

跳躍動作からみた
筋・腱連合組織のダイナミクス

深代千之

跳躍動作からみた

筋・腱結合組織のダイナミクス

深代 千之

- (1) Fukashiro, S., Y. Iimoto, H. Kobayashi and M. Miyashita:
A biomechanical study of the triple jump.
Med. Sci. Sports Exerc. 13(4)233-237, 1981.
- (2) Fukashiro, S. and M. Miyashita:
An estimation of the velocities of three take-off phases
in 18m-triple jump.
Med. Sci. Sports Exerc. 15(4)309-312, 1983.
- (3) Fukashiro, S. and P. V. Komi:
Joint moment and mechanical power flow of the lower limb
during vertical jump.
Int. J. Sports Med. 8 (Suppl):15-21, 1987.
- (4) Fukashiro, S. :
Moment of force and mechanical power in joints during extension.
Biomechanics XI-B, Eds:G.D.Groot, et al., Free Univ. Press.
1988, pp. 938-942.
- (5) Fukashiro, S., P. V. Komi, M. Jarvinen and M. Miyashita:
Comparison between the directly measured achilles tendon force
and the tendon force calculated from the ankle joint moment
during vertical jumps.
Clin. Biomech. 8:25-30, 1993.
- (6) 深代千之、松本 勝、宮下充正 :
一卵性双生児の跳動作の比較.
Jpn. J. Sports Sci. 4(8):620-624, 1985.
- (7) 深代千之、宮下充正 :
走幅跳における効果的動作の評価法.
第7回日本バイオメカニクス学会大会論集. 星川保、豊島進太郎編、
1984, pp. 66-70.
- (8) 深代千之、稲葉勝弘 :
幼児および児童にみられる走幅跳の動作の改善.
鹿屋体育大学紀要 2:49-60, 1987.

目次

序章	1
第1節 跳躍のバイオメカニクス	2
第2節 跳躍の研究小史	8
第3節 本研究の目的	15
第1章 陸上競技における跳躍動作のダイナミクス	16
第1節 走幅跳における踏切動作の3次元解析	17
第2節 三段跳における踏切動作の2次元解析	31
第3節 三段跳18m跳躍(世界記録)に必要な力学的変数の推定	39
第2章 跳躍動作を支える筋・腱連合組織のダイナミクス	45
第1節 垂直跳における下肢三関節トルクと機械的仕事	46
第2節 垂直跳における足関節トルクとアキレス腱張力の比較	54
第3節 垂直跳における筋・腱連合組織の弾性効果	61
第3章 ダイナミックな跳躍動作の獲得	70
第1節 発育期における跳動作改善の可能性—双生児の跳動作の比較—	71
第2節 統計分析を用いた走幅跳の「よい動作」の評価	78
第3節 発育期における跳能力の発達と練習効果	83
第4章 総括	93
第1節 陸上競技における跳躍動作のダイナミクス	94
第2節 跳躍動作を支える筋・腱連合組織のダイナミクス	97
第3節 ダイナミックな跳躍動作の獲得	100
謝辞	102
文献	103

序 章

第1節. 跳躍のバイオメカニクス

第2節. 跳躍の研究小史

第3節. 本研究の目的

第1節. 跳躍のバイオメカニクス

1. 力学的にみた跳躍

跳躍は、バイオメカニカルにみると「自力で、重力に抗して身体を空中に投射する運動」と定義できる。重力場にあるものを地面から離すには、重力による下向きの牽引よりも大きな上向きの推力を発揮しなければならない、この推力によって、身体が空中に投射される。

地上でヒトを含む動物が運動を行う場合、身体に作用する外力は、重力、空気抵抗、地面からの抗力の3つである(図1)。人間が直立姿勢で静止している場合、空気抵抗は無視でき、重力だけが身体重心に働く。地面にはその人間の体重分の力が足部を通してかかっており、静止しているためには、逆に身体はそれと同等の力を地面からの抗力Fとして受けている。脚の屈伸や腕の振りなどで身体を動かした場合、重心を上下させる力は、抗力Fと体重Wとの差であり、以下の運動方程式で表すことができる。

$$F - W = ma \dots \dots \dots (1)$$

ただし、m=身体質量、a=重心の加速度、(w=mG, G=重力加速度)。

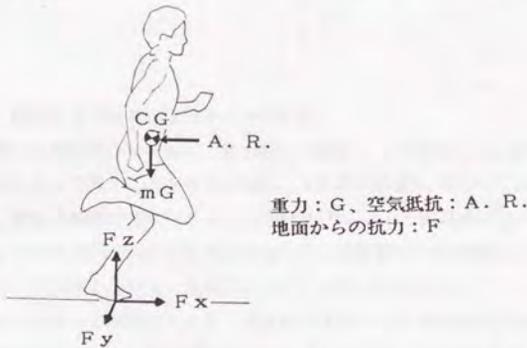


図1. 運動中に身体に加わる外力

垂直跳のように、下肢を伸展させて身体を空中に投射させるためには、抗力が体重より大きくなければならない($a = G(F/W - 1)$)。例えば、抗力Fが体重Wよりも小さい場合、加速度aはマイナスとなって身体重心は下降し、F=Wの時、身体は静止している。加速度が1Gよりも大きいときのみ、身体は投射されるのである。そして、離地後は地面に対する抗力Fは零($ma = -W$)で、身体に及ぼす外力は重力だけとなり、重心の軌跡は放物線となる(図2)。

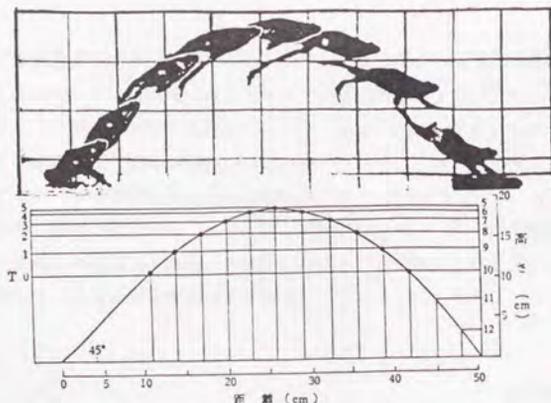


図2. カエルの跳躍 (Gray 1953)

すなわち、跳躍における重心の方向や飛距離は、離地するときの状態(初速度ベクトル)によって決定される。逆にいえば、跳躍は主として接地(踏切)中の抗力によって制御されているといえるのである。

2. 踏切における初速度ベクトルの比較

踏切の運動学的な特徴は、踏切動作の結果として現れる身体重心の初速度ベクトルによって表すことができる(図3、含動物の跳躍)。図3の右上に例示するように、踏切接地時の速度ベクトルAが踏切動作によって離地時にはベクトルBに変わる。ベクトルAとBの終点を結んだものが、速度変化(≒加速度)ベクトルCとなる。図中の各跳躍の矢印は、各踏切のベクトルCを示している。

その場からの跳躍をみると、垂直跳の速度ベクトルは垂直方向に向かい初速度3.5m/s程度となる。飛板飛び込みはスプリングボードの弾性を利用するので、同じ垂直方向ながら初速度が5m/sを越える。競泳のスタートは初速度が4m/s程度であるが、跳躍角は小さく水平方向に飛び出している。

次に助走後の跳躍をみると、ベクトルの基点つまり踏切前の助走速度は、走幅跳男子が最も大きく、走幅跳女子、走高跳男子の順に低くなる。図中のベクトルが左に向けば向くほど踏切での水平速度の減少(ブレーキ)が大きいといえるが、走幅跳よりも高く跳躍する走高跳の方が水平速度の減少が大きい。走幅跳で世界を代表するC.ルイス(8m78)とピーモン(8m90)は好対称で、ルイスは水平初速度が大きく、逆にピーモンは垂直初速度が大きい踏切であるといえる。三段跳は、ホ

ップで助走速度の減少を抑えて踏み切り、ステップでは飛び降りた後の踏切ということもあって水平速度の減少が大きく垂直初速度が少ない。そしてジャンプではホップと同程度の水平速度の減少でかつ垂直初速度が大きいといえる。ただし垂直初速度の絶対値は、走幅跳や走高跳に比べると小さい。また、スキージャンプは、ヒトの跳躍で助走速度が極端に大きい(約23m/s)。

一方、動物の跳躍では、カンガルーの跳躍距離13m、プーマの跳躍高3.3m、サケの水面からの跳躍高2.5mを、初速度に換算すると図ようになる。ヒトの跳躍と比較して、非常に大きな初速度を発揮していることがわかる。

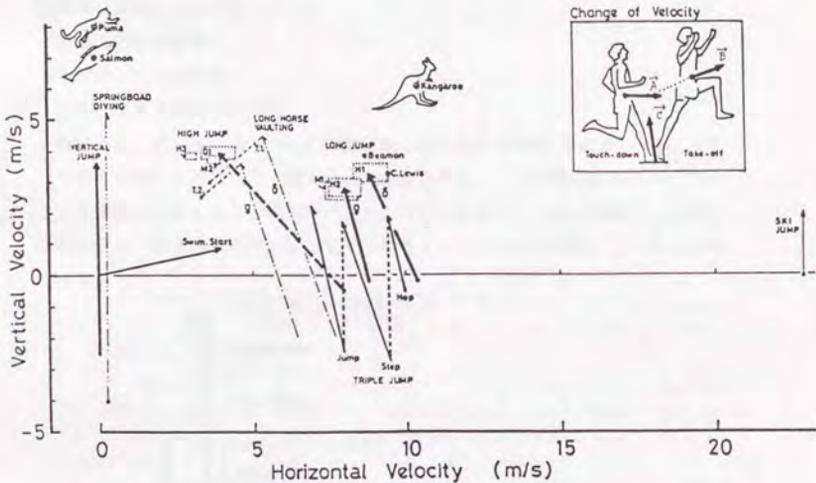


図3. 様々な跳躍の初速度ベクトル(深代1990)

◇LONG JUMP: 走幅跳, TRIPLE JUMP: 三段跳, HIGH JUMP: 走高跳, VERTICAL JUMP: 垂直跳, SPRINGBOARD DIVING: 飛板飛び込み, Swim.Start: 競泳のスタート, SKI JUMP: スキージャンプ, LONG HORSE VAULTING: 機械体操の跳馬

◇T.1: 跳馬における脚の踏切, T.2: 馬具からの手による踏切

◇♂: 男子, ♀: 女子

※出展論文 ◇走幅跳 ♂ H1: Hayら1986, M1: 松井ら1973, ♀ H2: Hayら1985. ◇走高跳 D1: Dapena 1980a, H3: Hay 1973, M2: 松井ら1974. ◇三段跳 Millerら1986. ◇跳馬 ♂: Dillmanら1985, ♀: Nelsonら1985. ◇飛板飛び込み Millerら1984. ◇競泳スタート Nelsonら1978. ◇垂直跳: 深代(未発表資料). ◇スキージャンプ Baumann 1979. ◇動物の跳躍 Gray 1953, 加古ら1982.

3. 跳躍を支える筋・腱連合組織

ところで、人間の運動を自然科学的に観察する時、筋活動は、常に研究の中心テーマであった。それは、身体運動が筋活動の統合によるので、個々の筋活動の動態を明らかにすることによって、身体運動の機序を究明しようという意図からである。

筋活動の基礎研究としては、動物(主に蛙や鼠)の摘出筋を用い、収縮時の張力や熱量を直接測る研究がある(Close 1972)。一方、ヒトの生体筋を用い、動作(伸張性・短縮性収縮など)を労作計によって規定して、力の発揮特性を調べることも行われてきた(Komi 1973)。こういった基礎研究の成果を基に、走や跳躍など自由で自然な(労作計など制限されない)身体運動が考察されてきている。これらの筋活動は、次のように大別できる。

- ① 摘出筋の筋活動
- ② 労作計への筋活動
- ③ 自由な身体運動の筋活動

分類③には、歩・走・泳といった移動運動、身体以外の物体(主にボール)にパワーを伝える投・打運動など、様々な運動が含まれる。ここで筋活動を出力パワーという観点からみると、「跳躍のパワー」が最も大きい。つまり跳躍は、人間の運動の中で、筋活動の出力媒体として「最もダイナミックな運動」ということができる。

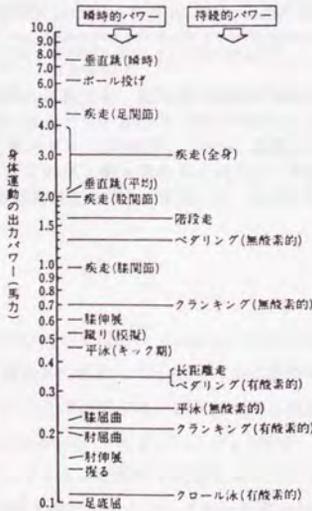


図4. 各種身体運動における出力パワー(金子1987)

図4は、金子(1987)が、各種身体運動における出力パワーをまとめたものであるが、跳躍のパワーは最も高い。さらに図5は、運動強度と持続時間、そしてパワーの算出時間を考慮して、各種身体運動の出力パワーを整理したものである。やはり、跳躍の出力パワーが最大となる。

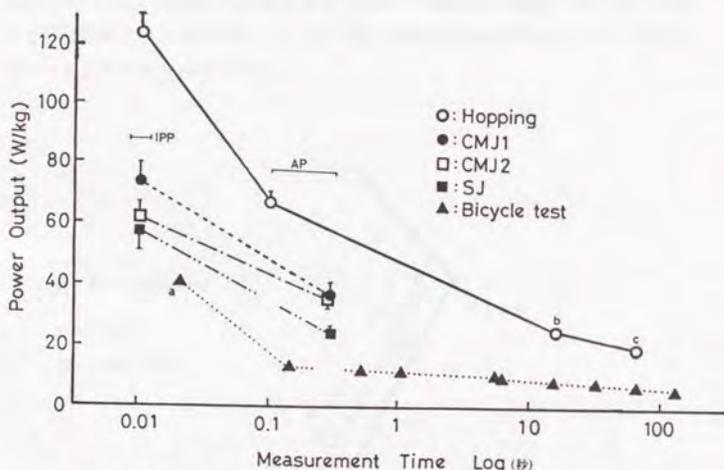


図5. 各種瞬発性運動におけるパワー算出時間とパワー値の関係(深代1992)
 ※垂直跳躍のデータは、Fukashiroら(1991)により、bとcのみBoscoら(1983)による、自転車ペダリング(▲印)は、aがDaviesら(1982)、他は中村ら(1984)がまとめたものを引用。
 ※IPP: 瞬時パワー、AP: 平均パワー

※同じ種類の運動でも、短時間で強度が高いほどパワーが大きく、逆に長時間で強度が低いほどパワーが小さくなる(例えば、両足そのば連続跳躍:Hoppingでのbとc、自転車ペダリング:▲印)。また、運動の種類と強度が同じでも、パワーの算出時間を変えれば、値も異なる。例えば、Hoppingの瞬時パワーは約125W/kg(図中のIPP、測定時間0.01秒)、平均パワーは約50W/kg(図中のAP、0.1秒)である。

運動を起こす力発生源(force generator)は筋自体であるが、ダイナミックな運動では、筋と骨格を直列につなぐ腱も大きな役割を果たす。つまり、跳躍の大きな出力パワーを支えているのは、筋と腱の連合組織「筋・腱連合組織: muscle-tendon complex system」であるといえる。図6は、足関節と足関節底屈に働く下腿三頭筋のモデルである。足関節を底屈させようとする場合(矢印a)、まず筋が短縮し(b)、同時に筋と直列につながるアキレス腱が伸張され(c)、その後筋の力が骨格に伝えられる(d)。腱組織には、引き伸ばされると縮もうとする「バネの働き」

がある。人間のほとんどの運動は、主運動に先行して逆方向に運動する反動を用いる。この逆方向の運動によって、強制的に引き伸ばされた腱に弾性エネルギーが蓄えられ、次の主運動の時に利用される。反動動作を伴う場合に大きな出力パワーを発揮できるのは、この弾性エネルギーの働きによると考えられている (Cavagna 1977, Komi 1984)。反動動作を伴う典型的な運動が「跳躍」である。したがって、跳躍の大きな出力パワーは、筋と腱の両組織の相乗効果によって、形成されていると考えられるのである。

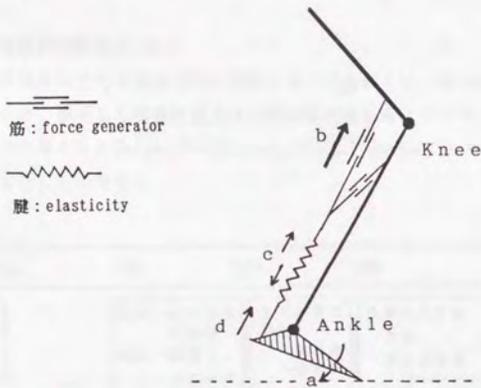


図6. リンクセグメントにおける筋と腱のモデル

第2節. 跳躍の研究小史

跳躍動作そのものは、ヒトが直立歩行を始めた時とほぼ同時に可能になったと推定できるが、跳躍を自然科学的な目で観察し、あるいは身体運動の評価手段として用いるようになったのは、20世紀に入ってからである。その先駆的な論文は、身体の発揮パワーの評価手段としての垂直跳の研究であった。ここでは跳躍を、垂直跳、立幅跳、走幅跳・三段跳、走高跳・棒高跳に分けて、それぞれの研究の流れを概観することにする。

1. 垂直跳の研究史(図7)

その場から全力で垂直方向に跳躍する「垂直跳」は、体力テストの1項目として親しいが、拳手した指先の直立時と跳躍時の差をもってパフォーマンスとする方法は1921年にD. A. Sargentが考案し1924年にL. W. Sargentがパワーのテストとして発展させたものである。

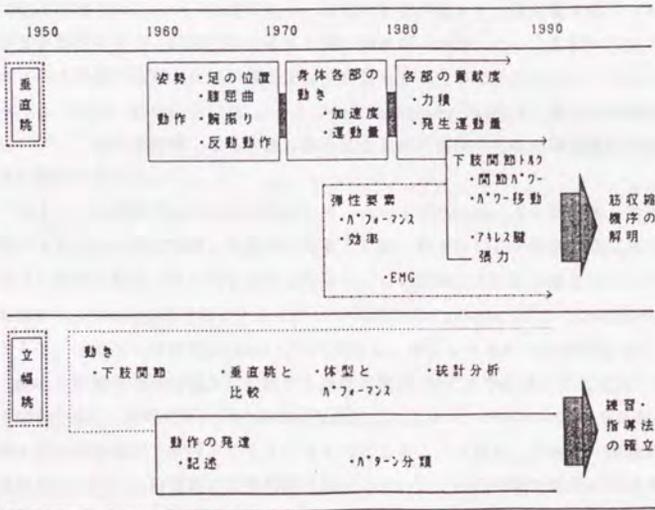


図7. 垂直跳と立幅跳の研究の流れ(深代1990)

垂直跳は1960年代から科学的な研究が多くみられるようになったが、その頃の研究視点は踏切における構えの姿勢や各種踏切動作が跳躍高に及ぼす影響といったことであった。例えば、構えた時の足の前後・左右の位置は15~20cmの円周上に足を置くとより大きな跳躍高が得られる(Martinら1969)。また踏切動作の中で、下肢の屈曲の最適膝角度は80~90度(金原1960)であり、それは腕の振り込み動作の有無に関わらない(岩田1969)といった研究である。

1970年代には踏切動作を身体各部の運動量や加速度でみようという試みがなされている。腕の振込動作によって約10%の跳躍高の増大が認められる(Luhtanenら1978)が、その時の腕の加速度は身体重心の加速度(2G程度)に比べて、瞬間的に3~5倍(5~10G)にもなる(小林1974)。Hay(1976)は踏切時の身体各部の速度と跳躍高との相関関係を調べ、腕の振りや上体の起こしが速いほど跳躍高が大きいくことを報告している。

1970年代後半から、各動作の跳躍高に対する相対的貢献度をみるという研究が始められている。その方法は2つに大別され、腕振りなし・反動なしといったように動作を制限して行う方法：動作制限法(Luhtanenら1978)と、何の制限もなく動作を行い身体各部の運動量や慣性力でみる方法：動作非制限法(小林1974、Millerら1976、Luhtanenら1978)である。後者は評価が難しく、運動量や慣性力で貢献度を算出すると、跳躍の中心となる脚の動きが‘速度’という変数に反映されず、身体各部が発揮した運動量を正しく見積もることができないという欠点がある(Hayら1976、Millerら1976)。そこでAeとShibukawa(1980)は、動作非制限法において、‘発生運動量’なる変数の導入による身体各部の正味の運動量の評価方法を提示している。

こういった運動学的な研究と平行して、1974年のAsmussenらの垂直跳と筋の弾性エネルギーの研究以来、垂直跳を対象とし筋・腱連合組織の弾性要素に焦点をあてた研究が数多く行われるようになった。この研究に主に取り組んできたのは、MargariaとCavagnaを中心とするイタリア生理学者(Cavagna 1977)とKomiを中心とするフィンランドの研究者(Komi 1984)である。弾性エネルギーの再利用とは、筋・腱連合組織が伸張後直ちに短縮する運動の場合(例えば垂直跳の反動動作における脚伸筋群)、筋伸張時に弾性要素に機械的なエネルギーが蓄えられ、それが次に続く筋の収縮局面で利用されるというものである。この説は、走運動の機械的効率が40%を越える(摘出筋の短縮効率は高々22~25%)ことの説明を弾性エネルギー再利用に求めた1964年のCavagnaの論文以来、改めて注目されていた。跳躍は反動動作を伴うことから、身体運動における弾性エネルギー研究には、最適な動作といえる。逆にいえば、弾性エネルギー研究のために跳躍そのものの機序が明らかにされてきたともいえる。

跳躍に関する弾性エネルギーの研究は、まず身体全体(質点)を対象とした方法で、反動動作を伴うことによる①機械的効率の増大(最大下強度)と②パフォーマンスの増大(最大強度)という2方向からの接近方法が上げられる。連続跳躍の効率研究①としては、Thysら(1975)、船渡ら(1980)、Boscoら(1982b)、Fukashiroら(1983b)などがあり、効率値(30~58%)はピッチが速く重心変位が小さいほど高い(反動を伴う場合でも重心変位が50~70cmと大きい場合、効率は23~26%と低くなる)。一方、反動動作による跳躍高の増大②は、Asmussenら(1974)、Komiら(1978)などの研究にみられる。それらによれば、反動効果を引き出すのに適した負仕事(飛び降りる台の高さにすると40~60cmが最適)があり、反動を用いない跳躍に比べて最大で3~6cm程度の跳躍高の増大が認められるとしている。

跳躍の弾性エネルギー研究は、上記のように身体全体を観察するというところから、徐々に筋や腱それ自体に注目する方向に進んできている。跳躍の主筋筋の筋放電量から弾性エネルギーの貢献度を調べようとしたものに、Boscoら(1982a)や伊藤ら(1987)の研究がある。両報告とも、反動動作によるパフォーマンスの増大が筋放電量からでは説明しきれず、弾性要素の関与が大きいことを示唆している。

さらに最近では、下肢3関節のトルク研究から跳躍中の筋・腱連合組織の動態をみようとする研究が、オランダ・フリー大学を中心としたグループによって数多くなされている(Bobbertら1986abc, 1988、van Ingen Schnauら1985、van Soestら1985)。例えばBobbertら(1986b)は、垂直跳における足関節の動きに注目し、パフォーマンスに対する足関節伸展パワーは①筋線維の貢献が30%、②腱の貢献が45%、③パワーの移動による貢献が25%と推定し、垂直跳のパフォーマンスにとって弾性による反動とパワーの移動が極めて重要であると結論している。

その後、跳躍中のアキレス腱張力を直接測定するという研究(Komiら1987)も出現し、垂直跳の研究方向は「跳躍を通した筋・腱連合組織の機序の解明」に進んでいるといえる。

2. 立幅跳の研究史

立幅跳に関する研究は、前述の垂直跳と比べるとかなり視点が異なり、動きや筋の活動機序というよりもむしろ「動作の発達」という観点からのものが多い。立幅跳の動作そのものについての研究としては、年代順に、下肢関節の動き(Zimmerman 1956)、垂直跳との動作比較(Eckert 1964, 1968)、体型とパフォーマンスの関連(Weber 1973)、跳躍動作の調節(大塚ら1979)があげられるにとどまる。

動作の発達をみるという観点では、他の跳躍と比較にならないほど、立幅跳を対象としたものが多い。その理由は、人間の跳躍動作が立幅跳に始まることもあ

るが、動作の方向が垂直方向だけである垂直跳に比べて、水平方向にも移動する立幅跳は動きの可動範囲が大きく、動作を観察しやすいという特長があげられよう。

立幅跳の動作発達に関する研究をたどると、1961年のHellebrandtらの研究に行き着く。その研究には、跳躍が可能になる2歳頃から成人した大人までの、立幅跳の動作パターンが描かれている。彼らは特に、3歳以後にみられる踏切での頭部の積極的な背屈運動の重要性を指摘している。その後Royら(1973)は、立幅跳の動作パターンが7歳において完成され、その後の跳躍能力の増大は身体資源の量の増大であると結論している。森下(1977)も、2歳から6歳にかけて踏切動作での腰・膝関節の運動範囲が著しく増大し、6歳の時点で両足同時踏切が確立されるとしている。また宮丸(1976)は、腕の振込動作を観察し、3歳頃は腕を逆(後方向)に動かし、5・6歳頃は腕がバランスを保持する平衡器として働く。そして10歳以後に運動量を増すための推進器として用いられる、と報告している。こういった動作の個々の観察に加えて、最近ではそれぞれの動作のパフォーマンスに対する相対的な貢献度を統計的手法(重回帰分析)によって調べようとする研究(湯浅ら1984)もみられる。

立幅跳を発育・発達の観点からとらえると、今後の研究課題は、実際の指導にフィードバックできる「練習方法とその効果」を客観的に調べることでありえる。

3. 走幅跳・三段跳の研究史(図8)

走幅跳における運動学的・運動力学的な研究は1950年以降盛んに行われてきた。Hay(1975, 1986)のレビューによれば、それらの研究の視点は、助走におけるピッチや速度の変化、至適助走速度、踏切における初速度ベクトル、そして踏切時の地面反力などである。これらの研究の主なまとめ方は、パフォーマンスである跳躍距離と各種変数との単相関をみるといった方法である。跳躍距離には助走速度が強く影響しており、したがって走幅跳では速い助走速度がまず重要で、それを基に踏切の効果的動作を獲得することが望ましいといえる。その後、単相関だけではなく、跳躍距離を従属変数とし各種変数を独立変数とした多変量解析で相対的に処理しようとする研究もみられる(Hay 1976、深代ら1984)。

走幅跳の研究は、バイオメカニカルな多変量を統計処理し集団の傾向をつかむという研究から、個人に焦点をあてた分析に進みつつある。個人に注目した典型的な研究は、1984年のロサンゼルス・オリンピックにおける走幅跳の試技の分析(Hayら1985, 1986)がある。これは最高のパフォーマンスを発揮した試技のバイオメカニカルな特徴を、特に個人差に着目して観察しようとするものである。集団

の傾向を把握した上で個人の特徴をみるという方向は、個人に適した動作を探る、つまり競技力向上へのフィードバックという観点からみると、不可欠であるといえる。

これら実際の動作を客観的に評価・確認する研究と平行して、跳躍をシミュレーションする研究が増えてきている。空中動作、特に回転運動についての研究(Ramey 1973, 1974, Herzog 1986)や、踏切動作のシミュレーションを練習に応用した研究(Hatze 1981, 1983)などがあげられる。また特殊な研究として、標高や風の影響によって走幅跳の記録がどのように変化するかといった検討もなされ(Ward-Smith 1984, 1986)、ピーモンの高地での世界記録(8m90)が再評価されている。今後この分野の発展は、応用科学としてのバイオメカニクスという観点からみると、極めて興味深いといえることができる。

一方三段跳は、その研究の歴史が浅く、跳躍研究を1975年に総括したHayの論文には、三段跳の一節は設けられていない。その後、三段跳の研究については、運動学的な変数(Fukashiroら 1981, 1983a)や地面反力(Ramey 1985)が分析されているにとどまる。

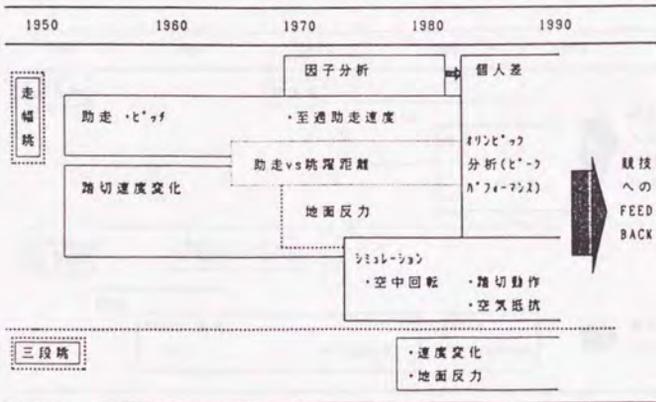


図8. 走幅跳と三段跳の研究の流れ(深代1990)

4. 走高跳・棒高跳の研究史(図9)

走高跳と棒高跳は、ともに助走後の跳躍で、跳び越えたバーの高さがパフォーマンスとなる。この両跳躍は、跳躍動作や使用器具の改良によって歴史的に大きく変遷してきた。つまり、走高跳は「背面跳の導入」により、棒高跳は「グラスファイバーボールの開発」によって、大きく記録が向上してきたのである。

まず走高跳であるが、現在ほとんどの選手が用いる背面跳は、1968年にD. Fosburyがオリンピックに優勝して以来、世界的に普及したものである。走高跳の研究の流れも、前述の走幅跳にきわめて類似している。1970年代から、助走速度や踏切そしてクリアランス動作の研究がなされ(松井ら1974、Dapena1980a, b)、背面跳の運動学的な特徴が明らかにされた。阿江ら(1980)は、踏切中の動作を①回転動作、②振上動作、③屈伸動作の3つに分けて整理している。さらに阿江(1988)は、身体各部の貢献度(垂直方向の力積に対する比率)を助走の歩数を1, 3, 5, 7歩と変えた場合の踏切について求めている。それによれば、踏切脚の貢献がきわめて大きく、一方の振上脚の貢献は7歩助走でわずか4~5%であるという。この結果から、彼は振上動作が踏切全体のバランスをくずすほどに強調されるべきでないと述べている。

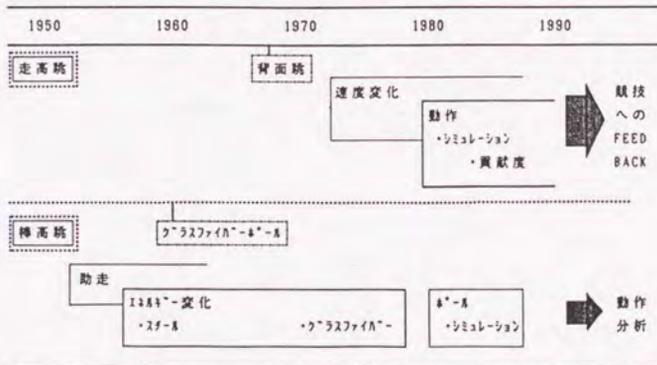


図9. 走高跳と棒高跳の研究の流れ(深代1990)

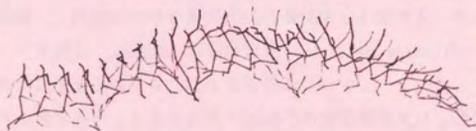
走高跳の運動力学的な研究は意外に少なく、小林(1978)が地面反力を力学モデルとして分析しているにとどまる。また、走幅跳同様、走高跳動作のシミュレーション研究(Dapena 1978, 1981)が空中の回転動作やフォームの改善といった観点からなされており、その中には、踏切離地時までの条件はすべて同じであっても、空中フォームを変えるだけで2m08から2m14へと6cmの記録の増大が見込まれるという興味深い研究もみられる。

棒高跳は1960年以降現在のグラスファイバーポールが使用されているが、棒高跳は水平速度を高さに変えるという種目特徴から、機械的エネルギーの観点からの研究が多い。1960年以前のスチールポールの跳躍についてのFletcherら(1960)の研究、そしてDillmanら(1968)、Hay(1971)の研究がそれである。また最近では、ポールの硬度や握りの位置を変化させた場合のポールの動きをシミュレーションするといった研究(Dapenaら1983)もみられる。

第3節．本研究の目的

跳躍は、人間の多種多様な運動の中でも、最も大きな機械的パワーを発揮できる、ダイナミックな運動といえることができる。本研究の目的は、「跳躍動作からみた筋・腱連合組織のダイナミクス」を明らかにすることである。本論は、次の3章によって構成される。まず、陸上競技の世界一流選手の跳躍について検討し、跳躍における筋・腱連合組織の働きを巨視的に観察する。世界一流選手の踏切動作には、遺伝的・環境的に最もすぐれた動作が表出されていると考えられるからである。次に、垂直跳を対象にした実験室テストによって、跳躍動作を支える筋・腱連合組織を直視して、その動態を微視的に検討する。そして最後に、跳躍動作の獲得について、発育・発達観点から検討する。

DYNAMICS OF LONG
& TRIPLE JUMP



第1章

陸上競技における跳躍動作の ダイナミクス

ヒトの自然な動作は、左右交互動作(Reciprocal motion)であり、最も典型的な動作として歩や走動作があげられる。助走後の片脚踏切である陸上競技の走幅跳と三段跳は、自然な走動作に引き続いて行われるダイナミックな運動ということができる。走幅跳と三段跳の踏切での地面反力は、平均値で体重の約5倍、瞬時値で体重の8~12倍に達する(RameyとWilliams 1985)。また、LuhtanenとKomi(1980)は、歩・走・走幅跳・三段跳における接地局面の身体重心の動きを、モデルを用いた「バネ係数」で比較し、走幅跳の踏切の負相(eccentric phase)のバネ係数が、全力疾走の走動作の46倍もの値となることを報告している。

陸上競技における競技選手、しかも世界一流選手の踏切動作には、遺伝的・環境的に最もすぐれた動作が表出されていると考えられる。したがって、世界一流選手の踏切動作の解析は、跳躍における筋・腱連合組織の最もダイナミックな動態を、巨視的に観察することになる。

本章の目的は、走幅跳の3次元解析(1993年現在の男子走幅跳の世界記録:8m95の動作を含む)によって走幅跳の踏切動作を明らかにすること、また三段跳の2次元解析で3回の連続跳躍の特徴を明らかにし、それを基に三段跳の世界記録:18mを跳躍するために必要な力学的変数を推定することである。

第1節 走幅跳における踏切動作の3次元解析

1. 研究目的

走幅跳は、これまで多くの研究が行われてきたが、それらは矢状面(Sagittal plane)から身体重心(Center of gravity)を観察したものであった(Hay 1975, 1986a)。走幅跳は、助走路に沿った直線的な運動であることから、最も移動距離の大きい矢状面の2次元解析において、身体の移動を代表できる重心に注目しようとしたからである。この研究方法は、最近の世界一流選手の競技会の試技の解析(Hayら1986、IAAF 1990)でも同様である。

しかし、走幅跳の踏切で重心の移動方向を変化させる動作についてみると、矢状面では観察できない身体の捻りが大きな役割を果たしていると考えられる。踏切動作の捻りを観察するには、3次元解析によらなければならない。

本研究の目的は、走幅跳における世界一流選手の踏切動作を3次元解析し、動作の特徴を明らかにすることである。

2. 研究方法

解析の対象とした走幅跳の撮影は、第3回世界陸上競技選手権大会の、男子走幅跳の決勝(東京・国立競技場、1991年8月30日19:30～、天候:曇、気温27℃、湿度83%)において行われた。

(1)対象選手

表1-1-1に、男子走幅跳の上位8選手のそれぞれの最高記録、解析試技の記録、および身長と体重を示した。解析対象は上位7名とした。

(2)動作の撮影

動作の撮影は、16mm高速度カメラ(Photo-Sonics社製)とハイスピードビデオ:HSVカメラ(NAC社製)を用い、側方から16mmカメラ1台とHSVカメラ1台、斜め前方から16mmカメラ1台の計3台の固定カメラ(図1-1-1)によって撮影した。16mmカメラは毎秒100コマ、HSVは毎秒200コマに設定した。側方と前方の16mmカメラは、フェイズロック(NAC社製)によって、フィルムが1コマごと完全に一致する。

キャリブレーションは、図1-1-2に示すように助走路からピットまでの間で座標系をつくり、競技会の前後に2回撮影した。

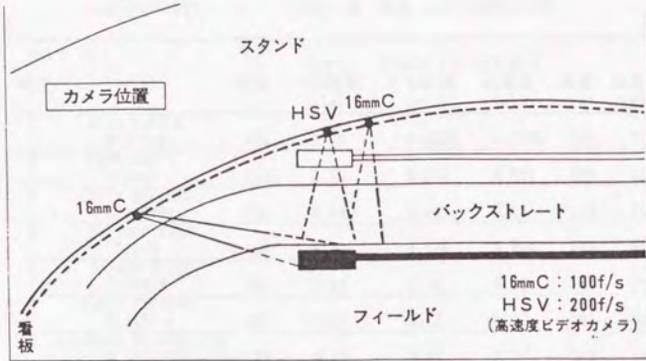


図1-1-1. 走幅跳撮影におけるカメラの位置

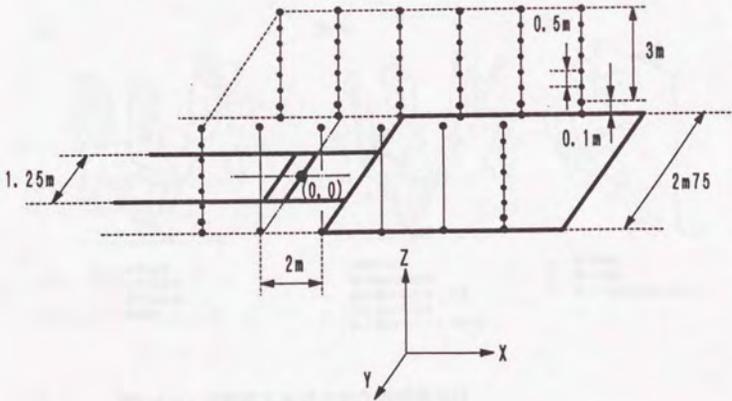


図1-1-2. 3次元解析のためのキャリブレーション

表1-1-1. 男子走幅跳の競技記録・分析試技と選手の形態

1991年8月30日

天候：曇 気温：27℃ 湿度：83%

順位	名前	国名	従来の ベスト記録 (m)	世界陸上の ベスト記録 (m)	分析試技 の記録 (m)	身長 (cm)	体重 (kg)
1	Mike POWELL M.ハウエル	USA	8.66	8.95WR	8.95WR	188	77
2	Carl LEWIS C.ルイス	USA	8.79	8.91W	8.91W	188	79
3	Larry MYRICKS L.マイリックス	USA	8.74	8.42	8.42	188	85
4	Dietmar HAAF D.ハーフ	GER	8.25	8.22W	8.22W	173	65
5	Bogdan TUDOR B.トゥドール	ROM	8.02	8.06	8.06	186	78
6	David CULBERT D.カールバート	AUS	8.13	8.02	8.02	191	85
7	Giovanni EVANGELISTI G.エヴァンジェリスティ	ITA	8.43	8.01	8.01	179	70
8	Vladimir OCHKAN V.オチカン	URS	8.34	7.99W	-	180	73

※ WR:世界記録、W:追風参考



図1-1-3. 走幅跳における動作の観察項目

(3) 動作解析

得られた2方向からのフィルムとビデオテープを基に、DLT法(池上1983)を用い、モーションアナライザー(NAC社製)によって、身体各部の3次元座標を構築した。身体重心の移動は、松井(1958)の身体部分質量を考慮して算出した。データは、10Hzのデジタルフィルターによって平滑化した。

観察した項目(図1-1-3参照)は、以下のとおりである。

- ① 身体重心の変位と速度(RV, X1, Z1, α)
 - ② 肩と腰の回転と捻り(a, b, a·b)
 - ③ 体幹の傾き(c)
 - ④ 踏切脚の動き(d, e1, e2)
 - ⑤ 振上脚の動き(f)
- ②の肩と腰の回転は、真上からみた横断面についての解析であるが、この回転は、右足踏切と左足踏切で逆のパターンになるので、すべて右足踏切に修正し統一した。また、各選手の横断面の跳躍方向(以後、「移動角」とする)を考慮して、踏切線の横断面の垂線(x方向)に対する回転角度ではなく、選手それぞれの進行方向に対する角度に補正した。上体の捻り(a·b)は、a肩とb腰の角度差として表した。③～⑤は側面からみた矢状面の角度である。

踏切中の平均加速度ベクトルは、以下のように、踏切接地時と離地時の速度差(前後・垂直方向)を踏切時間で除し、重力加速度を考慮して算出した(Fukashiroら1981)。

$$Ax = (X2 - X1)/t$$

$$Az = [(Z2 - Z1)/t] + G$$

ただし、Ax:前後方向の平均加速度ベクトル、Az:垂直方向の平均加速度ベクトル、G:重力加速度、t:踏切時間、X1:踏切接地時の前後方向の速度、X2:踏切離地時の前後方向の速度、Z1:接地時の垂直速度、Z2:離地時の垂直速度。

(4) 統計分析

各変数間の相関関係は、危険率5%をもって有意とした。

3. 結果と考察

競技成績1位のパウエルは、23年ぶりの世界新記録:8m95を跳躍し、第2位のルイスも追い風参考であるが8m91であり、競技水準の高い大会であった。ここでは、特にこの上位2名に注目していくことにする。

(1)踏切における重心の変位と速度

助走速度(踏切足接地時の重心の前後方向の速度、図1-1-3のRV)は、先行研究(松井ら1983)と同様、跳躍記録と有意性の高い相関関係($r=0.94, p<0.01$)が認められた(表1-1-2、図1-1-4)。第1位のパウエルと第2位のルイスの助走速度は、11 m/秒で同レベルであった。ルイスの助走速度は、1985年全米選手権(跳躍距離:8m 79、助走速度:11.1m/秒)(Hayら1986)と1988年ソウルオリンピック(各々8m72、11.0m/秒)(IAAF 1990)と同様であり、ルイスは100mの最高速度:12m/秒(阿江ら1992)の92%で踏切に入っていることになる。この助走速度は、踏切動作を調節するため、最大でも走能力の95%程度(Jarver 1970)といわれている。

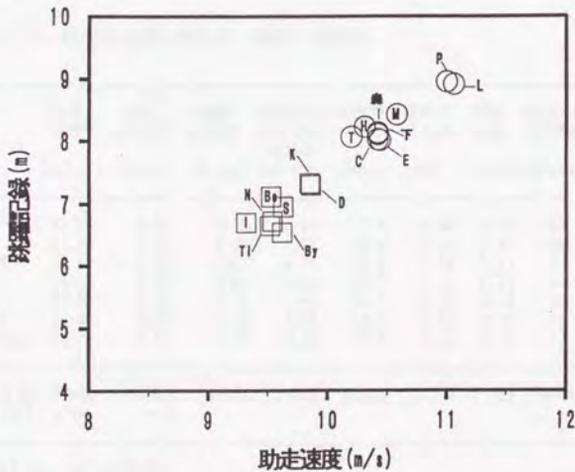


図1-1-4. 助走速度の跳躍距離の相関関係

※図中の記号、P:パウエル、L:ルイス、M:マイケル、H:ハート、T:グッド、K:カーター、D:ドクスター、B:ベリス、S:セリ、I:イシ、N:ニノ、By:ベリス、E:エリス、F:フェリス、C:チェリス、T:トリス、I:イリス、N:ニリス、By:ベリス

踏切初速度の前後方向の成分は、8.60~9.72m/秒の範囲で、Hayら(1986)の全米選手権(8.5~9.5m/秒)やIAAF(1990)のソウルオリンピック(8.1~9.5m/秒)の結果に対して、比較的高い値を示した。垂直方向の初速度:3.13~3.70m/秒も、やはり全米選手権(3.0~3.6m/秒)やソウルオリンピック(2.9~3.5m/秒)の結果よりも高い値であった。

踏切初速度の前後方向(x)と垂直方向(z)の割合(x/z)は、2.44~3.02の範囲にあり、平均で2.62であった。これは、Hayら(1986)の全米選手権の解析結果:2.7と近い値であった。この割合は、ルイス(3.02)が最も大きく、パウエル(2.45)は最小値に近かった。すなわち両者は、全く同じ助走速度をもちながら、踏切動作によって、高い跳躍(パウエル:跳躍角:23.1°)と低い跳躍(ルイス:18.3°)に分かれることになる(図1-1-5)。世界一流選手の跳躍角が18~23°の範囲(全米選手権:18.7~22.8°:Hayら1986、ソウルオリンピック:17.9~23.3°:IAAF 1990)にあることを考慮すると、この両者は、跳躍角について一流選手の両極に位置するといえる。

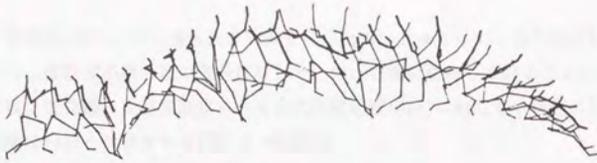
表1-1-2. 踏切中の重心の変位・速度・加速度

氏名	助走 速度 (m/sec)	水平 初速度 (m/sec)	垂直 初速度 (m/sec)	踏切中の 水平速度 の減少 (m/sec)	跳躍角 (X,Z) (deg)	移動角 (X,Y) (deg)	踏切 時間 (sec)	踏切中の加速度 :絶対値 :角度 (m/s*s) (deg)
パウエル	11.00	9.09	3.70	1.91	23.1	-1.39	0.12	43.6 111
ルイス	11.06	9.72	3.22	1.34	18.3	3.34	0.12	38.3 107
マイックス	10.58	8.82	3.57	1.76	22.2	2.82	0.11	45.2 111
ハーブ	10.31	8.80	3.61	1.51	22.6	-3.11	0.11	44.8 108
マトル	10.20	8.60	3.47	1.60	22.2	1.28	0.12	40.9 109
カルハート	10.42	8.85	3.13	1.57	18.9	-0.01	0.12	38.2 110
インジエリステイ	10.44	8.91	3.40	1.53	20.9	0.60	0.11	43.0 109
跳躍記録との 相関係数(n=7)	0.938 **	0.758 *	0.248	0.214	0.005	0.179	0.351	0.002 0.070

※ * : P<0.05 , ** : P<0.01

※ 移動角(X,Y)は、進行方向に向かって右方向がプラス、左方向がマイナスで表示してある。

踏切中の前後方向の速度の減少は、本研究では1.34~1.91m/秒の範囲にあり、Hayら(1986)の報告:1.1~2.1m/秒や、IAAF(1990)の報告:1.1~1.8m/秒と同様の値であった。パウエルは、踏切において前後方向の速度を大きく減少させても(-1.91m/秒)、大きい垂直初速度(3.7m/秒)を得ようとしていた。パウエルの跳躍は、空中の重心の最高点が1m94にも達した(垂直初速度と跳躍角の間にはr=0.96という有意な相関がある)。これに対して、前後方向の速度の減少が最も少ないのは、ルイスの-1.34m/秒で、前後方向の初速度が最も大きい。



パウエル動作・側方

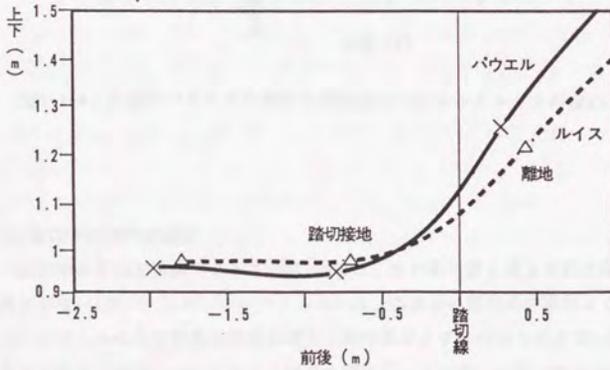
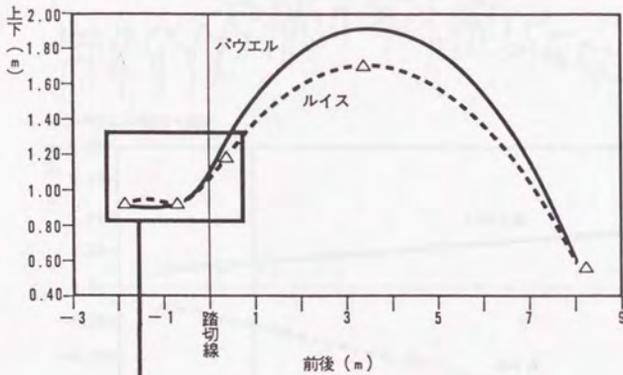


図1-1-5. 矢状面におけるパウエルとルイスの身体重心の軌跡

移動角(表1-1-2)で最も大きい値を示したのは、ルイスで、右方向に 3.34° であった。横断面の踏切線の垂線に対して、52cm右横に着地していることになる。これは、踏切線の垂線で測定される公式跳躍距離:8m91に対して、実際の斜辺の跳躍距離は8m93と計算される(図1-1-6参照)。

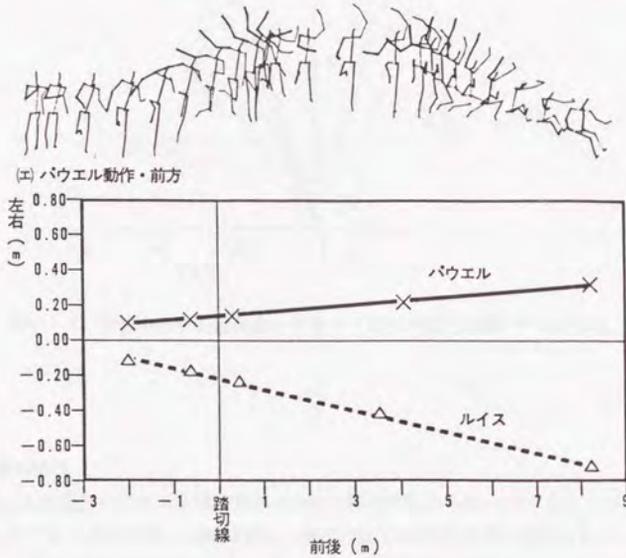


図1-1-6. 正面のパウエルの動作と横断面のパウエルとルイスの重心の軌跡

(2) 踏切中の平均加速度

踏切中の平均加速度ベクトル(図1-1-7)は、その絶対値も傾きも跳躍距離と相関関係がない(表1-1-2)が、このベクトルには、各選手の踏切の特徴がよく表れていた。ベクトルの角度が最も垂直に近く、絶対値が小さいのはルイスで、踏切で大きな地面反力を受けることなく、前方へ踏み切っていた。一方パウエルは、ベクトルを最も後傾させ、絶対値も大きい。つまり、踏切で、大きな地面反力を後方へ向けて働かせ、跳躍角を大きくしようとしているのである。

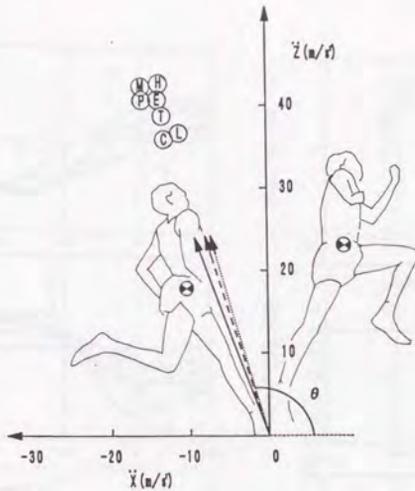


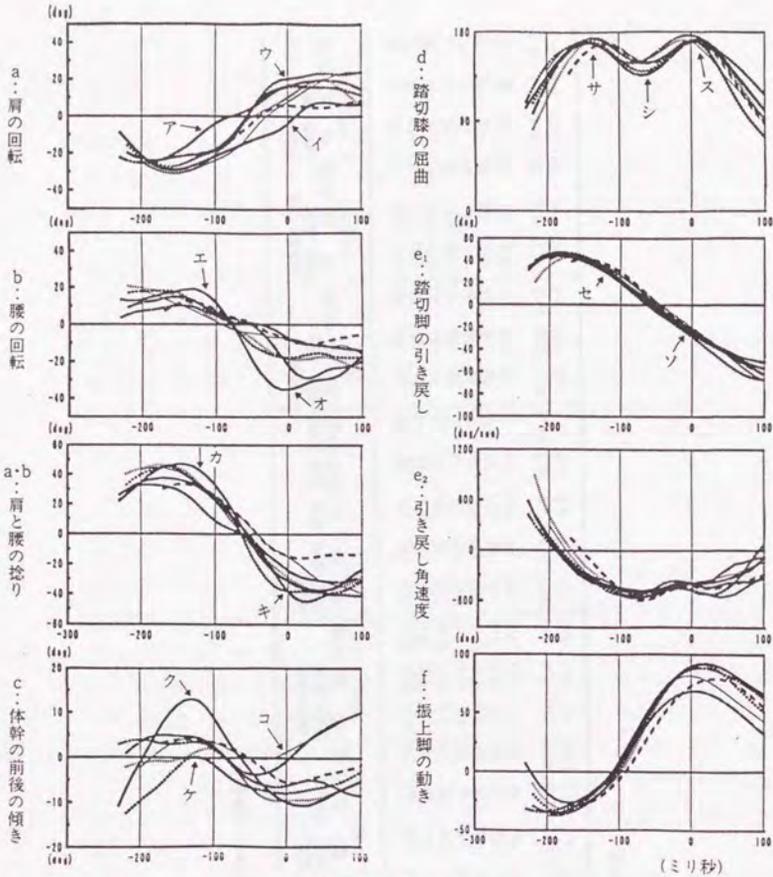
図1-1-7. 踏切中の平均加速度ベクトル—図中の記号は図1-1-4と同様.

(3) 踏切動作

重心の投射方向を決める踏切動作(a~f)の経時的变化を図1-1-8に示した。8項目全体では、a肩の回転、b腰の回転、c体幹の傾きの3項目の個人差が大きく、下肢の動き(d~f)は体幹の動きに比べると相対的に個人差が小さいといえる(表1-1-3)。

a肩の回転：通常、右足踏切では、右肩を後ろに引いた姿勢で接地し、踏切中に肩を回転させて右肩を前に出しながら離地する。接地時では、1名(ツドル:-10° 図中の矢印7)を除き、-20°程度右肩を後ろに引いている。離地では-4~20°とかなり個人差が大きい。右肩を引いたまま離地しているのはパウエル(4)で、逆に最も右肩を前に出しているはルイス(9)である。踏切中の肩の回転が最も大きいのはルイスの $\Delta 40^\circ$ で、一方最も小さいのがパウエルの $\Delta 21^\circ$ であった。

肩の回転について他の変数との相関関係をみると、離地時の肩の角度と跳躍角($r=-0.76$)、踏切中の肩の回転と跳躍角($r=-0.89$)、同じく肩の回転と垂直初速度($r=-0.83$)の間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。この結果は、踏切中に肩を回さず、踏切離地時に肩を前に出さない方が、高く跳躍できるということを意味している。



- パウエル
- ルイス
- マイリックス
- ハーフ
- ツドル
- カルバート
- エンジェリステイ

図1-1-8. 踏切動作の経時的变化—動作は図1-1-3参照。

表1-1-3. 踏切接地時と離地時の動作(図1-1-3参照)

	肩の回転		腰の回転		捻り		体幹の傾き		膝屈曲		引き戻し		引き戻し速度		振り上げ											
	接地 ①	離地 ②	接地 ③	離地 ④	接地 ⑤	離地 ⑥	接地 ⑦	離地 ⑧	接地 ⑨	離地 ⑩	接地 ⑪	離地 ⑫	接地 ⑬	離地 ⑭	接地 ⑮	離地 ⑯										
1L	-25	-4	18	-35	53	31	74	12.7	-9.9	22.6	171	148	171	23	23	31	-23	53	-412	-409	3	-9	89	88		
2R	-21	20	42	10	-18	28	-32	38	70	0.2	-7.8	8.0	165	140	171	25	32	33	-29	61	-476	-481	5	-14	90	105
3R	-24	10	34	4	-19	23	-28	29	57	2.2	-9.4	11.6	170	149	172	22	23	31	-20	51	-407	-464	57	-10	90	99
4L	-19	6	25	10	-9	18	-29	14	43	3.7	-5.5	9.2	167	148	171	19	23	34	-22	55	-388	-421	33	-13	73	86
5L	-10	16	26	8	-23	30	-18	39	56	3.5	-6.1	9.6	162	148	177	14	29	29	-26	55	-427	-391	36	-8	87	95
6R	-20	16	37	10	-8	18	-30	24	55	4.4	-0.6	5.0	163	138	170	27	34	30	-25	55	-434	-382	52	-10	68	79
7R	-25	8	33	3	-7	11	-29	15	44	4.0	1.4	2.6	169	150	172	19	22	30	-23	53	-408	-387	21	-9	82	90
σ	-20.7	10.3	31.0	9.0	-16.9	25.9	-29.7	27.2	56.9	4.4	-5.4	9.8	166.7	145.4	171.9	21.3	26.5	31.0	-23.8	54.7	-422	-419	30	-10.4	82.8	93.2
SD	4.9	7.5	6.7	4.4	9.3	12.5	6.7	9.2	10.8	3.6	4.0	5.9	3.3	4.9	2.0	4.0	4.4	1.6	2.6	2.8	26	36	20	2.2	8.2	8.1

*R:右脚着地、L:左脚着地、σ:回転と捻りは右脚(R)着地に統一

b腰の回転：腰は、肩とは逆に、右足踏切の場合、振上脚側の左腰を後ろに引いた姿勢で踏切に接地し、踏切離地では振上脚とともに左腰を前に振り出す。踏切接地時の角度の最大はパウエルの 18° (i)で、それを除くと $3\sim 10^{\circ}$ の範囲にあった。一方離地の角度の最大もパウエル(-35° (j))であり、パウエルの踏切中の腰の回転($\Delta 53^{\circ}$)は、他の6選手($10\sim 30^{\circ}$)の約2倍の値を示した。

a・b肩と腰の捻り：a肩とb腰の角度差：上体の捻りは、平均でみると、接地時： -30° 、離地時： 30° であった。接地時での最大角度は、パウエルの -42° (h)で、他の選手(-30°)よりも大きかった。一方、離地時の角度は、 $14\sim 39^{\circ}$ の範囲にあり、パウエルが 31° 、ルイスが 38° (k)であった。

踏切中の捻りの大きさ(Δ)は、パウエル($\Delta 74^{\circ}$)とルイス($\Delta 70^{\circ}$)が、他の5選手($\Delta 44\sim \Delta 57^{\circ}$)よりも大きな値を示した。ただし、パウエルとルイスの上体の捻りは、その構成要素がかなり異なっている。つまり、肩の回転はパウエル： $\Delta 21^{\circ}$ 、ルイス： $\Delta 42^{\circ}$ で、ルイスが2倍の大きさであるが、腰の回転は逆にパウエル($\Delta 53^{\circ}$)がルイス($\Delta 28^{\circ}$)の約2倍となっている。両者とも、上体の捻りを大きく使っているが、パウエルは腰、ルイスは肩というように、それぞれ特徴をもっている。

踏切中の捻りの大きさ(Δ)は、跳躍距離($r=0.86$)と助走速度($r=0.83$)に対して有意な相関関係が認められた。また助走速度と跳躍距離の間にも $r=0.94$ という有意な相関があることから、「助走速度が大きいほど、踏切中の上体の捻りが大きく、跳躍距離が大きい」という関係にあるといえる。

c体幹の前後の傾き：踏切接地時の体幹の傾きは、パウエルが最も大きく後傾(13° (l))していた。ルイスは 0° であり(m)、他の5選手は $2\sim 4^{\circ}$ の範囲であった。一方離地時の体幹の傾きは、2名(カルバート： -1° とエバンジェリスト： 1°)が直立に近く(n)、他の5選手は前に傾けていた($-6\sim -10^{\circ}$)。また踏切中の体幹の角度変位は、パウエルが $\Delta 23^{\circ}$ で、他の6選手($\Delta 3\sim \Delta 12^{\circ}$)よりも大きな値を示した。

離地時の体幹角度と跳躍距離の間には、 $r=-0.76$ という有意な相関関係があり、離地時に上体を前に出した方が跳躍距離が大きいという結果が得られた。また、踏切中の体幹角度変位と踏切中の前後方向の速度の減少の間に $r=0.77$ 、そして踏切中の体幹角度変位と腰の捻りの変化(Δ)の間に $r=0.93$ という、それぞれ有意な相関関係が認められた。この相関関係の結果は、踏切中の腰の回転が大きい方が、体幹の前後の傾きの変位も大きく、それは踏切での前後方向の速度の減少につながることを示している。つまり、踏切で前後方向の速度を減少させても高く跳躍しようという場合は、腰の回転と上体の前後動を用い、踏切で前後方向の速度を維持しようとする場合は、逆に腰と上体の動きを抑えればよいと解釈できる。

d踏切脚の膝の屈曲：踏切脚の膝の屈曲角度をみると、接地時はほぼ伸展位(平均 167°)で、踏切中に約 20° 屈曲し(平均最大屈曲位 145°)、離地に向けて伸展する(離地時の平均 172°)。パウエルは接地・最大屈曲位・離地が各々 $171\cdot 148\cdot 171^{\circ}$ 、ルイスは $165\cdot 140\cdot 171^{\circ}$ で、パウエルが膝を伸ばして高く跳躍しようとしており、逆にルイスが膝を屈曲させて前後方向の速度を維持しようとしているのがわかる。

この膝の屈曲に関して、踏切中の最大屈曲が小さいほど垂直初速度が大きく($r=0.84$)、跳躍角が高い($r=0.85$)という有意な相関関係が得られた。つまり、踏切脚の膝を曲げないようにする固定式接地：a 'locking' placement of the foot (Diachkov 1953)の方が、高い跳躍ができるというHay(1986a)の指摘を裏づける結果が得られた。

e1踏切脚の引き戻し：踏切脚の引き戻しは、個人差が小さい。接地時(平均 31°)と離地時(-24°)の標準偏差は、平均値に対してそれぞれ5%と11%である。踏切中の引き戻しの角度変化(踏切脚のスウィングの幅)は、ルイスが $\Delta 61^{\circ}$ で最も大きく、他の6選手は $\Delta 51\sim\Delta 55^{\circ}$ の範囲で差がない。このスウィング幅が大きいか、前後方向の速度の減少が少なく($r=-0.77$)、前後方向の初速度が大きい($r=0.77$)という相関関係が認められた。

e2引き戻し角速度：踏切脚の引き戻し角速度は、接地時と離地時ともルイスが最大値(各々 -476° /秒と -481° /秒)を示した。また、接地時の引き戻し角速度が小さい方が、跳躍角が大きい($r=0.81$)という結果が得られ、これは踏切脚を積極的に引き戻さない固定式接地が高い跳躍を導く(Hay 1986a)という技術を裏づけている。

f振上脚の動き：踏切中の振上脚のスウィングの幅は、 $\Delta 79\sim\Delta 104^{\circ}$ の範囲にあった。この振上脚の角度と他の変数について、有意な相関はみられなかった。なお、スウィングが最も大きかったのがルイス($-14^{\circ}\rightarrow 90^{\circ}:\Delta 104^{\circ}$)であった。

4. 結 論

第3回世界陸上競技選手権の男子走幅跳の試技を対象に、動作の3次元解析を行った。その結果、第1位のパウエルは高い跳躍、第2位のルイスは低い跳躍と身体重心の移動に特徴が表れていた。重心の移動を支える踏切動作も、両者は異なるパターンを示した(図1-1-8)。パウエルは、踏切で肩の動きを抑えて腰を回転させ、かつ体幹の前後の傾きを大きく利用していた。同時に、パウエルは踏切脚は膝を屈曲させないように固定式接地を用いて、高く跳躍していた。一方のルイスは、

第2節 三段跳における踏切動作の2次元解析

1. 研究目的

踏切脚が右・右・左、あるいは左・左・右と変わる三段跳は、左右交互動作というヒトの自然な動きから発展してきた系統発生的な動作とは異なり、人工的に作り出された「個体発生的な動作」として特徴づけられる。特に、三段跳の踏切の中のステップとジャンプは、跳び降りた後の踏切という意味で、他に類をみない動作ととらえることができ、大きな地面反力や発揮パワーが要求されるダイナミックな動作とすることができる。踏切中の地面反力は、平均値で体重の3~4倍(Fukashiroら1981)、瞬時値では体重の8~12倍(RamlyとWilliams 1985)にもなる。

本研究の目的は、三段跳の助走後半から着地までの一連の動作を高速度映画撮影し、動作の2次元解析によって、各踏切の特徴を明らかにすることである。

2. 研究方法

分析の対象とした三段跳の撮影は、順天堂大学と筑波大学の陸上競技対校戦およびそのオープン競技(1979年11月3・4日、筑波大学陸上競技場)において行われた。

(1)対象選手

対象選手は、自己最高記録が13.92~16.64mの15名である。選手の年齢は平均21.7歳(18~34歳)であり、身長は平均175.7cm(168~183cm)、体重は平均66.7kg(59~79kg)である。撮影時の各選手の最高記録(実測)は、13.78~15.33mであり、各選手のそれまでの最高記録の87~101%であった。

(2)動作の撮影

高速度16mm映画カメラ(Photo-Sonics 16-1P、Photo-Sonics社製)8台を用い、選手の動作を側面から毎秒100コマで撮影した(図1-2-1)。フィルムのコマ数は、100Hzのパルスフィルムに端に写し込むことによって校正し、さらに8台のカメラはコントロールパネル(NAC社製)を用いて1試行につき2回のイベントシグナルを入れることにより同期させた。なお、競技会の記録の他に、ホップ、ステップ、ジャンプの跳躍距離の測定を行った。本章では、3回それぞれの跳躍距離を「各跳躍距離」、3回合計の跳躍距離を「総跳躍距離」として区別する。

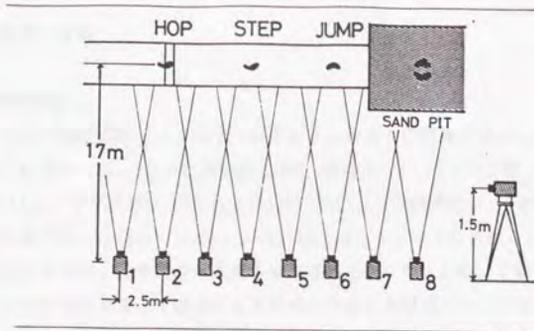


図1-2-1. 三段跳撮影におけるカメラの位置

(3) 動作解析

モーションアナライザー(NAC社製)を用いて、松井の方法(1958)により身体重心を1コマごとに算出し、5点移動平均法により平滑化した。解析試技は、15名の選手の最高記録出現試技とした。

(4) 踏切中の平均加速度ベクトル

踏切中の平均加速度ベクトルは、前節の走幅跳同様、踏切接地時と離地時の速度差を踏切時間で除し、それに重力加速度を考慮して算出した。

(5) 機械的仕事量の算出

機械的仕事量(以後外的仕事)は、機械的エネルギー(Mechanical Energy、以後ME)の変化分から、MEの減少分を負仕事、増加分を正仕事として外的仕事を算出した。MEは、身体重心の変位から得られる位置エネルギー(Potential Energy:PE)と重心の速度から得られる運動エネルギー(Kinetic Energy:前後方向:KE_x、垂直方向:KE_z)の和とした。

$$ME = PE + KE_x + KE_z$$

$$ME = mGh + mx^2 + mz^2$$

ただし、m:身体質量、G:重力加速度、h:地面からの重心の高さ、x:重心の前後方向の速度、z:重心の垂直速度。

3. 結果と考察

(1) 跳躍距離

撮影時の跳躍距離は 14.45 ± 0.46 mであり、各選手の最高記録(15.24 ± 0.91 m)より約0.8m低かった。3回の跳躍距離の割合(跳躍比)は、ホップが36.9%、ステップが29.1%、ジャンプが34.0%であった(表1-2-1)。この跳躍比は、17m以上の跳躍と同様な値であった(Nett 1970)。Nett(1970)は、フィルム分析から、ホップの比が35-37%にある時、前後方向の速度の減少は最小限に抑えられ、これ以上になると前後方向の速度が著しく減少すると述べている。本研究のホップもNettのいう至適範囲にあった。この跳躍比は、若干の個人差があるものの、三段跳に習熟している選手は、跳躍比はほぼ一定(36%:29%:35%)となるといえる。

表 1-2-1. 三段跳における運動学的諸変数、平均(標準偏差)

		HOP	STEP	JUMP
跳躍距離	(m)	5.33 (0.27)	4.20 (0.29)	4.92 (0.27)
踏切時間	(s)	0.12 (0.01)	0.15 (0.01)	0.16 (0.01)
初速度:x方向	(m/s)	8.48 (0.23)	7.76 (0.26)	6.59 (0.56)
:z方向	(m/s)	2.20 (0.17)	1.76 (0.25)	2.10 (0.32)
重心高:空中	(m)	1.29 (0.05)	1.17 (0.05)	1.30 (0.10)
:離地時	(m)	1.04 (0.03)	1.01 (0.03)	1.06 (0.04)
跳躍角	(deg)	13.4 (2.0)	13.8 (2.4)	16.8 (4.1)
空中のME	(J/kg)	48.8 (2.0)	41.8 (2.1)	35.8 (3.4)
MEの維持率	(%)	96.2 (2.0)	85.8 (4.3)	85.3 (6.5)
正仕事	(J/kg)	6.1 (1.6)	11.6 (2.9)	11.2 (1.9)
負仕事	(J/kg)	4.9 (1.7)	5.2 (1.9)	4.9 (1.6)
正パワー	(W/kg)	93.1 (31.4)	149.0 (51.0)	116.6 (26.5)
負パワー	(W/kg)	91.1 (31.4)	82.3 (29.4)	77.4 (34.3)

※MEの維持率:HOP=(HOPのME)/(助走のME)

※ :STEP=(STEPのME)/(HOPのME)

※ :JUMP=(JUMPのME)/(STEPのME)

(2) 踏切時間

各踏切時間(表1-2-1)の間には、ホップとステップ、ステップとジャンプでそれぞれ1%、5%水準で有意差があり、ホップ、ステップ、ジャンプと次第に踏切時間が長くなっている。Flynn(1973)、Klissourasら(1967)、Niggら(1973)は、走幅跳・走高跳において、踏切時間とパフォーマンスの間に負の相関関係があったことを報告しているが、有意な相関関係は認められなかった。

(3) 身体重心の垂直変位

踏切離地時の身体重心高は、ホップとジャンプにおいて差がないが、ステップはホップより3%、ジャンプより5%有意に低い。空中の最大重心高は、ホップとジャンプでは同程度の高さであるが、ステップはそれらより約10%低い(表1-2-1)。空中の最大重心高と跳躍距離の関係をみると、各跳躍距離と重心高ではホップとステップで、総跳躍距離と重心高ではステップとジャンプで有意な相関関係が認められた。つまり、ステップでの高い跳躍がパフォーマンスの増大に結びつくといえる。

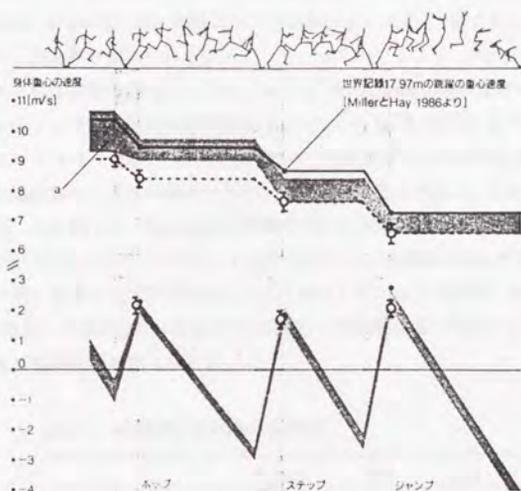


図1-2-2. 三段跳の動作図(バンクス17m97)と身体重心の速度変化

※ a: 1984年LAオリンピック決勝進出者12名の平均±1SDの範囲(MillerとHay 1985)

○: 本研究の平均±SD, ●: バンクスの世界記録の結果(MillerとHay 1985)

(4) 前後方向・垂直方向の重心の速度変化

図1-2-2に、重心の前後方向および垂直方向の速度変化の1例を示した(跳躍距離: 15m33)。前後方向の速度は踏切ごとに徐々に減少していく(表1-2-1)。ホップにおいては0.5-0.7m/s、6%前後の減少であるが、跳び降りた後の踏切という意味で三段跳の種目特徴となっているステップとジャンプでは、かなり大きな速度減少(13-18%)が認められた。MillerとHay(1986)はステップとジャンプの前後方向の速

度の減少を次のようにタイプ分けして、踏切技術を考察している。つまり、ステップよりもジャンプの方が速度減少率が大きい場合をタイプⅠ、逆の場合をタイプⅢとすると、1985年全米選手権上位4名中3名(1,2,4位)がタイプⅠ、1984年ロサンゼルスオリンピック上位6名中5名がやはりタイプⅠで、これに対しオリンピック7~12位の6名中5名がタイプⅢとなる。ここから、世界一流選手はタイプⅠの技術、つまりステップでは前後方向の速度を維持しておきジャンプでは前後方向の速度を減少させても高い跳躍をするという跳躍方法を用いる傾向がある、と述べている。さらにMillerらは、全米選手権の時のBanks, Conley, Joynerの跳躍(17.97m, 17.71m, 17.46m)よりも、オリンピックにおける彼らの跳躍はそれぞれ1.13m, 1.00m, 0.46m低いが、跳躍のタイプは変わることなく(全てタイプⅠ)、同様であったことを付け加えている。

一方、垂直速度の変化は、図1-2-2に示す通り、各踏切中はほぼ一定の割合で増加していく。踏切接地時の垂直速度はホップ(-0.5m/秒程度)に比べて、ステップとジャンプは-2~-3m/sと大きい。離地時の速度が空中の身体重心高を決めるが、垂直初速度はジャンプが最大であり、ステップが最小である。また、いわゆる‘つぶれ’の踏切では、垂直初速度が極めて小さい(深代ら1983)。

Flynn(1973)、松井ら(1973)、Niggら(1973)は、走幅跳において助走速度と跳躍距離の間に有意な相関関係があることを報告している。本研究においても、助走速度(踏切1歩前の空中の前後方向の速度)と総跳躍距離の間に $r=0.68$, $p<0.01$ という有意な相関関係が認められた。

表1-2-2. 跳躍距離と各種変数の相関係数

	HOP	STEP	JUMP
各跳躍距離 vs 踏切時間 (総踏切時間) vs -	0.314 (0.400)	0.074 (0.644)**	-0.046 (0.503)
各跳躍距離 vs 空中の重心高 (総踏切時間) vs -	0.665 ** (0.475)	0.742 ** (0.591)*	0.472 (0.575)*
各跳躍距離 vs 初速度:X方向 (総踏切時間) vs -	0.528 * (0.570)*	-0.374 (0.232)	0.725 ** (0.234)
各跳躍距離 vs 初速度:Z方向 (総踏切時間) vs -	0.516 * (0.132)	0.801 *** (0.450)	0.433 (0.419)
各跳躍距離 vs 空中のME (総踏切時間) vs -	0.675 ** (0.718)**	0.196 (0.489)	0.714 ** (0.457)
各跳躍距離 vs 正仕事 (総踏切時間) vs -	0.669 ** (0.411)	0.277 (0.232)	0.707 ** (0.516)*

※ *: $p<0.05$, $n=15$

** : $p<0.01$

*** : $p<0.001$

次に各踏切の初速度と跳躍距離の関係を相関関係でみると、各跳躍距離に影響を与える要因は、ホップでは前後方向と垂直方向の初速度、ステップでは垂直初速度、ジャンプでは前後方向の初速度となった。走幅跳では、前後方向の初速度と跳躍距離の間に非常に高い相関関係があるが垂直初速度ではない(第1章1節あるいは松井ら1973)。三段跳では、ホップとジャンプの跳躍距離が前後方向の初速度に依存していた。しかし、ステップは、逆に垂直初速度と高い相関があり、前後方向の初速度では有意な相関がなかった。つまりステップでは高い跳躍が望ましいといえるわけである。ステップの踏切は、大きな着地角と小さな投射角で構成されているが、着地角と投射角がこのような関係にある時、容易に前後方向の速度を維持することができる(Dyson 1968)。しかしステップでは前後方向の速度の維持は跳躍距離に結びつかないので、ステップでは前後方向の速度を減少させても垂直速度を大きくすることが重要となる。これは、ホップとジャンプに対するステップの踏切の特徴といえる。

(5) 踏切中の平均加速度ベクトル

三段跳の各踏切の平均加速度ベクトル(図1-2-3)は、全て負(前後方向の速度の減少)に傾いている。ベクトルの傾きはホップが $96.9 \pm 2.3^\circ$ ステップが $96.4 \pm 2.8^\circ$ ジャンプが $100.4 \pm 3.7^\circ$ であり、ホップとステップにおいて、傾きに有意差はないが、ジャンプはそれより有意に($p < 0.01$)負に傾いている。

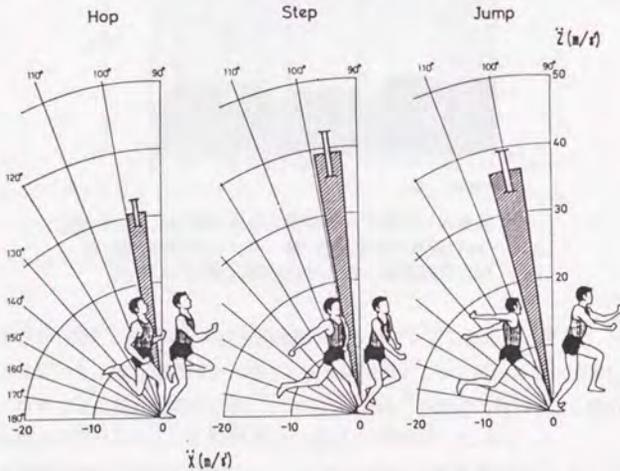


図1-2-3. 三段跳の各踏切における平均加速度ベクトル:平均±SD

加速度ベクトルの絶対値は、ホップが 30.6 ± 2.1 、ステップが 39.2 ± 3.3 、ジャンプが 36.2 ± 3.3 N/kgである。ベクトルの絶対値は、3つの踏切の間で全て有意差があり、ステップが最大、ホップが最小であった。

ベクトルの絶対値および角度と各跳躍距離との関係をみると、ステップにおいてのみベクトルの絶対値が $r=0.52$ 、 $p<0.05$ 、角度が $r=0.65$ 、 $p<0.01$ という有意な相関関係が得られた。つまりステップでの大きな跳躍距離は、大きな加速度ベクトルを左に傾けることによりなされ、この結果は前後方向の速度を減少させてでも高さを得るための力を発揮することが望ましいことを示している。

(6) 機械的エネルギーの変化

三段跳のPE、KEz、KEx、MEの変化を図1-2-4に示した(跳躍距離:15m33)。図からMEの大部分は前後方向の速度によるKExからなることがわかる。

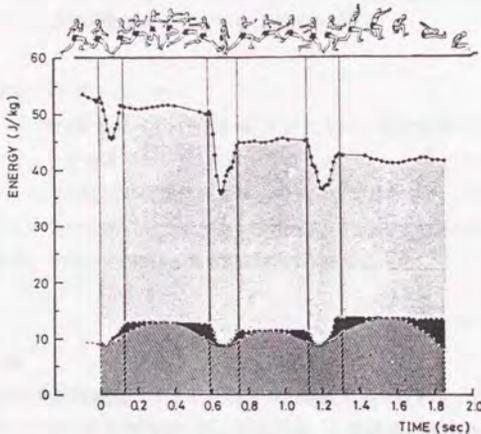


図1-2-4. 三段跳における機械的エネルギーの変化

- ※ 位置エネルギー: PE、■ 垂直方向の運動エネルギー: KEz、
- 水平方向の運動エネルギー: KEx、● 機械的エネルギー: ME

表1-2-1には、三段跳における機械的エネルギー、正・負仕事、正・負パワーが示されている。MEは踏切前半に減少し後半に増加するが、減少の方が大きいため、踏切ごとに有意に減少する。このMEの減少は、各踏切においてPE、KEzがほとんど変わらないことから、KExの減少に依存しているといえる。

各踏切におけるMEの維持率はステップとジャンプで有意差がなく、ホップはそれらより約10%有意に大きい。つまりホップでは、助走中に蓄えられたMEのほとんど

どが維持されるが、ステップとジャンプではそれぞれの踏切で約15%ずつ減少する。また空中のMEと各跳躍距離の関係をみると、ホップとジャンプにおいてそれぞれ $r=0.68$ 、 $r=0.71$ という有意な相関が得られた。

(7) 踏切における正・負仕事

三段跳の各踏切における正仕事は4.9～5.2 J/kgであり、踏切間で有意差はない。しかし負仕事では、ステップとジャンプがホップの約2倍の値を示し、有意に大きかった。またステップとジャンプでは、正仕事の約2倍の負仕事認められた。空中のMEが踏切ごと(特にステップとジャンプ)に減少するのは、踏切前半の負仕事が大きいためといえる。

各跳躍距離と仕事量の関係は、ホップで正仕事($r=0.67$)と負仕事($r=0.54$)、ステップで負仕事($r=0.64$)、ジャンプで正仕事($r=0.71$)とそれぞれ正の相関関係が認められた。ホップでは正・負仕事、ステップでは負仕事、ジャンプでは正仕事の方が跳躍距離が大きいという結果である。

(8) 踏切における正・負パワー

図1-2-4のMEの傾きがパワー(仕事率)を示す。MEの減少を負のパワー、増加を正のパワーとし、平均値で表1-2-1に示してある。

負のパワーは各踏切で有意差があり、ステップが最大、ホップが最小であった。しかし正のパワーは踏切間で差がなく、全て80 W/kg程度であった。絶対値で見ると、15選手の平均で約6000W、最高値で約10000Wであった。

4. 結 論

8台の16mm高速度映画カメラで、15名の三段跳選手を撮影し、三段跳の踏切の特徴をバイオメカニカルに検討した。その結果、三段跳遂行中の身体重心の前後方向と垂直方向の速度変化、重心の垂直変位などが明らかになり、さらに跳躍距離に影響を及ぼす要因として、ホップでは前後方向と垂直方向の初速度、ステップでは垂直初速度、ジャンプでは前後方向の初速度があげられた。この初速度を左右する踏切中の平均加速度ベクトルは、ホップが体重の3.1倍、ステップが3.9倍、ジャンプが3.6倍であり、このベクトルは進行方向と逆に傾き、前後方向の速度を減少させる働き(ブレーキ)をしていた。機械的エネルギーは踏切ごとに減少したが、それは踏切前半の負仕事大きいことによる。各踏切における正仕事は約5J/kgであり、正のパワーは約80W/kgであった。また、各跳躍距離と仕事量の関係は、ホップとジャンプが正仕事、ステップが負仕事と正の相関関係を示した。

第3節 三段跳18m跳躍(世界記録)に必要な力学的変数の推定

1. 研究目的

三段跳における1993年現在の世界記録は、W. Banks(U. S. A.)の17.97m(1985年)である。三段跳は、助走で得た前後方向の速度を3回の踏切で維持し、かつ各踏切で高さを得ることが重要である(Dyson 1968)。つまり、三段跳の跳躍距離は各踏切の初速度によって左右されるのであるが、三段跳において「ある一定の距離を跳躍するための踏切初速度」は研究されていない。

そこで本研究は、三段跳においてある一定の距離を得るために必要な①踏切初速度と②踏切中の平均加速度ベクトルを推定することを目的とした。それを基に、世界記録である18mを跳躍するための力学的変数を推定した。

2. 研究方法

(1)初速度推定のための仮定

身体重心の踏切初速度から跳躍距離を推定するために、次の2つを仮定した。

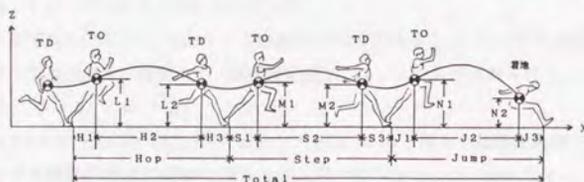


図1-3-1. 三段跳の各踏切における重心の軌跡
※TD:踏切接地時、TO:離地時。

表1-3-1. 各踏切の接地時と離地時の重心位置

H1 : 0.42(0.04)m	L1 : 1.04(0.04)m
H3 : 0.59(0.05)m	L2 : 0.95(0.03)m
S1 : 0.48(0.06)m	M1 : 1.02(0.03)m
S3 : 0.61(0.06)m	M2 : 0.93(0.03)m
J1 : 0.45(0.07)m	N1 : 1.07(0.04)m
J3 : 0.47(0.07)m	N2 : 0.60(0.06)m

平均(SD)

仮定1. 第1章2節における研究結果から、各踏切の接地時(TD:Touch Down)と離地時(TO:Take Off)における踏切地点と身体重心の位置(H1, H3, S1, S3, J1, J3, L1, L2, M1, M2, N1, N2、図1-3-1)は、標準偏差が0.07m以下と小さかった(表1-3-1)。そこで、図1-3-1の「各踏切における重心位置は跳躍距離の大きさに関係なく一定である」という仮定を設けた。

仮定2. ホップ・ステップ・ジャンプの跳躍距離の割合(跳躍比)の平均値と標準偏差は、第1章2節の結果から、ホップ:36.9±1.5%、ステップ:29.1±1.7%、ジャンプ:34.0±1.9%であった。この跳躍比は標準偏差が少なく、また他の優秀な選手(Nett 1970)と同様の値であった。そこで跳躍比をホップ36.9%、ステップ29.1%、ジャンプ34%と仮定した。

跳躍距離の推定. 3回の踏切後の空中の重心の前後方向の移動距離(H2, S2, J2)は、次の3つの条件によって決まる。各踏切の①前後方向と②垂直方向の初速度と③離地時と接地時の重心高の差(ホップではL1とL2、ステップではM1とM2、ジャンプではN1とN2の差)である。重心の空中の移動距離(例えばH2)は前後方向の速度(Xh)と滞空時間(t)によって、以下のように求められる。

$$H2 = Xh \cdot t$$

$$t = [z_h + \sqrt{(z_h^2 + 2G(L_1 - L_2))}] / G$$

∴

$$H2 = Xh \cdot [z_h + \sqrt{(z_h^2 + 2G(L_1 - L_2))}] / G$$

G:重力加速度(9.8m/s²)、Xh:ホップの前後方向の初速度、zh:ホップの垂直初速度。ホップの跳躍比は36.9%なので、総跳躍距離Dに対して次の式が得られる。

$$0.369 \cdot D = H_1 + H_2 + H_3$$

以上の2つの式とH1, H3, L1, L2が一定という仮定1から、様々な総跳躍距離に対応したホップの踏切初速度の前後方向と垂直方向の組み合わせが可能になる。ステップとジャンプについても同様の計算によって跳躍距離に対応した踏切初速度を算出した。

(2) 研究対象選手

21名の三段跳選手を対象にし、競技会での跳躍を高速度映画撮影した。対象選手は跳躍レベルによって3群に分けた。各群の跳躍距離の平均値(±SD)と人数は次の通りである。A群(n=7):14.06m(±0.26m)、B群(n=8):14.80m±0.28m、C群(n=7):15.96m±0.38mである。AとB群の選手は第3章1節で対象にした選手と同様である。C群は「東京国際陸上1980」に参加した外国招待選手である。

(3) 動作の撮影

AとB群の撮影条件は、第1章2節で示した通りである。

C群の撮影は、2台の16mm高速度カメラ(Photo-Sonics 16-1P、Photo-Sonics社製)を用い、毎秒100コマで行った。2台のカメラは、助走路から20m離れた側方で、1.5mの高さに設置した。2台のカメラの画角は、ホップの踏切の3歩前からジャンプの着地までを撮影できるように設定した。

(4) 動作解析

動作解析は、第1章2節で示したものと同様である。

3. 結果と考察

三段跳の総跳躍距離と各踏切の初速度の関係は図1-3-2に示す通りである。この図は、踏切離地時の重心の初速度ベクトルの終点を示したものである。図中の曲線は、三段跳においてある一定の跳躍距離を得るのに必要な各踏切の初速度である。したがって、この曲線は「速度図における等跳躍距離線」ということができる。

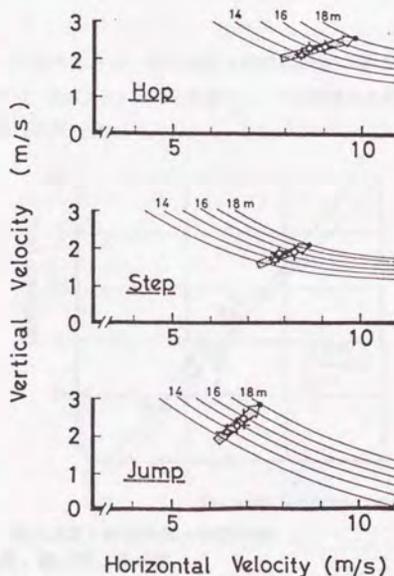


図1-3-2. 三段跳の各踏切における初速度
 ※△:A群、□:B群、○:C群、●:18m跳躍

図1-3-2には、3群の初速度の平均値と標準偏差を示した。初速度から算出した総跳躍距離と実際の跳躍距離は、各々、A群が13.76mと14.06m、B群が14.65mと14.80m、C群が15.65mと15.96mとなった。推定値は若干過小評価されているが、実測値との差は0.32m以下であり、よい推定がなされたといえる。

次に、世界記録18m跳躍に必要な初速度を推定する。方法は、レベルの異なる3群の延長線上に18m跳躍があると仮定して推定した(図中の3群から延長した矢印)。

18m跳躍に必要なホップの初速度は、 $x=9.9\text{m/s}$ 、 $z=2.6\text{m/s}$ 、ステップは $x=8.6\text{m/s}$ 、 $z=2.1\text{m/s}$ 、ジャンプは $x=7.3\text{m/s}$ 、 $z=2.8\text{m/s}$ であった(表1-3-2参照)。

表1-3-2. 三段跳の各踏切接地時と離地時の重心速度、平均(SD)

		HOP		STEP		JUMP	
		接地時	離地時	接地時	離地時	接地時	離地時
A群 (n=7)	X	8.82(0.25)	8.40(0.25)	8.40(0.25)	7.75(0.18)	7.75(0.18)	6.57(0.44)
	Z	-0.23(0.16)	2.12(0.07)	-2.46(0.07)	1.64(0.21)	-2.08(0.07)	2.03(0.30)
B群 (n=8)	X	9.04(0.17)	8.55(0.22)	8.55(0.22)	7.77(0.33)	7.77(0.33)	6.61(0.69)
	Z	-0.26(0.16)	2.28(0.20)	-2.68(0.22)	1.87(0.24)	-2.19(0.16)	2.18(0.35)
C群 (n=7)	X	9.77(0.33)	9.00(0.38)	9.00(0.38)	8.56(0.42)	8.56(0.42)	6.91(0.39)
	Z	-0.32(0.25)	2.36(0.25)	-2.67(0.22)	1.92(0.43)	-2.32(0.32)	2.26(0.41)
18m 跳躍	X	10.7	9.9	9.9	8.6	8.6	7.3
	Z	-0.3	2.6	-2.9	2.1	-2.5	2.8

※ X:重心の水平速度、Z:垂直速度(m/秒)

また図1-3-3に示すように、助走速度と総跳躍距離の間には有意な相関関係が認められた($r=0.91$, $p<0.001$)。回帰直線から、18m跳躍に必要な助走速度を推定すると、約10.7m/sとなった。

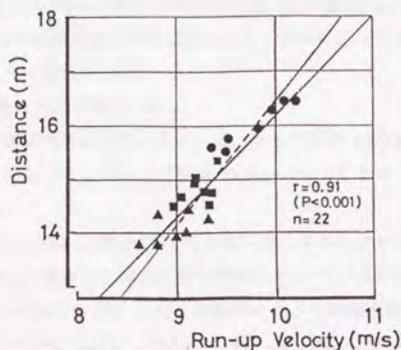


図1-3-3. 助走速度と跳躍距離の相関関係

※▲:A群、■:B群、●:C群

回帰式 — : $D=1.85R - 2.29$, - - - : $D=0.45D + 2.62$

D:跳躍距離、R:助走速度

各踏切において、助走速度を維持し、かつ垂直速度を獲得するには、踏切で適切な地面反力を得る必要がある。そこで、各踏切の平均加速度ベクトルを、第1章1節で示した方法で、群ごとに算出した。競技レベルの異なる3群における、各踏切の位置と地面反力ベクトルを図1-3-4に示した。

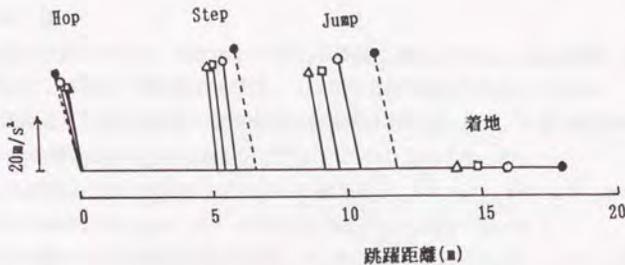


図1-3-4. 踏切中の平均加速度(力)ベクトル
 ※△:A群、□:B群、○:C群、●:18m跳躍

18m跳躍における地面反力ベクトルを推定するためには、踏切時間を仮定しなければならない。本研究の対象選手の踏切時間は、平均で、ホップが0.12s、ステップが0.15s、ジャンプが0.16sであり、この値は競技レベルの異なる3群の間に有意差は認められなかった。したがって、上記の踏切時間をそのまま18m跳躍における地面反力の推定に採用することにした。またホップの踏切接地時の重心速度は、助走速度:10.7m/sを用い、垂直方向は3群21名の平均値-0.3m/sを用いることとした。ステップの踏切接地時の垂直速度(z_0)は、次式によって求めた。

$$z_0 = \sqrt{[z_n^2 + 2G(L_1 - L_2)]}$$

ジャンプも同様の方法で算出した。

18m跳躍の各踏切の地面反力ベクトルは、ホップが36.4N/kg、 101.2° 、ステップが44.6N/kg、 101.4° 、ジャンプが42.9N/kg、 100.7° であった。この結果は図1-3-4に示した。

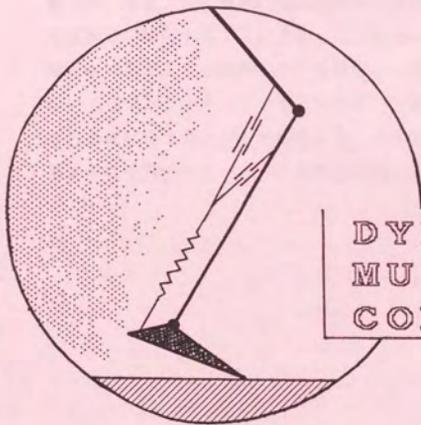
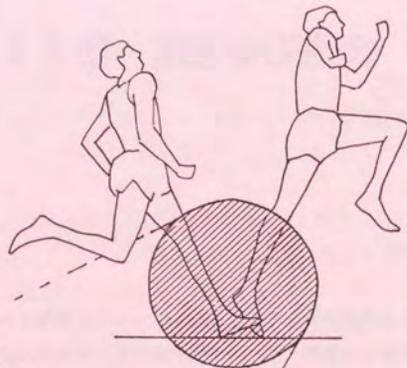
地面反力の大きさは、A群とB群で差がないが、それらよりC群の方が大きく、さらに18m跳躍の方が大きい。地面反力の方向については、競技レベルに対する明らかな傾向は認められない(図1-3-4)。理論的に大きな跳躍距離を獲得するためには、平均加速度ベクトルの角度がより垂直に向き、絶対値が大きいことが望ましい。しかし、踏切ごとに垂直速度を獲得するために前後方向の速度が減少する(Fukashihiroら1981)ので、絶対値と角度を両立させることは難しい。加速度ベクトルの方

向と絶対値の最大公約数をとると、18m跳躍のためには、 101° の方向で $3.6\sim 4.4$ N/kgの地面反力を各踏切において発揮することが必要と推定できた。

4. 結 論

映画分析法を用いて、三段跳における18m跳躍を達成するための助走速度、各踏切初速度、各踏切の地面反力を推定した。主要な結果は以下の通りである。

1. 助走速度と総跳躍距離の間に有意な相関関係が認められた。その回帰直線から、18m跳躍に必要な助走速度を推定すると、約 10.7m/s となった。
2. 18m跳躍のための各踏切の身体重心の初速度は、 $x=9.9\text{m/s}$ 、 $z=2.6\text{m/s}$ 、ステップは $x=8.6\text{m/s}$ 、 $z=2.1\text{m/s}$ 、ジャンプは $x=7.3\text{m/s}$ 、 $z=2.8\text{m/s}$ であった。
3. 18m跳躍のための踏切地面反力は、ホップが 36.4N/kg 、 101.2° 、ステップが 44.6N/kg 、 101.4° 、ジャンプが 42.9N/kg 、 100.7° であった。



DYNAMICS OF
MUSCLE-TENDON
COMPLEX SYSTEM

第2章

跳躍動作を支える筋・腱結合組織の ダイナミクス

前章では、競技選手における跳躍のダイナミクスを、身体全体の動作として観察した。本章では、基礎的な跳躍である垂直跳を対象に、筋・腱結合組織の働きを直視して検討することにする。第1節では、リンクセグメントモデルを用いて踏切中に発揮される関節トルクを算出し、第2節では踏切中のアキレス腱張力について、リンクセグメントモデルを用いた推定値と特殊なin vivo技術を用いた腱張力の直接測定値との差を比較する。そして第3節では、踏切中にアキレス腱に蓄えられる弾性エネルギーの仕事を腱張力の直接測定によって検討する。

第1節. 垂直跳における下肢3関節トルクと機械的仕事

1. 研究目的

跳躍の踏切における筋・腱連合組織の動態を検討するには、最初に、下肢3関節の関節回りのトルクを観察することが適切である。踏切中に生じる関節トルクは、筋活動による張力がリンクセグメント(骨や関節)に働いた結果としてとらえることができるからである。

これまで、関節トルクに関する研究は、基礎的な歩・走の移動運動(Elftman 1939, Gollhoferら1984, Winter 1983, Scottら1990)や跳躍運動(Hayら1978, Bobbertら1986abc, Hubleyら1983, Ingen Schenauら1985, Soestら1985)について行われてきた。最近では、関節トルクが拮抗筋からの間接的な貢献を定量できない(Robertsonら1980)という理由から、関節トルクと筋電図を併用した研究も、行われている(Hofら1983, Olneyら1985)。

垂直跳について、関節トルクの研究をみると、HubleyとWells(1983)は、Hayら(1978)の研究を発展させ、垂直跳の総(正)仕事に対する腰・膝・足関節の貢献度を推定した。また、Soestら(1985)は片足の反動垂直跳での関節トルクとパワーを計算し、Ingen Schenauら(1985)は両足の反動垂直跳において、足底屈のトルク-角速度関係を検討した。また、Bobbertら(1986ab)は、垂直跳中の関節トルクから筋・腱連合組織の働きを推定することを試みている。

本研究の目的は、反動を用いない垂直跳・反動を伴う垂直跳そして連続垂直跳の3種類の跳躍における下肢3関節のトルクを求め、各種垂直跳における関節ごとの特徴を検討することである。特に、連続垂直跳は、筋・腱連合組織における弾性エネルギーの蓄積が最も高い跳躍と推定されながら(Thysら1975)、いまだ関節トルクについては検討されていない。

2. 研究方法

(1)被検者と測定手順

被検者は、次に示す健康な男子3名とした。

Subj.	年齢	身長	体重
S-1	21yrs	178cm	68kg
S-2	20yrs	181cm	71kg
S-3	30yrs	182cm	74kg

被検者S-1・2は現役の陸上競技の短距離と跳躍の選手で、S-3は以前、陸上競技の跳躍選手で、それぞれ各種垂直跳に習熟していた。

被検者は以下の3種類の垂直跳を、圧力盤(Kistler社製)上で行った。

(a)膝を屈曲させたスクワット姿勢から、反動を用いない垂直跳(squat jump:以後SJとする)。

(b)直陸姿勢から反動を用いた垂直跳(Counter movement jump:CMJ)。

(c)連続跳躍(Hopping)。

すべての垂直跳で、被検者は手を腰にあて(腕振りを用いずに)、最大努力で跳躍した(ただし被検者S-3のHoppingのみ最大下強度の運動とした)。SJとCMJの動作の詳細は、Komiら(1978)を参照されたい。解析は、それぞれ1試技の垂直跳について行った。

毎秒100コマに設定された高速度16mmカメラ(Photo-SonicsとLocam 51-0003)によって、側方(矢状面)から、跳躍動作を撮影した。同時に、圧力盤(Kistler社製)によって床反力を測定した。

三浦ら(1974)およびDempster(1955)の方法を用い、各身体セグメントの座標をモーションアナライザー(NACおよびVanguard Film Analyzer)によって解析した。座標は10Hzのデジタルフィルターによって平滑化した後、関節トルクと機械的エネルギー算出に必要な変位・速度・加速度の運動学的な変数を求めた。

(2)各種力学的変数の算出

a. 機械的エネルギーの算出

各身体セグメント: E_i の瞬時の機械的エネルギーは、次の式(1)によって算出した。

$$E_i = mgh + mv^2 + I\omega^2 \dots\dots(1)$$

ただし、 m =セグメントの質量、 h =質量中心の床からの高さ、 v =質量中心の速度、 I =質量中心に関する回転の慣性モーメント、 ω =セグメントの角速度。

b. 関節トルクの算出

BreslerとFrankel(1950)およびWinter(1979)の方法にしたがい、リンクセグメントキネマティクスと床反力のデータを用いて、下肢3関節のトルクを算出した(Appendix I 参照)。通常は、セグメントの末端が半時計回りの場合をプラスとするが、本研究では伸展トルクをプラス、屈曲トルクをマイナスとした。

c. 関節の機械的仕事とパワー

関節で生じるパワー(Pm)は、次式によって算出した。

$$P_m = M_j \cdot \omega_j \dots\dots\dots (4)$$

ただし、Mj=関節トルク、ωj=セグメントの角速度。また各関節における機械的
正仕事(Wj)は、次式によって算出した。なお時相は、運動の上方向への開始時(U
PM)から離地時(toe off:TO)までの局面とした。

$$W_j = \int_{UPM}^{TO} P_m dt = \int_{UPM}^{TO} M_j \cdot \omega_j dt \dots (5)$$

3. 結果と考察

3種類の垂直跳における跳躍高(空中の重心上昇高)は、以下に示す通りである。

	S-1	S-2	S-3	
SJ	36cm	40cm	33cm	
CMJ	52cm	51cm	40cm	
Hopping	37cm	32cm	*7cm	*最大下運動

これまでの報告(Asmussenら 1974、Fukashiroら 1983、Komiら 1978)通り、CMJの
跳躍高はSJよりも大きかった。また現役競技選手のS-1・2の値は、S-3よりも高い
値であった。

(1) 床反力と下肢の機械的エネルギー

図2-1-1に、3種類の垂直跳における、床反力と下肢の各セグメントの機械的エ
ネルギーの変化を示した(被検者S-3の結果)。SJでは、正確に体重のレベルから反
動を用いずに運動を開始している。CMJでは、まず重心が下方向に加速され、床反
力の方向は次の局面で上方向に変換される。CMJの正の局面(正相)の時間は260ms
で、SJよりも若干短い。CMJの最大床反力(2146N)は、SJの値(2011N)よりも大きく、
Hoppingはさらに大きい値(3026N)を示した。被検者S-1と2も、図2-1-1のS-3と同
様の結果であった。

次に、各セグメントの機械的エネルギーの変化をみると、SJとCMJにおいて、下
肢セグメントの機械的エネルギーの増加には、「時相の遅延」があるといえる。
最初に、大腿の機械的エネルギーが増加し(離地150ms前)、次に下腿(離地100ms前)、
そして最後に足部(離地40ms前)となる。一方、Hoppingの機械的エネルギーは、負

の局面(負相)で減少し、そして正相で増加する。Hoppingには、SJやCMJでみられた下肢の各セグメントの時相の遅延が認められなかった。

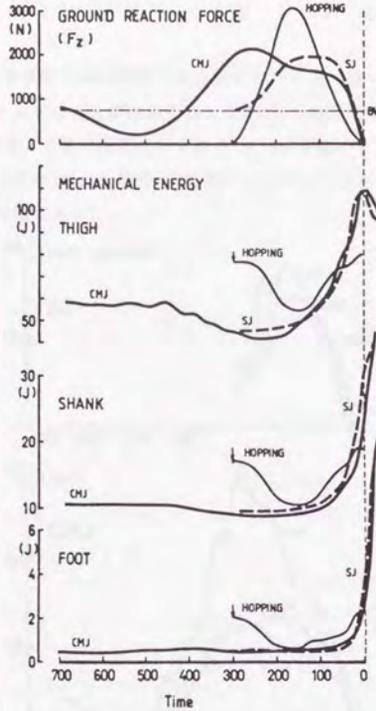


図2-1-1. 3種類の垂直跳中の床反力と機械的エネルギーの変化

機械的エネルギーの増加は、筋トルクによる関節で生じた仕事からセグメントへのエネルギーの流入を示す(Elftman 1939)。本研究では、セグメントへのエネルギーの流入は、SJとCMJの正相において、大腿、下腿、足部の順でみられた。これは、下肢の上部のセグメントから下部のセグメントへのエネルギーの流れを示唆している。一方、Hoppingのエネルギーは、負相においてエネルギーの流出があり(あるいは、弾性エネルギーのような異なったタイプのエネルギーの蓄積があり)、その後の正相において、関節反力や筋トルクからの流入によって、再びエネルギー

の増加が生じる。つまり、Hoppingでは、足関節伸筋群の弾性の活用が示唆されるのである。Thysら(1975)は、足関節を中心とした小さい跳躍高の連続跳躍では1/2~1/3の弾性エネルギーの貢献があると報告している。

(2) 関節トルク

図2-1-2に、被検者S-3の3種類の垂直跳における股・膝・足関節のトルクを示した。SJでは、トルクの最大値は若干異なるが、3つの関節トルクのパターンは同様である。CMJでは、大きな股関節のトルク(313Nm)が認められ、その最大値は、負相から正相への変換点(膝最大屈曲時)で現れていた。このトルクパターンは、被検者S-1と2でも同様であった。

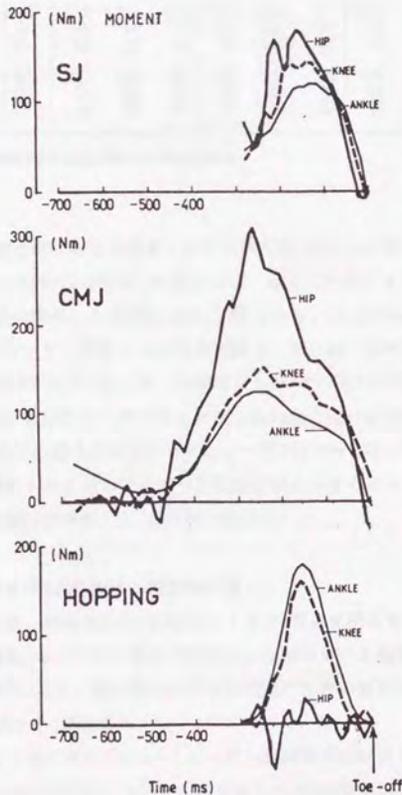


図2-1-2. 3種類の垂直跳中の下肢3関節のトルク

一方Hoppingは、SJとCMJときわめて異なるトルクパターンを示した。最大下の図2-1-2のHopping(S-3)では足関節のトルクが最も大きく、次が膝、そして最も小さいのが股関節であった。ただし、最大努力のHopping(S-1・2)では、股関節の貢献も大きくなっていった(表2-1-1)。

表2-1-1. 垂直跳中の下肢3関節のピークトルクと機械的仕事量

被検者 →		足関節			膝関節			股関節			総仕事量		
		S-1	S-2	S-3	S-1	S-2	S-3	S-1	S-2	S-3	S-1	S-2	S-3
SJ	トルク (Nm)	150	161	120	264	326	142	315	418	179	300	311	263
	仕事 (J)	73	54	51	132	143	100	95	114	112			
	%Work (%)	24	17	19	44	46	38	32	37	43			
CMJ	トルク (Nm)	116	111	125	210	215	151	254	242	306	393	385	329
	仕事 (J)	76	58	51	147	167	108	170	160	170			
	%Work (%)	19	15	16	37	43	33	43	42	51			
Hopping	トルク (Nm)	261	133	180	435	270	159	487	312	25	180	186	79
	仕事 (J)	81	41	56	72	84	25	46	63	-2			
	%Work (%)	34	22	71	40	45	32	26	34	-3			

※ %Work: 下肢3関節に対する各関節の仕事量の割合

次に、各垂直跳における関節トルクの最大値(表2-1-1)をみる。SJのトルク値は、HubleyとWells(1983)の報告した値とほぼ一致していた。またCMJの値は、Bobbertら(1986a)の報告した値(股:366Nm、膝:279Nm、足:266Nm)よりも若干低かった。

SJとCMJにおいて、関節トルクの最大値は、足<膝<股関節の順に大きくなった。ただし、被検者S-1・2では、膝・股関節ともCMJよりもSJの方が大きく、S-3では逆にCMJの方が大きいという差がみられた。HubleyとWells(1983)が指摘するように、トルク値は若干の個人差が認められた。一方Hoppingでは、被検者S-1・2ではSJとCMJ同様、関節トルクが、足<膝<股関節の順に大きくなった。しかし、最大下強度のS-3では順序が逆転した(足>膝>股関節)。

(3) 関節トルク-角速度関係と機械的仕事

図2-1-3には、被検者S-3の各関節のトルク-角速度関係を示した。図2-1-3の関節角速度(横軸)のプラスの部分の面積が、正相における機械的仕事を示す。その機械的仕事(Work)と、総仕事に対する各関節の仕事の割合(%Work)を、3名の被検者について表2-1-1に示した。

まず図2-1-3でSJとCMJを比べると、足・膝関節はほぼ同じパターンであるが、股関節はCMJがSJを大きく上回る曲線を示した(斜線部参照)。これを機械的仕事で見ると、足と膝関節ではSJとCMJで差がないが、股関節のみSJよりもCMJの方が、

46~75J(40~80%)大きかった。したがって、SJとCMJの跳躍高の差は、股関節の機械的仕事の差に主に依存していると考えられる。この示唆は、SJとCMJのパフォーマンスの差が脚伸筋群の弾性の活用による(例えばAsmussenら1974)という、これまでの仮説を否定する結果であった。

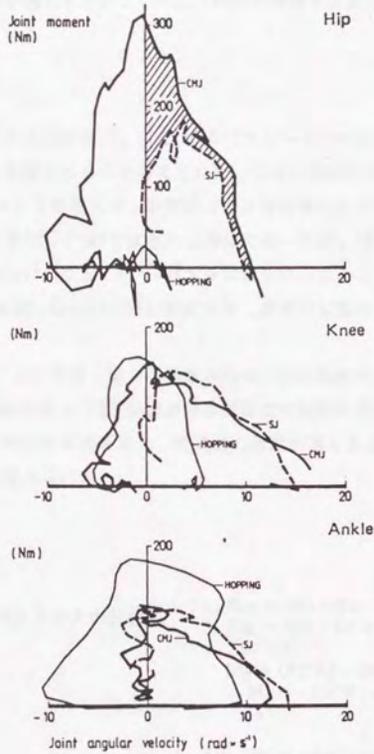


図2-1-3. 垂直跳中の下肢3関節の角速度-トルク関係

一方、最大下強度のHoppingは、きわめて大きな足関節の機械的仕事と股関節の小さい仕事によって特徴づけられる(図2-1-3と表2-1-1のS-3)。しかし、最大努力のHopping(S-1・2)では、下肢3関節が同程度の貢献をしているといえる。すなわち、最大下のHoppingでは外的機械的仕事の増加に股関節がほとんど貢献していないのに対し、最大では股関節の貢献が増大する。この結果は、主観的努力度が高まると股関節の貢献が増えるという、阿江(1990)の指摘と合致した。

4. 結論

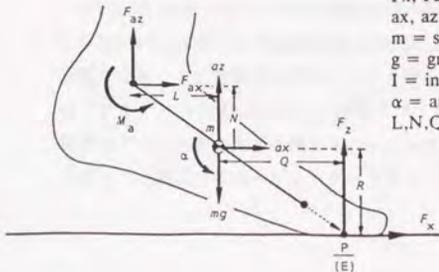
これまで多くの先行研究は、SJとCMJのパフォーマンスの差が筋の弾性エネルギーの活用の差を反映するものと考えていた。しかし本研究によって、SJに対するCMJのパフォーマンスの増大が、股関節の大きな仕事によっていることが示された。膝と足関節の仕事はSJとCMJでほとんど同じであったが、CMJにおける股関節伸筋群の機械的仕事はSJよりも、40~80%大きな値を示したからである。一方Hoppingは、伸張-短縮連関(Thysら1975)が貢献する、典型的な弾性運動としてとらえられた。

またHoppingにおいては、最大下強度の時は、総仕事量に対して足関節が大きく貢献し、最大強度の時は下肢3関節がほぼ同程度の割合の貢献となっていた。この結果は、主観的努力度が高まると、股関節の貢献が増えるという身体運動の特徴を示していると考えられた。

Appendix I. 関節反力とトルクの計算法

1. $F_{ax} = m a_x - F_x$
2. $F_{az} = m a_z - F_z + m g$
3. $\Sigma M = I \alpha$
 $M_a + (F_x \cdot R) + (F_z \cdot Q) - (F_{az} \cdot L) - (F_{ax} \cdot N) = I \alpha$
 $\therefore M_a = -(F_x \cdot R) - (F_z \cdot Q) + (F_{az} \cdot L) + (F_{ax} \cdot N) + I \alpha$

F_{ax}, F_{az} = joint reaction force
 M_a = moment of the joint
 F_x, F_z = ground reaction force
 a_x, a_z = acceleration of the centre of segment
 m = segment mass
 g = gravity due to acceleration
 I = inertia moment of the segment
 α = angular acceleration of the segment
 L, N, Q, R = distance.



第2節. 垂直跳における足関節トルクとアキレス腱張力の比較

1. 研究目的

跳躍の解析において、関節トルクの算出が1つの有効な手段となることは前節で述べた。ただし関節トルクは、靭帯や筋によって発揮された力、関節反力、そして重力と摩擦による力が総合された結果であるので、筋が発揮した内力を直接推定するには問題がある。この観点から、Gregorら(1991)は、自転車ペダリング中の足関節トルクをリンクセグメントモデルから推定したものとアキレス腱の張力測定から算出したものとで比較した。その結果、腱張力から推定した足関節トルクは、リンクセグメントモデルから推定したトルクの65%になる場合があると報告している。しかし、跳躍のような重力がかかる自然な運動において、関節トルクとそれに関わる内力との関係は、いまだ検討されていない。

本研究の目的は、垂直跳を対象に、直接測定したアキレス腱張力と、関節トルクから推定したアキレス腱張力とを比較することである。本研究では、ヒトのアキレス腱張力を特殊なin-vivo技術によって、直接測定した(Komiら1987, Komi 1990)。

2. 研究方法

(1)被検者と測定手順

被検者は、前節のS-3の、健常な30歳の男子(身長:182cm、体重:74kg)である。被検者は、測定手順や手術に伴う危険性を十分に認識した上で、誓約書に同意し、実験に参加した。

被検者は、前節で示した3種類の垂直跳:SJ, CMJ, Hoppingを行った。

(2)アキレス腱張力(ATF)の直接測定

ATF(Achilles tendon force)直接測定に関わる手術は、フィンランドのTampere University Central Hospitalにおいて行われた。手術室で、被検者を仰臥位で安静にさせ、まず被検者の右足アキレス腱の皮膚に、4%のアドレナリンを含む1%のリドカイン15-20ccを注射し、麻酔をかけた。アキレス腱部の皮膚を切開し、被検者のアキレス腱の太さに適するバックルタイプのトランスジューサー(図2-2-1)を選んで、腱にはめ込んだ。トランスジューサーの表面の120Ωのストレインゲ-

ジのコードを皮膚の外に出し、切開した皮膚を手術用テープで貼って止めた (Groganら1991, Komiら1987, Komi 1990)。

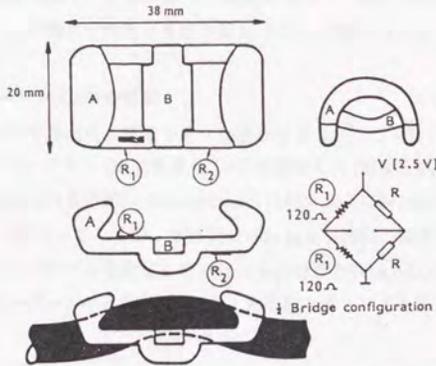


図2-2-1. アキレス腱に装着したバックルタイプのトランスジューサー (Komiら1987より)

術後、被検者は実験用体育館に設置された、校正用テーブルの上に、仰臥位になり、ATFの校正を行った。校正は、足関節を回転中心とし足底屈できるシューズを用い、母指球での張力とバックルトランスジューサーの張力とを対応させ、てこ比を考慮してATFを校正した(図2-2-2)。校正後、被検者は苦痛を伴うことなく、上記の3種類の跳躍を遂行した。

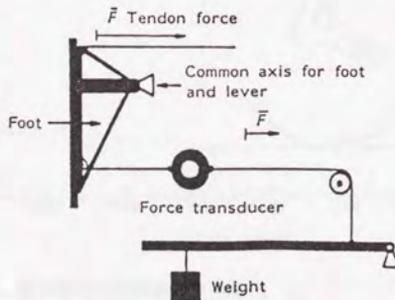


図2-2-2. トランスジューサーのキャリブレーション (Komiら1987より)

(3) フィルム解析と床反力の測定

フィルム解析は、前節の被検者S-3と同様である。つまり、毎秒100コマに設定された高速度16mmカメラ(Locam 51-0003)によって、側方(矢状面)から、跳躍動作を撮影した。同時に、床反力を圧力盤(Kistler社製)によって測定した。

(4) 関節トルクからATFの推定

関節トルクの算出は、前節で述べた通りである。ここでは、関節トルク(Ma)と足関節のレバーアーム(D)を考慮してATFを推定した(以後、Estimated ATF: EATFと略す、Appendix II 参照)。Robertsonら(1980)およびEricsonら(1985)はレバーアームDを一定としているが、本研究ではRuggら(1990)の報告を基に、関節角度を考慮してレバーアームを決定した。Saleら(1982)とRuggら(1990)は、足関節の運動によってレバーアームDが変化することを確かめているからである。

3. 結果

図2-2-3に、各垂直跳における足関節の角度変化を示した。SJとCMJの足関節角度は、運動開始から離地130ms前まで若干の背屈を行い、その後130ms前から急激に底屈している。一方、Hoppingの足関節角度は、着地後急激に背屈し、次の局面で底屈する。3種類の跳躍の足底屈局面では、Hoppingの足角度が若干低いレベルにあるが、ほぼ同様の角度変化を示した。

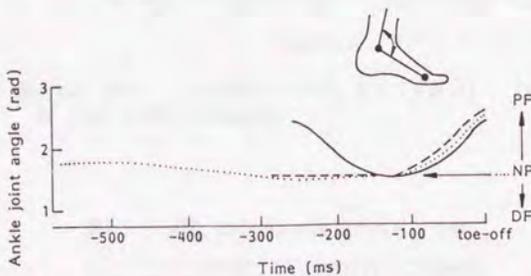


図2-2-3. 垂直跳中の足関節角度の変化

※ --- :SJ、 - - - :CMJ、 ····· :Hopping

DF:背屈、NP:立位、PF:底屈

図2-2-4に、直接測定したATFと関節トルクから推定したEATF、そして垂直方向の床反力を示した。ただし、本研究の3種類の跳躍は左右対象の動作なので、図中の床反力は1値(片足あたり)に変えてある。床反力の最大値(表2-2-1)は、SJ:1006N、CMJ:1073N、Hopping:1513Nで、それよりもATFの最大値の方が大きい。SJの最大ATFは2234Nで、床反力の2.2倍である。CMJのATFは1896Nで、床反力の1.8倍、HoppingのATFは3787Nで、床反力の2.5倍となっている。

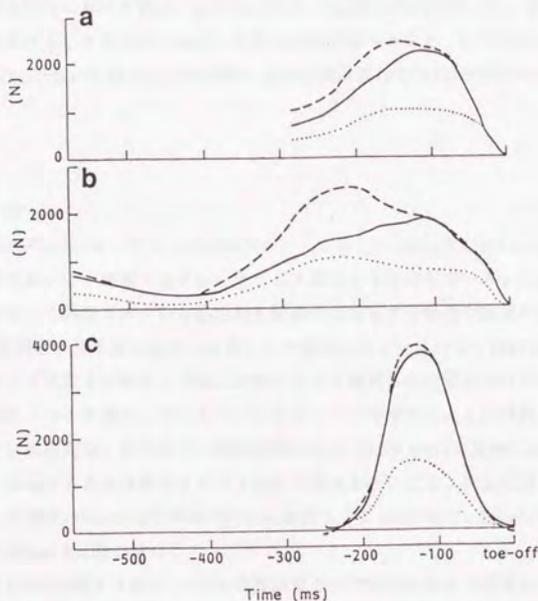


図2-2-4. ATF(—)とEATF(---)、そして床反力(···)の変化
 ※ a: SJ, b: CMJ, c: Hopping

表2-2-1. ATF、EATFそして床反力のピーク値

	ATF(N)	EATF(N)	GRF(N)
SJ	2234	2402	1006
CMJ	1896	2513	1073
Hopping	3787	3916	1513

図2-2-4におけるEATFの曲線は、ATFとよく一致しているといえる。細かくいうと、SJとCMJにおけるEATFの値は、特に離地130ms前から離地までの局面において、ATFと一致している。ただし、それより前の局面では、EATFがATFに対して若干過大評価されている。

EATFとATFの両変数の差は、主に足底屈局面の前に現れた。足底屈の前の局面における差は、SJとCMJでは最大40%にも及んだが、Hoppingでは高々8%であった。一方、足底屈局面における差は、SJとCMJが16%、Hoppingが8%であった。また、EATFとATFにおける、それぞれ10msごとの値で相関関係をみると、SJ: $r=0.95$ 、CMJ: $r=0.96$ 、Hopping: $r=0.99$ という有意性の高い相関係数($p<0.001$)が得られた。

4. 考 察

Ericsonら(1985)はベダリング運動において、Hofら(1983)とScottら(1990)は歩・走運動において、関節トルクからアキレス腱張力を推定している。このようにモデルを用いて関節トルクから筋活動を間接的に推定する場合の誤差に関して、ATFを直接測定する手法は有用である。この観点から、Gregorら(1991)は、最大下のベダリング運動を対象に、下腿三頭筋によって発揮された張力(ATF)の直接測定から足関節トルクを求め、それとリンクセグメントモデルによる足関節トルクと比較した。本研究は、重力場での跳躍運動におけるEATFとATFを比較しようというもので、Gregorらとは運動のタイプと強度が異なるといえる。例えば運動強度でいえば、本研究のHoppingで発揮された足関節トルクは200Nmで、Gregorらのベダリングの50Nmの約4倍である。

EATFとATFを比較する前に、ATFの直接測定とEATF推定における誤差について、2つの観点から考察しておく。(1)ATFは、校正の時点で下腿三頭筋以外の6つの足底屈筋(足底筋、長母指屈筋、長指屈筋、後脛骨筋、長腓骨筋、短腓骨筋)の力を含んでいる。下腿三頭筋(腓腹筋とヒラメ筋)の生理学的横断面積は、すべての足底屈筋の約65%である(Alexanderら1975、Murrayら1976、Wickiewiczら1983)。この横断面積の割合と、各筋のモーメントアーム(Murrayら1976)を考慮して、Gregorら(1991)は足底屈に及ぼす下腿三頭筋とそれ以外の筋の貢献度を計算した。Gregorらの計算によれば、最大等尺性収縮中の足底屈における、下腿三頭筋(ATF)の貢献度が78%となった。Murrayら(1976)も、同様の下腿三頭筋の貢献度(理論的に80%)を報告した。また、HahsとStiles(1989)は、バックルタイプのトランスジューサーにおける腱張力測定の限界について指摘している。例えば、もし筋が力発生器と並行に弾性と粘性組織をもつ場合、トランスジューサーへの張力は、筋力以外

の他の応力を含むからである。これらを考慮すると、ATFの値は若干過大評価されている可能性がある。(II)関節トルクは、足関節底屈によるすべての力、つまり下腿三頭筋とともに他の足底屈筋の力を当然含んでいるといえる。したがって、関節トルクとモーメントアームから計算されたEATFも、同様に過大評価されているはずである。EATFの算出は、ATFの校正における状態とまったく同じといえるからである。

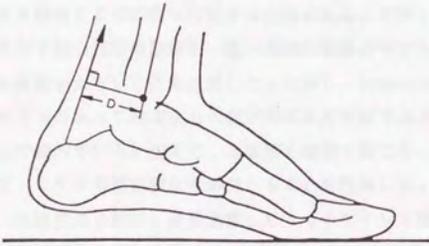
ここで議論したように、下腿三頭筋以外の足底屈筋の影響は、ATFとEATFの比較の場合には無視することができる。事実、足底屈局面におけるEATFは、ATFとほぼ一致している(図2-2-4参照)。これは、Gregorら(1991)の結果、すなわちアキレス腱直接測定から求めた足関節トルクがリンクセグメントモデルから求めたトルクの65%であった(両者でトルクパターンは同じ、Gregorらの論文の図3参照)という報告と異なるものであった。この2つの研究の差は、自転車ペダリングと跳躍における運動強度の差によって説明することができよう。つまり、ペダリング中のアキレス腱張力と関節反力(Ericsonら1985)は、走(Scottら1990)や歩(Staufferら1977, Procterら1982)に比べてきわめて小さい値である。自転車ペダリングのような比較的強度の低い運動の場合、すべての足底屈筋が十分に働かない可能性がある(Gregorら1991)。すなわち、本研究における足底屈局面でEATFがATFとよく一致し、Gregorらの最大下の自転車ペダリングに対して異なる結果となったのは、足底屈筋の筋活動パターンの差によることが考えられるのである。

一方、SJとCMJにおいて、運動開始から離地130ms前までの間、ATFとEATFの値に大きな差が認められた(図2-2-4)。この局面のEATFの過大評価は、次の理由が考えられる。SJとCMJでは、足関節に対して、股・膝関節の伸展が総仕事量に大きく貢献する(Fukashiroら1987)。そしてこれは、Bobbertら(1986c)が指摘するように、下肢の上部で発生した機械的エネルギーが下腿三頭筋に伝播する可能性がある。彼らは、CMJの下肢関節伸展局面において、26%のエネルギーの伝播があると推定している。したがって、運動開始から離地130ms前までのEATFの過大評価は、上部の関節からの機械的エネルギーの伝播による可能性が考えられるのである。

5. 結論

リンクセグメントモデルからの関節トルクの推定と、アキレス腱張力直接測定との比較により、足底屈局面では両変数がよく一致するという結果を得た。ただし、他の関節(股・膝)が主動的に働く場合(本研究のSJとCMJの運動初期)や、運動強度が低い場合(Gregor 1991)には、関節トルクからの推定が過大評価される。

Appendix II. 関節トルクからのアキレス腱の推定



$$1. EATF = Ma \cdot D^{-1}$$

EATF = estimated achilles tendon force

Ma = moment of ankle joint

D = moment arm of ankle joint.

第3節. 垂直跳における筋・腱連合組織の弾性効果

1. 研究目的

跳躍は、反動動作を伴う典型的な運動といえる。反動動作とは、筋・腱連合組織が主運動の短縮の前に伸張される運動のことをいう。この伸張-短縮連関(Stretch-shortening cycle)の動態は、摘出筋(Cavagnaら1968)そして身体運動:歩行(Cavagna 1977, Gollhoferら1987, Hofら1983)や跳躍(Cavagna 1970, Asmussenら1974, Boscoら1982abcd)を対象に、機械的効率(Thysら1975, Fukashiroら1983b)や機械の仕事・パワー(Cavagnaら1968, Ingen Schenauら1985)という観点から広く検討されてきている。これらの研究によって、短縮前に伸張された筋および腱は、その直後の短縮時において、筋の活動能力が高まることが確かめられており、その原因は伸張時に筋および腱の直列弾性要素(SEC)に蓄えられる弾性エネルギーの利用によると考えられている。

筋・腱連合組織の中で、SECはそのほとんどが腱にある(Huijing 1991)ので、SECを観察するには腱に注目する必要がある。近年、Bobbertら(1986bc)は、垂直跳中の下腿三頭筋の動態を、筋・腱連合組織のモデルを用いて検討し、アキレス腱の貢献が大きいことを指摘した。しかし、Bobbertの共同研究者であるHuijingは、モデルによって推定された値が単なる推定値であることを別の論文(Huijing 1991)で述べている。加えて、本論第1章第2節でも、運動の局面や運動強度によって、モデルの推定値に差が生じることを指摘した。

本研究の目的は、直接測定したヒトのアキレス腱張力(ATF: Achilles tendon force)の値を基に、力(ATF)の関数として、各種垂直跳中の「腱の弾性特性」を検討することである。

2. 研究方法

被検者、3種類の垂直跳動作、フィルム解析は、第1節で述べた通りである。また、ATFの測定手順は第2節と同様であるが、本節のATFは深部足底屈筋の過大評価20%を考慮して計算した。

(1)筋長と腱長の算出

本研究では、下腿三頭筋の筋・腱連合組織において、筋とアキレス腱の長さを、

以下の方法によって分けて算出した。

下腿三頭筋の筋・腱連合組織の長さの変化率%MTL: Grieveら(1978)の方法にしたがい、アキレス腱と下腿三頭筋(腓腹筋とヒラメ筋)の筋・腱連合組織の長さの変化率(%MTL: Percent of Muscle tendon length)を求めた。二関節筋である腓腹筋の%MTLは、膝・足関節の角度変化から、単関節筋であるヒラメ筋の%MTLは足関節の角度変化から推定した。

下腿三頭筋の長さの変化ΔMTL: 被検者の腓腹筋(含むアキレス腱)の長さ(本研究では直立位でのCalcaneusからcondylus medialis of femorisの長さとした)は43cmであった。ヒラメ筋の長さは、腓腹筋の62%(Grieveら1978):27cmとした。筋・腱連合組織の長さの変化(ΔMTL)は、%MTLにそれぞれの長さ(腓腹筋:43cm、ヒラメ筋:27cm)を乗じることによって算出した。

アキレス腱の長さの変化ΔTL: アキレス腱の力-長さ関係は、直線的な部分と曲線的な部分とがある(Woo 1981)が、2次の指数曲線とよく一致する。腱の力-長さ特性を2次曲線と仮定すると、力'F'は、次のように腱の硬度'k'を定数とし、長さΔTLの関数となる。

$$F = k \times \Delta TL^2 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、ΔTLは腱の伸張の長さ。被検者のアキレス腱の横断面積:81mm²を考慮すると(Alexanderら1977)、硬度係数kは19.6N/mm²となる。したがって、ΔTLは式(1)より求められる。

筋長の変化ΔML: 筋長の変化(ΔML: Muscle length)は、筋・腱連合組織の長さΔMTLから腱の長さの変化分ΔTLを減じることによって算出した(式2)。

$$\Delta ML = \Delta MTL - \Delta TL \dots \dots \dots (2)$$

(2) 身体全体および下腿三頭筋の仕事

身体全体の仕事: 垂直跳の踏切中の身体全体の仕事は、式(3,4)によって算出した。

$$P = F \cdot v \dots \dots \dots (3)$$

$$W = \int P dt \dots \dots \dots (4)$$

ただし、P:踏切中の重心の機械的パワー、F:地面反力、V:重心の垂直速度、W:重心の機械の仕事。重心の垂直速度は垂直方向の地面反力を時間積分することによって求めた。

下腿三頭筋の仕事: 腓腹筋とヒラメ筋のアキレス腱張力に対する貢献は、腓腹筋がATFの34%である(Alexanderら1975)。したがって、下腿三頭筋の仕事は式(5)によって算出した。

$$W1 = \int F1(d) \quad 1 + \int F2(d) \quad 2 \dots (5)$$

ただし、W1:下腿三頭筋の機械的仕事、F1: Δ ATF x 0.34(腓腹筋)、F2: Δ ATF x 0.66(ヒラメ筋)、1:腓腹筋の長さの変化分、2:ヒラメ筋の長さの変化分。

(3)筋電図(EMG)の記録

腓腹筋の長頭とヒラメ筋のEMGは、双極誘導による表面電極によって求め、テープレコーダー(Racal 7DS)に収録した。EMGのアナログ信号は、A/D変換し、全波整流した後、積分処理を行った。10msごとにサンプルしたEMGは、各動作様式での3回の跳躍について平滑化した。そして矩形波によって校正を行った(Komi 1973)後、腓腹筋とヒラメ筋のEMGを加算した。2つのEMGを加算したのは、ATFに対して両方の筋が貢献しているからである。

3. 結果

(1)キネマティクス

図2-3-1は、SJ, CMJ, Hoppingにおける垂直方向の地面反力GRF、膝・足関節角度、腓腹筋とヒラメ筋の%MTLを示したものである。SJでは、離地前約130ms(矢印)から、下腿三頭筋の短縮(%MTLの減少)が始まる。また、CMJの下腿三頭筋の短縮局面は、SJとほぼ同じ変化を示した。一方、HoppingはSJ・CMJと異なり、着地後すぐに膝・足関節が屈曲し(腓腹筋とヒラメ筋の伸張)、その後離地に向けて、膝・足関節が伸展する(下腿三頭筋の短縮)。

表2-3-1. 垂直跳中の足関節底屈局面における筋・腱長の変位と短縮速度

		Δ muscle-tendon	Δ muscle
SJ	GAST	26mm (0.22m/s)	19mm (0.16m/s)
	SOL	28mm (0.23m/s)	21mm (0.18m/s)
CMJ	GAST	32mm (0.23m/s)	27mm (0.19m/s)
	SOL	31mm (0.22m/s)	26mm (0.19m/s)
Hopping	GAST	46mm (0.31m/s)	36mm (0.23m/s)
	SOL	35mm (0.23m/s)	25mm (0.18m/s)

Δ muscle-tendon: length change from origin to insertion

Δ muscle: Δ muscle-tendon - Δ Achilles tendon length change

表2-3-1に、腓腹筋とヒラメ筋の短縮局面における、各筋の Δ MTLと Δ MLの長さ
と速度の変化を示した。 Δ MTLと Δ MLの差は、アキレス腱の変位を示しており、S
Jでは7mm、CMJでは5mm、Hoppingでは10mmになる。 Δ MTLに対する Δ MLの変化は、
腓腹筋とヒラメ筋でそれぞれ、SJでは65%と68%、CMJでは81%と81%、Hoppingでは
70%と63%である。Hoppingでは大きなアキレス腱の短縮が認められたが、 Δ MLの変
位と速度変化については、3種類の垂直跳でそれほど大きな差はみられなかった。

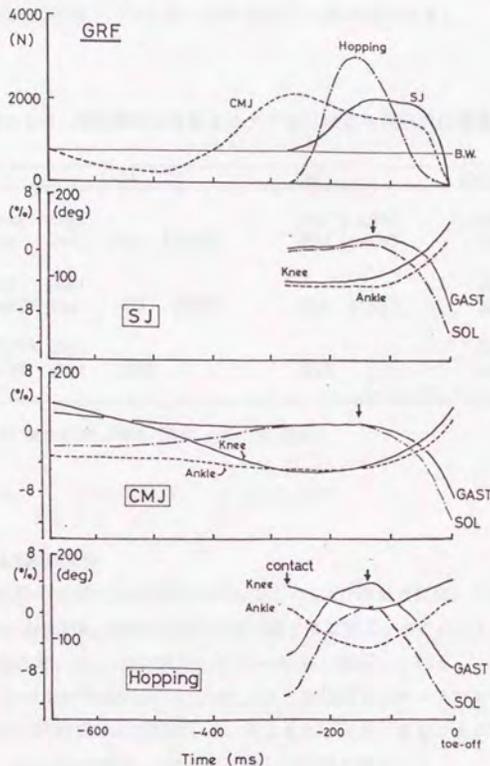


図2-3-1. 3種類の垂直跳中の床反力、膝・足関節角度、
腓腹筋・ヒラメ筋の筋長変化
※ GRF:床反力、GAST:腓腹筋、SOL:ヒラメ筋

(2)踏切中の機械的仕事

機械的仕事は次の2つの局面に分けて考える。身体全体では重心下降局面を負相、上昇局面を正相、そして下腿三頭筋では筋・腱連合組織の伸張局面を負相、短縮局面を正相とする。表2-3-2に、身体全体および下腿三頭筋の機械的仕事とパワーを示した。ただし表2-3-2の身体全体の値は、片脚あたりという意味で1/2で示してある。

SJとCMJでは、下腿三頭筋の仕事はほぼ同じといえる。しかしHoppingにおける下腿三頭筋の仕事やパワーは、SJやCMJの1~2倍の値である。

表2-3-2. 垂直跳中の身体重心と下腿三頭筋の機械的仕事量とパワー

		SJ	CMJ	Hopping
Whole body	Neg:		-176J (-420W)	-123J (-818W)
	Pos:	311J (1110W)	398J (1592W)	134J (837W)
Calf muscle	Neg:			43J (269W)
	Pos:	27J (225W)	21J (150W)	39J (243W)
ATF/EMG	Neg:			3163
	Pos:	1953	1515	4005

Neg: negative phase, Pos: positive phase

(3)ATFとEMGの関係

各垂直跳中のATFとEMGを図2-3-2に示した。ATFの最大値(SJ:1742N, CMJ:1478N, Hopping:2953)は、両脚でのGRFの最大値とほぼ同じレベルにある(図2-3-1参照)。各垂直跳において、ATFの発揮パターンはGRFに類似している。

SJとCMJにおけるEMG(図2-3-2)は、ATFとほぼ同じパターンである。しかしHoppingのEMGは離地前60msで消失している。また、正相・負相ごとの「ATF/EMG」(表2-3-2)は、Hoppingの値が、SJやCMJに対してかなり大きい。

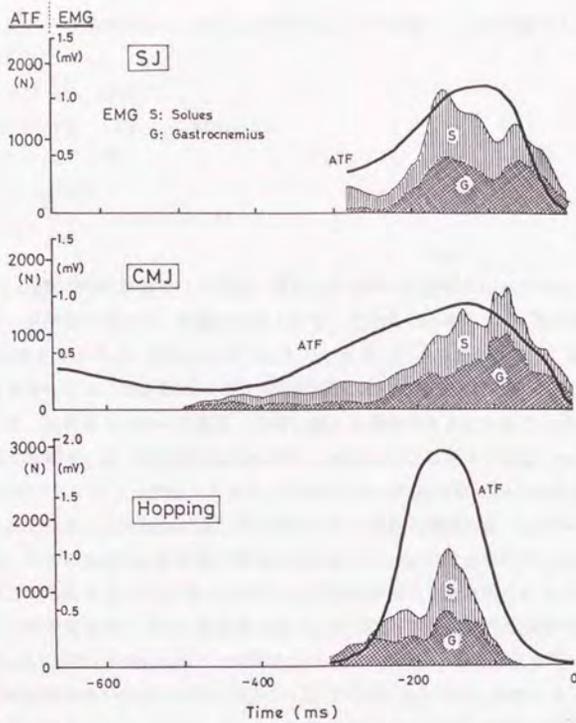


図2-3-2. 垂直跳中のATFと筋電図の変化
※ G: 腓腹筋、S: ヒラメ筋

4. 考察

Hill(1970)のモデルにしたがえば、筋・腱連合組織は収縮要素(CC: Contractile component)と直列弾性要素(SEC: Series Elastic Component)からなる。並列弾性要素は、踏切中の筋・腱連合組織の動態に対してほとんど貢献しない(Ingen Schenauら1985)。SECは、腱と筋内部のクロスブリッジに存在し(Morgan 1977, Proskelら1987)、両者の特性はそれぞれ独立している(Huijing 1991)。筋内部のクロスブリッジへの弾性エネルギーの蓄積量は限界があるが、腱はかなりの弾性エネルギーを蓄えることができる(Alexanderら1977)。

SEC(ここでは腱)の力-長さ特性を2次曲線と仮定すると、式(1)のように、力 F' は腱の硬度 k' を定数とし、 ΔTL の関数となる。したがって、腱に蓄積された弾

性エネルギーの量(Eel)は、力F0とSECの伸張ΔTLを考慮し、F0の関数として表せる(式6)。

$$\begin{aligned}
 \Delta TL & & \Delta TL \\
 Eel = \int_0 F(d)TL & = \int_0 k \cdot TL^2(d)TL \\
 & = \frac{1}{3} \frac{\sqrt{F0^3}}{\sqrt{k}} \dots\dots\dots(6)
 \end{aligned}$$

式6より、腱の硬度kが高くなるほど、弾性エネルギーの蓄積が少なくなり、「力の要素」が弾性エネルギー蓄積に大きく貢献していることがわかる。Huijing(1991)が指摘するように、腱が大きな力によって大きく引き伸ばされる時、腱による仕事は最大となる。大きなATFと短い接地時間によって特徴づけられるHopping(図2-3-2)は、弾性エネルギーの蓄積・利用に適した動作であるといえることができる。短い接地時間は、筋・腱連合組織の伸張から短縮への切り換えし時間(coupling time)を短くし、それは弾性エネルギーを利用するのに効果的だからである。

腱の硬度係数:k:19.6N/mm²は、被検者のアキレス腱の横断面積:81mm²を考慮して推定したものである。豚の指の屈筋(digital flexor)の腱において、ほぼ同じ硬度係数が報告されている(Woo 1981)。この係数を用い、垂直跳中にアキレス腱に蓄えられた弾性エネルギーを計算すると、CMJは5J(下腿三頭筋の全仕事量の19%)、SJは4J(20%)、Hoppingは12J(31%)となる(表2-3-3)。下腿三頭筋の筋・腱連合組織の伸張が大きいHoppingでは(図2-3-1)、SJやCMJに比べて、弾性エネルギーが多く蓄積されている。つまり、Hoppingにおける大きな下腿三頭筋の機械的仕事(表2-3-2)は、弾性エネルギーによる貢献が大きいといえることができる。

表2-3-3. 垂直跳中のATFの最大値と蓄積された弾性エネルギー(Eel)

	SJ	CMJ	Hopping
Peak ATF	1742N	1478N	2953N
Eel	5J	4J	12J
% of Eel	19%	20%	31%

本研究で試算した弾性エネルギーの蓄積量は、先行研究の推定値に比べて、若干低い値であった。Thysら(1975)は、機械的効率を基に、Hoppingにおける弾性エネルギーの貢献を50~66%と報告した。Boscoら(1982c)も、足首による跳躍での弾性エネルギーの貢献を50%とした。Bobbertら(1986c)は、リンクセグメントモデルを用いて、CMJにおけるアキレス腱の仕事は40%と報告している。本研究では、典型的な弾性運動といえるHoppingでさえ、高々31%であった。先行研究における弾性エネルギーの貢献の過大評価は、それらの研究のモデルに荷重的な力(重力と摩擦力)が含まれているためと考えられる。もし腱を除いた他のSEC(筋腹、筋線維内のクロスブリッジ)の影響を考慮したとしても、モデルによって推定した弾性エネルギーの貢献は相対的に大きいといえる。Huijing(1991)が指摘したように、リンクセグメントモデルによる関節トルクから計算した推定値には限界があると考えられるのである。

Boscoら(1982a)は、ドロップジャンプの高いパフォーマンスが弾性エネルギーと反射機構の両方によると考察した。Asmussenら(1974)は、伸張反射の時間を考慮すると、着地後に足関節背屈によって筋・腱連合組織が伸張されるのでは、伸張反射を利用するには遅すぎると考察した。しかし、本研究のHoppingでは、着地前に筋の予備緊張が認められた。この予備緊張は、下腿三頭筋が着地直前に張力を高め、着地準備を行っていることを示している。反射は着地以前に何らかの引き金によって引き起こされる可能性がある。脚の伸張-短縮連関の運動のトレーニング効果を筋・神経コントロールから検討したKyrolainenら(1991)は、予備緊張に関して次のような結果を得ている。トレーニング後には、着地前に足関節背屈が生じるタイミングが速くなり、それが反射機構の開始を速める原因である。このように、反射機構の開始はAsmussenが考察した着地ではなく、足関節背屈が引き金になっていると考えられるのである。本研究のHoppingでは、足関節の角度は、離地時よりも着地時の方が小さい(図2-3-1参照)。これは、着地直前に足関節背屈が始まっていることを示している。その結果、ATFの増加が着地において既に認められるのである。

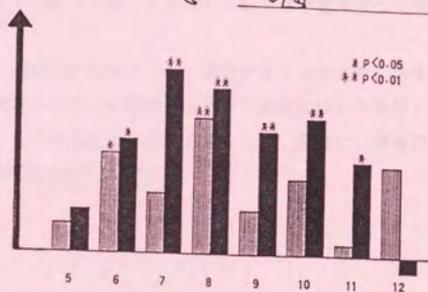
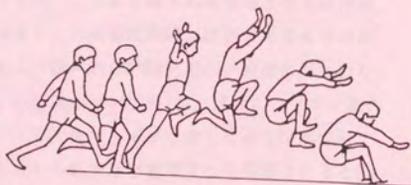
最大下強度の筋活動におけるEMGと等尺性筋力との関係は、Lippold(1952)以来、多くの研究がなされ、両変数の間には直線的(Komi 1973, Johnsson 1978)・非直線的(Komiら1972)関係が報告されている。一方、筋活動の興奮レベルが一定の場合、筋張力は筋長(Bouisset 1973)と短縮速度(Komi 1973, Biglandら1954)に影響され、短縮速度が増加する時、張力は減少し、EMG活動はわずかに増加する。したがって、ATF/EMG比は、短縮速度の増加にともない、減少するはずである。しかしながら、Hoppingでは、GASTとSOLの短縮速度がSJやCMJよりも大きい(表2-3-1)にもかかわらず、大きなATF/EMG比(SJやCMJの2倍以上)が認められたのである。また、筋張力

とEMGの関係を考える時、EMGに対する張力の時間遅れを考慮する必要がある。Komi (1984)は、この時相差をEMGと張力の開始時の差と定義し、EMD (electromechanical delay)と呼んだ。EMDは主にSECの伸張によって生じると考えられている (Komi 1984)。しかし、このEMDを考慮しても、HoppingのATF/EMG比は大きいと考えられる。例えば、EMDを30msと仮定して、Hoppingの正局面のATF/EMG比を再計算しても、ATF/EMG比は2918 N/mVで、SJやCMJに比べて大きいからである。したがって、Hoppingの大きなATF/EMG比は、前述したように、伸張-短縮連関の運動の腱の弾性特性によっているといえることができる。

5. 結論

ヒトのアキレス腱張力の直接測定は、腱弾性のような筋-腱連合組織のバイオメカニカルな特性を評価するのに適している。本研究では、アキレス腱に蓄えられる弾性エネルギーは、SJが19%、CMJが20%、Hoppingが31%と計算された。最大下運動強度のHoppingにおいて、最大強度のSJやCMJよりも大きな弾性エネルギーの貢献が認められたのである。すなわち、アキレス腱張力は、運動強度だけでなく、運動のパターンにも影響されるといえる。アキレス腱の直接測定によると、弾性の貢献が、リンクセグメントモデルによる推定ほど大きくないということも示された。

DEVELOPMENT OF DYNAMIC JUMPING MOVEMENT



第3章

ダイナミックな跳躍動作の獲得

ヒトの運動は、一般に歩・走のように先天的に獲得される系統発生的な運動と、投・泳のように学習があって初めて成り立つ、つまり後天的に獲得される個体発生的な運動に大別できる。しかしながら、この両者は明確に区別できるものではなく、様々な運動は先天的(遺伝的)および後天的(環境的)要因が複雑にかかわりあって成り立っていると考えられる。Hellebrandt(1961)は、跳躍について、動作を遂行する筋活動の時系列は本質的には不随意であるが、空中に身を投げ出してできるだけ長い水平距離を移動しようとする動作は学習によって獲得されると指摘している。

本章の目的は、跳能力の発達について検討することである。具体的には、まず双生児研究から発育期における跳動作改善の可能性について検討し、次に跳躍における「よい動作」の評価法を提示する。そして、最後に、発育期における跳能力の発達と練習効果について検討する。

第1節 発育期における跳動作改善の可能性：双生児の跳動作の比較

1. 研究目的

身体教育において、各種運動技能の向上のために適切な働きかけを行うには、先天的および後天的要因が、運動技能の発達をどのように支配しているかが明らかにされなければならない。そのためには、双生児研究は最も有効な手段の1つである。双生児を対象にした従来の研究をみると、体格と運動能力(樋口ら1976)、有酸素性作業能(Klissourasら1973)、反射と反応時間(Komiら1973)、筋線維組成(Komi 1977)など主に量的因子についての検討がなされており、これらの項目では遺伝的影響が強いと報告されている。しかしながら、身体教育の核である動作の巧みさに(遺伝的・環境的要因の質的条件)については、検討されていない。

本研究は、一卵性双生児の走幅跳について、動作の巧みさを運動学的に比較検討することを目的とした。一卵性双生児の2児は、特に生活環境を分離しないならば、遺伝的因子と生育環境が等しいと考えられる(樋口ら1976)。したがって、一卵性双生児を観察することによって、遺伝的要因の強さを推定することができる。

2. 研究方法

(1) 観察対象者

観察対象者は、東京大学教育学部附属中学校・高等学校に在籍する一卵性双生児23対(男子11対、女子12対、年齢13~17歳)である。計46名の観察対象者の身体特性は、表3-1-1に示すとおりである。研究に先立ち、観察対象者に研究の目的を説明し、研究に積極的に参加するという同意を得た。

表3-1-1. 観察対象者の形態

	A児	B児
男子 身長(cm)	160.6(8.4)	161.5(7.1)
(n=11)体重(kg)	50.4(9.2)	50.1(7.6)
女子 身長(cm)	153.0(4.1)	152.7(4.9)
(n=12)体重(kg)	44.3(4.5)	43.4(4.9)
平均(SD)		

(2)測定手順

動作遂行にあたっては、約20mの助走を用い、文部省スポーツテストの方法(1982)にしたがい、この対象者に走幅跳を最大努力で行わせた。その際、側方30mより高速度映画撮影を行った。撮影には16mm高速度カメラ(Photo-Sonics 16-1P, Photo-Sonics社製)を用い、毎秒100コマの速度で踏切から着地までの動作を撮影した。露出時間および焦点距離は、それぞれ1/1200秒、30mmであった。加えて、スチール製巻尺によって、跳躍距離の計測を行った。

(3)分析方法

撮影によって得られたフィルムから、スポーティアス・システム(NAC社製)を用いて、助走速度、踏切離地時および着地時の関節角度(図3-1-1参照)を求めた。双生児対間の比較は、相関係数法、対差百分率法(2児の対差の2児平均値に対する割合、Klissourasら1972, Komiら1973)、および対差t検定を用いて行った。なお、ここでは双生児対間の兄・姉をA児、弟・妹をB児とする。

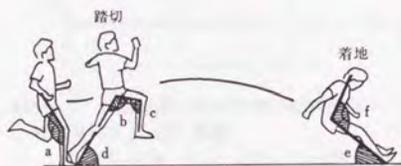


図3-1-1. 動作比較のために観察した6項目

3. 結果

身長、体重および跳躍距離は、双生児対間でそれぞれ $r=0.97$ 、 $r=0.81$ 、 $r=0.82$ (全て $p<0.001$)という有意性の高い相関関係が得られた。この結果は、樋口らの報告(1976)と一致するものであった。

(1)助走速度、動作、跳躍距離の関係

走幅跳は助走後の跳躍であり、パフォーマンスを増大させるためには、助走速度をいかに跳躍距離に結びつけるかが重要なポイントであるといえる。事実、競技選手の間では、助走速度と跳躍距離の間に極めて有意性の高い相関関係が認め

られている(松井ら1983)。そこで対象者について、助走速度(踏切1歩前の空中の腰の平均水平速度)と跳躍距離の関係を見ると、男女それぞれ有意性の高い相関関係が得られた(図3-1-2)。

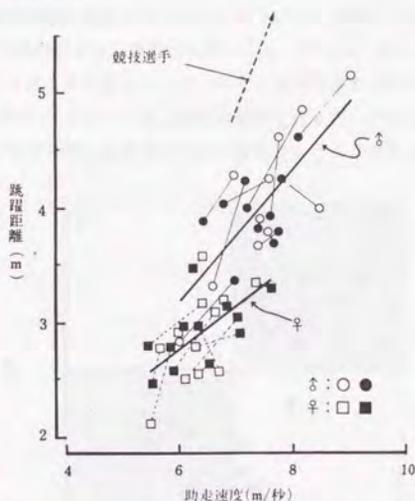


図3-1-2. 助走速度と跳躍距離の相関関係

※ A男:○□, B男:●■
♂: $y=0.569x - 0.24$ ($r=0.76$, $p<0.001$)
♀: $y=0.361x + 0.59$ ($r=0.59$, $p<0.01$)

この図3-1-2の中で、「助走速度を効果的に跳躍距離に結びつける動作」については、左上に位置する者は巧みであり、逆に右下に位置する者はその動作が巧みでないといえる。双生児の男女を比較してみると、男子の方が左上に位置し、女子に比べて動作が巧みであるといえる。一方図3-1-2において、双生児対間を結んだ直線は、次のようにとらえることができる。つまり、直線が右上を向いている対では、跳躍距離の差が助走速度の差に強く依存しており、左上に向いている対では助走速度ではなく動作の差によって跳躍距離の差が生じている。双生児対間の直線のほとんどが右上を向いていることから、跳躍距離の差は動作ではなく、助走速度に依存しているととらえられる。

ここでは跳躍距離が①助走速度と②それを効果的に跳躍距離に結びつける動作とからなるという前提にたつて、動作の巧みさを抽出したが、次にこの動作の巧みさを数量化して、双生児対間で比較してみる。図3-1-3は観察対象者について計

測された跳躍距離の値と、その時の助走速度を図3-1-2の回帰直線に代入して推定した跳躍距離の値との差、つまり図3-1-2における回帰からの偏差を、各双生児について示したものである。この偏差は、男子あるいは女子の群の中で、助走速度を効果的に跳躍距離に結びつけられるかどうかという動作の巧みさを表すといえる。図3-1-3の縦軸はA児、横軸はB児とした。それ故、第I象限に位置する双生児は、A児とB児ともに動作が巧みであり、第III象限の双生児はA児B児ともに動作が巧みでない。そして、第II象限の双生児はA児のみ動作が巧みであり、第IV象限の双生児はB児のみ動作が巧みであるということになる。

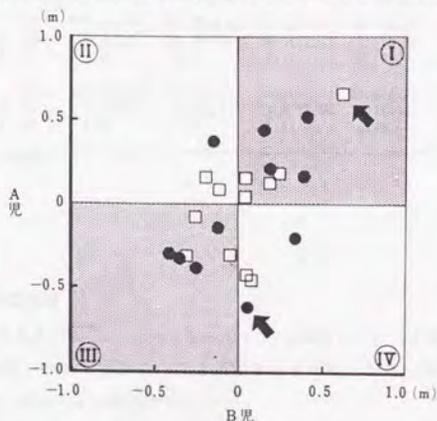


図3-1-3. 跳躍距離における図3-1-2の回帰からの偏差

※ ♂:●、♀:□。r=0.53, p<0.01
 $y=0.674x-0.02$, $x=0.411y+0.02$

各象限の分布の割合は、I=39%、II=13%、III=31%、IV=17%であった。また、双生児の両方とも動作が巧みであるか、あるいは両方とも巧みでないことを示す第I・III象限、いかえれば、動作が類似している象限の分布の割合は、70%にも及んだ。加えて、図3-1-3では有意な相関関係が得られた。

(2) 動作を構成する各種変数の比較

本研究では、前述の巧みな動作を構成する踏切および着地時の姿勢の中で、跳躍距離に大きな影響を及ぼすと考えられる6変数(図3-1-1のa~f)を選択した。具体的にいうと、(a)踏切中の支持脚の膝の最大屈曲角度、踏切離地時の(b)両大腿の角度、(c)振り上げ脚の膝関節角度、(d)支持脚の角度、着地時の(e)脚の角度、そして(f)上体と脚の屈曲角度の6項目について、双生児対間で比較した。それぞれ

れの項目の平均値、対差百分率および対差 t 検定の値は表3-1-2に示す通りである。

各項目の対差百分率は、(c)を除けば、小さい値であった。また対差 t 検定では、項目(f)の女子を除き、有意差は認められなかった。

表3-1-2. 双生児対間における踏切・着地姿勢の比較

項目	n	a(deg)	b(deg)	c(deg)	d(deg)	e(deg)	f(deg)
男子	絶対値	22	164.3(9.9)	96.5(10.8)	62.3(11.0)	66.1(3.9)	43.7(6.0)
	対差百分率	11	4.5(3.9)	10.7(7.2)	18.4(16.3)	5.1(5.6)	11.5(9.7)
	対差 t 検定	11	0.34	0.02	1.14	0.17	0.13
女子	絶対値	24	154.2(13.1)	87.5(8.0)	71.0(12.9)	67.4(4.0)	48.5(5.8)
	対差百分率	12	5.5(5.5)	9.4(8.0)	21.8(17.7)	6.1(4.9)	8.4(8.2)
	対差 t 検定	12	0.35	2.04	1.64	0.78	0.22

平均(SD) *: $p < 0.05$

(3) 跳動作の具体例

A 児、B 児ともに動作が巧みであって、かつ類似している対間(X) (図3-1-3の第 I 象限の矢印)、そして動作の巧みさが異なると考えられる対間(Y) (第IV象限の矢印) について、図3-1-4に動作を示した。

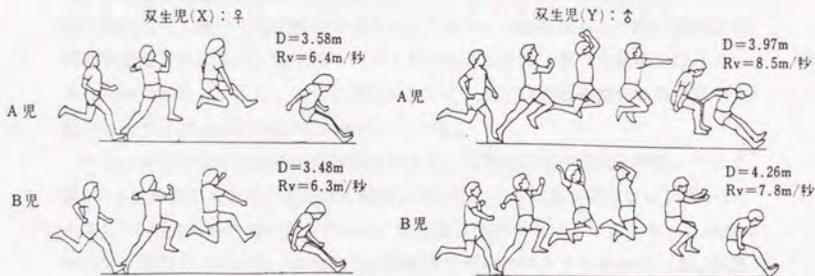


図3-1-4. 双生児の跳躍動作の具体例

※ D: 跳躍距離、Rv: 助走速度

双生児(X)をみると、踏切における体肢の動作、そして空中や着地の姿勢は類似しており、同一人物が2回跳躍したかのようなものである。一方、双生児(Y)では、助走速度はB児よりA児の方が0.7m/s速いが跳躍距離は逆にB児の方が0.29m大きい。つまり、助走速度と跳躍距離の大きさの順序が対間で逆転している例である。この双生児(Y)では、B児の方が助走速度を有効に使っているといえる。動作は、B児の方が上体を起こして、上方へ跳び出している(跳躍角、A児：9度、B児：16度)。そしてB児は、空中でも上体が起きているために、着地で余裕をもって足を前に振り出している。これが跳躍距離の差に現れていると考えられる。しかしながら、体肢の動作は、双生児(X)同様、極めて類似していると考えられる。

4. 考察

klissouras(1972)は、8歳から15歳までともにトレーニングを積んだ男子一卵性双生児1対について、一方がそれ以後激しい身体活動に参加し、他方が参加しなかった結果、6年後には身体組成および有酸素性作業能で顕著な差が現れたことを報告している。この報告を考慮すれば、身長、体重、跳躍距離の相関係数が高い本研究の双生児は、特別なトレーニングや疾病もなく、非常に類似した環境で育ってきたと考えられる。

助走を有効に使えるかどうかという動作の巧みさについて、まず男女間で比較してみると、図3-1-2から、女子よりも男子の方が動作が巧みであるといえる。これは、踏切や着地における個々の姿勢にも現れている。すなわち、表3-1-2に示すように、男子は女子に比べ、踏切では支持脚の膝を深く曲げずに、踏切で下肢伸筋群の伸張性収縮の特長を巧みに利用していると考えられる。また、男子の方が両大腿を大きく開いて踏切動作を大きくしており、しかも振り上げ脚の膝をより屈曲することによって、慣性モーメントを小さくして振上動作を素早く行っている(Dyson 1968)といえる。さらに着地において、男子は跳躍距離の獲得に有効な足の引き上げ(Fukashiroら1985)を行っている。

一方、男女それぞれを双生児対間でみると、対差百分率や対差t検定、そして図3-1-4の動作において、差がなく類似しているという結果が得られた。表3-1-2の項目(c)の対差百分率が大きいのは、計測値自体が小さいことによる。この点について、樋口ら(1976)は、体前屈の測定結果を例に次のように述べている。対差百分率法による類似度の比較は双生児研究において古くから用いられており、個々の双生児対間の経年的変化をみるのに都合のよい方法であるが、測定項目によっては不都合な場合が生じる。すなわち、測定値で一方が負の値をもつもの、あるいは双生児対がともに小さな値をもつ項目では、対差百分率は非常に大きな値

となり比較の意味をなさないからである、としている。そこで、対差 t 検定を行って見たわけであるが、やはり、ほとんどの項目において有意差が認められなかった。しかしその中で、女子の着地の脚のかかえ込み動作において、有意差が認められた。これは、着地動作が環境的影響を受けやすい動作であることを示している。

助走速度を有効に使う動作の巧みさを、双生児対間で比較した図3-1-3では、相関係数はそれほど高くなかったものの、有意な相関関係が得られた。すなわち、動作の巧みさという質的因子は、遺伝的影響を受けているといえる。ただし、動作の巧みさを体格や運動能力の量的因子と比較すると、動作の巧みさの方が遺伝的影響を受けにくいということもいえる。事実、鍛錬された、いいかえれば環境的影響を受けた競技選手では、図3-1-2の左上に示されるように、助走速度が大きだけでなく、それを有効に使う動作が双生児の男子よりも、一層巧みなのである。

5. 結論

動作の巧みさは、遺伝的な影響を受けているが、身長など意図的に変えることがほとんど不可能な因子に比べると、環境的影響を受けやすい因子であると考えられる。したがって、遺伝的要因の支配から、いかに環境的要因の影響力をもたせるかが、動作の巧みさの獲得を核とする身体教育に課せられた使命であり、意義であるといえる。すなわち、本研究によって、運動技能の向上を目標にした計画的かつ意識的な身体への働きかけが、身体教育において一層強調されねばならないということが示唆された。

第2節 統計分析を用いた走幅跳の「よい動作」の評価

1. 研究目的

本節では、跳動作を評価するための方法を、統計的手法を用いて検討する。ここでも、前節同様、走幅跳の跳躍距離が助走速度とその速度を跳躍に結びつけるための技術という2因子によって構成される(深代1983)を基礎としている。つまり、走幅跳の運動構造を「助走を技術というブラックボックスに入力した場合に跳躍距離が出力する」と考えたのである。ここでは走能力を身体資源として考えており、走能力が高ければ踏切中に大きな外力を発揮することも可能であるということを含んでいる。しかしながら、助走速度が大きくかつ踏切において大きな外力を発揮し得たとしても、技術が伴わなければ跳躍距離の増大に結びつかないのである。

従来、走幅跳の研究では、踏切中の地面反力(Boscoら1976, Ramey 1970)や身体重心の変位・速度(Boscoら1976, 松井ら1973)、踏切支持脚の関節角度変化(Klisourasら1958)などが測定されているが、パフォーマンスを評価の対象(従属変数)として検討しているので、身体資源と動作の良否との貢献度を区別できない。しかし、走幅跳の跳躍距離は助走速度と技術によって構成されているという前提にたつて、図3-2-1のように、因果関係モデルを設定すれば、体力の要素を除いた技術(動作)を把握することができ、バイオメカニクス研究の核の一つである「よい動作」の基準を明らかにすることが可能になる。

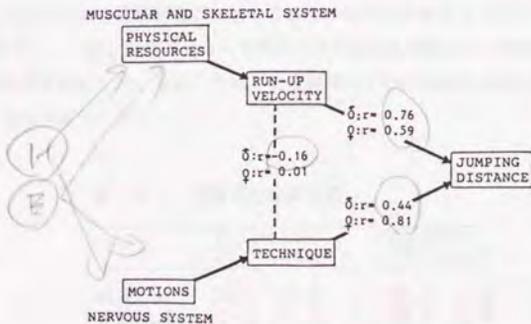


図3-2-1. 走幅跳の跳躍距離を構成する因果関係モデル

本研究の目的は、図3-2-1に示すモデルの各変数の相互関係を、重回帰分析を用いて明らかにし、走幅跳におけるパフォーマンス増大のための重要な動作を示すことである。

2. 研究方法

(1) 研究対象者と測定項目

研究対象者と測定項目は、前節と同様である。ただし本節では、対象者の身長、体重、等尺性最大筋力(椅座位での膝関節伸展)と背筋力を測定し、評価に加えた。なお、動作の巧みさ(技術)は、前節同様、助走速度と跳躍距離の帰直線からの偏差をもって数量化した。

(2) 分析方法

本研究では、図3-2-1の因果関係モデルの相互の関係をみるために重回帰分析を用いた。重回帰分析は多変量を同時に、かつ総合的にとり扱うことができ、従属変数に対する各独立変数の相対的重要性を容易に知り得るという利点がある(安田ら1977)。

助走速度を分析するには、助走速度を従属変数、体格と筋力を独立変数とした。また技術の場合には、技術を従属変数、身体各部の動作を独立変数とした。したがって、説明変数(独立変数)は、助走速度について4変数、技術では6変数となる。具体的な分析手順は、まず全体的な関連をみるために相関係数を算出し、次に被説明変数(従属変数)とした助走速度と技術のそれぞれに対する、説明変数全体で被説明変数の変動部分(分散)の何パーセントを説明できるかを知る。そして各説明変数の被説明変数に対する寄与の程度を把握するために、標準化された(平均0、分散1になるように変換された)偏回帰係数Beta、重相関係数R、決定係数 R^2 を算出した。なお、本研究では標準化された偏回帰係数が0.1を越えるものを意味があると考えた。

表3-2-1. 対象者の身体特性

	男子(n=22) 平均 (±SD)	女子(n=24) 平均 (±SD)
身長(cm)	165.3 (5.3)	155.2 (4.3)
体重(kg)	54.4 (7.2)	46.6 (3.9)
膝筋力(kg)	54.2 (13.7)	37.7 (7.9)
背筋力(kg)	102.9 (20.1)	73.7 (11.2)
走幅跳(m)	4.02 (0.53)	2.90 (0.35)

3. 結果と考察

(1) 身体特性

表3-2-1に研究対象者の身体特性と走幅跳の跳躍距離の値を、平均±標準偏差で示した。本研究対象者の身体特性は、15歳の全国平均(日本人の体力標準値1982)と比べてみると、筋力が少し低い(全国平均、脚力：男子55kg、女子41kg、背筋力：男子125kg、女子79kg)が、体格は全国平均(身長：男子167cm、女子156cm、体重：男子56kg、女子51kg)と同程度であり、本研究対象者は通常の中・高校生の身体特性を有しているといえる。一方、走幅跳の跳躍距離は、全国平均(15歳：男子4.36m、女子：3.30m)より、若干低い値であった。

(2) 跳躍距離・助走速度・技術の関係

図3-2-1に示される通り、跳躍距離に対して助走速度・技術ともに有意な正の相関関係があり、助走速度が大きく、技術が高いほどパフォーマンスが大きいといえる。ここで、跳躍距離を従属変数、助走速度と技術を独立変数としてBetaでみると、男子では技術(0.49)より助走速度(0.79)の方が効くが、女子ではその逆(技術0.81、助走速度0.58)になっている。すなわち、ここから男子の跳躍距離は助走速度によって強く規定され、女子では技術によることが示唆された。

Beta
故
F=7
(OK)

(3) 助走速度

表3-2-2は、体格・筋力と助走速度との関係を重回帰分析で処理した結果である。まず男子をみると、脚力が助走速度に対して強い影響を及ぼしており、次いで身長、体重という順になる。この4変数で助走速度の分散の67%を説明するが、脚力は1変数のみで52%を説明している。つまり、男子の場合、助走速度は脚力によってほぼ決定されるととえられる。

表3-2-2. 助走速度と身体資源の関係

	男子		女子	
	r	Beta	r	Beta
身長	0.320	0.313	0.162	- 0.055
体重	- 0.427 *	- 0.257	0.244	0.418
膝筋力	0.611 **	0.858	- 0.055	- 0.381
背筋力	0.347	- 0.191	0.121	0.189
	R = 0.817		R = 0.370	
	R ² = 0.668		R ² = 0.139	

** : P > 0.01

r : 単相関係数、R、R² : 重回帰係数

一方女子では、4変数全てをもってしても、助走速度の分散の14%しか説明せず、また助走速度と各変数の間で有意な相関関係もみられない。従属変数の分散が、独立変数とモデルに含まれていない諸変数(残差変数)との1次結合によって完全に決定される(安田1977)と考えれば、女子の場合は、ここであげた4変数以外の因子が助走速度を決定していることになる。

(4)技術

本研究では、踏切および着地時の動作の中で、跳躍距離に大きな影響を及ぼすと考えられる6変数(前節の図3-1-1のa~f)を選択した。身体各部の動作を評価する場合には、もちろん位置の変位のみでなく、その速度、加速度も検討しなければならないが、ここでは「動き」として最も評価しやすい位置の変位をまず分析することにした。

表3-2-2. 助走速度と身体資源の関係

項目	男子		女子	
	r	Beta	r	Beta
:a	0.257	-0.089	0.157	0.117
:b	0.070	0.238	0.368	0.446
:c	-0.288	0.393	-0.231	-0.335
:d	0.560 **	0.828	0.288	0.208
:e	-0.195	-0.343	-0.573 **	-0.576
:f	-0.145	-0.019	-0.043	0.091
	R = 0.806		R = 0.803	
	R ² = 0.650		R ² = 0.645	

** : P > 0.01

r : 単相関係数, R : 重相関係数

表3-2-3は、身体各部の動作と技術の関係を示したものである。男子では、6変数の中で最も技術に影響を及ぼしている動作は、踏切離地時の支持脚の角度dであり、次に振り上げた脚の膝関節角度cである。この2変数によって、技術の分散の58%が説明されることになる。すなわち、踏切時には踏切足を支点とした前方回転(hinged moment, Dyson 1968)をなるべく抑えること、また振り上げ脚の膝は屈曲させて慣性モーメントを小さくし、素早く前方へ振り出すことが重要になる。加えて、変数d、cと比較すると低い角、着地時の脚の角度eと離地時の両大腿の角度bも技術に関係している。つまり、踏切時には前述の振り上げ脚の膝を屈曲させるとともに大腿を十分に上方に振り上げ、着地時には足を引き上げることが望ましいととらえられる。

女子では、動作項目e、dが強く技術に影響しており、この2変数で技術の分散の49%を説明している。次いで、動作項目c、dが技術に関係している。このよ

b2 (後)

表3-2-2

17

うに男女共通して、動作項目 b、c、d、e が重要であるといえるが、技術に対して効く動作項目の順序は、男女間で明らかに異なるという結果を得た。特に、跳躍距離が助走速度より技術に依存する(図3-2-1参照)女子では、着地で足を引き上げることが極めて重要であるといえる。これは、Fukashiroら(1984)が三段跳の着地を分析した結果やDyson(1968)の指摘と一致しており、通常軽視されがちな着地動作の重要性が認められた。一方、男女とも、踏切中の支持脚の最大膝関節屈曲角度 a、そして着地時の上体と脚の角度 f は、技術とほとんど関係なかった。

4. 結論

走幅跳の跳躍距離の構成要素を、助走速度(体力)とそれを跳躍距離に結びつける動作(技術)に分けて因果関係モデルをつくり、各要素を支える因子を重回帰分析によって検討した。統計分析による本節の結果は、バイオメカニカルにみた「よい動作」とよく一致した。しかし、男女でそれぞれ「よい動作」が異なるという結果も得られ、対象とした集団で「よい動作」が異なることが示唆された。したがって、本研究の動作評価法を、男女・年齢・競技レベルという集団ごとに当てはめて行えば、各集団に適した「よい動作」が具体的に指摘でき、指導法の効率化が図れると考えられた。

前節結果
(進化) 40 肉付

第3節. 発育期における跳能力の発達と練習効果

1. 研究目的

前々節では、発育期における跳動作改善の可能性を検討し、計画的・意識的な身体への働きかけが重要であることを指摘した。この跳動作の獲得については、運動を制御する神経系の発達が著しい幼児および児童期(Tanner 1962)に、より高い発達の可能性が存在すると推定されている(Flinchumら1972, 宮下1980)。しかし、その実証はほとんど得られていない。

跳躍動作は人種や文化の違いに左右されることなく、2歳ごろに可能になる(Hellebrandtら1961)。このように跳躍それ自体は先天的に獲得される動作であるが、速くへ跳躍しようとする動作つまりパフォーマンスを高めようとする動作は、学習が必要である(Hellebrandtら1961)といわれている。いいかえれば、跳躍では大きな跳躍距離を目的とする場合、動作の巧みさを高めるための練習が必要であるといえるのである。

従来、発育・発達期にある者を対象にした跳動作の研究は少ない。Hellebrandt(1961)・宮丸(1976)・Roy(1973)は立幅跳において、Poe(1976)は垂直跳において動作様式の発達段階を観察した。また湯浅ら(1984)は、統計的手法を用いて発育期における立幅跳の効果的な動作を検討した。しかし、これらの研究は横断的な動作の観察であって、働きかけによる変化、つまり練習効果を検討したものはない。

本研究の目的は、幼児(5、6歳)および児童(7~12歳)に走幅跳の練習を課し、練習によって生じる跳躍距離の変化を検討することと、練習による跳動作の改善について検討することである。

2. 研究方法

(1)被検者

幼児は横浜市松陰幼稚園の園児で、5歳児(5歳児とは、その年度中に5歳になる者を示す)と6歳児の計48名、児童は横浜市立馬場小学校の生徒で7~12歳児の計189名、総計237名であった。被検者数を性別にみると、男子118名、女子119名であった。被検者の身体特性は、表3-3-1に示す通りである。身長と体重は、全国平均(日本人の体力標準値1982)と同程度の値であり、本研究の被検者は平均的な日本

人の幼児・児童を代表しているといえる。なお、被検者の親に対し、幼児においては幼稚園の園長、生徒においては担任の教諭を通じて、跳躍練習を行うことの同意を得た。

表3-3-1. 観察対象者の形態

		5歳	6歳	7歳	8歳	9歳	10歳	11歳	12歳
n		14	13	17	16	15	14	17	12
男子	身長	105.3 (5.7)	110.3 (4.0)	121.4 (5.6)	127.4 (6.0)	133.0 (5.9)	137.9 (5.2)	145.0 (4.8)	146.1 (7.3)
	体重	17.6 (3.2)	17.8 (1.4)	22.8 (3.5)	26.3 (4.3)	29.0 (5.4)	31.3 (4.2)	36.3 (5.4)	38.8 (5.1)
n		10	11	19	14	15	18	18	14
女子	身長	101.8 (3.0)	108.3 (4.1)	120.3 (5.8)	127.5 (6.4)	129.7 (7.4)	138.3 (8.5)	144.1 (7.2)	148.4 (5.4)
	体重	15.7 (2.0)	16.4 (1.8)	22.7 (3.6)	26.7 (5.8)	28.3 (4.9)	32.0 (5.8)	37.5 (9.1)	38.3 (5.7)

身長:cm、体重:kg 平均(SD)

(2) 跳躍練習

幼児については昭和56年5月から7月初旬にかけて、児童については昭和58年10月から12月にかけて、それぞれ約2カ月間の跳躍練習を教師の指導のもとに行った。具体的には、週4日、1日10回程度の跳躍練習である。動作としては、a)垂直跳と立幅跳、b)とび箱の上からの立幅跳(着地練習)、c)ロイター板を用いた走幅跳(写真1)、d)走幅跳で空中にメンコをつるして、その的を手でたたくといったことであった。一方、指導要点としては、a)助走をリズムカルに(1、2、1、2、ボン:踏切)、b)踏切で振り上げ脚や腕・肩を引き上げる、c)空中で身体を伸ばす、d)着地で脚を引き上げる、e)助走を速く、であった。



写真1. 走幅跳の練習風景

(3) 跳躍距離の測定と動作の撮影

跳躍距離の測定は、2カ月間の練習期間の前後に行った。距離の測定においては、スチール製の巻尺を用い、踏切時のつま先から着地点までを計測した。その際の動作様式は、文部省スポーツテストの方法(1982)に従い、年齢に応じて5mから20mの助走を用いて、「できるだけ速くへ跳びなさい」という指示のもとに行うものであった。さらに跳動作を観察するために、踏切から着地までの動作を、側方より撮影した。幼児の撮影では16mm高速度カメラ(Photo-Sonics社製)を用い毎秒24コマで、また児童の撮影ではロータリーシャッタービデオカメラ(Sony社製)を用い毎秒30コマで行った。

(4) 動作の分析

撮影によって得られたシネフィルムおよびビデオフィルムから、各幼児・児童の助走速度(踏切1歩前の腰の水平速度)および跳動作の評価を行った。跳動作評価の項目および判断の基準は、以下に示す通りである。なお、「2」がバイオメカニカルにみた「よい動作」である。

A. 踏切の様式

1=両足踏切、2=片足踏切

B. 踏切離地時の振り上げ脚の大腿の位置

1=大転子からおろした垂線と大腿がなす角が45度未満、2=45度以上

C. 踏切離地時の振り上げ脚の下腿の位置

1=膝関節からおろした垂線より下腿(足首)が前にある、2=後にある

D. 踏切離地時の腕の前後の位置

1=両手が肩より前、2=それぞれの手が肩の前後(走と同様)

E. 踏切離地時の振り上げ腕(踏切脚側)の上下の位置

1=手が肩より下、2=手が肩より上

F. 空中の腕の位置

1=どちらかの手が肩より下、2=両手が肩より上

G. 着地の様式

1=走りぬけ、2=両足着地

H. 着地時の腕の位置

1=どちらかの手が肩より後、2=手が肩より前

I. 着地時の上体(大転子と首を結ぶ線)と脚(大転子と足首を結ぶ線)の角度、つまり脚を抱え込んでいるかどうか

1=90度以上、2=90度未満

(5)統計処理

練習による各被検者の跳躍距離の増減の有意性を調べるために、練習前と練習後の測定結果について、各測定値を対する対差 t 検定を行った。t 検定および相関は、危険率5%以下をもって有意と判定した。

3. 研究結果

練習前の跳躍距離と年齢の関係は、図3-3-1に示す通りである。男子 $r=0.98$ 、女子 $r=0.98$ (各々 $p<0.001$)という有意性の高い相関関係が両者の間に認められた。また、図3-3-1には、2カ月の練習による跳躍距離の増減について示してある。練習の前後の跳躍距離を対した対差 t 検定では、男子では6歳と8歳、女子では6~11歳の間で有意差が認められた。跳躍距離の増加量は、男女ともに7、8歳にピークが現れた。

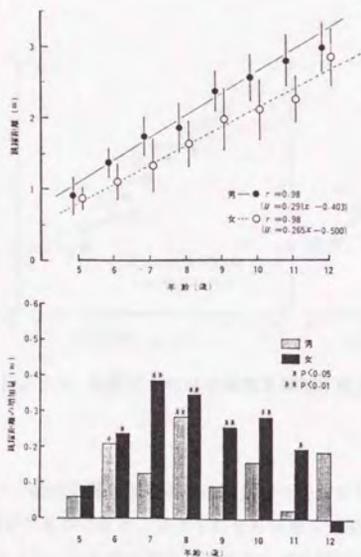


図3-3-1. 練習前の走幅跳の跳躍距離と年齢との関係(上)と2カ月間の練習後の跳躍距離の改善(下)

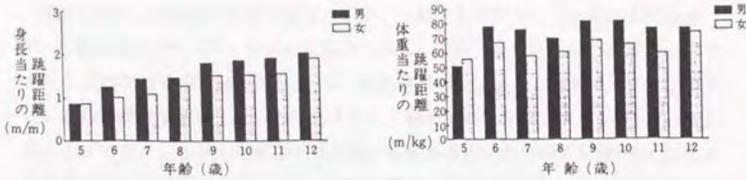


図3-3-2. 年齢ごとの身長あたり・体重あたりの跳躍距離

跳躍距離を身長当たり、体重当たりで示したのが図3-3-2である。身長当たりの跳躍距離は、男女それぞれ有意性の高い相関関係が認められた(男子 $r=0.97$ 、女子 $r=0.98$)。体重当たりの跳躍距離も、年齢に対して有意な相関関係が認められたが、相関係数自体は身長当たりの値よりも低かった(男子 $r=0.60$ 、女子 $r=0.59$)。体重あたりの跳躍距離は、5歳児では男女とも約 0.05m/kg であり、6歳以降では男子が $0.070\sim 0.082\text{m/kg}$ 、女子が $0.058\sim 0.074\text{m/kg}$ であった。

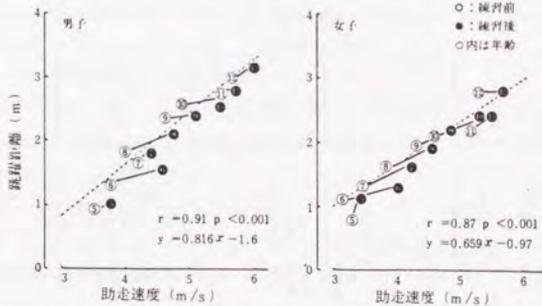


図3-3-3. 年齢ごとの助走速度と跳躍距離の関係

図3-3-3は、跳躍距離と助走速度の関係について示したものである。図中の回帰直線は練習前のものであり、男女それぞれ有意な相関関係が認められた(男子 $r=0.91$ 、女子 $r=0.87$)。白丸は年齢ごとのグループの練習前の平均値、そして黒丸は練習後の平均値である。跳躍距離も助走速度も練習後の値の方が向上しているが、各グループにおける練習前と練習後を結んだ直線の傾きは、その大部分が全体の回帰直線の傾きよりも小さかった。

図3-3-4は、各動作の評価項目について、年齢ごとのグループにおける評価点‘2’の出現率をパーセントで示したものである。実線で示したものが練習前の値であり、丸印は練習後の値である。‘2’の出現率が多いほど、各グループのなかでよい動作の被検者が多いということになる。練習前の動作は、大きく3つに分類することができた。つまり、練習する以前から既に習得されている動作(例えば男子の項目A, B, C)、年齢とともに徐々に改善していく動作(例えば男女の項目D, 男子の項目G, I)、そして年齢の増加と無関係に低い値となる項目(例えば男女の項目F, H)に大きく分けられた。また、練習後の値(丸印)をみると、練習によってほぼ全員がよい動作となる項目(例えば女子の項目A, B, C, 女子の項目D, 男女の項目E)、幼児期あるいは小学校低学年で練習効果の大きい項目(例えば男女の項目F, H)に分けられた。

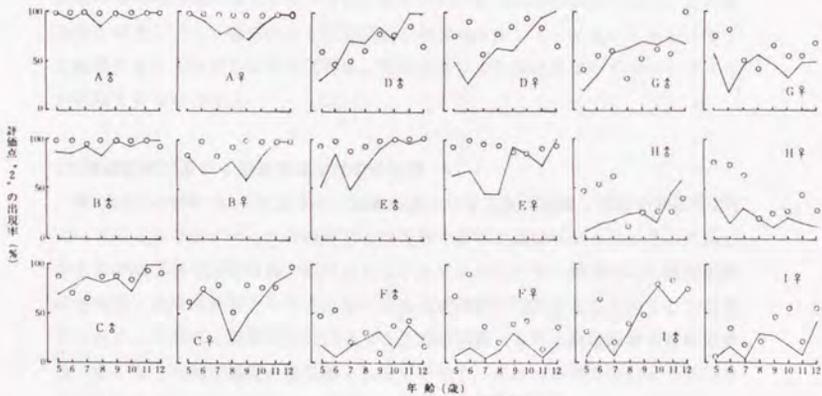


図3-3-4. 各動作パターンの改善
※ — : 練習前、○ : 練習後

4. 考察

(1) 跳躍距離について

練習前の跳躍距離と年齢との有意な相関関係(図3-3-1)は、学校体育以外に特別な働きかけをしない場合、年齢とともにこのように跳躍距離が発達することを示している。現在の文部省指導要領では、5年時以降に走幅跳の授業が組み込まれているが、授業による指導効果、例えば5年時に急激に跳躍距離が伸びるといったことは認められなかった。また、身長当たり・体重あたりの跳躍距離は男女それぞれ有意な相関関係が認められたが、相関係数自体は体重当たりの値の方が低かった。すなわち、跳躍距離の発達には身長の増加よりも、体重の増加がいかにすれば筋量の増加に依存しているということが示唆された。

2カ月間の練習による跳躍距離の増加量は、男女ともに7、8歳にピークがあり、その前後の増加量は少ない。約2カ月の練習では、小学校低学年において最も伸び率が大きいといえる。また、図3-3-1の回帰直線から、2カ月の練習期間における跳躍距離の増加量を推定してみると、男子が約5cm、女子が約4cmである。この成熟度を考慮しても、練習による跳躍距離の増加は大きいといえる。したがって、走幅跳における働きかけの至適時は、男女ともに小学校低学年であるということが示唆されるのである。

(2) 跳躍距離に及ぼす助走速度と技術の影響

第3章の1と2節で示したように、跳躍距離に対する助走速度と技術の貢献を図3-3-3でみると、各グループの練習前と練習後を結んだ直線の傾きは、その大部分が全体の練習前の回帰直線の傾きよりも小さい。すなわち、練習による跳躍距離の増大は、動作の改善というよりもむしろ助走速度の増大によるということが考えられる。この点、植屋ら(1984)の小学生の走幅跳における跳躍距離の獲得条件は、あくまでも助走速度の延長線上にあるもので、走りぬげ型の踏切として行われるレベルのものであるという指摘と一致する。

(3) 身体各部の動作の改善

跳躍動作(図3-3-5)についてみると、踏切の様式や踏切離地時の大腿・下腿の位置といった踏切における下肢の動きは、男子では幼児期に至る前に既に獲得されており、一方、女子では特別な練習をしない場合11歳以降にはほぼ全員が獲得するが、練習を課せば男子同様幼児期からよい動作の習得が可能になるといえる。ただし、踏切時に振り上げ脚をかかえこんで引き上げる動作(項目C)は、男子に比べ女子が劣っている。これは、踏切時に振り上げ脚の膝を屈曲させて慣性モーメントを小さくし、素早く前方へ振り出すという動作(Dyson 1968)である。

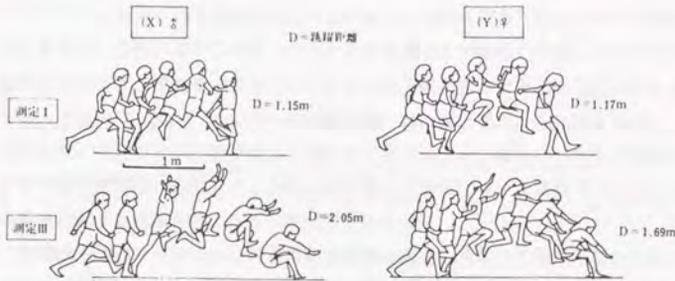


図3-3-5. 練習による跳躍動作の改善例

踏切時の腕の動作をみると、練習前は年齢とともに徐々によい動作を習得する人数が増えるが、練習によって、動作獲得の時期が早まる。これは体幹よりも末端の動作の方が意図的な動作を容易に行うことができることを示している。しかしながら、空中の腕の動作は練習前のレベルも低く、幼児においては若干の練習効果がみられるものの、児童に到っては練習による改善もあまりみられない。この理由として、できるだけ速い助走を行いその後踏み切った場合、空中でバランスをとることがうまくできず、空中での腕の動作に集中できないということが考えられる。空中でバランスがとれないという問題は着地動作にも影響しており、項目Gにみられるように小学校高学年になっても両足着地ができずに走りぬけになっている被検者が多い。Hellebrandt(1961)や宮丸(1976)は、立幅跳では既に3歳ごろから両足で腰を屈曲して着地していると報告している。つまり、立幅跳における着地は、跳動作が可能になるとすぐに両足着地ができるのであるが、走幅跳では小学校高学年の児童でもなかなかできず、練習を課してもその動作の獲得は難しい(項目G参照)といえる。また両足着地をしても、身体が伸びた状態では効果的な着地とはいえない(深代と宮下1984)。そこで、着地において脚をかかえ込んでいるかどうか(項目I)をみると、男子では年齢とともに徐々に向上しているが練習効果はみられず、女子では練習効果も認められない。幼児であれ競技選手であれ、走幅跳においては着地動作が跳躍距離に大きな影響を及ぼす(深代1983)。本研究の練習においても着地動作の指導は行ったものの、その効果は認められなかったのである。

(4) 動作獲得の生理学的背景

真島(1978)は、学習に基づく行動を学習行動として、本能行動のような生まれつきの生得行動と区別している。また、Hellebrandt(1961)は、跳躍の動作それ自

体は先天的に獲得される系統発生的なもので、筋活動の時系列は本質的には不随意であるが、空中に身を投げ出してできるだけ長い水平距離を移動しようとする動作は学習があって始めて成り立つ、つまり後天的に獲得する個体発生的なものであると述べている。すなわち、走幅跳の動作は学習行動であるといえるが、本研究では、通常の生活体験を通して培われてきた幼児・児童の、いわば生得行動に近い形の跳躍動作に対して、身体を受容器に「練習」という刺激を入力し、その刺激に対する効果をみようとしたわけである。

走幅跳の運動パターンは、通常の随意運動と同様、身体の種類受容器から入力された「跳躍」という情報が求心性神経を経て中枢神経系に達し、そこで処理されて遠心性神経を経て効果器である骨格筋を動かすことにより成り立つ。ここでいう練習とは、単に跳躍という情報を受容器に入力するだけでなく、研究方法で述べたように遠くへ跳ぶために有効であると思われる動作を、言語により聴覚から、教師の模範動作により視覚から情報として入力し、そして表出された動作を教師がさらにまた言語により修正するというものである。もちろん、運動の結果が自分自身の筋の張力受容器から感覚性インパルスにより大脳皮質や小脳へフィードバックされ、刻々にその運動を制御するという身体内部のフィードバック機構が練習遂行時に働いている(篠田1983)のはいうまでもない。この練習を2カ月間繰り返して、動作の変化を観察したところ、前述したように特に踏切動作において著しい改善が認められたのである。しかしながら、練習による動作の変化が随意運動の機序のどの部分の改善によるのかということは、残念ながら本研究では不明である。すなわち、動作の改善が、刺激を受け入れる受容器と求心性神経に関わる性能の改善によるのか、中枢神経系の性能の改善によるのか、動作を表出する効果器と遠心性神経に関わる性能の改善によるのかは明確ではない。ただ、意図的な働きかけによる動作の改善という意味においては、随意運動の成立機序の中である特定部分の改善によるというよりも、量の多少はあれむしろそれぞれの経路の性能全ての改善によると考えられる。

ところで、運動には無意識的に行われている反射運動の部分と、意識を働かせて行う随意運動の部分がある(篠田1983)が、ほとんどの運動は両者が重複して成立しており、走幅跳も同様である。例えば助走で走る時の両足を交互に前に出すという意識ののぼらない部分と、踏切でしっかり地面反力を受けとめる、あるいは肩をより高く引き上げるといった意志の関わる部分である。先に述べた学習行動を習得していく過程では、意志の関わる随意的な運動を繰り返し行っていくうちに、意識しなくてもその動作が望ましい状態で行えるようになる。これがいわゆる「身体で覚える」ということであり、合目的な運動パターンの生成といえる。本研究において観察された動作の改善が跳躍距離の向上に影響を及ぼすまで

に至っていないという事実は、動作の改善が跳躍距離の増大という目標に対してまだ合目的な動作として洗練されていない、いいかえれば改善された動作がまだ意志の関わる範囲であり、個々の動作の改善がまとまりをみせていないということが考えられる。

また、パフォーマンスが向上していく過程では、体力の向上がまずあって、次に技術の改善がそれに適応していくという時相差が存在する。そして、練習による跳躍距離の増大は動作の改善というよりもむしろ助走速度の増大が原因となっていた。そして動作の改善が大きく跳躍距離に影響しなかった理由は、着地動作の改善があまりみられなかったためと考えられた。したがって、着地動作の改善を中心に2カ月を越えてもう少し長く練習を続けたならば、望ましい動作が無意識的にかつ合目的に集約され(助走速度を生かすように個々の動作がまとまり)、さらなる跳躍距離の増大が認められたのではないかと推定できる。事実、約6カ月という長期の練習を幼児に課した研究(深代ら1983)では、動作の改善とともに跳躍距離も飛躍的に伸びたという結果が報告されている。

5. 結 論

幼児および児童(5~12歳)を対象に、約2カ月間の走幅跳の練習を課し、練習による跳躍距離の変化と動作の改善について検討した。動作の分析については映画分析法を用い、踏切、空中、着地局面における腕、上体、脚などの動作を評価した。

練習を行う前の跳躍距離は年齢とともに増加し、その増加は主に体重いかにすれば筋量の増加によることが考えられた。一方、2カ月間の練習を課すと、跳躍距離は7、8歳をピークに40cm近い伸びが認められ、その前後つまり5、6歳あるいは11、12歳ではそれほど大きな伸びは現れなかった。したがって、走幅跳における働きかけの至適時は、男女ともに小学校低学年であるということが示唆された。

跳躍距離が助走速度と技術という2因子によって成り立っていると考えると、練習による跳躍距離の増加は技術の改善というよりもむしろ助走速度の増加という因子のほうが大きかった。しかし、動作それ自体を観察してみると、着地動作を除けば著しい改善が認められ、着地動作をさらに指導することでより一層跳躍距離が向上すると推定された。

すなわち、従来の指摘通り、本研究でも神経系の発達の著しい幼児期あるいは小学校低学年時において、著しい走幅跳の練習効果が認められた。本研究によって、小学校低学年までに動作の改善のための働きかけが必要であり、それを行えば跳躍距離の増大が期待できるという実証が得られた。

第4章 総括

跳躍は、人間の様々な身体運動の中で、出力パワーが最も大きく、筋活動の出力媒体として「最もダイナミックな運動」といえる。跳躍の大きな出力パワーを支えているのは、筋と腱の連合組織「筋・腱連合組織: muscle-tendon complex system」である。もちろん、運動を起こす力発生源(force generator)は筋自体であるが、ダイナミックな運動では、筋と骨格を直列につなぐ腱が大きな役割を果たす。腱組織には、引き伸ばされると縮もうとする「バネの働き」があるからである。人間のほとんどの運動は、主運動に先行して逆方向に運動する反動動作を用いるが、この逆方向の運動によって、強制的に引き伸ばされた腱に弾性エネルギーが蓄えられ、次の主運動の時に利用される。反動動作を伴う場合に大きな出力パワーを発揮できるのは、この弾性エネルギーの働きによると考えられている(Cavagna 1977, Komi 1984)。反動動作を伴う典型的な運動が「跳躍」である。したがって、跳躍の大きな出力パワーは、筋と腱の両組織の相乗効果によって、形成されていると考えられるのである。

ここでは、本研究の主題である「跳躍動作からみた筋・腱連合組織のダイナミクス」を総括することにする。

第1節 陸上競技における跳躍動作のダイナミクス

陸上競技における競技選手、しかも世界一流選手の踏切動作には、遺伝的・環境的に最もすぐれた動作が表出されていると考えられる。したがって、世界一流選手の踏切動作の解析は、跳躍における筋・腱連合組織の最もダイナミックな動態を、身体全体の移動として、巨視的に観察することになる。

水平跳躍距離を争う走幅跳と三段跳は、助走における身体重心の水平方向の速度ベクトルを、踏切で斜め上方に変える跳躍である。この跳躍で、パフォーマンスに大きく影響する因子は、助走速度と跳躍角である(深代1992)。踏切に入る時の最終助走速度と跳躍距離の間には、有意性の高い相関関係が認められる(第1章1,2,3節)。したがって、水平跳躍である走幅跳と三段跳は、まず高い助走速度をもつことが前提になる。ただし、100m疾走のように、単に全力で助走速度を高めても、大きな跳躍角を得ることはできない。この場合の助走速度は、踏切(筋・腱連合組織の活動)をコントロールできる範囲での、できるだけ高い速度という意味である。一般に、優れた走幅跳選手でも、自分の最高速度の95%程度で踏切に入るといわれている(Javer1970)。例えば、国際大会において、100m(9'86:世界記録)と走幅跳(8m87)の両種目で常に優勝を争うカール・ルイスは、100mの最高速度:12m/秒(阿江ら1992)の92%:11m/秒(第1章1節)で踏切に入っている。

跳躍距離に影響するもう一つの因子、踏切離地時の跳躍角(投射角)は、跳躍の種類によって異なる。走幅跳は $18\sim 24^\circ$ の範囲(第1章1節)で、三段跳のホップは $12\sim 19^\circ$ 、ステップは $10\sim 20^\circ$ 、ジャンプは $18\sim 26^\circ$ の範囲である(第1章2節、深代ら1992)。ホップとステップが同程度の跳躍角で、ジャンプと走幅跳の踏切がそれらより若干大きいといえる。

跳躍角を制御しているのは、踏切中の地面反力である。図4-1は、走幅跳(第1章1節)と三段跳(第1章2,3節)における各踏切の平均の加速度ベクトル(≒地面反力)を示したものである。これらの跳躍の加速度ベクトルは、すべて(ブレーキとして)水平速度を減じる方向に働き、それによって重心の移動方向を斜め上方に変えている。走幅跳と三段跳を比較すると、走幅跳の加速度ベクトル(図4-1:●印)は、三段跳の各踏切よりも後ろに傾き(約 110°)、絶対値も大きい(体重の4.2倍)。これに対して三段跳は、ベクトルの傾きが小さく、垂直に近いといえる。走幅跳では1回でできるだけ速くへ跳躍しようとする踏切の特徴、三段跳では水平速度を維持しながら3回の踏切をまとめようとする踏切の特徴が現れているととらえることができる。

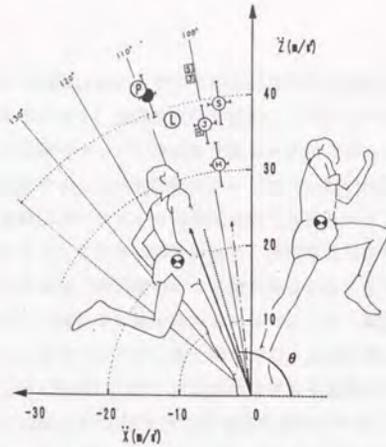


図4-1. 各種跳躍の踏切における平均加速度ベクトル

- ※ ●:男子走幅跳の平均±SD、○P:パウエル、○L:ルイス、
 ○H:ホップ・○S:ステップ・○J:ジャンプの各平均±SD
 □H・S・J:三段跳18m跳躍の推定値

平均加速度ベクトルの絶対値は、世界一流選手の場合、走幅跳(第1章1節、図4-1:●印)でも三段跳(第1章3節、図4-1:□印)でも、体重の4倍を越える値であった。また、三段跳の中の加速度ベクトルはステップが最大、ホップが最小であり(第1章2節)、この順序は三段跳の世界記録の踏切を推定した値(第1章3節)でも同様であった。第1章2節で述べた三段跳の加速度ベクトルの絶対値(○:H, S, J)が若干小さいのは、対象とした日本選手が、第1節の世界一流の走幅跳選手(●)や第3節の世界記録を出力するための推定値(□:H, S, J)に比べ、競技レベルが低いことによると考えられる。

以上のように踏切の種類によって、踏切の平均加速度ベクトルの方向と大きさが異なるが、同じ様式の踏切の中でも個人差がある。走幅跳で最も高い跳躍(跳躍角:23.1°)であったパウエルは、加速度ベクトルの傾きも絶対値も大きい(○P)。これに対して、最も低い跳躍(跳躍角:18.3°)であったルイスは、ベクトルの傾きも絶対値も小さい(○L)。パウエルとルイスは、同じ最終助走速度(11m/秒)をもちながら、高い跳躍と低い跳躍に分かれるが、両者の踏切の特徴は、この加速度ベクトルによって説明することができる。

そして、踏切中の加速度ベクトルをコントロールしているのが、踏切動作である。踏切動作で中心となるのは支持脚(阿江1988)であるが、支持脚の伸展筋群は踏切前半で伸張性(エクセントリック)収縮、後半で短縮性(コンセントリック)収縮となる。走幅跳や三段跳のように助走後の踏切では、踏切前半の伸張性収縮が

大きな役割を果たす(深代1990)。踏切で伸筋群の伸張性収縮が強いほど図4-1の加速度ベクトルが後ろに傾き、伸張性収縮を強調しなければベクトルが垂直に近くなるといえる。三段跳のホップは伸張性収縮をそれほど強調しない例であり、走幅跳の中で低い跳躍のルイスは三段跳のホップに近い踏切の様式であるといえる。これに対して、走幅跳のパウエルは伸張性収縮を強調しベクトルを後ろに傾けて、高い跳躍角を得ようとしている。両者の踏切の運動学的な特徴を示すと、以下のようになる。パウエルは、踏切接地時に、踏切脚をあまり引き戻さない固定式接地(深代1990)を用い、踏切中に膝を屈曲させないように、脚伸筋群の伸張性収縮を強調している。一方のルイスは、踏切接地時に、上体を直立に保ち、踏切脚の引き戻し速度を上げ(積極的接地)、踏切脚の膝を若干屈曲させて(脚伸筋群の伸張性収縮をそれほど強調せずに)前後方向の速度を減少させない踏切を行っていた。

いずれにしても、陸上競技における跳躍の踏切では、踏切前半の伸張性収縮が重要な役割を果たしている。これは、筋・腱連合組織の弾性特性が大きく関わっていると考えることができる。筋自体の短縮性収縮だけでは、図4-1にみられるような、体重の4倍もの力を約0.1秒間も発揮することは不可能と考えられるからである。

第2節 跳躍動作を支える筋・腱連合組織のダイナミクス

本節では、前節で予想した跳躍の踏切において重要な筋・腱連合組織の動態を直視することにする。ここでは垂直跳を対象に、まず下肢3関節の関節回りのトルクを観察し、踏切中の各関節の働きを調べることから始める。踏切中に生じる関節トルクは、筋活動による張力がリンクセグメント(骨や関節)に働いた結果としてとらえることができるからである。

跳躍動作は、スクワット姿勢からの垂直跳(SJ)、直立位から反動を伴う垂直跳(CMJ)、足関節を中心としたその場連続跳躍(Hopping)の3種類の垂直跳を対象とした。これらの垂直跳では、踏切中に下肢3関節すべてが伸展トルクとして働く(第2章1節)。したがって垂直跳でも、前節の陸上競技の踏切同様、関節の屈曲局面で下肢伸筋群は伸張性収縮、伸展局面では短縮性収縮になる。垂直跳におけるトルクの発揮パターンは、若干の個人差がある(HubleyとWells 1983)ものの、3関節のトルクはほぼ同期して現れる。トルクは重心の最下点(伸張性収縮と短縮性収縮の変換点)において最大となるが、その時点において、機械的エネルギーの流れはほとんど認められない(第2章1節、FukashiroとKomi 1987)。つまり、下肢の屈曲から伸展への変換点は、力学的にいえばあたかもバネが引き伸ばされた状態、いかえれば弾性エネルギーが筋・腱連合組織に蓄えられた状態といえる。特に、その傾向は、Hoppingにおいて顕著であった(第2章1節)。

これまで、ほとんどの先行研究(例えばAsumussenら1974)は、SJとCMJのパフォーマンスの差が筋の弾性エネルギーの活用之差を反映するものと考えていた。しかし、第2章1節のトルク研究、すなわち膝と足関節の仕事はSJとCMJでほとんど同じであったが、CMJにおける股関節伸筋群の機械的工作はSJよりも40~80%大きな値を示すという結果によって、SJに対するCMJのパフォーマンスの増大は、弾性エネルギーの利用というよりもむしろ、股関節の大きな仕事によっていることが示されたのである。加えて、Hoppingは、様々な跳躍運動の中でも、より弾性エネルギーの活用が大きい運動と考えられた。

ところで、関節トルクからの推定値を基に、筋・腱連合組織の動態を観察する場合、最初に推定値の妥当性の検討がなされなければならない(Gregorら1991)。関節トルクは、靭帯や筋によって発揮された力、関節反力、そして重力と摩擦による力が総合された結果であるので、筋が発揮した内力を関節トルクから推定するには問題があると考えられるからである。

そこで、ヒトのアキレス腱張力(ATF: Achilles tendon force)を特殊なin-vivo技術によって、直接測定し(第2章2節、Komiら1987、Komi 1990)、この直接測定の

ATFと、リンクセグメントモデルにおける関節トルクから推定したEATF(Estimated ATF)とを比較した。ATFの測定は、ヒトのアキレス腱にバックルタイプのトランスジューサーを埋入し、運動中のATFを直接測定するという方法である。

関節トルクの推定値は、アキレス腱張力直接測定値に対して、足底屈局面では両変数がよく一致するという結果を得た(第2章2節)。ただし、両変数とも、下腿三頭筋以外の足底屈筋(足底筋、長母指屈筋、長指屈筋、後脛骨筋、長腓骨筋、短腓骨筋)の20%の過大評価(Murrayら1976)を考慮しなければならない。Gregorら(1991)は、自転車ペダリング中の足関節トルクについて、ATFから推定した足関節トルクは、リンクセグメントモデルから推定したトルクの65%になる場合があると報告している。すなわち、自転車ペダリングのように運動強度が低い場合(Gregor 1991)や、他の関節(股・膝)が主動的に働く場合(SJとCMJの運動初期)には、関節トルクからの推定が過大評価される(第2章2節)。これは、関節や靭帯などに生じる‘摩擦’がリンクモデルのトルクに反映されないためと考えられる。

最後に、ATF直接測定によって、垂直跳における筋・腱連合組織の弾性効果について検討する。跳躍は、反動動作を伴う典型的な運動といえることができ、反動動作(筋・腱連合組織の伸張-短縮連関: Stretch-shortening cycle)は、弾性エネルギーの活用にも有効に働くからである。弾性エネルギーは、筋・腱連合組織の中の直列弾性要素(SEC)に蓄えられる。SECはそのほとんどが腱にある(Huijing 1991)ので、SECを観察するには腱に注目する必要がある。そこで、直接測定したヒトのATFの値を基に、次に示すように、力(ATF)の関数として、各種垂直跳中の「腱の弾性特性」を検討した。

アキレス腱の力-長さ関係を2次曲線(Woo 1981)と仮定すると、力‘F’は腱の硬度‘k’を定数とし、長さΔTLの関数となる(式1)。

$$F = k \times \Delta TL^2 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、ΔTLは腱の伸張の長さ。

被検者のアキレス腱の横断面積を考慮し(Alexanderら1977)、硬度係数kを計算すると19.6N/mm²となる。腱に蓄積された弾性エネルギーの量(Eel)は、力F0とSECの伸張ΔTLを考慮し、F0の関数として表せる(式2)。

$$\begin{aligned} Eel &= \int_0^{\Delta TL} F(d) TL = \int_0^{\Delta TL} k \cdot \Delta TL^2(d) TL \\ &= \frac{1}{3} \frac{\sqrt{F0^3}}{\sqrt{k}} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

式2より、「腱の硬度kが高くなるほど、弾性エネルギーの蓄積が少なくなり」、逆に「力が大きいほど弾性エネルギーの蓄積量が増大する」ことがわかる。つま

り、力の要素が弾性エネルギー蓄積に大きく貢献しているのである。

垂直跳中に、アキレス腱に蓄えられる弾性エネルギーを計算し、下腿三頭筋の正仕事量に対する割合で示すと、SJが19%、CMJが20%、Hoppingが31%となった(図4-2)。最大下運動強度のHoppingにおいて、最大強度のSJやCMJよりも大きな弾性エネルギーの貢献が認められた。これは、Hoppingの運動様式が伸張-短縮連関(Stretch-shortening cycle)の特長をよく活用していることを示している。

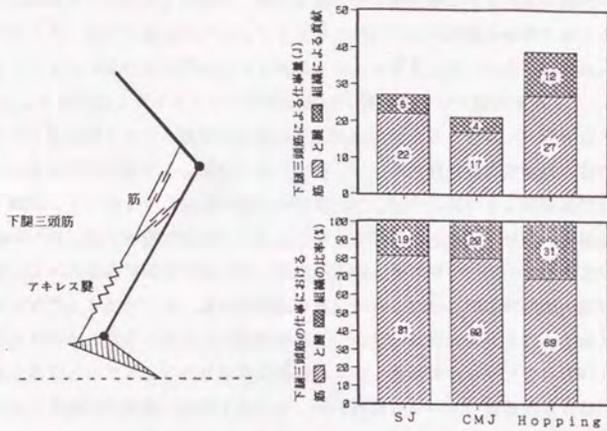


図4-2. 垂直跳における下腿三頭筋の動態：筋とアキレス腱の貢献

第3節 ダイナミックな跳躍動作の獲得

ヒトの運動は、一般に歩・走のように先天的に獲得される系統発生的な運動と、投・泳のように学習があって初めて成り立つ、つまり後天的に獲得される個体発生的な運動に大別できる。しかしながら、この両者は明確に区別できるものではなく、様々な運動は先天的(遺伝的)および後天的(環境的)要因が複雑にかかわりあって成り立っている。跳躍は、動作を遂行する筋活動の時系列は本質的に不随意であるが、空中に身を投げ出してできるだけ長い水平距離を移動しようとするダイナミックな動作は学習によって獲得されると考えられている(Hellebrandt 1961)。本節では、ダイナミックな跳躍動作の獲得について検討する。

まず、発育期における跳動作改善の可能性を検討するために、一卵性双生児における跳動作を比較する。遺伝的因子が等しい一卵性双生児の走幅跳の動作は、よく類似しているという結果を得た(第3章1節)。しかしながら、跳躍動作(巧みさ)の獲得は遺伝的な影響を受けているものの、相対的にみると、体格・筋組成・運動能力などの量的な因子に比べて、環境的影響を受けやすい因子であるということが出来る。したがって、遺伝的要因の支配から、いかに環境的要因の影響力をもたせるかが、動作の巧みさの獲得を核とする身体教育に課せられた使命であり、意義であるといえる。この双生児研究によって、運動技能の向上を目標にした計画的かつ意識的な身体への働きかけが、身体教育において一層強調されねばならないということが示唆されたのである。

動作改善のための働きかけを行う場合、具体的な動作が提示されなければならない。そこで次に、統計分析を用いて、走幅跳における「よい動作」を、次のように推定した。つまり、走幅跳の跳躍距離の構成要素を、助走速度(体力)とそれを跳躍距離に結びつける動作(技術)に分けた因果関係モデルをつくり、各要素を支える因子を重回帰分析によって検討したのである。この統計分析によって、踏切時には、振り上げ脚の膝を屈曲させて前方に振り出し、着地時には足を引き上げることが望ましいという結果が得られ、これらの動作はバイオメカニカルにみた「よい動作」とよく一致した(第3章2節)。また、男女でそれぞれ「よい動作」の順序が異なるという結果も得られた。

ところで、跳躍動作は人種や文化の違いに左右されることなく、2歳ごろに可能になる(Hellebrandtら1961)。さらに、よりダイナミック(巧み)な跳躍動作の獲得は、運動を制御する神経系の発達が著しい幼児および児童期(Tanner 1962)に、より高い発達の可能性が存在する(Flinchumら1972, 宮下1980)と推定されているが、その実証は得られていない。そこで、幼児(5,6歳)および児童(7~12歳)を対象に、

約2か月間の走幅跳の練習を課し、練習によって生じる跳躍距離の変化と、練習による跳動作の改善について検討した。

意図的な練習を行わない場合、跳躍距離は年齢とともに増加し、その増加は主に体重(≒筋量)の増加によっていた。そして、2か月間の練習を課すと、跳躍距離は7,8歳をピークに40cm近い伸びが認められ、その後つまり5,6歳あるいは11,12歳ではそれほど大きな伸びは現れなかった(図4-3)。したがって、走幅跳における働きかけの至適時は、男女ともに小学校低学年であるということが示唆された。

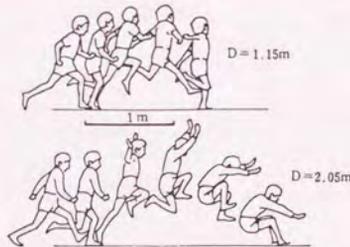
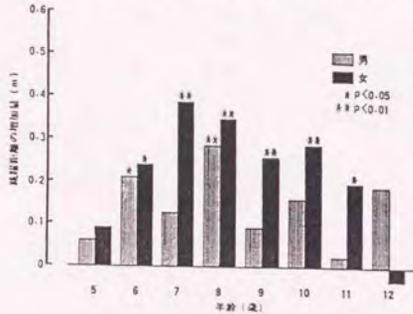


図4-3. 練習による走幅跳の跳躍距離の増大と動作の改善
※ D: 跳躍距離

跳躍距離が助走速度と技術という2因子によって成り立っている(第3章2節)と考えると、練習による跳躍距離の増加は技術の改善というよりもむしろ助走速度の増加という因子のほうが大きかった。しかし、動作それ自体も改善が認められた(図4-3)。本研究によって、神経系の発達の著しい幼児期あるいは小学校低学年時において、走幅跳の練習効果が存在するという実証が得られたのである。すなわち、小学校低学年までに動作の改善のための働きかけが必要であり、それを行えば、筋・腱連合組織の活動に支えられたダイナミックな跳躍動作を獲得できると推定できるのである。

THE HISTORY OF THE

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

謝 辞

本研究は、東京大学教育学部 宮下充正教授の指導のもとに行われたものであり、稿を終えるにあたり、宮下充正教授に感謝の意を表する次第である。

加えて、以下の協力に対し、感謝の意を表する。

(1) 第1章の第1節は、日本陸連バイオメカニクス特別研究班の活動の一部である。

(2) 第2章の第1節の一部と第2・3節のアキレス腱張力の測定は、フィンランド・Jyväskylä大学のP.V.Komi教授の研究室において、Komi教授との共同研究として行った研究である。

The researches of chapter 2 were carried out in the Department of Biology of Physical Activity, University of Jyväskylä, under the direction of Prof. Paavo V. Komi. Therefore, I appreciate Prof. P.V.Komi's assistance and cooperation on the researches.

(3) 第3章の第1・2節では、東京大学教育学部附属中学校・高等学校に協力頂いた。

(4) 第3章の第3節では、横浜市松陰幼稚園と横浜私立馬場小学校に協力頂いた。

文 献

- Ae, M. and K. Shibukawa: A biomechanical method for the analysis of the contribution of the body segments -with an example of vertical jump takeoff-. *J. Physical Educ.* 25:233-234, 1980.
- 阿江通良ら: 高さをねらいとする跳のバイオメカニクス, 第5回バイオメカニクス国内セミナー、プロシーディング。1980.
- 阿江通良: 跳躍競技とバイオメカニクスの貢献。 *Jpn. J. Sports Sci.* 7:76-81, 1988.
- 阿江通良、安藤真太郎、結城匡啓: 垂直跳の踏切における努力度が下肢各部の貢献度に及ぼす影響。 *ジャンプ研究*、日本バイオメカニクス学会編、メヂカル・リ社、1990, pp. 40-45.
- 阿江通良、鈴木美佐緒: 世界一流スプリンターのレースパターン。 *Jpn. J. Sports Sci.* 11:609-614, 1992.
- Alexander, R. McN. and A. Vernon: The dimensions of knee and ankle muscles and the forces they exert. *J. Human Movement Studies* 1:115-123, 1975.
- Alexander, R. McN. and H. C. Bennet-Clark: Storage of elastic energy in muscle and other tissue. *Nature* 264:114-117, 1977.
- Asmussen, E. and F. Bond-Pertersen: Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol. Scand.* 91:385-392, 1974.
- Baumann, W.: The biomechanical study of ski-jumping. *Proceedings of Int. Symposium on Sci. Skiing.* 1979, pp. 70-95.
- Bigland, B. and O. C. L. Lippold: The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscle. *J. Physiol.* 123:214-224, 1954.
- Bobbert, M. F., P. A. Huijing, G. A. van Ingen Schenau: Biomechanical analysis of drop and counter movement jumps. *Eur. J. Appl. Physiol.* 54:566-573, 1986a.
- Bobbert, M. F., P. A. Huijing, G. A. van Ingen Schenau: A model of the human triceps surae muscle-tendon complex applied to jumping. *J. Biomech.* 19:887-898, 1986b.
- Bobbert, M. F., P. A. Huijing, G. A. van Ingen Schenau: An estimation of power output and work done by the human triceps surae muscle-tendon complex in jumping. *J. Biomech.* 19:899-906, 1986c.

Bobbert, M.F. and van Ingen Schenau: Coordination in vertical jumping. *J. Biomech.* 21:249-262, 1988.

Bosco, C. and P.V. Komi: Kinetics and kinematics of the take-off in the long jump. In Komi, P.V. (Ed.) *Biomech. V-B*, University Park Press, Baltimore., 1976, pp. 174-180.

Bosco, C. et al.: Combined effect of elastic energy and myoelectrical potentiation during stretch-shortening cycle exercise. *Acta Physiol. Scand.* 114:557-565, 1982a.

Bosco, C. et al.: Neuromuscular function and mechanical efficiency of human leg extensor muscles during jumping exercises. *Acta Physiol. Scand.* 114:543-550, 1982b.

Bosco, C., I. Tarkka and P.V. Komi: Effect of elastic energy and myoelectrical potentiation of triceps surae during stretch-shortening cycle exercise. *Int. J. Sports Med.* 3:137-140, 1982c.

Bosco, C., A. Itoh, P.V. Komi, P. Luhtanen, P. Rahkila, H. Rusco and J.T. Viitasalo: Neuromuscular function and mechanical efficiency of human leg extensor during jumping exercises. *Acta Physiol. Scand.* 114:543-550, 1982d.

Bouisset, S.: EMG and muscle force in normal motor activities. New developments in electromyography and clinical neurophysiology 1. In Desmedt (ed.), Karger, Basel 1973, pp. 547-583.

Bresler, B. & J.P. Frankel: The forces and moments in the leg during level walking. *Trans. ASME* 72:27-36, 1950.

Cavagna, G.A. et al.: Mechanical work in running. *J. Appl. Physiol.* 19:249-252, 1964.

Cavagna, G.A., B. Dusman and R. Margaria: Positive work done by a previously stretched muscle. *J. Appl. Physiol.* 24:21-32, 1968.

Cavagna, G.A.: Elastic bounce of the body. *J. Appl. Physiol.* 29:279-282, 1970.

Cavagna, G.A.: Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exerc. Sports Sci. Rev.* 5:89-129, 1977.

Close, R.: Dynamic properties of mammalian skeletal muscle. *Physiol. Rev.* 52:129-197, 1972.

Cooper, J. and R. Glassow: *Kinesiology*. Mosby, 1972.

- Dapena, J.: A method to determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity. J. Biomech. 11:251-256, 1978.
- Dapena, J.: Mechanics of translation in the Fosbury flop. Med. Sci. Sports Exerc. 12:37-44, 1980a.
- Dapena, J.: Mechanics of rotation in the Fosbury flop. Med. Sci. Sports Exerc. 12:45-53, 1980b.
- Dapena, J.: Simulation of modified human airborne movements. J. Biomech. 14:81-89, 1981.
- Dapena, J. and T. Braff: Use of separate hand locations to calculate ground reaction force exerted on a vaulting pole. Med. Sci. Sports Exerc. 15:313-318, 1983.
- Dempster, W. T.: Space requirements of the seated operator. Ohio, Wright-Patterson Air Force Base, 1955(WADCTR 55-159).
- Diachkov, V. M.: Long Jump (Russian). Moscow: Physical Culture and Sports, 1953. (in Hay 1986).
- Dillman, C. J. and R. C. Nelson: The mechanical energy transformations of pole vaulting with a fiberglass pole. J. Biomech. 1:175-184, 1968.
- Dillman, C. J. et al.: A kinematic analysis of men's Olympic long horse vaulting. Int. J. Sports Biomech. 1:96-110, 1985.
- Dyson, G.: The mechanics of athletics. University of London Press Ltd. 1968.
- Flinchum, B. M. and M. R. Hanson: Who says the young child can't? JOHPER43:16-19, 1972.
- Eckert, H. M.: Linear relationships of isometric strength to propulsive force, angular velocity and angular acceleration in the standing broad jump. Res. Quart. 35:298-306, 1964.
- Eckert, H. M.: Angular velocity and range of motion in the vertical and standing broad jump. Res. Quart. 39:937-942, 1968.
- Elftman, H.: Force and energy changes in the leg during walking. Am. J. Physiol. 125:339-356, 1939.

Ericson, M.O., J. Ekholm, O. Svensson and R. Nisell: The forces on ankle joint structures during ergometer cycling. *Foot Ankle* 6:135-142, 1985.

Fletcher, J.G. et al.: Human power output: The mechanics of pole vaulting. *Ergonomics* 3:30-34, 1960.

Flynn, J.E.: Cinematographic study of the kinematic and temporal analysis of the take-off in the running long jump. *T&F Quart. Rev.* 73:222-230, 1973.

Fukashiro, S., Y. Iimoto, H. Kobayashi and M. Miyashita: A biomechanical study of the triple jump. *Med. Sci. Sports Exerc.* 13:233-237, 1981.

深代千之、小林敬和、飯本雄二、菅原秀二、村木征人、宮下充正: 三段跳びの Biomechanics. 身体運動の科学 V, スポーツ・バイオメカニクスへの挑戦, 杏林書院、1983, pp. 159-168.

Fukashiro, S. and M. Miyashita: An estimation of the velocities of three take-off phases in 18m-triple jump. *Med. Sci. Sports Exerc.* 15:309-312, 1983a.

Fukashiro, S., H. Ohmichi, H. Kanehisa and M. Miyashita: Utilization of stored elastic energy in leg extensors. In: Matsui et al. (eds.), *Biomechanics VIII-A*, Human Kinetics Publishers, 1983b, pp. 258-263.

深代千之: 走幅跳と三段跳の Biomechanics. *Jpn. J. Sports Sci.* 2(8):600-613, 1983.

深代千之、稲葉勝弘、畑栄一、宮下充正: 幼児期における跳動作の練習効果. *Jpn. J. Sports Sci.* 2(12):994-999, 1983.

深代千之、宮下充正: 走幅跳における効果的動作の評価法. 第7回ハ'イホ'ニクス学会大会論集、星川保・豊島進太郎編。1984, pp. 66-70.

深代千之、稲葉勝弘、角田俊幸、宮下充正: 跳能力の発達—走幅跳の練習効果. 第35回日本体育学会大会号、1984, p. 408.

Fukashiro, S. and M. Miyashita: A biomechanical study of the landing in triple jump. *Biomechanics IX-B*, D.A. Winter, et al. (Eds.), Human Kinetics Publishers, Illinois, 1985, pp. 454-457.

Fukashiro, S. and P.V. Komi: Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int. J. Sports Med.* 8(Suppl):15-21, 1987.

深代千之: 跳ぶ科学—スポーツ科学ライブラリー—, 大修館書店、東京。1990.

深代千之: 瞬発性運動における発揮パワーの評価. *Jpn. J. Sports Sci.* 11(3):176-187, 1992.

Fukashiro, S., P. V. Komi, M. Jarvinen and M. Miyashita: Comparison between the directly measured Achilles tendon force and the tendon force calculated from the ankle joint moment during vertical jump. Clin. Biomech. 8:25-30, 1993.

船渡和男、石井喜八：跳躍運動の効率。体育の科学 30:335-340, 1980.

Gollhofer, A., D. Schmidtbleicher and V. Diets: Regulation of muscle stiffness in human locomotion. Int. J. Sports Med. 5:19-22, 1984.

Gollhofer, A., P. V. Komi, N. Fujitsuka and M. Miyashita: Fatigue during stretch-shortening cycle exercises II: Changes in neuromuscular activation patterns of human skeletal muscle. Int. J. Sports Med. 8:38-47, 1987.

Gray, J.: How animal moves. Cambridge Univ. Press, London, 1953
(邦訳：動物の運動。柳田為正訳、岩波書店、東京 1963).

Gregor, R. J., P. V. Komi, R. C. Browing and M. Jarvinen: A comparison of the triceps surae and residual muscle moments at the ankle during cycling. J. Biomech. 24:287-297, 1991.

Grieve, D. W., P. R. Cavanagh and S. Pheasant: Prediction of gastrocnemius length from knee and ankle posture. In: Asmussen et al. (eds.), Biomechanics VI. University Park Press, Baltimore, 1978, pp. 405-412.

Hatze, H.: A comprehensive model for human motion simulation and its application to the take-off phase of the long jump. J. Biomech. 14:135-142, 1981.

Hatze, H.: Computerized optimization of sports motions. An overview of possibilities, methods and recent developments. J. Sports Sci. 1:3-12, 1983.

Hay, J. G.: Mechanical energy relationships in vaulting with a fiberglass pole. Ergonomics 14:437-448, 1971.

Hay, J. G.: A kinematic look at the high jump. Track Tech. 53:1697-1703, 1973.

Hay, J. G.: Biomechanical aspect of jumping. Exerc. Sports Sci. Rev. 3:135-162, 1975.

Hay, J. G. et al.: Identification of the limiting factors in the performance of a basic human movement. In: P. V. Komi (ed.), Biomech. V-B, Univ. Park Press, Baltimore, 1976, pp. 13-19.

- Hay, J.G., et al.: An analysis of joint contributions to performance of a gross motor skill. In Asmussen et al. (eds.): Biomechanics VI-B. Baltimore, University Park Press. 1978, pp. 64-70.
- Hay, J.G. and J.A. Miller, Jr.: Techniques used in the transition from approach to takeoff in the long jump. *Int. J. Sports Biomech.* 1:174-184, 1985.
- Hay, J.G.: The biomechanics of the long jump. *Exerc. Sports Sci. Rev.* 14:401-446, 1986.
- Hay, J.G., J.A. Miller and R.W. Canterna: The techniques of elite male long jumpers. *J. Biomech.* 19(10):855-866, 1986.
- Hahs, D.W. and R.N. Stiles: Buckle muscle tension transducer: What does it measure? *J. Biomech.* 22:165-166, 1989.
- Hellebrandt, F.A. et al.: Physiological analysis of basic motor skills. *Ame. J. Physical Med.* 46:14-25, 1961.
- Herzog, W.: Maintenance of body orientation in the flight phase of long jump. *Med. Sci. Sports Exerc.* 18:231-241, 1986.
- 樋口満ら: 双生児の身体発育発達に関する縦断的研究.
東京大学教育学部紀要、16:347-362, 1976.
- Hill, A.V.: First and last experiments in muscle mechanics. Cambridge, 1970.
- Hof, A.L., B.A. Geelen and Ven Den Berg Jw.: Calf muscle moment, work and efficiency in level walking: Role of series elasticity. *J. Biomech.* 16:523-537, 1983.
- Hujing, P.A.: Elastic potential of muscle. In: Komi (ed.), *Strength and Power in Sport*, Blackwell, 1991, pp. 151-168.
- Hulbey, C.L. and R.P. Wells: A work-energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 50:247-254, 1983.
- IAAF: Scientific research project at the Games of the XXIVth Olympiad - Seoul 1988. IAAF, 1990.
- 池上康男: 写真撮影による運動の3次元解析法.
Jpn. J. Sports Sci. 2:163-170, 1983.

Ingen Schnau, G. J. van et al.: The instantaneous torque-angular velocity relation in planter flexion during jumping.
Med. Sci. Sports Exerc. 17:422-426, 1985.

伊藤章ら：跳躍運動における反動効果—下腿三頭筋の筋放電量と弾性エネルギーの利用—。Jpn. J. Sports Sci. 6:232-238, 1987.

岩田敦：跳躍運動の分析（垂直跳について）。体育学研究 5:132, 1960.

Jarver, J.: The long jump. In Wilt, F., and T. Ecker (eds.). International Track and Field Coaching Encyclopedia. West Nyack, NY: Parker Publishing, 1970, pp. 166-198.

Johnsson, B.: Kinesiology: With special reference to electromyographic kinesiology. EEG Clin. Neurophysiol. (Suppl) 34:417-428, 1978.

加古里子、武藤芳照、深代千之：じょうずになろう—とぶこと—。評論社、東京、1982.

金子公有：筋の出力パワーと走運動—人体エンジンは何馬力のパワーを出力できるか。体育の科学 37:203-209, 1987.

金原勇ら：基礎的跳躍運動の分析。体育の科学 10:271-274, 1960.

Klissouras, V. and P. V. Karpovich: Electro-goniometric study of jumping events. Res. Quart., 38(1):41-48, 1958.

Klissouras, K. and P. V. Karpovich: Electrogoniometric study of jumping events. Res. Quart. 38:41-48, 1967.

Klissouras, V.: Genetic limit of functional adaptability.
Int. Z. angew. Physiol., 30:85-94, 1972.

Klissouras, V., et al.: Adaptation to maximal effort: Genetic and age.
J. Appl. Physiol., 35:288-293, 1973.

小林一敏：跳のパワーの発生位相。身体運動の科学 I。
杏林書院、東京、1974, pp. 86-98.

小林一敏：走高跳の踏切についての力学的研究。体育学研究 24:79-86, 1978.

Komi, P. V. and E. R. Buskirk: Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle.
Ergonomics 15:417-434, 1972.

- Komi, P. V. : Relationship between muscle tension, EMG and velocity of contraction under concentric and eccentric work. In: Desmedt(ed.), *New Developments in Electromyography and Clinical Neurophysiology*, Basel, Karger, 1973, pp.596-606.
- Komi, P. V. et al. : Genetic variation in neuromuscular performance. *Int. Z. angew. Physiol.*, 31:289-304, 1973.
- Komi, P. V. : Skeletal muscle fibre and muscle enzyme activities in monozygous and dizygous twins of both sexes. *Acta Physiol. Scand.*, 100:385-392, 1977.
- Komi, P. V. and C. Bosco: Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscle by men and women. *Med. Sci. Sports* 10:261-265, 1978.
- Komi, P. V. : Physiological and Biomechanical correlates of muscle function :Effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. In: Terjung(ed.), *Exerc. Sports Sci. Review* 12:81-121, 1984.
- Komi, P. V., M. Salonen, M. Jarvinen and O. Kokko: In vivo registration of Achilles tendon forces in man. 1. Methodological development. *Int. J. Sports Med.* 8(Suppl):3-8, 1987.
- Komi, P. V. : Relevance of in vivo force measurements to human biomechanics. *J. Biomech.* 23:23-34, 1990.
- Kyrolainen, H., P. V. Komi and D. H. Kim: Effects of power training on neuromuscular performance and mechanical efficiency. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 1:78-87, 1991.
- Lippold, O. C. J. : The relaxation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension. *J. Physiol.* 117:492-499, 1952.
- Luhtanen, P. and P. V. Komi: Segmental contribution to forces in vertical jump. *Eur. J. Appl. Physiol.* 38:181-188, 1978.
- Luhtanen, P. and P. V. Komi: Force-, Power, and Elasticity-Velocity Relationships in Walking, Running, and Jumping. *Eur. J. Appl. Physiol.* 44:279-289, 1980.
- Martin, T. P. and G. A. Stull: Effects of various knee angle and foot spacing combinations on performance in the vertical jump. *Res. Quart.* 40:324-331, 1969.
- 真島英信 : 生理学. 文光堂、1978.

松井秀治：運動と身体の重心、体育の科学社、1958。

松井秀治ら：走り幅とびの踏み切りにおける速度変化。昭和48年度日本体育協会スポーツ科学研究報告。No. VI 跳躍能力の向上—第1次研究報告—1973, pp. 7-11.

松井秀治ら：走り高とびの踏み切りにおける速度変換。昭和49年度日本体育協会スポーツ科学研究報告。No. VI 跳躍能力の向上—第2次研究報告—1974, pp. 14-19.

Miller, D. I. and D. J. East: Kinematic and kinetic correlates of vertical jump in woman. In: P. V. Komi (ed.), Biomech. V-B, Univ. Park Press, Baltimore, 1976, pp. 65-72.

Miller, D. I. and C. F. Munro: Body segment contributions to height achieved during the flight of a springboard dive. Med. Sci. Sports Exerc. 16:234-242, 1984.

Miller, D. I. and J. G. Hay: Kinematics of a world record and other world class performances in the triple jump. Int. J. Sports Biomech. 2:272-288, 1986.

三浦望慶、池上康男、松井秀治：部分及び合成重心係数を用いての座標測定方法による合成重心の算出。体育の科学 24(8):517-524, 1974.

宮下充正：子どものからだ—科学的な体力づくり。東京大学出版会、1980。

宮丸凱史：幼児の基礎的運動技能におけるMotor Patternの発達過程。身体運動の科学II、杏林書院、1976, pp. 96-114.

文部省スポーツ課内社会体育研究会編：スポーツテスト(児童生徒編) —その実施と活用—、第一法規、1982。

Morgan, D. L.: Separation of active and passive components of short-range stiffness of muscle. Am. J. Physiol. 232:45-49, 1977.

森下はるみ：年齢と動きの発達。スポーツと年齢。大修館、東京、1977, pp. 58-72.

Murray, M. P., G. N. Guten, J. M. Baldwin and G. M. Gardner: A comparison of plantar flexion torque with and without the triceps surae. Acta Orthop. Scand. 47:122-124, 1976.

Nelson, R. C. and N. L. Pike: Analysis and comparison of swimming starts and strokes. Swimming Med. IV, 347-360, 1978.

Nelson, R. C. et al.: Vaults performed by female Olympic gymnasts: A biomechanical profile. Int. J. Sports Biomech. 1:111-121, 1985.

Nett, T.: Zur Ökonomie des Dreisprungs. *Leichtathletik* 22:773-776, 1970.

Nigg, B., P. Neukomm and J. Waser: Messungen in weitsprung an weltklassenspringern. *Leistungssport* 3:265-271, 1973.

Olney, S. J. and D. A. Winter: Predictions of knee and ankle moments of force in walking from EMG and kinematic data. *J. Biomech.* 18:8-20, 1985.

大築立志、定本朋子: 前方跳躍および上方跳躍における運動制御。
身体運動の科学III. 杏林書院、東京、1979, pp. 191-204.

Poe, A.: Description of the movement characteristics of two-year-old children performing the jump and reach. *Res. Quart.* 47:260-268, 1976.

Procter, P. and J. P. Paul: Ankle joint biomechanics. *J. Biomech.* 15:627-634, 1982.

Proske, U. and D. L. Morgan: Tendon stiffness: methods of measurement and significance for the control of movement.
A review. *J. Biomech.* 20:75-82, 1987.

Ramey, M. R.: Force relationship of the running long jump. *Med. Sci. Sports.* 2:146-151, 1970.

Ramey, M. R.: Significance of angular momentum in long jumping. *Res. Quart.* 44:488-497, 1973.

Ramey, M. R.: The use of angular momentum in the study of long jump take-offs. In: Nelson et al. (eds.), *Biomech. VI*. Baltimore, Univ. Park Press, 1974, pp. 144-148.

Ramey, M. R. and K. R. Williams: Ground reaction forces in the triple jump. *Int. J. Sports Biomech.* 1:233-239, 1985.

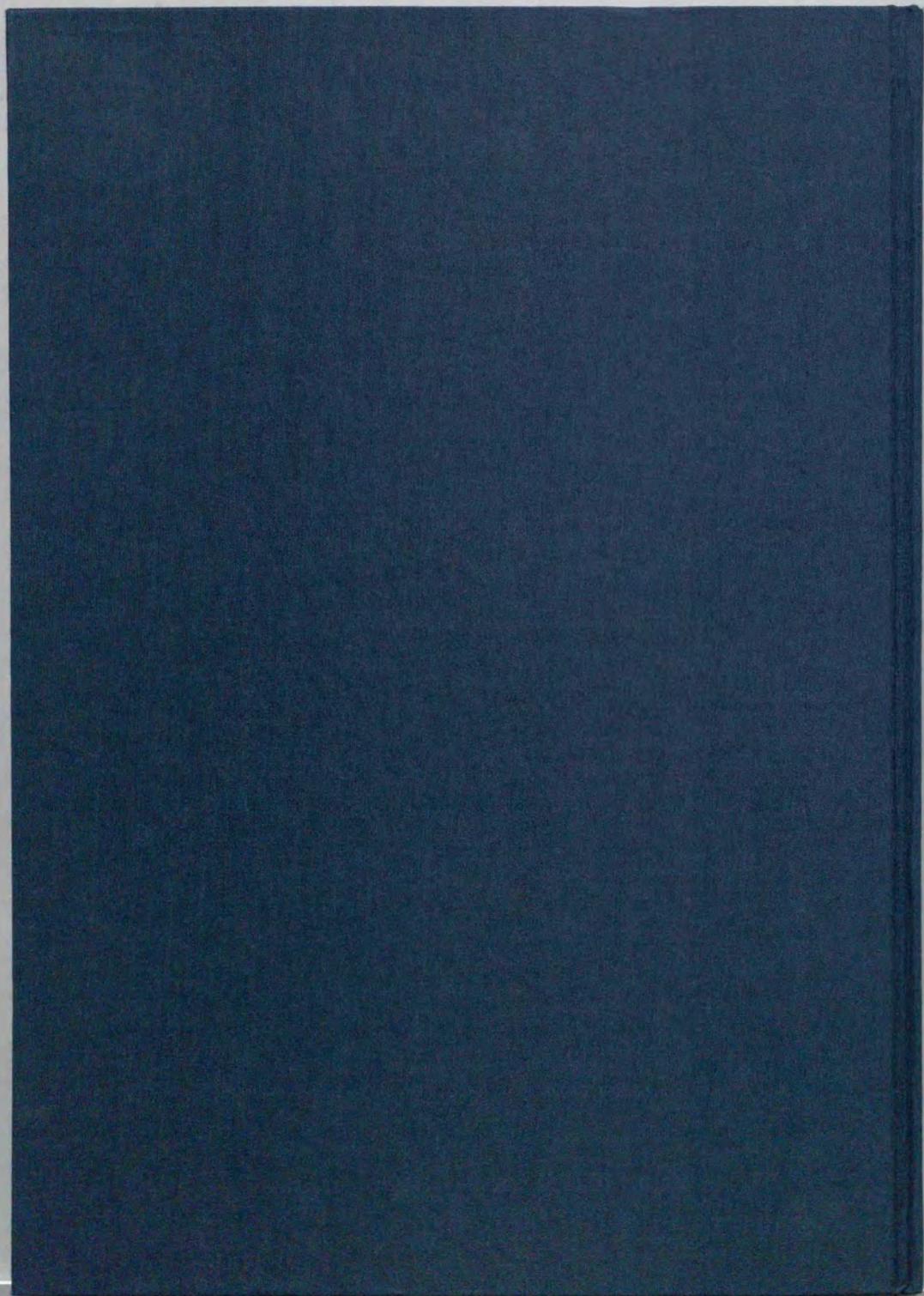
Robertson, D. A. and D. A. Winter: Mechanical energy generation, absorption and transfer amongst segments during walking. *J. Biomech.* 13:845-854, 1980.

Roy, B.: Kinematics and kinetics of the standing long jump in 7-, 10-, 13-, and 16-year-old boys. In: *Biomechanics III*, Karger, 1973, pp. 409-416.

Rugg, S. G., R. J. Gregor, B. R. Mandelbaum and L. Chiu: In vivo moment arm calculations at the ankle using magnetic resonance imaging (MRI). *J. Biomech.* 23:495-501, 1990.

- Sale, D., J. Quinlan, E. Marsh, A. J. McComas and A. Y. Belanger: Influence of joint position on ankle plantarflexion in humans. *J. Appl. Physiol.* 52:1636-1642, 1982.
- Sargent, D. A.: The physical test of a man. *Ame. Physical Educ. Rev.* 26:188-194, 1921.
- Sargent, L. W.: Some observations on the Sargent test of neuromuscular efficiency. *Ame. Physical Educ. Rev.* 29:47-56, 1924.
- Scott, S. H. and D. V. Winter: Internal forces at chronic running injury sites. *J. Biomech.* 22:357-369, 1990.
- 篠田義一: 随意運動制御における体性感覚の役割. 伊藤正男編「脳の運動」、平凡社、1983, pp. 249-270.
- Soest, A. J. van, M. E. Roebroek, M. F. Bobbert, P. Huijing and G. J. van Ingen Schenau: A comparison of one-legged and two-legged counter-movement jumps. *Med. Sci. Sports Exerc.* 17:635-639, 1985.
- Stauffer, R. N., E. Y. S. Chao and R. C. Brewster: Force and motion analysis of normal, diseased and prosthetic ankle joint. *Clin. Orthop.* 127:189-196, 1977.
- Tanner, J. M.: Growth at adolescence. 2nd ed. Blackwell, 1962.
- Thys, H., G. A. Cavagna and R. Margaria: The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude. *Pflugers Arch.* 354:281-286, 1975.
- Tokizane, T. and H. Shimazu: Functional differentiation of human skeletal muscle. University of Tokyo Press, 1964.
- 東京都立大学身体適性学研究室編: 日本人の体力標準値(第三版). 不味堂、1982.
- 辻野昭ら: 発育にともなう動作とパワーの変遷について-跳躍動作(垂直跳び、立幅跳び)-. 身体運動の科学 I、杏林書院、1974, pp. 203-243.
- Ward-Smith, A. J.: Calculation of long jump performance by numerical integration of the equations of motion. *J. Biomech. Engineering* 106:244-248, 1984.
- Ward-Smith, A. J.: Altitude and wind effects on long jump performance with particular reference to the world record established by Bob Beamon. *J. Sports Sci.* 4:89-99, 1986.

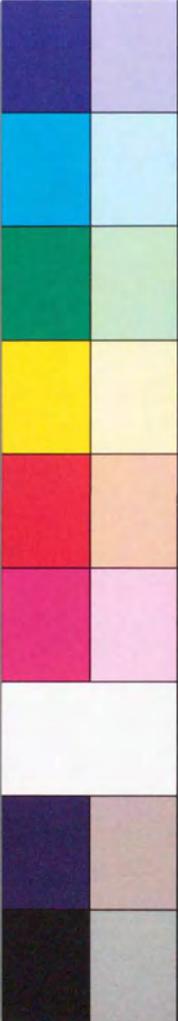
- Weber, H. and E. Cafarelli: An analysis of static and dynamic factors in the standing broad jump. *J. Sports Med.* 13:266-273, 1973.
- Wickiewicz, T.L. et al.: Muscle architecture of the human lower limb. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 179:317-325, 1983.
- Wickstrom, R.M.: Developmental kinesiology- Maturation of basic motor patterns. In: Wilmore et al. (Eds.), *Exerc. Sports Sci. Rev.* Academic Press, Inc. 1975, pp. 163-192.
- Winter, D.A.: Biomechanics of human movement. John Wiley & Sons, 1979.
- Winter, D.A.: Moment of force and mechanical power in jogging. *J. Biomech.* 16:91-97, 1983.
- Woo, S.L.Y.: The effects of exercise on the biomechanical and biochemical properties of swine digital flexor tendons. *J. Biomech. Engineering* 103:51-56, 1981.
- 安田三郎、海野道郎: 社会統計学 (改訂2版), 丸善, 1977.
- 湯浅景元ら: 立幅跳における"よい動き"を評価するためのParameterの検討, 第7回 biomechanics学会大会論集、星川保・豊島進太郎編、1984, pp. 80-84.
- 植屋清見、中村和彦: 走幅跳の距離獲得条件-その定性的モデルと小学生におけるLimiting factors-, 星川保、豊島進太郎編、第7回日本 biomechanics学会大会論集、1984, pp. 71-79.
- Zimmerman, H.M.: Characteristic likenesses and differences between skilled and non-skilled performance of standing broad jump. *Res. Quart.* 27:352-362, 1956.



Ruler with inches and centimeters markings from 1 to 8.

Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM Kodak