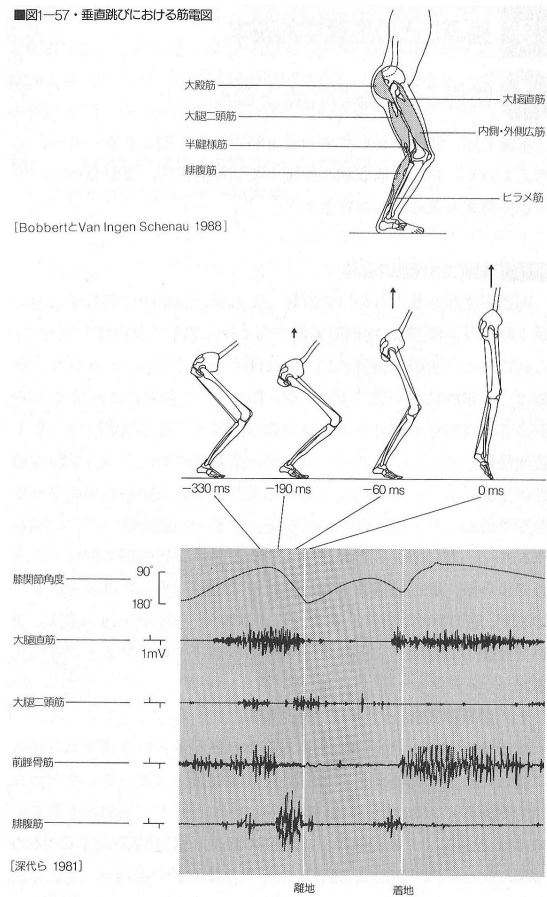


図 9.3: 垂直跳びにおける筋電図

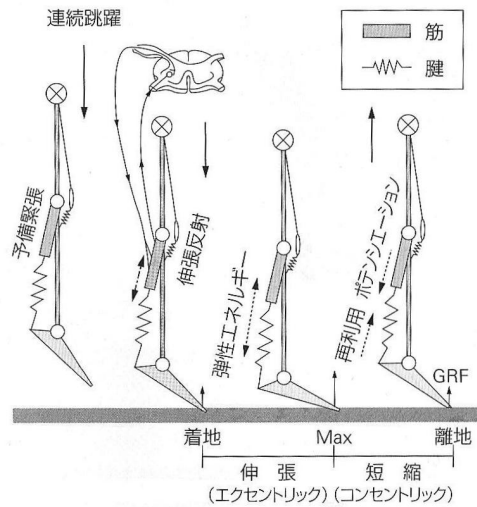
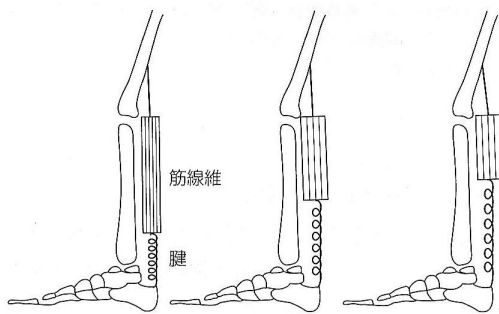
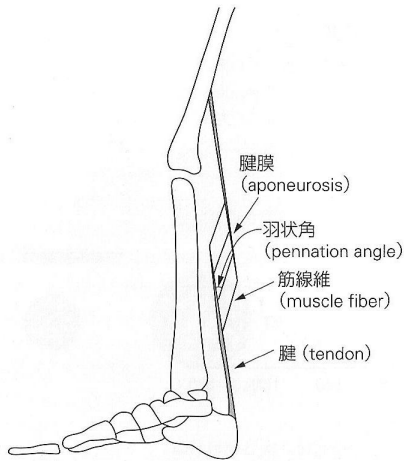


図 9-6 反動動作における研究視点のまとめ
 足関節のみの連続跳躍（ホッピング）で下腿三頭筋を対象にしたモデル。着地前に予備緊張があり、着地後のエクセントリック局面で伸張反射と弾性要素の伸張が起こる。その結果、その後のコンセントリック局面で筋の増強効果・反射と弾性エネルギーの再利用が生じる。しかし、Kurokawa⁶⁾により、強度の高いドロップジャンプでも筋の伸張が生じないことがわかり、伸張反射は大きな役割を果たさないことが判明した。
 (深代千之：反動動作のバイオメカニクス。体育学研究，45：457-471，2000)

図 9.5: 筋腱複合体の模式図 2

図 9.4: 筋腱複合体の模式図 1

反動動作と振り込み動作

筋・腱の動態は跳躍や走行、歩行によるヒトの移動においても重要視されているが、その構造を総称して筋腱複合体 (Muscle-Tendon Complex) と呼ぶ。腱がバネ的要素をもつと考えると、ドロップジャンプのような反動動作、また垂直跳びにみられるような振込動作などで効果的に高く跳躍ができることを理由づけられる。

図 9.5 には筋腱複合体の模式図を示している。図 9.6 には垂直跳びにおける筋および腱の伸張距離、パワー変化などを示している。図 9.5 に示してあるように、連続ジャンプやドロップジャンプでは筋は予備緊張を行う。着地時には筋が引き伸ばされることによって伸張反射と弾性要素である腱の伸張が起こる。伸張反射は脊髄からの反射ループによる自動的な反応であり、筋は脳の指令なしに収縮を起こす。これに加えて引き伸ばされた腱は運動エネルギーを弾性エネルギーとして蓄えるため両者が複合して引き続く収縮過程ではより大きな力を発揮することが可能となる。

9.3 跳動作の生理学

跳躍運動のなかでも連続跳躍、たとえば縄跳びなどではその消費エネルギーが毎回のジャンプにかかるエネルギー量を足し合わせたものよりも少ないことが知られている。これは、ジャンプを行う下肢関節においてエネルギーが有効に使われていると考えられている。これには筋・腱・靭帯といった部位がもつ機械的な特性のひとつである弾性が運動エネルギーの再利用を行っているという見方が大

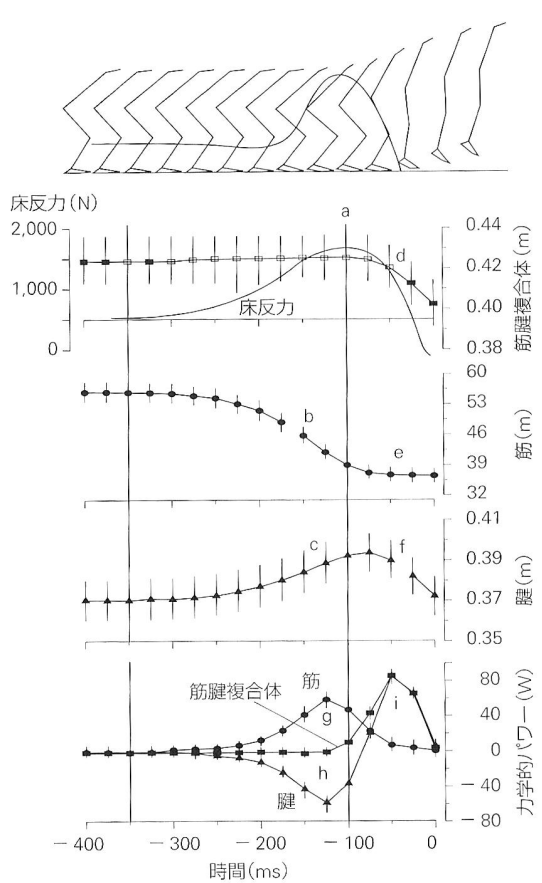


図 9-3 スクワットジャンプ中の腓腹筋の動態. 筋と腱, 筋腱複合体それぞれの長さ変化, そして各要素の力学的パワーの変化

踏切最後の足関節伸展局面では, 筋が等尺性収縮をしていて, 腱に蓄えられた弾性エネルギーが大きな役割をしているのがわかる.

(Kurokawa S et al: Behavior of fascicles and tendinous structures of human gastrocnemius during vertical jumping. J Appl Physiol, 90: 1349-1358, 2001 より引用改変)

図 9.6: 垂直跳びにおける筋腱複合体の動態

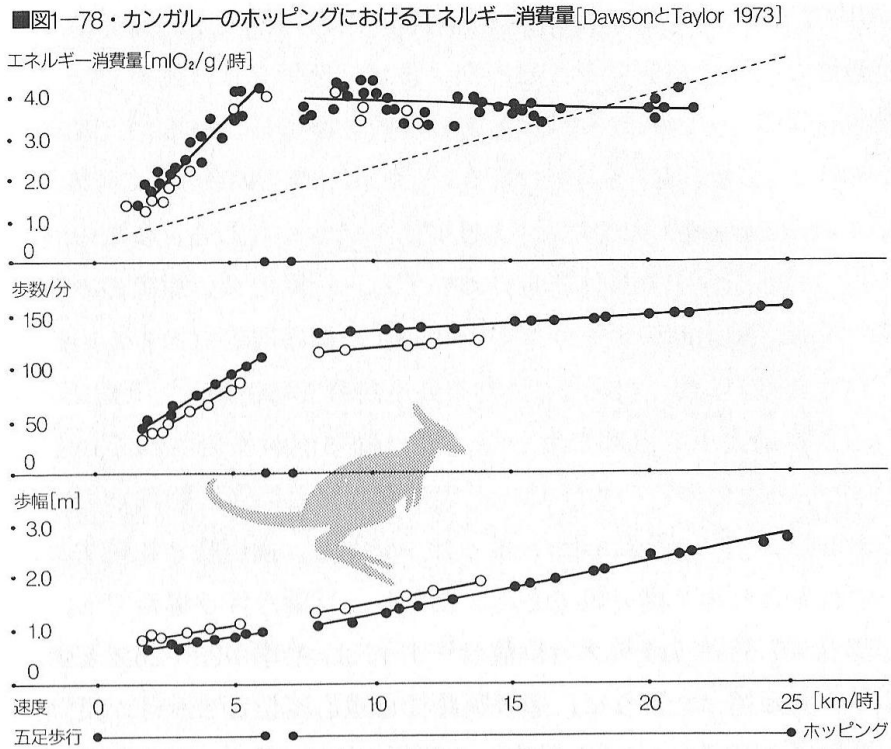


図 9.7: カンガルーのホッピングにおけるエネルギー消費

勢を占めている。

実際、連続ジャンプで移動を行うカンガルーではそのエネルギー効率が非常に高いことが知られている。Dawson と Taylor はカンガルーの移動におけるエネルギー消費について時速 6Km 以下の場合、その移動速度に比例してエネルギー消費が増加するのに対して、それ以上になるとエネルギー消費が増加しないという不思議な現象を発見して報告した [?]。カンガルーの後ろ脚は長いアキレス腱がある代わりに筋肉が極端に少ない。ホッピングが始まるとアキレス腱が収縮し弾性エネルギーとして貯めることが可能である。ヒトにおいてもこれと同じメカニズムが存在し、筋・腱等がエネルギーをためることが出来て再利用が可能であると考えられている。

参考書、「跳ぶ科学」(宮下監修、深代編著) に詳細が書かれているが、最大下における跳躍運動では筋の伸縮が素早くなっていくと、そもそも上昇するときに筋放電が認められなければならないはずが、実際には筋放電が消失することが知られている。つまり筋の収縮によるエネルギーではないメカニズムが存在する。機械的なバネと同じ性質をもつ部位は腱であると考えられているが、筋および腱のそれぞれがどの程度跳躍運動中、跳躍高に対して貢献しているのかは現在も興味深く研究がつづけられている。

9.4 垂直跳びのキネマティクス・キネティクス解析

9.4.1 運動方程式

垂直跳びに限らず、ヒトの運動を解析する際に、その筋骨格構造を剛体リンクセグメントモデルでモデル化し、これによって外力である地面反力、セグメントの位置・速度・加速度、関節の角度・角速度・角加速度などの情報から関節に作用する力、トルク等を求めることができる。

■図1-48・関節トルクの計算法[Winter 1979より]

1 ——— $F_{ax} = m a_x - F_x$

2 ——— $F_{az} = m a_z - F_z + m g$

3 ——— $\Sigma T = I a$

$$T_a + (F_x \cdot r) + (F_z \cdot q) - (F_{az} \cdot l) - (F_{ax} \cdot n) = I a$$

$$\therefore T_a = -(F_x \cdot r) - (F_z \cdot q) + (F_{az} \cdot l) + (F_{ax} \cdot n) + I a$$

F_{ax} , F_{az} : 関節反力 T_a : 関節トルク F_x , F_z : 地面反力 a_x , a_z : セグメントの重心の加速度
 m : セグメントの質量 g : 重力加速度 I : セグメントの慣性モーメント a : セグメントの角加速度
 l , n , q , r : 距離

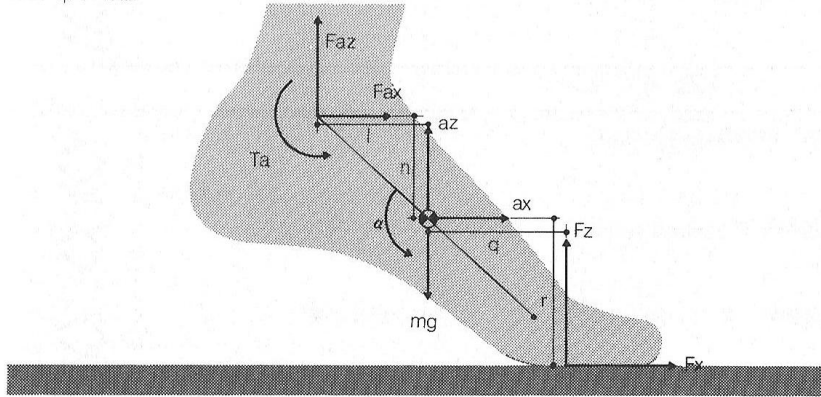


図 9.8: 運動方程式の導出

図 9.8 には跳躍、あるいは歩行動作のような場合を想定した図が描かれている。並進・回転を表現するニュートン・オイラー方程式を解くことで関節作用力、ならびに関節トルクを計算によって求めることが可能である。

身体セグメントの回転運動をあらわすには、図 9.9 に示したように身体重心位置を回転中心を求めたのちに各セグメントの相対角度変化を算出し、それをもとにしてセグメントごとの角運動量を計算する。

9.5 走り幅跳びにおける跳躍：キネマティクスとキネティクス

走り幅跳びでは、跳躍距離が直接競技結果を決定するが、跳躍距離は図 9.10 に示されるように、離地までの距離、空中期における距離、着地時における進行距離の三つに分解できる。助走における画像分析からは、選手が跳躍時に踏切四歩前くらいで踏切足の調整のために、走行のストライドを調節していることがわかる。

走り幅跳びでは水平方向にもつ速度に上向き速度成分をもたせることが踏切に要求される。通常、選手の重心は踏切直前には図 9.11 に示したように助走時から沈み込む。やや下向きに向いた速度ベクトルは踏切後に上方に向き、大きさは $1.1 \sim 2.1 \text{ m/s}$ 程度減少し、これは助走速度の約 $10 \sim 20\%$ にも相当する。したがって踏切の最中には速度ベクトルの向きを変えるような作用が地面反力によってなされる。すなわち地面反力には水平後方に向く成分が含まれる。

助走速度が速い場合には踏切後の速度ベクトルの水平とのなす角度は小さいことが知られており、高く跳躍しようとするれば水平方向速度成分が減少することも知られている。

この踏切においては二つの技術が指導されており、ひとつは踏切足を前方から後方に向けて「かく」ように接地し前後方向の速度減少を防ぐものである。もうひとつはできるだけ踏切足の膝を曲げないで地面反力を大きくするものである。通常後者の指導が多いようであるが、この際踏切初期

■図1-45・身体の角運動量の算出[Dapena 1978]

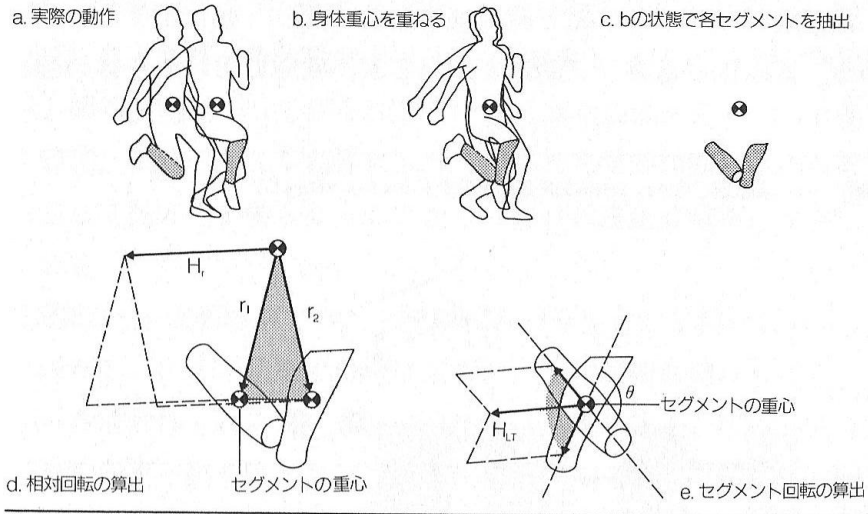


図 9.9: 角運動量の計算方法

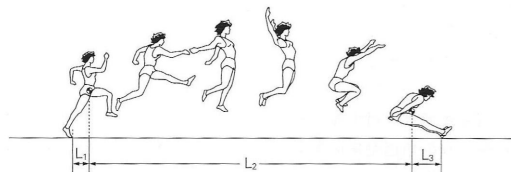


図 9-17 走幅跳の記録の構成要素
(阿江通良：陸上競技のバイオメカニクス。In：日本陸上競技連盟編，陸上競技指導教本<基礎理論編>，p45，大修館書店，1992)

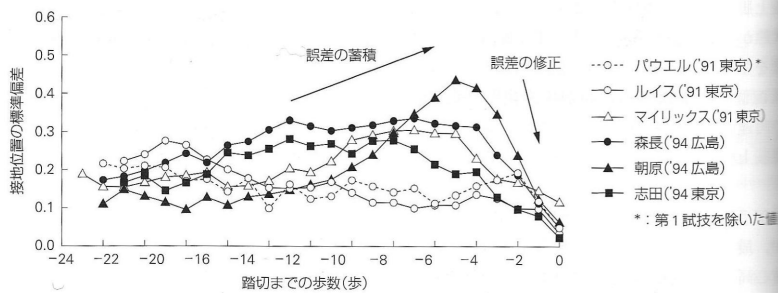


図 9-18 走幅跳における助走 1 歩ごとの接地位置の標準偏差
(伊藤信之：助走。In：深代千之ほか編，スポーツバイオメカニクス，pp31-33，朝倉書店，2000 より引用改変)

図 9.10: 走り幅跳びにおける局面と選手の助走における調整

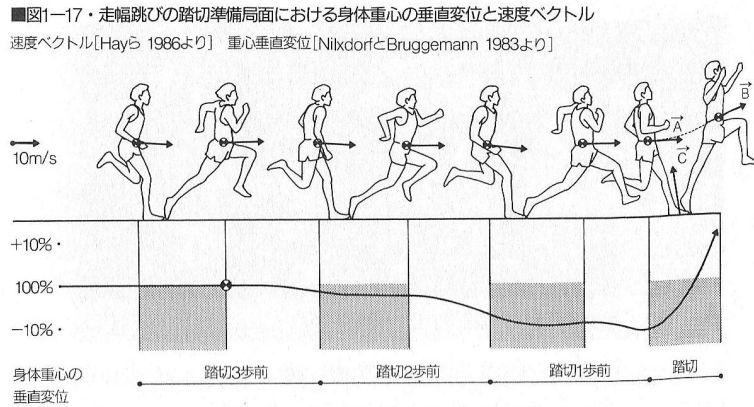


図 9.11: 走り幅跳びにおける重心高の移動変化

に上体を後傾させ踏切足の接地位置からみた重心位置が引き続いて重心を上昇させるために後方により傾いていることが必要である。

図 9.13 には走り幅跳びにおける地面反力を描いている。最初の鋭いピークが踏切足の着地であり、そのあとに続く山がキック力と呼ばれる力である。図 9.14 には踏切中の関節パワーを示しているが、踏切初期にはエキセントリックな収縮によって筋が引き伸ばされるため、負のパワーが得られている。

踏切時には踏切足が受ける地面反力で身体は回転運動を引き起こす。図 9.15 には地面反力の水平方向成分 F_x 、鉛直方向成分 F_z と着地足の地面反力の作用点から重心までの距離 (x,y) を表しているが、着地支持脚の真上に重心位置がくるまでの間 (局面 a) では、鉛直方向地面反力が身体を後方に回転させようと作用する。その後は地面反力の水平、鉛直方向のそれぞれの成分が身体を前方回転させようとするモーメントを生み出す。また踏切最後の局面ではわずかに後方回転モーメントを発生させる。

図 9.15 の角力積の負 (後方回転)、正 (前方回転) の総和は跳び出し時に身体が持つ角運動量となる。総じてこれは前方回転を生み出すが、空中では重力以外に空気抵抗しか作用しないため保存される。そのままでは身体は前方に回転をしながら跳んでいく。姿勢を維持するためには選手は上肢下肢を前方回転させる技術をみにつける必要がある。

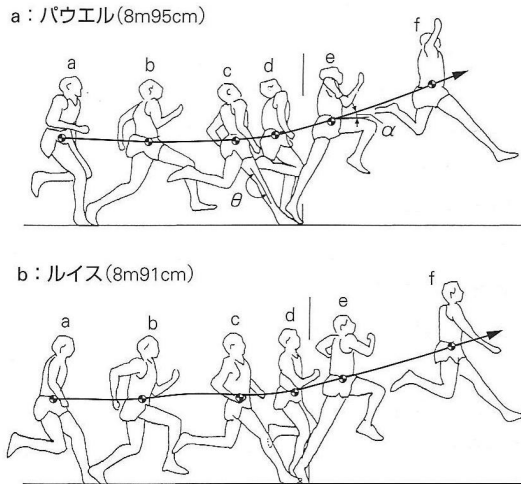


図 9-22 パウエルとルイスの踏切準備動作
 身体の中の●は重心を示し、それを結んだ線は重心の軌跡を示す。
 a: パウエル, 助走速度 (RV: 11.0m/s), 跳躍角 α (23.1°), θ_1 接地時 (171°), θ_2 最大屈曲 (148°), θ_3 離地時 (171°)
 b: ルイス, 助走速度 (RV: 11.1m/s), 跳躍角 α (18.3°), θ_1 接地時 (165°), θ_2 最大屈曲 (140°), θ_3 離地時 (171°)
 (深代千之ほか: 走幅跳のバイオメカニクス. In: 佐々木秀幸ほか監修, 世界一流陸上競技者の技術. pp169-184, ベースボールマガジン社, 1994 より引用改変)

図 9.12: 世界陸上におけるマイク・パウエル、カール・ルイス選手の跳躍

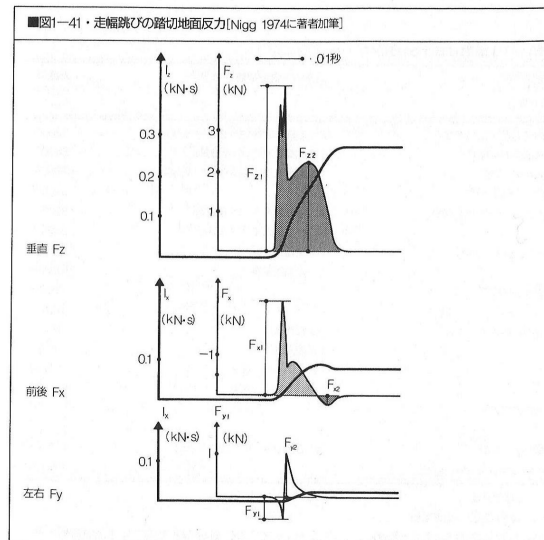


図 9.13: 走り幅跳びにおける地面反力

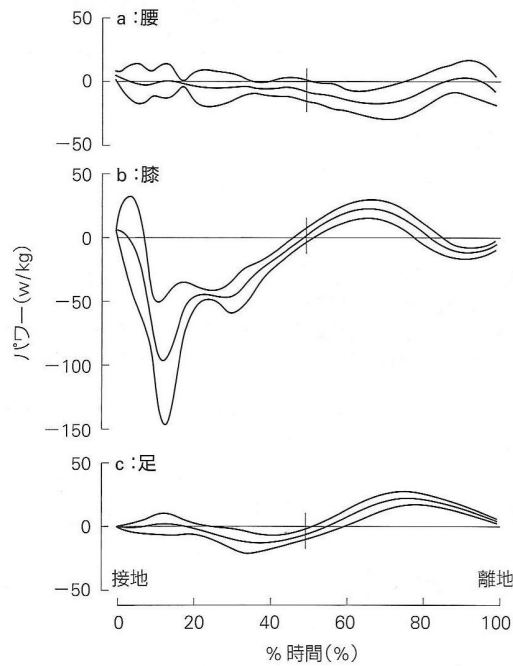


図 9-23 走幅跳における踏切脚関節のパワーの変化
 (阿江通良：走高跳および走幅跳の踏切における身体各部の使い方・貢献度. Jpn J Sports Sci, 9: 130-136, 1990)

図 9.14: 踏切時における関節パワー

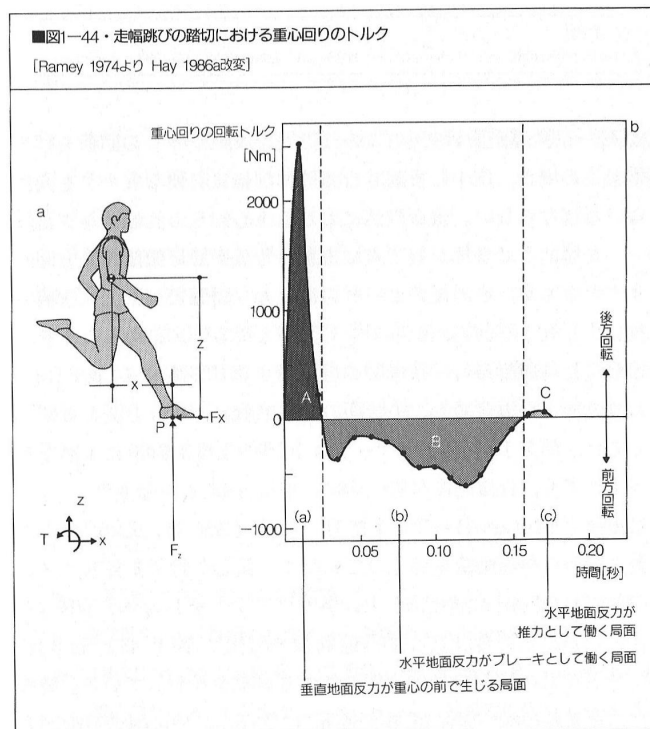


図 9.15: 走り幅跳びにおける重心周りのモーメント

参考文献

- [1] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1–18. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- [2] Kingston Bernard, 足立和隆訳. よくわかる筋の機能解剖. メディカルサイエンス・インターナショナル, 2000.
- [3] Robertson D., Gordon E., Caldwell Graham, E., Hamill Joseph, Kamen Gary, and Whittlesey Saunders, N. *Research Methods in Biomechanics*. Human Kinetics, 2004.
- [4] Thompson Floyd, 中村千秋, 竹内真希. 身体運動の機能解剖 (Manual of Structural Kinesiology). 医道の日本社, 1997.
- [5] F. Gazzani. A new algorithm for calibrating stereophotogrammetric systems devoted to motion analysis. *Human Movement Science*, Vol. 12, pp. 403–425, 1993.
- [6] H.M. Karara G.T. Marzan. A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity, and some application of it. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems*, pp. 420–476, 1975.
- [7] H. Hatze. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified dlt-approach. *J. Biomechanics*, Vol. 21, No. 7, pp. 533–538, 1988.
- [8] Perry Jacqueline. ペリー歩行分析、正常歩行と異常歩行. 医歯薬出版, 2007. 武田功監訳.
- [9] Rose Jessica and Gamble James, G. *Human Walking*. Lipricott Williams & Wilkins, 2006.
- [10] 金谷健一. 画像理解 - 3次元認識の数理 -. 森北出版, 1990.
- [11] 金子公宥, 福永哲夫 (編). パイオメカニクス, 身体運動の科学的基礎. 杏林書院, 2004.
- [12] 江原義弘, 山本澄子. ボディダイナミクス入門、歩き始めと歩行の分析. 医歯薬出版, 2002.
- [13] 佐伯由香, 黒澤美枝子, 細谷安彦, 高橋研一編訳 (編). トートラ 人体解剖生理学 原書6版. 丸善, 2004.