

第10回 歩行のバイオメカニクス

教科書 金子公宥、福永哲夫編、バイオメカニクス、杏林書院 第章

参考書 江原義弘、山本澄子、ポディダイナミクス入門、歩き始めと歩行の分析、医歯薬出版、2002

参考書 Jacqueline Perry 著、武田功監訳、ペリー歩行分析、正常歩行と異常歩行、医歯薬出版、2007

参考書 Jessica Rose, James G. Gamble, Human Walking, Lipricott Williams & Wilkins, 2006[10]

参考書 James Watkins, An Introduction to Biomechanics of Sport and Exercise, Elsevier, 2007[9]

10.1 ヒトの歩行

ヒトが二足歩行によって歩く能力を得たのは、紀元前 400 万年前程度はないかと推定されている。二足歩行によって両手が使えるようになってきた、そして石器という道具を用いることができるようになってきた、といった諸説があるが四足歩行から二足歩行に変化する過程で、人類の体に起こった変化にはいくつもの特徴があり、それが二足歩行の決定要因になることが多い。

歩行はヒトの基本動作であり、歩行ができるということが先に述べたようにヒトがヒトたる所以であるともいえる。そのため歩行研究はスポーツ科学、人間科学の分野において古くから行われてきた歴史をもつ。

10.2 歩行解析に用いられる用語・定義

歩行研究、解析においては特有の用語が用いられることが多い。覚えることが必要である。地面に足が接地する瞬間と離れる瞬間によってその周期的運動の局面わけを行う。足が地面に接地している間を立脚期(立脚相)(stance phase)、地面から足が離れている局面を遊脚期(遊脚相)(swing phase)とよぶ。

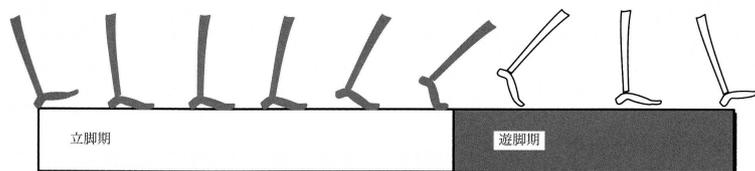


図 1.1 歩行周期の区分

白い部分は立脚期の期間、網かけの部分は遊脚期の期間を示す。立脚期は初期接地から足指離地までの期間、遊脚期は振り出した下肢が再び接地するまでの期間である。

図 10.1: 歩行周期の定義 [8]

以下に歩行周期を決定する事象とその呼称を列挙しておく。

HC : 踵接地 踵が地面に接地すること (Heel Contact)

FF:足部水平 足底面がすべて地面に接地すること (Foot Flat)

HO:踵離地 踵が地面から離れること (Heel Off)

TO : つま先離れ つま先が地面から離れること (Toe Off)

上記の定義に気をつけて歩いてみれば、歩行では両足で身体を支持している両足接地時期があることに気が付く。これを両下肢支持期 (double stance phase) とよぶ。片側だけに注目すれば、まず着地した際の両足支持期と離地する直前の両下肢支持期の 2 つの時期がある。あとの節で紹介するが、両足支持期の中間時点においてヒトの身体重心位置は鉛直方向においてもっとも低い位置にあり、片足支持期の中間時点においてそれは最も高い位置にあることが知られている。

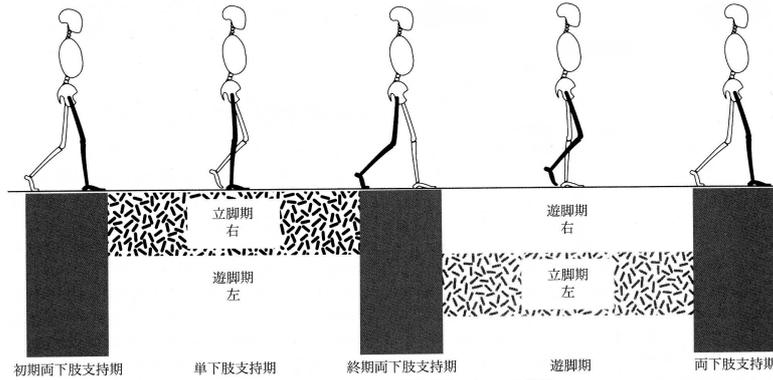


図 1.2 立脚期の区分と両側床接地パターンとの関係

縦の黒い部分は、左右の足部による両下肢支持の期間を表す。横の網かけの部分は単下肢支持を表す。全立脚期は、最初の両下肢支持と単下肢支持期、最後の両下肢支持という 3 つの期に分けられる。遊脚期は、終期両下肢支持後の白い部分で表している。右の単下肢支持期と左の遊脚期は同時に起こっている点に注目する。右の遊脚期の間は左の単下肢支持期である。3 つ目の縦の部分 (両下肢支持) は、次の歩行周期の開始となる。

図 10.2: 歩行周期の定義 [8]

歩行周期を定義すると次に、歩行周期に関連するいくつかの定義が決まる。

step length (right/left) 着地した踵から次に着地したもう片方の踵までの距離

stride length 着地した踵と同側の踵が再び着地するまでの距離

stride width 両足中心線同士の距離

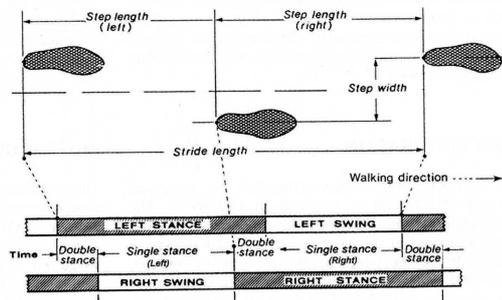


FIGURE 3-9. Linear distance measurements of the gait cycle.

図 10.3: 歩行周期の定義 [10]

表 10.1 には、歩行 1 周期中の時間割合が述べられている。踵接地から次の踵接地までの 1 周期を 100%として各事象の起こる平均的な時間を示している。これによれば平均的な歩行周期では、

立脚期局面が 62%、遊脚期局面が 38%であるとされている。歩行速度が増加してくると一般的には遊脚期の時間が減少して速度の上昇を得ている。

▶ TABLE 3-1 Gait Cycle: Events, Periods, and Phases

Event	% Gait Cycle	Period	Phase
Footstrike	0	Initial double limb support	Stance, 62% of cycle
Opposite foot-off	12		
Opposite foot strike	50		
Foot-off	62	Single limb support	
Foot clearance	75	Second double limb support	
Tibia vertical	85	Initial swing	
Second foot strike	100	Mid swing	
		Terminal swing	

表 10.1: 歩行周期の定義 [10]

10.3 歩行の発達

新生児が歩き始めるまでには、それほど時間はかからない。早ければ 1 年未満でヨチヨチ歩きではあるが、自分の意志で歩きまわる。教科書 141 ページには、乳児型歩行から成人型歩行にいたる過程でみられる筋電図の変化が示されている。乳児歩行の筋電図をみると明らかなように脚部の拮抗筋同士がともに歩行周期中に発火しているのに対して、成人型歩行になると拮抗筋同士が時間的に交互に発火をしていくパターンに移行している様子がみてとれる。

成人における歩行筋電図 (図 10.5) によれば一周期のなかで筋活動が綺麗に拮抗して現れていることが読み取れる。これに対して陸上競技の競歩では、下肢筋のより大きな放電がみられるとともに上肢の積極的な運動への関与が筋電図的研究から読み取れる (図 10.6)。図 10.6 の上半分は下肢筋電図を積分筋電位 (iEMG) としてあらわしている。下半分は得られた筋電図をそのまま表示している。

10.4 歩行の力学モデル

歩行を考えるうえで、身体重心と地面反力 (床反力) から説明をすることが多い。身体に作用する力は結局のところ身体重心を動かすために作用されると考えると、歩行では外力は地面から受ける力と重力のみであるため、重心の変位と地面反力によって説明をすることが可能である。

10.4.1 歩行時の床反力と重心の動き

歩行時には身体重心が三次元的に移動をする。身体重心そのものは仮想的に計算の結果得られたものなので、身体各部位が動くことによって重心が変わることを考えれば身体重心が動いた、のではなく身体各部位の運動の結果として身体重心が移動したと考えるほうが自然である。

図 10.7 に示したように身体重心は骨盤を固定してみると骨盤のやや上の位置で三次元的に八の字を描くように歩行周期中に移動を繰り返す。

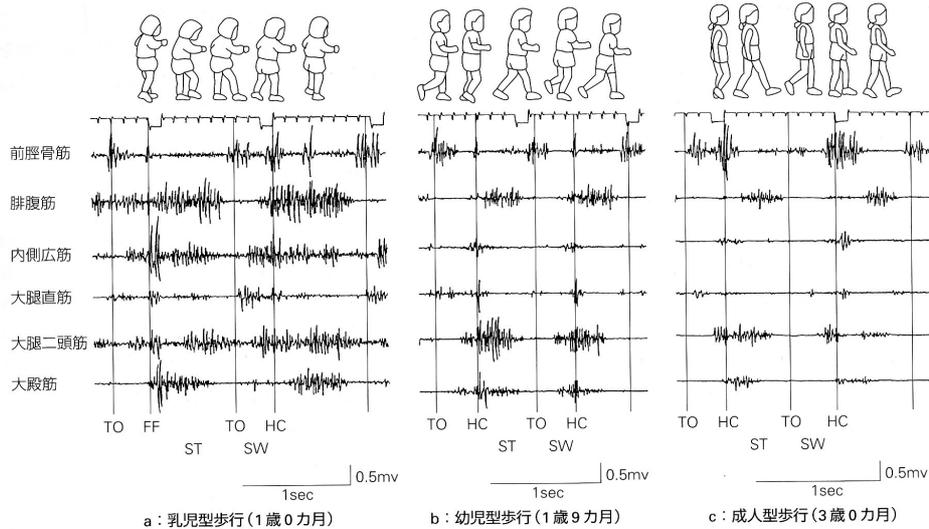


図 7-4 歩行発達過程のフォームと筋電図(同一乳幼児)
 a: 歩行習得 1 週目の乳児型歩行 (1 歳 0 カ月), b: 歩行習得 3 カ月～2 年の幼児型歩行 (1 歳 9 カ月), c: 3 歳以降の成人型歩行 (3 歳 0 カ月).

図 10.4: 乳児型歩行から成人型歩行に至る歩行筋電図の変化 [12]

上下方向

上下方向でこの身体重心を観察すると、上下動を繰り返す。この上下動を画像分析から観察してみると数センチ程度 (3cm 程度) である。ここからその加速度を求めてみるとその周期は高さの変動に対して半周期進んでいる。これは上下動を三角関数で近似すれば加速度が変位の二階微分であることから理解できる。

上下に変動する重心の移動にあわせて地面反力を測定した結果が、図 10.9 である。右足と左足の支持によりその合成地面反力が描かれている。図からは合成地面反力が最も大きくなっているときに重心の高さが低くなっており、単脚支持期の中間地点において地面反力が最低 (下に凸)、重心高さは最大になっていることがわかる。この変化は体重計の上に乗って上下動を繰り返したときに体重として確認できるその変化と同じである。

左右方向

左右方向の地面反力は上下方向に比べると非常に小さい。図 10.10 からは右立脚期には左向きの力が、左立脚期には右向きの力が作用していることがわかる。しかしその大きさは 100N 程度と小さい。

前後方向

前後方向の地面反力に着目すると、右足着地時の前半においては後ろ向きの力 (進行方向とは反対の負の力) が作用し、後半には前方向の力 (進行方向の力) が作用していることがわかる。ブレーキとアクセルを繰り返すことが前後方向の地面反力の特徴である。

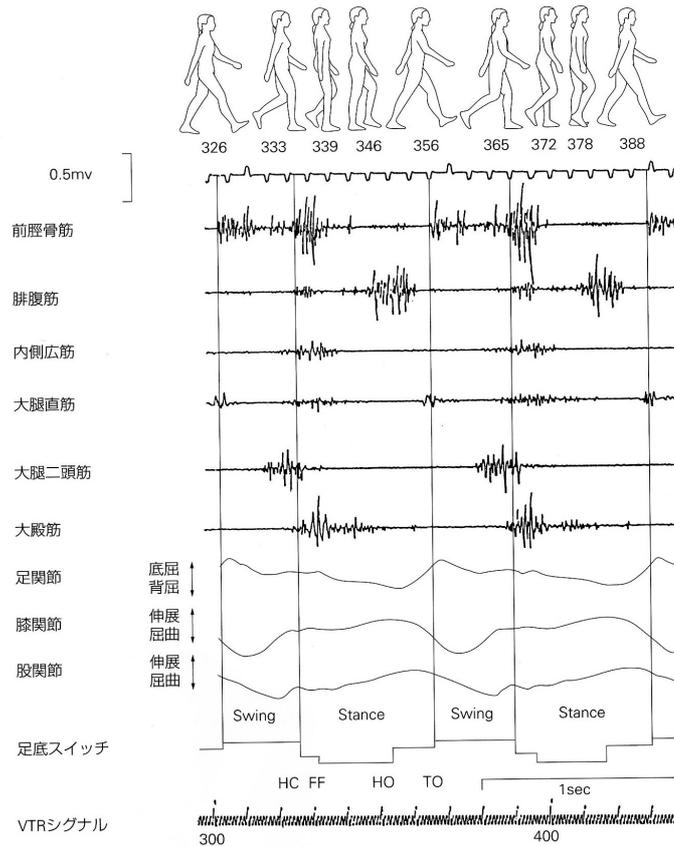


図 7-5 成人歩行の筋電図
 Swing (SW) : 遊脚期, Stance (ST) : 立脚期, HC : 踵着地, FF : 足底全面着地, HO : 踵離地, TO : 足先離地.

図 10.5: 成人における歩行筋電図 [12]

10.4.2 足圧中心の移動軌跡

踵着地 (HC) からつま先離地 (TO) までの間で、地面反力の作用点中心位置が足部からみると変化する。図 10.12 をみるとまず、踵近くで着地した力の作用点がみられるがそれは、前方へと移動し着地している時間を 100%としたとき、約 50%の時刻には拇指球付近まで移動する。この付近に停滞したのち親指方向に抜けていくのが普通とされている。土踏まず (plantar arch) がない扁平足の場合や踵から外側部へと着地位置が変化しない病的歩行の場合には違った変化パターンをとることもある。

10.5 歩行時の仕事とパワー

歩行時に身体重心がした仕事は、他のヒトの運動と同じく内的仕事 (internal work) と外的仕事 (external work) とに分けられる。

内的仕事は身体重心を中心とした身体各部位の運動でありこれは身体重心周りの並進運動と回転運動の和である。

$$E_{internal} = \frac{1}{2}m_i v_i^2 + \frac{1}{2}I\omega_i^2 \quad (10.1)$$

$$W_{internal} = \sum E_{internal} \quad (10.2)$$

これに対して外的仕事とは身体うの移動にともなって外部になした仕事である。仕事になされるのはそこにエネルギーが使われたからだと考えれば身体運動によってなされるエネルギーについて少し知っておく必要がある。身体重心がもつ位置エネルギー ($E_{p_v} = mgh$) と水平方向・鉛直方向の運動エネルギー ($E_{k_f} = \frac{1}{2}mv_v, E_{k_f} = \frac{1}{2}mv_f$) の和であらわされる。全身のエネルギーを計算しこの変化を観察してみると、歩行周期中はこの全身のエネルギーがほぼ一定であることに気が付く。周期的な運動のなかで重心の上下動と身体前後方向の運動エネルギーはエネルギーの受け渡しがあると考えられている。外的エネルギーは、歩行によって外部になされた仕事であるので増加量は水平方向になされたエネルギーによって決定される。

これによって効率の計算が可能となる。歩行では効率が約 0.3~0.4 程度と見積もられている。徐々に歩行速度を上げていくと効率も少しづつよくなっていく (時速約 7Km で最高) もののあまり速度を上げすぎると逆に低下してしまう。

運動強度が激しくなっていくと次第にその内的仕事も大きくなることが知られていてヒトの運動ではこの内的仕事の割合が無視できない。歩行の場合には時速 3km/h を超えるあたりから内的仕事の方が外的仕事よりも大きくなっていくことが知られている。自然歩行の歩調、120 歩はちょうど

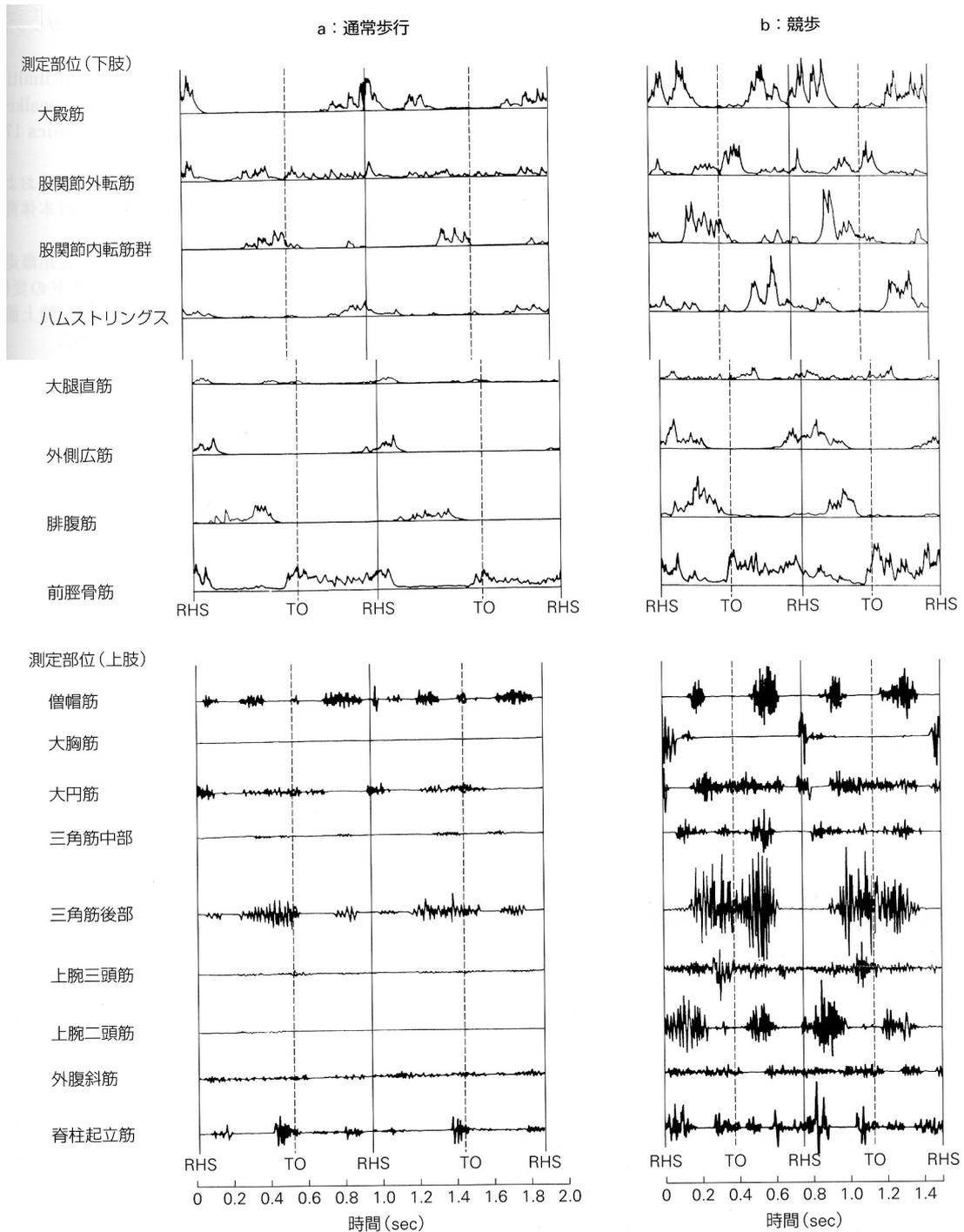


図 7-18 米国五輪代表選手の通常歩行(a)および競歩(b)中における下肢および上肢の表面筋電図
 RHS : 右足接地, TO : 離地
 (Murray MP et al: Kinematic and electromyographic patterns of olympic racewalkers. Am J Sports Med, 11: 68-74, 1983)

図 10.6: 通常歩行と競歩における筋電図 [12]

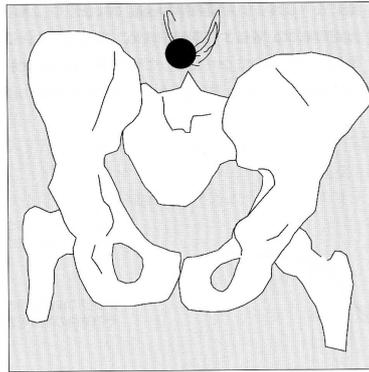


図 II-1-6 前顔面からみた重心の軌跡：蝶の形をしている

図 10.7: 歩行時の重心の移動軌跡 [8]

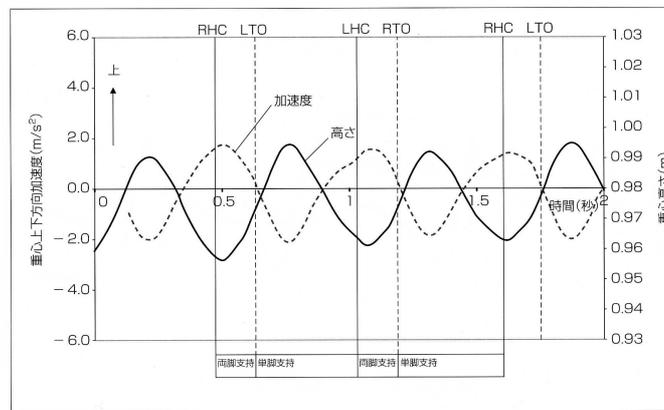


図 II-2-9 重心上下方向位置・上下方向加速度時間変化

図 10.8: 歩行時の重心の上下運動 (鉛直方向)[15]

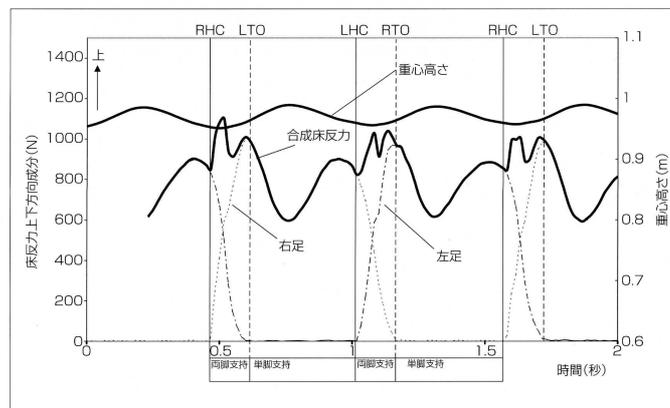


図 II-2-6 重心の上下方向位置・合成床反力上下成分の時間変化

図 10.9: 歩行時の重心の上下運動 (鉛直方向)[15]

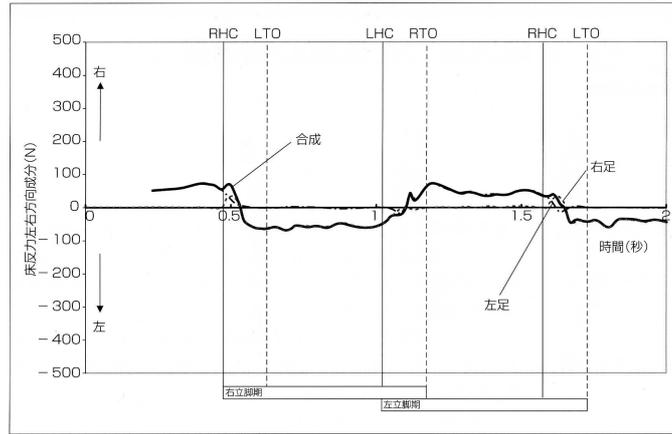


図 II-2-5 左右方向床反力時間変化 (右足：点線、左足：鎖線、合成：実線)

図 10.10: 歩行時の床反力 (左右方向)[15]

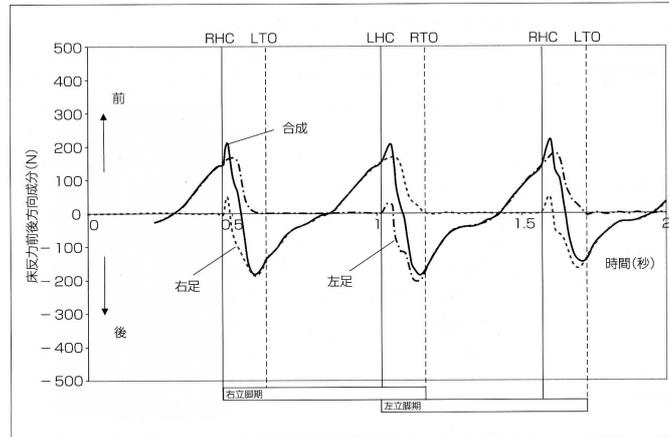
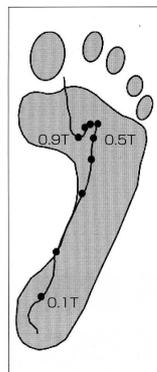


図 II-2-4 前後方向床反力時間変化 (右足：点線、左足：鎖線、合成：実線)

図 10.11: 歩行時の床反力 (前後方向)[15]



●は立脚期時間 T を 10 に分割した位置
図 II-2-21 足底内の床反力作用点軌跡

図 10.12: 歩行時の足圧中心の移動軌跡 [15]

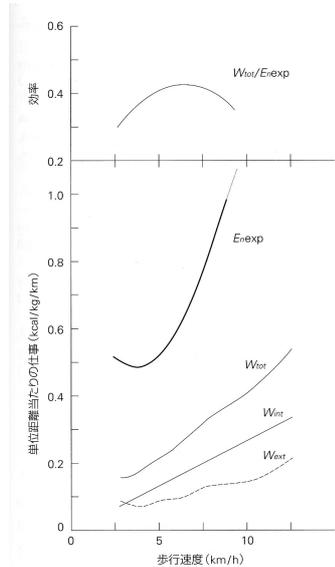


図 7-12 歩行の外的仕事 (W_{ext})、内的仕事 (W_{int})、全機械の仕事 (W_{tot})、エネルギー消費量 (E_{exp} : 全消費量 - 立位消費量) および効率 (W_{tot}/E_{exp}) の歩行速度に対する変化
 1kcal/kg/km = 4.18J/kg/m
 (Cavagna GA and Kaneko M: Mechanical efficiency in level walking and running. J Physiol, 268: 467-481, 1977)

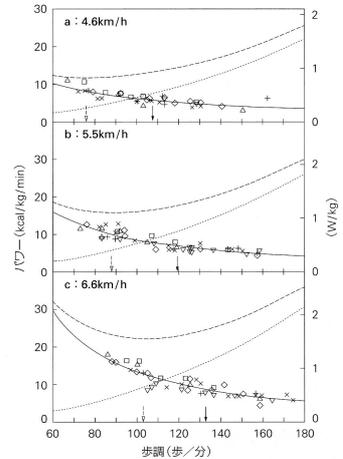


図 7-13 3 種類の歩行速度における歩調に対する機械的パワーの変化
 実線は外的パワー、点線は内的パワー、破線が総パワー (外的パワー+内的パワー)
 (Cavagna GA and Franzetti P: The determinants of the step frequency in walking in humans. J Physiol, 373: 235-242, 1986)

図 10.14: 歩行時の機械的効率 [15]

図 10.13: 歩行時の内的仕事・外的仕事 [15]

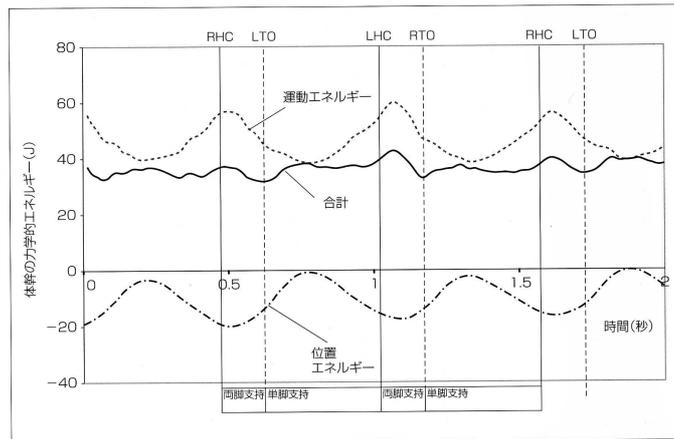


図 II-6-1 歩行中の体幹の位置エネルギーと運動エネルギーの時間変化

図 10.15: 歩行時のエネルギー [15]

参考文献

- [1] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1–18. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- [2] Kingston Bernard, 足立和隆訳. よくわかる筋の機能解剖. メディカルサイエンス・インターナショナル, 2000.
- [3] Robertson D., Gordon E., Caldwell Graham, E., Hamill Joseph, Kamen Gary, and Whittlesey Saunders, N. *Research Methods in Biomechanics*. Human Kinetics, 2004.
- [4] Thompson Floyd, 中村千秋, 竹内真希. 身体運動の機能解剖 (Manual of Structural Kinesiology). 医道の日本社, 1997.
- [5] F. Gazzani. A new algorithm for calibrating stereophotogrammetric systems devoted to motion analysis. *Human Movement Science*, Vol. 12, pp. 403–425, 1993.
- [6] H.M. Karara G.T. Marzan. A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity, and some application of it. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems*, pp. 420–476, 1975.
- [7] H. Hatze. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified dlt-approach. *J. Biomechanics*, Vol. 21, No. 7, pp. 533–538, 1988.
- [8] Perry Jacqueline. ペリー歩行分析、正常歩行と異常歩行. 医歯薬出版, 2007. 武田功監訳.
- [9] Watkins James. *An introduction to biomechanics of sport and exercise*. Elsevier, 2007.
- [10] Rose Jessica and Gamble James, G. *Human Walking*. Lipincott Williams & Wilkins, 2006.
- [11] 金谷健一. 画像理解 - 3次元認識の数理 -. 森北出版, 1990.
- [12] 金子公宥, 福永哲夫 (編). バイオメカニクス, 身体運動の科学的基礎. 杏林書院, 2004.
- [13] Dawson T., J. and Taylor C., R. Energetics cost of locomotion in kangaroo. *Nature*, Vol. 243, pp. 313–314, 1973.
- [14] Martin T., P. and Stull G., A. Effects of various knee angle and foot spacing combinations on performance in the vertical jum. *Res. Quart.*, Vol. 40, No. 2, pp. 324–331, 1969.
- [15] 江原義弘, 山本澄子. ボディダイナミクス入門、歩き始めと歩行の分析. 医歯薬出版, 2002.
- [16] 佐伯由香, 黒澤美枝子, 細谷安彦, 高橋研一編訳 (編). トートラ 人体解剖生理学 原書 6 版. 丸善, 2004.