

## 坂道における歩行の理論的考察と基礎的な実験

† 森本安夫<sup>1)</sup>, 伊藤 譲<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 明治鍼灸大学 物理教室

<sup>2)</sup> 明治鍼灸大学医療技術短期大学部 柔道整復学教室

**要旨**：坂道における歩行は日常生活でまた登山などのスポーツ、あるいはリハビリテーション等によく見られる動作である。しかしこのことについての理論的あるいは実験的な報告は成書でも研究論文でもほとんど見当たらない。恐らく簡単なことなので見過ごされているか、あるいは研究されていても報告されていないものと思われる。しかし坂道における歩行は基本的なものであり理論的、実験的な研究が必要である。本論文では坂道における歩行についてのモデルを構築し、歩行速度と歩幅についての理論的な解析を行い、その正当性を検討するための予備的な測定を行った。さらに歩行時に荷物を持つことを想定して重量負荷の歩行速度と歩幅への影響についても考察を行った。

理論の基本はエネルギーバランスである。歩行に要する仕事は地面と足底との摩擦と体重心の昇降に伴う位置エネルギーの変化であるとした。これにより歩行速度が定まる。この際、位置エネルギーの変化は実効的な摩擦係数の変化として現われる。歩幅は幾何学的に平地での歩幅からどう変化するかという形で求めた。なお、坂道での歩幅の解析は今までみられず本研究が初めての試みである。以上の理論的な解析の妥当性を検討するため行った実験は次のようなものである。

坂道は傾斜角度  $7 \pm 1^\circ$  で距離は105m, 標高差12.8mであった。重量負荷は1から25kgとし、ほぼ1kg間隔の物を用意した。負荷への慣れを防ぐため重量負荷の順序はランダムにした。被験者は22歳から58歳で男7名、女2名の計9名である。歩行に際しては”普通に”歩くことを要請した。測定は万歩計とストップウォッチで歩数と歩行時間を測定し歩行速度と歩幅を求めた。

脚部の発生するパワーについて適当な値を仮定し定量的な検討を行った。その結果、昇り降りの歩行速度とその負荷依存性について満足する一致が得られた。また歩幅についても昇り降りについて定量的な一致を得た。ただ歩幅については負荷の効果を解析するには到っていない。

以上のように理論と実験値の一致を得ることに成功したがその精度は満足すべきものではない。これはまだ被験者の特性—身長、体重、脚力等—が充分考慮されていないためである。しかしこのような解析法の確定と、測定への応用が為されていない状況では充分価値をもたずである。本論文が坂道歩行の研究の発端になるのではないかと期待している。

### 1. 序 論

歩行は日常における身体の移動だけでなくリハビリテーションにおいても重要な動作であり、それに関する教科書<sup>1-7)</sup>や論文<sup>8-16)</sup>の枚挙に暇が無い。研究は多方面に渡り、筋電図による各種筋の動作解析<sup>9, 11)</sup>、トレッドミル上での歩行での酸素消費量の測定<sup>1, 2, 8)</sup>、フォースプレートによる床反力の測定<sup>10, 14)</sup>あるいはビーコンによる3次元動作解析<sup>12, 13)</sup>など精密科学への歩みを深めている。また義足の改良を目的とした歩行の解析といった臨床面での研究<sup>8)</sup>や年齢による歩行動態の研究<sup>15)</sup>も進んでいる。

ところが少し方向の異なる歩行の研究—例えば、

重量負荷をかけた歩行の研究—はどうだろうか？これは日常では荷物を持って歩く場合、スポーツではワンダーフォーゲルや登山、また臨床面ではリハビリテーションにおいて重要な動作である。過去の文献を調査した限りでは重量負荷による歩行への影響について真剣な研究がなされている様子は見られなかった。著者らが知る限りでは1930年代にトレッドミル上で負荷により酸素消費量がどう変化するかを測定したものが1件<sup>1)</sup>あっただけであった。負荷によって歩行速度と歩幅あるいは歩行率（単位時間当たりの歩数）といった歩行のパラメータがどう変化するかについての報告は見当たらなかった。これらのデータは歩行に関

平成15年12月2日受付, 平成16年10月7日受理

Key Words: 坂道歩行 Walking in Slope, 歩行速度 Walking Velocity, 歩幅, Step Length, 負荷依存性, Load Dependence

† 連絡先: 〒629-0392 京都府船井郡日吉町保野田ヒノ谷6 明治鍼灸大学 物理教室

Tel: 0771-72-1181(内線251) Fax: 0771-72-0326

e-mail: y\_morimoto@meiji-u.ac.jp

しては基本的なものであり、厳密に検討しておく必要があると思われる。

そこで我々は先に被験者に各種の負荷をかけ400mを"普通に"歩いてもらい、歩行時間と歩数をストップウォッチと万歩計で測るという単純な実験を行った<sup>16)</sup>。結果は歩行速度と歩幅は少数の例外を除いて負荷の増大に伴い減少するが、歩行率は増加する場合と減少する場合が同じ程度であり、一定の傾向を示さなかった。これらの結果は歩行に必要な仕事はほとんどが地面と足底との摩擦によること、負荷(かけ方にもよるが)により体重心が低下すること、および被験者は歩行のために発するパワーは一定であるとする仮定をおくことで大雑把な解析をすることができた。もちろん歩行に必要なエネルギーとしては地面との摩擦以外に体重心の上下動に伴うロス、あるいは股関節部の回転エネルギー、あるいは空気の抵抗等種々のものが考えられるが、前2者は元々保存的なものであり最後の項は"普通に"歩く場合は問題にはならないと考えられる。なおこのような測定では通常トレッドミル上で歩行速度を設定して行われる。それは測定条件が正確に設定されるという点では優れた方法であるが日常での"普通に歩く"動作を調べるには問題があろう。キネティクスが多少異なると思われるからである。

日常の歩行動作あるいは登山といったスポーツあるいはリハビリテーションの臨床でもう一つ重要なのは坂道での歩行であろう。この場合必要な歩行の仕事として地面との摩擦以外に体重心の上下による位置エネルギーの変化が必要となる。従って平地の歩行とは異なる状況があるはずである。この件についても過去の報告を探してみたが、最近1件上り坂における長距離走についての実験的な報告<sup>17)</sup>があるだけで坂道歩行についての詳しい解析や実験報告は見当たらなかった。

そこで本研究では坂道の歩行において歩行速度と歩幅がどのように決定されるか理論的に解析することを試みた。理論の基礎は歩行速度についてはエネルギーバランスである。歩行に要する仕事は地面との摩擦と体重心の上下に伴う位置エネルギーの変化であり、これが脚部の発生するパワーによって供給されると言うものである。歩幅は坂道であることの幾何学的条件より考察した。また日常の動作において荷物を持って歩くことを想定

して負荷依存性についても考察した。さらにこれらの理論的な考察の結果を検討するため少数例ではあるが被験者を募って実験を行った。精度に問題はありますがおおまかな点では理論が適用できることを確認した。理論はまだ出発したばかりで大雑把なものであるがそれが坂道の歩行の理論の出発点となることを期待している。

次節においては坂道歩行のモデルを構築しそれによる理論的な解析を示す。3節では予備的に行った実験の結果を示し、それに続く4節では理論的に予想されるものと比較検討を行なう。最後の節はここでの結論を提示する。

## II. 理論的な考察

先の文献<sup>16)</sup>の理論を踏襲すると歩行に必要な仕事はほとんど全て地面と足底の摩擦に抗する仕事である。本研究の場合には加えて体重心が上下することによる位置エネルギーの変化が加わる。図1に各力の配分を示す。体重 $m$ (kg)の被験者が $M$ (kg)の負荷をつけて角度 $\theta$ の坂道を $L$ (m)昇るとしよう。坂道と足底との摩擦係数は $\mu$ 、地球の重力加速度は $g$ とする。摩擦力は $\mu(m+M)g \cos \theta$ 、落ちようとする力は $(m+M)g \sin \theta$ であるから、AからBまで昇るのに必要な仕事 $U$ (J)は次のようになる。

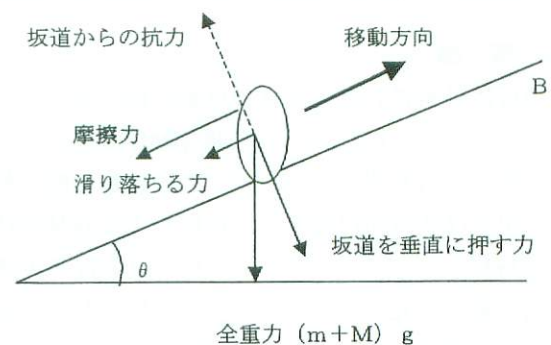


図1 坂道での力の配分。楕円は重量負荷と被験者。被験者はAからBまで昇る。AB=Lである。坂道を垂直に押す力は $(m+M)g \cos \theta$ で、摩擦力は $\mu(m+M)g \cos \theta$ となる。滑り落ちる力は $(m+M)g \sin \theta$ である。降りの場合は移動方向および摩擦力の方向が逆になる。

$$U = \{ \mu(m+M) \cos \theta + (m+M) \sin \theta \} g L. \quad (1)$$

歩行は全身的な動作ではあるが最終的には脚部の筋が作用する。そこでこの仕事が脚部がする仕事

となる。昇りきるのに時間が  $T$  (s) を要したとすると、筋の発するパワー、 $P$ は

$$P = \frac{U}{T} = (m + M)g(\mu \cos \theta + \sin \theta) \frac{L}{T}$$

$$= (m + M)g(\mu \cos \theta + \sin \theta)V(up, M) \quad (2)$$

となる。  $V(up, M)$  は負荷が  $M$  (kg) のときの昇りでの歩行速度である。筋の発するパワーは一定であるとする。これによると坂道の影響は単に平地 ( $\theta = 0^\circ$ ) の場合の摩擦係数  $\mu$  をと変更することである。(2) は正確ではあるが実際には体調とか負荷の取り付け方あるいは摩擦係数のバラツキとかで誤差が入るので、文献16)と同様に  $m \gg M$  の近似で歩行速度の表式を求めの方が実験と比較しやすい。そうすると、

$$V(up, M) = \frac{P}{(m + M)g(\mu \cos \theta + \sin \theta)} \approx \frac{P}{mg(\mu \cos \theta + \sin \theta)} \left(1 - \frac{M}{m}\right) \quad (3)$$

となり、歩行速度が負荷により直線的に減少することが予想される。降りでは図1で移動方向および摩擦力の方向が逆になるだけなので次の結果を得る。すなわち、

$$V(down, M) = \frac{P}{(m + M)g(\mu \cos \theta - \sin \theta)} \approx \frac{P}{mg(\mu \cos \theta - \sin \theta)} \left(1 - \frac{M}{m}\right) \quad (4)$$

$V(down, M)$  は負荷が  $M$  のときの降りでの歩行速度である。もちろん、降りの場合滑り落ちないためには  $\mu \cos \theta > \sin \theta$  あるいは  $\mu > \tan \theta$  という条件が必要である。次節で示す実験では  $\theta = 7^\circ$  ( $\tan 7^\circ = 0.123$ ) で、通常  $\mu$  は0.5から0.6なので<sup>18)</sup> この条件は満たされている。

次に歩行速度の負荷依存性を求めよう。これは単位負荷による歩行速度の減少度であり、昇りについては  $\frac{v(up, M) - v(up, 0)}{M}$  である。これは(3)より次のように求められる。

$$\frac{v(up, M) - v(up, 0)}{M} \approx -\frac{P}{m^2 g(\mu \cos \theta + \sin \theta)} \quad (5)$$

降りについては同様にして(4)より次のように求められる。

$$\frac{v(down, M) - v(down, 0)}{M} \approx -\frac{P}{m^2 g(\mu \cos \theta - \sin \theta)} \quad (6)$$

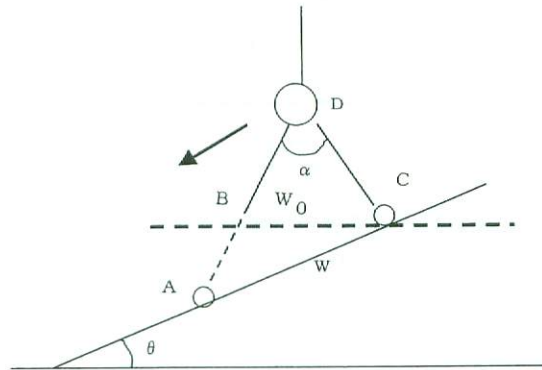


図2 坂道を降りる場合の歩幅の決定。Dは開脚の中心、DC、DBは両足を示す。BCが平地での歩幅、 $W_0$ である。Aは坂道の場合の着地場所。ACが下りの場合の歩幅、 $W$  (down)となる。 $\alpha$ は開脚の角度である。 $\theta$ は坂道の傾き角度である。

一方歩幅はどのように求められるであろうか？この解析は他で論じられていないので、図2のようなモデルを考えてみた。図の詳細については図説明を参照して欲しい。まず降りの場合を考える。平地での歩幅を  $W_0$  ( $= BC$ ) としよう。平地ならBで着地するところが坂道のためDBを延長したAで着地することになる。そうするとACがこの場合の歩幅、 $W$  (down)になると考えられる。

$W$  (down)は $\triangle ABC$ に正弦法則を適用することで得られる。すなわち、 $\angle ABC = \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2}$ 、 $\angle BAC = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \theta$ であるから、

$$\frac{W(down)}{\sin(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2})} = \frac{W_0}{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \theta)}$$

$W$  (down)は次のようになる。

$$W(down) = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2})}{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \theta)} W_0 \quad (7)$$

昇りの場合の歩幅、 $W$  (up) の場合の様子を図3に示す。A'、B'、C'、D'は図2のA、B、C、Dに相当する。平地ではA'で着地するところが、坂道ではD'A'と坂道の交点であるB'で着地することになる。A'C'= $W_0$ 、B'C'= $W$  (up)である。 $\triangle A'B'C'$ に正弦法則を適用する。

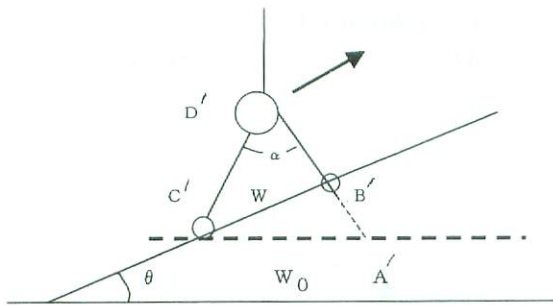


図3 坂道を昇る場合の歩幅の決定.  $A', B', C', D'$ は図2での $A, B, C, D$ に対応している.  $A'C' = W_0, B'C' = W (up)$ である.

$$\angle B'A'C' = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}, \quad \angle A'B'C' = \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} - \theta$$

であるから,  $\frac{W(up)}{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2})} = \frac{W_0}{\sin(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} - \theta)}$  という関係より

$W(up)$ が次のように求まる.

$$W(up) = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2})}{\sin(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} - \theta)} W_0 \quad (8)$$

残念ながらこの解析は純粋に幾何学的で負荷の効果は全く考慮されていないので負荷依存性は求められない. 考慮に入れるとすると $W_0$ に入れるしかないが, その効果はかなり小さいことが予想されその効果は体重心の昇降にマスクされてしまう. 将来の問題として残されている.

これらの結果は後に実験結果と比べられる.

### III. 予備的な実験

前節の解析が妥当なものであるかどうかを確認するため予備的な実験を行なった. その方法と結果を述べる.

#### 3-1. 方法

実験は被験者に重量負荷を加え傾斜角  $7 \pm 1^\circ$  のほぼ直線状の坂道, 105m (高低差12.8m) を昇降してもらい, 歩数と歩行時間とを万歩計とストップウォッチで測定するという簡単なものである. 記録は坂道の上と下とでとり昇りと降りのデータを別々にとった. 1日に4から5回の昇降を行いほぼ1週間間隔で3回測定を行い実験日による

バラツキを均等にするようにした. 負荷は1から25kgまでほぼ1kg間隔で用意し, 負荷の慣れを防ぐため負荷の大きさの順はランダムにした. 負荷の形態は錘の入ったベルト, ジャケット, 水を入れたペットボトルおよび鉄製の円盤 (14kg, 20kg) 等である. ベルトとジャケットは身体に装着できる構造になっている. ペットボトルはリュックサックに, 鉄製の円板は背負子にて各々装着した. 装着部位はいずれも腰部に位置するようにした. 被験者は明治鍼灸大学の学生, 教員より募集した. 20才代6名 (内女子2名), 30才代男子2名, 50才代男子1名の男子7名, 女子2名の計9名である. 体重は50kgから75kgに渡って分布していた.

#### 3-2. 結果

直接の測定結果は歩行時間と歩数であり, 典型的な2例についてその値をグラフとして示しているのが図4, 5である. 他の被験者でも同様な結果が得られている. ここでは典型的なものだけを示している. 図4の被験者は22才男子で少林寺拳法の経験者である. 昇り, 降り共に両パラメータ

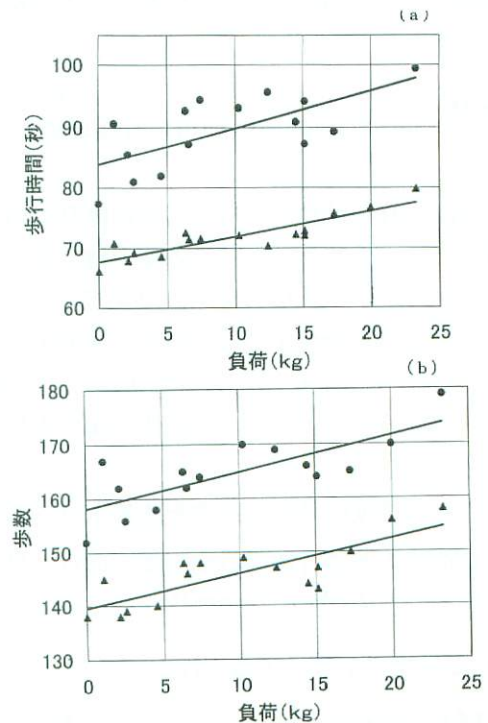


図4 道昇降の代表データ. 被験者は少林寺拳法をやっている22才男子. (a), (b)は各々歩行時間, 歩数の負荷依存性を示している. ●は昇り, ▲は降りのデータを示す. 横軸は負荷で (a), (b)である.

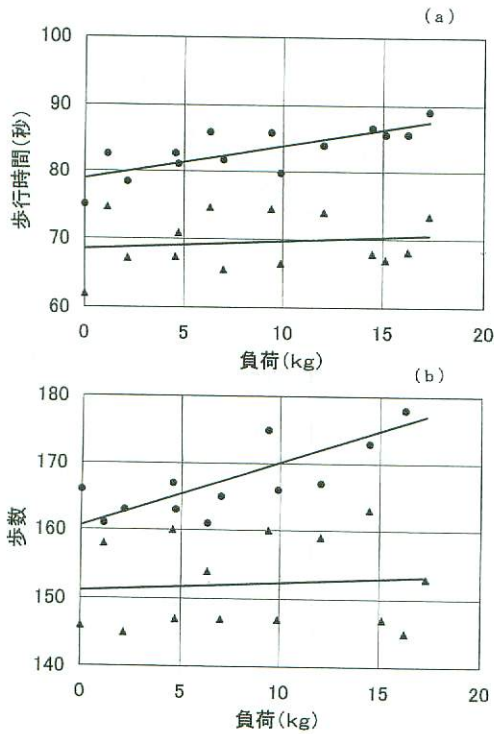


図5 坂道昇降の代表データ。被験者は陸上競技をやっている21才女子。記号等は図3と共通。

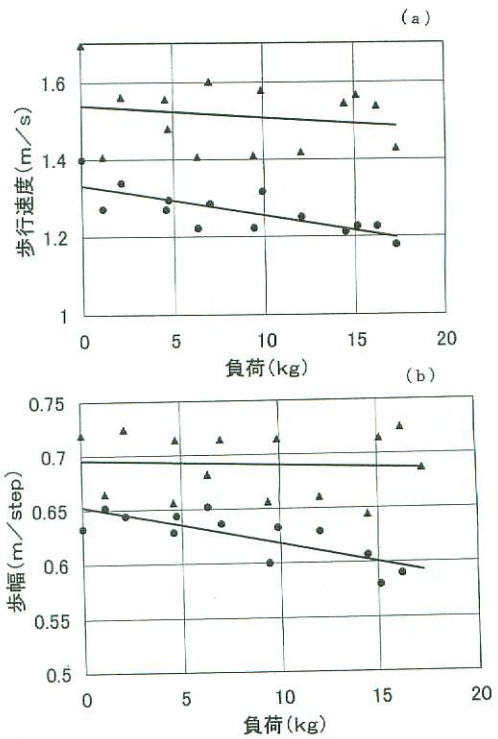


図7 図5の被験者に関する歩行速度と歩幅。説明は図6と共通。

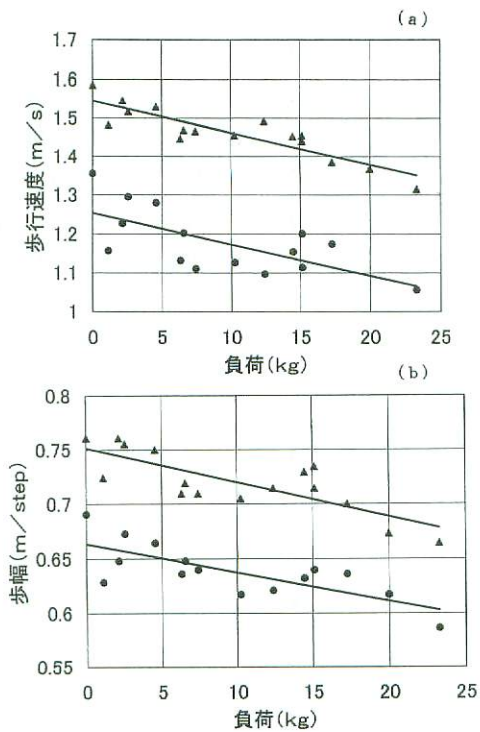


図6 図4の被験者に関する歩行速度と歩幅。(a), (b)は各々歩行速度 (m/s), 歩幅 (m/step) の負荷依存性を示している。●は昇り, ▲は降りのデータを示す。横軸は負荷である。

は負荷に対してほぼ直線的に増加している。どちらも当然のことながら昇りの方が大きい。図5の被験者は21才女子で陸上競技、中距離の選手である。この場合昇りは前者と同じ傾向を示すが降りは負荷による影響はあまり見られない。これは負荷に引き摺られて降りの歩行が加速されるのではないかと推測される。以上二つの傾向は他の被験者でも同様に見られる。

以上のデータを歩行速度、歩幅に換算したのが図6、7でそれぞれ図4、5の被験者に対応している。もちろんこれらは等価である。以下ではこれらのデータについて種々の量を検討する。

### 3-3. 無負荷時でのデータ

まず無負荷時でのデータを示す。序論で述べたように歩行の研究は多岐に渡りかつ多量にあるが坂道の昇降についてのデータ、あるいは研究報告は見当たらない。

図8 (a) は各被験者についての  $V(\text{up},0)$  に対して  $V(\text{down},0)$  をプロットしたものである。これは両者の相関を見るのが目的ではなく、単に各々の分布する範囲を見易くするためのものである。 $V(\text{down},0)$  は1.35から1.81m/sに、

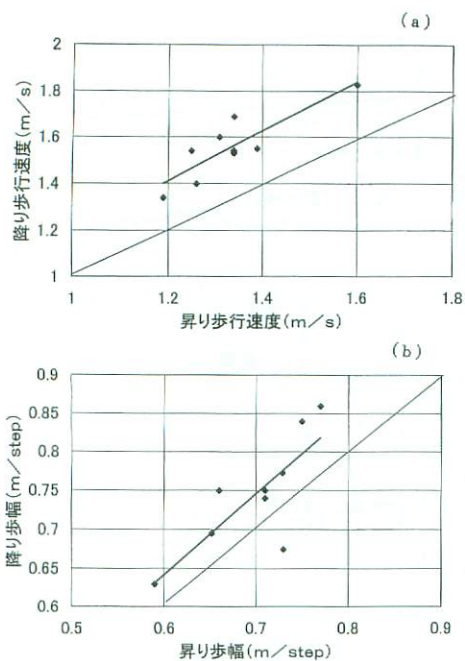


図8 無負荷時での $V(\text{down}, 0)$ と $V(\text{up}, 0)$ , (a) および $W(\text{down})$ と $W(\text{up})$ , (b). 図中の細い実線は $V(\text{down}, 0) = V(\text{up}, 0)$  および $W(\text{down}) = W(\text{up})$  の関係を示している.

$V(\text{up}, 0)$  は1.18から1.60m/sに渡ってそれぞれ分布している。これらの分布は各被験者の体力、特に脚力によるものであろう。平地では歩行速度は1.21から1.51m/sという範囲にあった。 $v(\text{down}, 0)$ よりわずかに速く $v(\text{up}, 0)$ よりわずかに遅いという値である。(図8(b)では $W(\text{up})$ に対する $W(\text{down})$ を示している。これも両者の分布を見易くしたものである。 $W(\text{down})$ は0.63から0.86m/stepに、 $W(\text{up})$ は0.59から0.77m/stepに渡って分布している。この場合も $W(\text{down})$ の方が $W(\text{up})$ の方が大きい。平地では歩幅は0.66から0.84m/stepに渡って分布しておりこの場合も歩行速度と同じような傾向を示す。

次に歩幅と歩行速度との関連を図9に示す。当然のことながら昇り、降りいずれの場合も歩行速度が大きくなるにつれ歩幅は増大する。ただ歩行速度が同じなら降りの方が歩幅は小さい。降りの場合、小幅で歩き、昇りでは大股となる傾向が見られる。なお文献(16)では歩行率も重要なパラメータとして議論されたが、それは負荷により体重心の位置が微妙に変化することにより歩幅が影響を受けることによっていた。しかし坂道を昇降

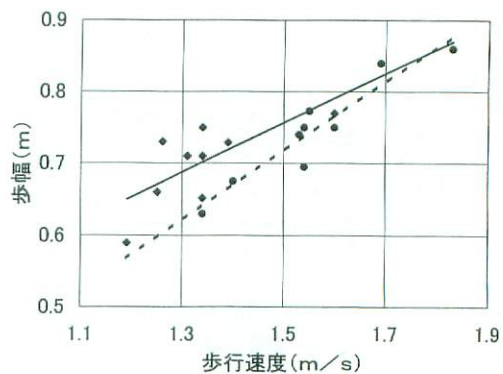


図9 無負荷時での歩幅と歩行速度の相関。実線、 $\blacklozenge$ は昇り、点線、 $\bullet$ は降りのデータである。各点は各被験者に対応している。

する場合には歩幅はそれ以外の因子、坂道の昇降による体重心の変化等により大幅に変化し、体重心の位置による影響はマスクされるのでその議論は成立しない。よって歩行率はここでは議論の対象としない。

### 3-4. 歩行速度と歩幅の重量負荷依存性

負荷依存性で興味ある量としては図6, 7の直線の傾き、すなわち負荷依存係数を上げることができる。これらの分布を図10と図11に示す。図10は歩行速度について示したもので昇り、降りとも1件を除いて係数は負、すなわち負荷により歩行速度は低下する。これは当然であろう。例外についてはいろいろ理由は考えられる。例えば適度の負荷がかかることで姿勢が矯正され歩行速

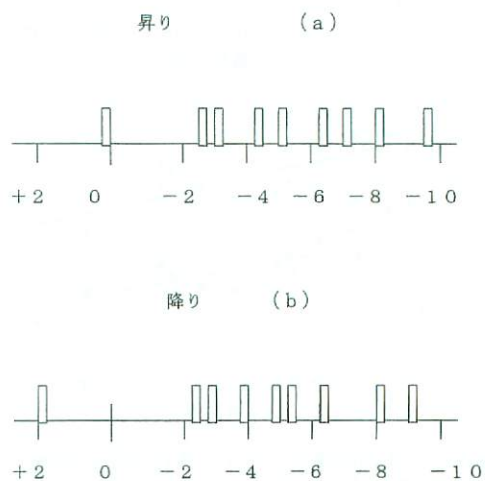


図10 歩行速度の負荷依存係数の分布。横軸の単位は $\times 10^{-3} \text{m/s} \cdot \text{kg}$ である。(a)は昇り、(b)は降りの値である。一つの長方形が各被験者に対応している。

度が増加するというのは有力な理由の一つである。あるいは降りでは負荷に引き摺られる形態になるであろう。昇りについては負荷があることで頑張っ  
て歩くといった事情があるのかもしれない。残念ながらここでは考察の対象外とした。昇りでは $-2.5$ から $-9.6 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ kg}$ の範囲に、降りでは $-2.3$ から $-9.0 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ kg}$ の範囲に均等に分布している。文献16)での平地におけるデータは $-1.0$ から $-8.6 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ kg}$ であった。これらは我々母データと同程度であり坂道でも平地でも負荷が歩行速度を減少させる機構は同様なものであることが推測される。

図11は歩幅の負荷依存係数の分布を示す。昇りtp降り共に2例を除き係数は負で0から $-4 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ step} \cdot \text{ kg}$ の範囲に分布している。文献14)の平地での負荷依存性のデータは $-0.3 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ step} \cdot \text{ kg}$ から $-8 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ step} \cdot \text{ kg}$ であり、坂道での場合より広い分布を有する。これは先に述べたように平地では負荷による体重心の低下がはっきり表れるのに対して坂道の歩行ではそれがマスクされることによるものと推測される。残念ながら歩幅の解析は負荷を含む形では為されていないので定量的な議論はできない。なお例外的に係数の符号が正になるのは特に降りの場合には負荷に引き摺られるような事情があるものと思われる。

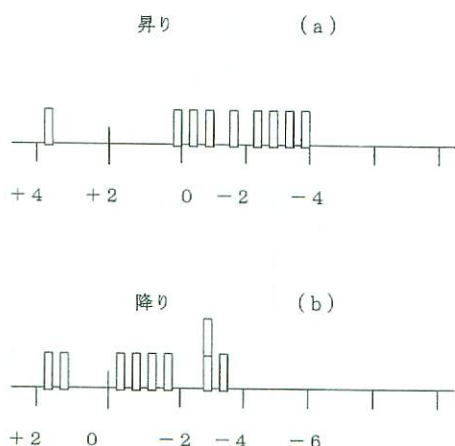


図11 歩幅の負荷依存係数の分布。一つの長方形が各被験者のデータである。横軸の単位は $\times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ step} \cdot \text{ kg}$ である。(a)は昇り、(b)は降りの値である。図中長方形が2段あるのは同じ値のものが2例あることを示す。

#### 4. 実験結果の解析

2節で坂道歩行の理論的な解析を示し3節でそれを確認するための予備的な実験の結果を示した。本節では実験結果を提出された理論が定量的に説明できるかどうかを検討する。

まず、無負荷時での歩行速度を検討しよう。これは式(3)と(4)において $M=0 \text{ kg}$ として求められる。パラメータを設定する必要があるので図5または7の被験者についてみることにする。摩擦係数は先に述べたように0.5から0.7が土砂、砂、地面で得られているので<sup>18)</sup>平均をとって、 $\mu=0.6$ とし、 $\theta=7^\circ$ 、また $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $m=70 \text{ kg}$ である。Pは文献16)で体力的に同程度の被験者に対して評価された値 $P=560 \text{ W}$ を用いる。昇りの場合、これらの値を(3)に代入すると、

$$v(up,0) = \frac{560}{70 \times 9.8 \times (0.6 \times 0.933 + 0.122)} \approx 1.20 \text{ m/s}$$

と評価される。実測値は $1.26 \text{ m/s}$ であり、相対誤差は約5%である。また降りの場合では(4)へ代入すると、

$$v(down,0) = \frac{560}{70 \times 9.8 \times (0.6 \times 0.933 - 0.122)} \approx 1.87 \text{ m/s}$$

と評価される。実測値は $1.55 \text{ m/s}$ であり、相対誤差は前者と同じで20%である。パラメータの設定がかなり大雑把であることを考えれば満足すべき一致であろう。

次のその負荷依存性を評価してみよう。昇りでは式(5)に上述のパラメータを代入すると

$$\frac{560}{70 \times 70 \times 9.8 \times (0.6 \times 0.992 + 0.122)} \approx 0.016 \text{ m/s} \cdot \text{ kg}$$

となる。実測では $8.1 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ kg}$ であり、相対誤差は100%となる。また降りでは式(6)を用いると同様な計算により $0.024 \text{ m/s} \cdot \text{ kg}$ と評価される。実測では $8.4 \times 10^{-3} \text{ m/s} \cdot \text{ kg}$ であり、相対誤差は200%となる。いずれの場合も歩行速度の場合程精度の良い評価は得られない。これは負荷の装着の仕方やまだ考慮されていない条件が関与するのではないと思われるが、将来の検討事項である。現在は $10^{-2}$ 程度という値が得られたことで満足すべき段階である。

最後に歩幅についてみてみよう。この場合開脚角度 $\alpha$ というパラメータが必要になる。ほぼ $30^\circ$

であることが実測されるのでこの値を用いる。また平地での歩幅 $W_0$ も必要である。標準的な体格の被験者で0.6から0.8mの範囲であったので平均をとり $W_0 = 0.7m$ とした。降りの場合は式(7)へこれらの値を代入すると次のように評価される。

$$W(down) = \frac{\sin(90+15)}{\sin(90-15+7)} \times 0.7 \approx 0.73m$$

一方実測値は0.75mである。また昇りでは式(8)を用いて0.68mと評価され、実測値は0.67mであった。両者はいずれも相対誤差が各々3%および1%であり、高い精度で一致している。従って2節での理論的なモデルは妥当なものであることを示している。残念ながら歩幅の負荷依存性を理論的に導くことにはまだ成功していない。

## 5. まとめ

坂道での歩行についての理論的な解析および実験はまだ報告されていない。しかし坂道の歩行は動作として基本的なものであるからこれらは早急に実施されるべきであろう。このため本論文において坂道歩行の理論的なモデルを構築し、それを確かめるため予備的な実験を行い、理論と実験結果と比較検討を行い、現段階では納得できる両者の一致を得ることができた。

理論の要点は次の通りである。

- (1) 歩行に要する仕事は地面と足底との摩擦と体重心の移動に伴う位置エネルギーの変化分である。
- (2) その仕事は脚部が発生し、歩行中一定とする。
- (3) 歩幅は坂道により着地点が変わる実を用い純粋に幾何学的に決めた。

実際に被験者について実験をデータを得るため歩行速度と歩幅を測定した。得られた値と理論から予想される値を比較検討した。これを行なうには脚部の発生するパワー、地面と足底との摩擦係数および開脚角度等のパラメータを設定しなければならない。これを行なった結果次のような結論を得た。

- (1) 無負荷時の昇りと降りの歩行速度は共に10%の相対誤差で評価された。
- (2) 歩行速度の重量負荷依存性の係数は100%の相対誤差があり、精度の点で問題があっ

た。負荷の加え方のどに問題があるのかもしれない。

- (3) 歩幅は昇り、降り共3%程度の相対誤差で評価できた。

なお今後に残された問題として次の事項が挙げられる。

- (1) 本論文で理論的に考慮した因子以外のものを取り込みもっと精密にする。
- (2) 実験的には被験者の体格、脚力等を考慮に入れる。
- (3) 筋電図等で筋の動きを同時計測する。
- (4) 被験者数を増し得られた結果の精度の向上を図る。

本研究は我々の知り得る限り、坂道昇降に関する初めての報告であり、参考とすべき文献はほとんど見当たらない。そのため解析に用いた理論は非常に簡単なものであり、今後更に精密化していく必要がある。故にこの論文がその端緒を開くものと期待している。殊に歩幅については負荷依存性の解析は手付かずの状態であり、さらなるアイデアが望まれる。

## 謝辞

本研究に当たっては2002年度の物理教室のゼミ生望月弘貴氏を中心とする本学の学生、教職員に被験者として協力を頂いた。ここに感謝の意を表するものである。

本研究は本学研究倫理委員会の承認を2002年3月19日に受けている。受付番号は13-80である。

## 参考文献

- 1) 松井秀治：身体運動の運動学的原理：身体運動学入門。杏林書院。東京。pp85-130, 1979.
- 2) R. M. アレキサンダー (東昭訳)：歩行と走行：生物と運動。日経サイエンス社。東京。pp25-62, 1992.
- 3) 多野義郎：ヒトは1日でどれだけ歩くのか、等：ウォーキングと歩数の科学。不味堂出版。東京。pp3-127, 1998.
- 4) 政二慶：動きに対する原理と研究成果。歩、走：スポーツバイオメカニクス。朝倉書店。東京。pp9-22, 2000.
- 5) 浅見俊雄、石井喜八、宮下充正等：歩く、走る：身体運動学概論。大修館書房。東京。pp129-190, 1979.
- 6) 金子公宥：種々の運動の出力パワー：パワーアップの科学。朝倉書店。東京。pp64-80, 1988.



- 7) 山崎信寿, 広瀬秀行：時間, 距離因子の分析：臨床歩行分析入門 (土屋和夫編). 医歯薬出版, 東京, pp11-23, 1988.
- 8) 大道等, 見波静：病理的歩行動作の重心移動. 臨床スポーツ医学. 19：403-411, 2002.
- 9) 長谷川公隆：歩行時の運動制御の解析：総合リハ. 27：1029-1036, 1999.
- 10) 平崎鋭矢：歩行解析の現況. 関節外科. 18：128-135, 1999.
- 11) 林良一：表面筋電図による歩行解析. Clin. Neurosci. 18：141-143, 2000.
- 12) 飯田寛和, 中村孝志：Computer Graphicsを使用した新しい歩行分析装置. 日本臨床バイオメカ. 18：373-377, 1997.
- 13) 坂田清, 石橋俊郎：Visicon clinical managerによる歩行解析. 関節外科. 18：136-143, 1999.
- 14) 滝口清昭：歩行に見る固有パターンの存在. 日経サイエンス. 2：108-111, 2002.
- 15) 柳川和優, 磨井祥夫, 山口立雄, 渡部和彦：若年者と高齢者における歩行動作の比較. バイオメカ研究. 7：179-192, 2003.
- 16) 森本安夫, 伊藤譲, 望月弘貴：歩行のパラメータの負荷依存性. 明治鍼灸医学. 32, pp49-56, 2003.
- 17) 横澤俊治, 藤井範久, 橋本靖士, 阿江通良：上り坂における長距離走動作のキネテイクスの特長. バイオメカ研究. 7：30-42, 2003.
- 18) 曾田範宗：摩擦係数と日常感覚：摩擦の話. 岩波書店, 東京. pp72-74, 1978.

## Theoretical analysis and preliminary experiment for slope walking

†MORIMOTO Yasuo<sup>1)</sup>, and ITOH Yuzuru<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Physics Department, Meiji University of Oriental Medicine*

<sup>2)</sup> *Faculty of Judo Seifuku Therapy, College of Medical Technology,*

*Meiji University of Oriental Medicine*

### Abstract

**[Purpose]** The basic data such as walking velocity or step length in walking the slope, have not been seen in any textbooks or articles as far as the author's efforts. It seems very strange, because the walking the slope is important action in daily life or sport such as mountain climbing. So we try to investigate the above quantities in walking the slope.

**[Theory]** The walking velocity is estimated by assuming that the energy necessary to maintain the walking is the friction between ground and foot. The slope has the effect to modify the friction coefficient, thus new effective friction coefficients are obtained for going up and down the slope. Through this fact the difference between the walking velocities for going up and down the slope is derived. Their load-dependences are also explained. The step-length is derived by purely geometrical manner, however to our regret we can not succeed in deriving its load-dependence.

**[Method]** The used slope has an inclination angle of  $7 \pm 1^\circ$ , length of 105m and vertical height of 12.8m. The ages of 9 volunteers (male 7 and female 2) are ranged from 22 to 58. The time for walking and the number of steps are measured by stop-watch and pedometer. The weight of load is ranged from 1 to 25kg, and is prepared at interval of about 1kg.

**[Results]** The walking velocities for going up and down the slope without load are ranged from 1.2 to 1.6m/s, and from 1.3 to 1.8m/s, respectively. The step lengths without load are ranged from 0.60 to 0.78 m/step for going up the slope, while from 0.63 to 0.86 m/step for going down the slope, respectively. These differences can be explained theoretically. Both the walking velocity and step-length decrease almost linearly with the load. The coefficients of load-dependence for the walking velocity are ranged from, which are roughly explained theoretically. Those for the step-length are ranged from 0 to.

**[Conclusions]** The basic data, walking velocity and step-length and their load-dependences are investigated for going up and down the slope. The results are roughly analyzed theoretically. In the theory the assumption is used that the work necessary to maintain the walking is the work of friction between the ground and foot. The effect of the slope is to modify the friction coefficient. The step-length is estimated through purely geometrical manner, which allows to explain the experimental results. However we do not yet succeed in deriving its load-dependence, and is left for future problem.

---

Received on December 2, 2003 ; Accepted on October 7, 2004

† To whom correspondence should be addressed.

Meiji University of Oriental Medicine, Hiyoshi-cho, Funaigun, Kyoto 629-0392, Japan