

階段歩行についての理論的解析と予備的実験

† 森本安夫

明治鍼灸大学 物理学教室

要旨：現在、階段歩行についての理論的な研究はなされていない。本研究では階段歩行についての初歩的な理論を構成し、それを検証するため予備的な実験を行なった。平地歩行では歩行時間と歩数あるいは歩幅が独立であるのに対して階段歩行では歩数あるいは歩幅は階段によって決まってしまう、測定量は歩行時間だけという特徴がある。また平地歩行に要する仕事は主に地面と足底との摩擦に抗するものであるのに対して、階段歩行では体重心の上下動による位置エネルギーが主要である。またこれだけでは昇り、降りの仕事の差が出てこないで重心の周りの回転エネルギーを考慮しなければならないという特徴も有る。すなわち昇りではエネルギーを脚部が発生させなければならないが、降りでは位置エネルギーの開放により受動的に発生する。降りでは位置エネルギーの減少分は脚部の筋で粘性の形で消費され筋の負担になるがこの回転エネルギーの分だけ負担が軽減されるからである。この分降りの方がエネルギー的には負担が少なくなる。

実験は高さ、幅が共に0.2mの53段の階段を用い、9名の被験者に対して歩行時間を測定するというものである。同時に荷物を持つことを想定しその負荷依存性も測定した。それらの結果と理論的な予想と定量的な比較を行なった。そのためには脚部の発生するパワーを適当に設定しなければならないが、これには210から250Wという常識的な値を仮定することで歩行時間については相対誤差が数%という精度で満足すべき一致を得た。負荷依存性については相対誤差が数%の場合と100%近くになる場合があり、満足すべき結果は得られていない。

ただ理論はまだまだ荒削りなものであり、もっと精密化する必要がある。更に被験者数についても9名と少なくまだ予備的な段階であり、今後被験者数を増やすことで結果が一般的なものかどうかを確認する作業が残っている。しかしこのような階段歩行における研究は現在為されておらず本研究がその端緒を拓くのではないかと期待している。

1. 序 論

我々は数年来自然な歩行の解析に関心を持って研究を進めてきた^{1, 2)}。もちろん歩行は日常生活だけでなく、健康のためのウォーキングあるいはリハビリテーションなどの臨床の現場においても重要な動作として数多くの研究があり、それに関する成書³⁻⁷⁾、総合報告⁸⁻¹⁰⁾あるいは論文¹¹⁻¹⁸⁾等も枚挙に暇がない。しかし研究の大部分はフォースプレートやトレッドミル等を用い、実験条件がきちんと設定された実験室内で行なわれており¹²⁾研究目的としては自然な歩行については健康への影響あるいは加齢による変化等^{10, 13, 15)}が挙げられる。また日常では荷物を持って歩くことが多く重量負荷の効果も重要と考えられるがそれらについての報告はほとんど無い。文献1)において著者らは自然な歩行とその重量負荷効果にまず注目した。これらのテーマに関する研究は少なく、

その理由として、多分単純なことなので見過ごされていたか、あるいは測定はなされてもそれ程関心を持たれずきちんとした報告がなされなかったことが考えられる。しかし歩行は日常において頻繁に現れる動作であるし、リハビリテーションといった医療の現場でも多用される動作である。従って研究されるべきテーマであり、我々は文献1)においてその諸特性を報告した。

次に注目したのは登山といったスポーツでもよく見られる坂道での歩行動作である。このテーマに関しても教科書レベルでの記述や論文等においても報告は見当たらない。先と同じような状況があるものと推測される。そこで我々は本テーマについても研究結果を報告した²⁾。これらの研究は初期的なものであり、実験的にも理論的にも不完全と考えられるが、その方向への端緒を拓いたのではないかと考えている。

平成16年11月22日受付、平成16年12月27日受理

Key Words : 階段歩行 Walking on Staircase, 位置エネルギー Potential Energy, 回転エネルギー Rotational Energy, 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 明治鍼灸大学 物理学教室
Tel: 0771-72-1181 Fax: 0771-72-0326 e-mail: y_morimoto@meiji-u.ac.jp

平地歩行、坂道歩行以外にもう一つ重要な歩行動作がある。それは階段歩行としての昇降動作である。このテーマについても先の2例の如く先行研究は見当たらない。踏台昇降に関する研究は散見するが¹⁹⁾これは普通に階段を昇降する動作とは異なると考えられる。歩行動作としては体重心の上下に伴う位置エネルギーの変化という点においては坂道での昇降と似たものと思われるが、以下の点からそれとは異なる特徴的な事情がみられる。第1に平地や坂道歩行に要する仕事は地面との摩擦が主であるが^{1, 2)}、階段歩行の場合、その幅が0.5m以内ならば水平方向への動きは少なく摩擦はほとんど関与しないため体重心を移動させることに伴う位置エネルギーだけが主要な仕事になると考えられる。第2点としては足の周りの回転エネルギーが必要となる。この仕事は平地や坂道での歩行では無視しても差し支えない程度であったが、階段の歩行ではそれが昇りと降りの差をもたらすことが理論的に予想され無視できないものである。第3点は仕事だけでなく、先の2例では歩行時間と歩数が重要な量であったが階段歩行では歩幅や歩数は階段により固定されるので独立な変数は歩行時間のみとなる。従って階段の昇降は平地あるいは坂道歩行とは異なる特性を示すことが予想される。

しかしながらこのような事情を考慮した議論も実験も我々の検索努力の範囲では見付けることはできなかった。そこで我々は荒削りなものではあるが階段の昇降についての理論的なモデルを構成し、基礎的な実験を行い、そのデータを解釈することを試みた。それによって階段の昇降と言う動作を理解する手掛かりを得ようとした。実験方法は被験者に"普通(自然)"に階段を昇降してもらい、その時間を計測するというものである。平地あるいは坂道歩行では歩数も測る必要があったが、この場合は階段の段数で決まってしまうからである。また荷物を持った状態も想定して重量負荷依存性も測定した。

現段階では被験者が少数(9名)であり、得られたデータが一般的なものかどうかは確定していない。また参考にするべき理論的解析がなく、理論的には充分とはいえないが本論文が階段昇降の研究に向けての端緒となるのではないかと期待している。

次節において階段昇降の簡単な理論を展開する。3節では実験方法とその結果を示し、4節で理論との比較検討を行う。最後の節は議論とまとめ、そして将来に残された問題点について述べる。

II. 階段昇降の理論

まず階段の昇りから考えてみよう。図1にその模式図を示す。階段の高さをH、幅をLとする。Cは腰部でここを中心にして開脚が行われる。AC、BCが両脚でその長さをhとする。実験では重量負荷はCの付近に装着する。昇りに際してはAを支点として足Bを上げ、B'まで移動させる。それにつれて開脚の中心、CはC'へ移動する。体重心の水平方向への移動距離はほぼ2Lとなる。体重心がH上昇することに対応する位置エネルギーの増加とAの周りの回転エネルギーが脚力によって供給される。体重をm、負荷重量をMとし、脚力はパワー、Pを発生する。1段昇るのに要する時間をt(up, M)とすると次式が成立する。

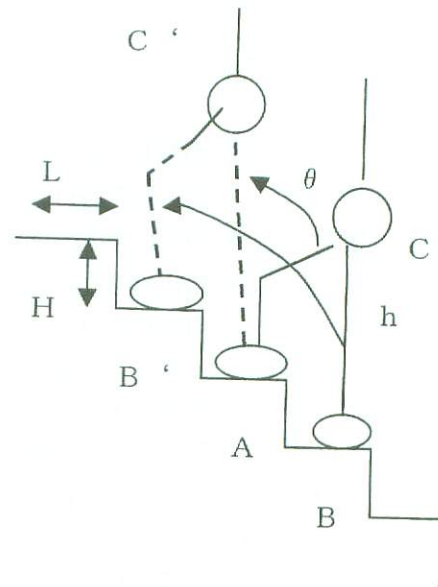


図1.

階段を昇る時の模式図。A、Bは足先、Cは開脚の中心。簡単のため体重心はこの付近にあるとしている。B'、C'は1段昇ったときの足の位置を示す。Hは1段の高さ、Lは幅、hは脚の長さでAC=BC=hである。θは1段昇るに際しての開脚角度。

$$(m+M)gH + \frac{1}{2}I\omega^2 = Pt(\text{up}, M) \quad (1)$$

ここでは足底Aと階段との摩擦は無視した。その理由として階段の幅は充分狭く(0.5m以下)

Aの水平方向の移動は充分小さいため摩擦に抗する仕事は無視しうると考えられるからである。

IはAの周りの慣性モーメントで ω はそのときの回転の角速度である。Iは第1近似としては、Cに体重、mと負荷、Mが集中しているとして $I \approx (m+M)h^2$ で与えられる。gは地球の重力加速度である。1段当たりの開脚角度はほぼ $\frac{2L}{h}$

でその要する時間は $t(up, M)$ なので $\omega = \frac{2L}{ht(up, M)}$ となる。従って(1)は次のように書き換えられる。

$$(m+M)gH + \frac{1}{2}(m+M)h^2 \frac{4L^2}{h^2 t(up, M)^2} = Pt(up, M)$$

さらに少し整理すると次のようになる。

$$(m+M)gHt(up, M)^2 + 2(m+M)L^2 = Pt(up, M)^3 \quad (2)$$

これは $t(up, M)$ についての3次方程式なので厳密に解けるが、それは複雑で実用的でない。そこで近似的に解くことを考える。まず(1)の左辺の各項の大きさを評価してみる。簡略化のため無負荷、 $M=0$ kgとしよう。次節の実験の項で詳しく述べるが各パラメータを次のようにとる： $m \approx 60$ kg, $H=L=0.2$ m, $h=0.8$ m。また1段当たりに要する時間は0.5秒程度である。そうすると ω は約1.0rad/sとなる。 $g=9.8$ m/s² であるから、これらの値を用いると第1項は mgH

$H \approx 120$ Jとなる。第2項は $\frac{1}{2}mh^2\omega^2 \approx 40$ Jとなる。

従って圧倒的に第1項が大きい。そこでひとまず(1)式において第2項を無視して得られる $t(up, M)$ の値を t_0 とすると次のようになる。

$$t_0 = \frac{(m+M)gH}{P} \quad (3)$$

$t(up, M)$ と t_0 の差は小さいため $t(up, M) = t_0 + \Delta t$ として(2)式へ代入し Δt を1次の近似で求めてやる。結果は次の通りである。

$$\Delta t = \frac{2PL^2}{(m+M)g^2H^2} \quad (4)$$

これより

$$t(up, M) = t_0 + \Delta t = \frac{(m+M)gH}{P} + \frac{2PL^2}{(m+M)g^2H^2} \quad (5)$$

と求められる。

次に階段の降りの場合を考えてみよう。図2にその模式図を示す。この場合位置エネルギーは開放されるので歩行の仕事は不要に思われるが、それは物体がころげ落ちるようなときで、落下速度は増大する。従ってヒトが一定の速さで階段を降りる場合にはこの位置エネルギーは何らかの形で消散させる必要が有る。この消散は脚部の筋で粘性の形で消費されることが考えられる。すなわち降りにおいても脚部が発生させなければならないパワーは昇りの場合と同じになる。しかし実際には昇りよりも降りの方が楽である。これは降りの場合には位置エネルギーの一部を利用して回転エネルギーが受動的に発生するため、ため筋の粘性で処理しなければならない位置エネルギーの量はこの分だけ減少するためと考えられる。もしこの仮定が正しければ降りの場合(1)式は次のようになる。

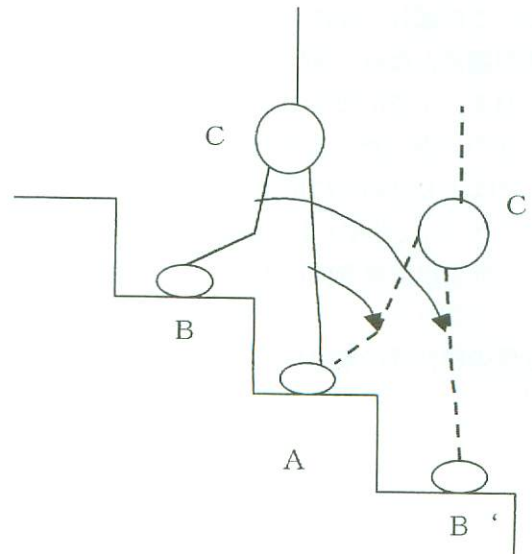


図2. 階段を降る際の模式図。記号は図1と同様である。

$$(m+M)gH - \frac{1}{2}I\omega^2 \approx Pt(\text{down}, M) \quad (6)$$

$t(\text{down}, M)$ は負荷, M のとき1段降りるのに要する時間である. この値も先の場合と同様な手法で求めることができる. 結果は次の通りである.

$$t(\text{down}, M) = t_0 - \Delta t \\ = \frac{(m+M)gH}{P} - \frac{2PL^2}{(m+M)g^2H^2} \quad (7)$$

(5), (7)が最終結果である. この結果より歩行時間の負荷依存係数(重量負荷1kg当たりの歩行時間の増加率)は次のように求められる.

$$\frac{t(\text{up}, M) - t(\text{up}, 0)}{M} = \frac{gH}{P} - \frac{2PL^2}{m(m+M)g^2H^2} \\ \frac{t(\text{down}, M) - t(\text{down}, 0)}{M} = \frac{gH}{P} + \frac{2PL^2}{m(m+M)g^2H^2} \quad (8)$$

これらの結果は次節で得られる実験結果と比較される.

III. 実験とその結果

III-1. 実験方法

実験に用いた階段は1段あたり, 高さ0.2m, 幅0.2mである. 下段から14, 13, 12, 14段の計53段あり, 途中に長さが1.53, 1.72, 1.70mの踊り場がある. この部分では約2歩の平地歩行となり歩行時間の誤差となる. 被験者は男子9名で, 8名は21~24才, 1名が59才である. 体重は60kgから75kgであった. 重量負荷は1kgから25kgまでほぼ1kgおきに用意した. 形式は錘を付けたジャケット、ベルトおよび水を入れたペットボトルで前者は直接身体に装着し, 後者はリュックサックで背負う. これらの重量負荷の位置は体重心近傍の腰背部に集中している. 測定項目は歩行時間のみで, 被験者がストップウォッチを持ち, 階段の上下で各々測定した. 歩行に際しては"普通に歩く"ことを要請した. 慣れを防ぐため重量負荷の順序はランダムとし, 1日3回から5回昇降し, それを1ないし2週間の間隔で3回から5回行った.

III-2. 実験結果

図3, 4に典型的なデータを示す. 縦軸は前副節で示した53段の階段(3箇所の踊り場を含む)を昇降するのに要した時間である. 横軸はその際の重量負荷を示す. 他の被験者についても1例を除いてほぼ同様な結果が得られている. いずれの場合も降りの方が速くなる. 歩行時間は昇り, 降りのいずれも重量負荷に対してほぼ直線的に増加する. 図中の直線は最小自乗法でフィットさせたものである. 例外的な場合を除いて相関係数は0.7から0.8であり, 高い相関を示す.

図3の被験者は22才男子で陸上競技の選手である. 無負荷時での1段当たりの歩行時間は昇り, 降りに対して各々0.56s/step, 0.49s/stepである. 図3では直接的なデータで53段分の値を示しているが, 便宜上1段当りの値に換算している. 負荷依存係数は各々 6.6×10^{-3} s/step · kg, 7.4×10^{-3} s/step · kgであり, 降りの場合の方がわずか

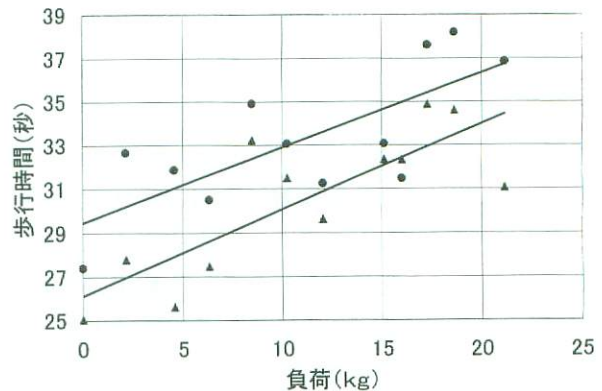


図3. 階段昇降の昇降の生データ. ●は降り, ▲は昇りである. 被験者は22才男子でスポーツは少林寺拳法の選手.

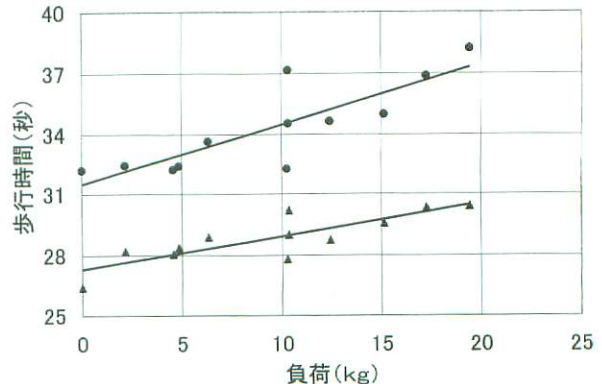


図4. 階段昇降の昇降の生データ. 記号は図3と同じ. 被験者は59才男子. 空手の経験者.

に大きい、一方図4の被験者は空手の経験がある59才男子である。無負荷時での歩行時間は0.59s/stepおよび0.52s/stepで前者よりわずかに遅い。負荷依存係数は各々 5.6×10^{-3} s/step・kg、 3.1×10^{-3} s/step・kgであった。これらは脚部の発生するパワーによっていることが次節で説明される。

この2例は典型的な例であるが、例外的な1例を図5に示す。被験者は23才男子でスポーツの経験は無い。昇り、降りでの負荷依存係数が 7.8×10^{-3} s/step・kg、 2.0×10^{-3} s/step・kgと大きく異なっているのが特徴的であり、相関係数は昇り、降りでの0.65および0.26である。この例が例外的なものかどうかは被験者が少ない現時点では確定できない。今後被験者数を増やして測定を行う必要がある。

図6には無負荷時で階段を昇降する際の歩行時間の対応を各点で示した。図中の直線はこれらの各点を最小自乗法でフィットさせたものである。

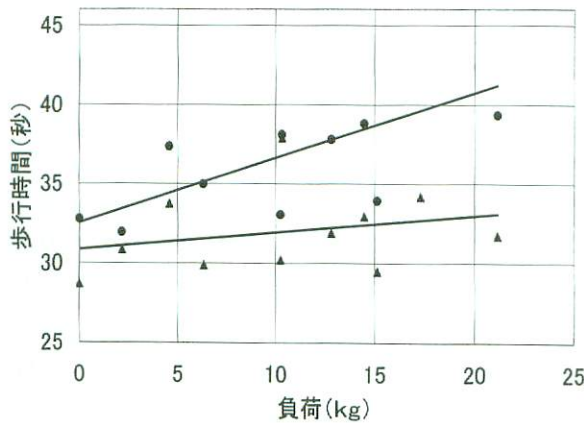


図5. 例外的な負荷依存性を示す被験者のデータ。9名中1名。被験者は23才男子でスポーツ経験は無い。

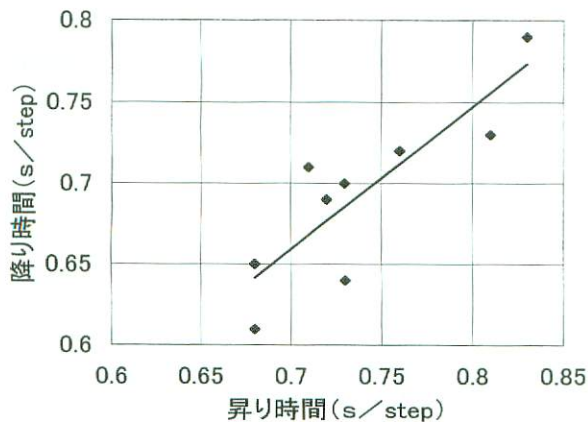


図6. 各被験者の無負荷での昇りと降りの時間の対応。

昇りでは0.68から0.85s/stepに、降りでは0.61から0.78s/stepに分布している。これによると降り歩行時間は昇りのほぼ8割である。この差は前節の理論による足の周りの回転エネルギーの差に由来する。この関係の相関係数は0.85で高い相関を示した。これは歩行速度が体重と脚部の発するパワーに影響されることを示している。

図7には昇り、降りの負荷依存係数の対応を示している。各点が各被験者に対応している。昇りは2.0から 9.5×10^{-3} s/step・kg、降りでは1.0から 7.8×10^{-3} s/step・kgに分布している。図中の直線はこれらnデータについて最小自乗法でフィットさせたものである。それによると降りの係数は昇りの係数のほぼ半分である。これは降りでは重量負荷に引き摺られる効果を示すとも考えられるが、相関係数は0.5であり、それ程強い関連は認められない。

図8は無負荷時での歩行時間に対する負荷依存係数を示している。横軸は被験者の脚部の発するパワーに相当するので、パワーと負荷依存係数との関係が考えられる。昇りでは傾斜が正であり、パワーが大きいほど係数は小さいという結論を示している。一方、降りでは傾斜はほとんど無く、係数はあまりパワーに依存しない。これは先に述べたように降りでは重量負荷に引き摺られるといった効果を示していると推測される。しかし相関係数は昇りで0.4、降りでは0.04で、負荷依存係数のパワー依存性はそれ程はっきりしたものではないことを示している。

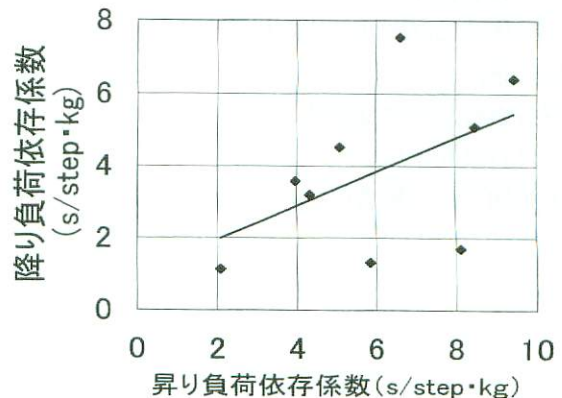


図7. 昇りと降りの負荷依存性係数の対応。横軸、縦軸の値には $\times 10^{-3}$ が省略されている。

IV. 考察

3節で得られた結果を2節での解析を用いて妥

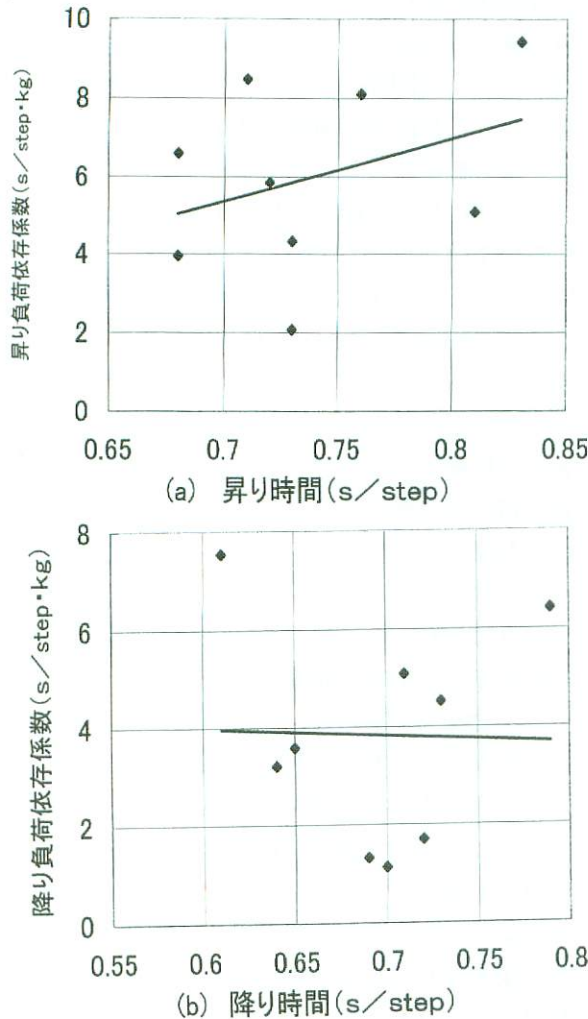


図8. (a) 各被験者の昇り時間と負荷依存係数との関係. (b) は降りの場合の同様な関係. 負荷依存係数には $\times 10^{-3}$ が省略されている.

当な一致を得ることができるかどうかを検討しよう. 具体的には図3, 4の被験者のデータについて検討を行う.

解析を行なうには脚部の発するパワー, Pを決めなければならない.

まず図3の被験者について考えよう. データは $t(\text{up},0)=0.56\text{s/step}$ および $t(\text{down},0)=0.49\text{s/step}$ である. t_0 は(5), (7)より, この2量の平均値が求められるので, $t_0=0.53\text{s/step}$ と評価される. この被験者の体重, $m=65\text{kg}$ また $H=0.2\text{m}$, $L=0.2\text{m}$ という値から(3)より $P=250\text{W}$ という値が得られる. ヒトが発生できる最大パワーとして0.8馬力すなわち約600Wという値が知られている²⁰⁾

ので妥当な値と思われる. この値を(5), (6)へ代入すると

$$t(\text{up},0) = \frac{65 \times 9.8 \times 0.2}{250} + \frac{2 \times 250}{65 \times 9.8^2} \approx 0.58\text{s}$$

$$t(\text{down},0) = \frac{65 \times 9.8 \times 0.2}{250} + \frac{2 \times 250}{65 \times 9.8^2} \approx 0.42\text{s}$$

となり実測値は各々0.56s, 0.49sなので満足すべき一致が得られた. ただこれはPの値を実験データから評価しているので当然とも言える. 問題は負荷依存性である. それを(8)から評価しよう. まず昇りに対しては

$$\frac{9.8 \times 0.2}{250} - \frac{2 \times 250}{65^2 \times 9.8^2} \approx 6.8 \times 10^{-3} \text{ s/step} \cdot \text{kg}$$

降りに対しては

$$\frac{9.8 \times 0.2}{250} + \frac{2 \times 250}{65^2 \times 9.8^2} \approx 7.8 \times 10^{-3} \text{ s/step} \cdot \text{kg}$$

と評価される. 実測値は各々 6.4×10^{-3} および $7.4 \times 10^{-3} \text{ s/step} \cdot \text{kg}$ でありその一致はやはり満足すべきだろう.

図4の被験者についても同様な評価を行なってみる. $m=60\text{kg}$ である. 観測結果, $t(\text{up},0)=0.59\text{s}$, $t(\text{down},0)=0.52\text{s}$ より $P=210\text{W}$ と評価された. 先の例で22才の陸上競技の選手が250Wであったので, 年齢から考えて妥当な値であろう. これを用いると

$$t(\text{up},0)=0.60\text{s}, \quad t(\text{down},0)=0.52\text{s}$$

と評価される. 実測値は各々0.59sおよび0.52sなので満足すべき結果である. 一方負荷依存係数は

$$\text{昇り} : 1.1 \times 10^{-2} \text{ s/step} \cdot \text{kg}$$

$$\text{降り} : 8.1 \times 10^{-3} \text{ s/step} \cdot \text{kg}$$

と評価される. 実測値は各々 $5.6 \times 10^{-3} \text{ s/step} \cdot \text{kg}$ および $3.1 \times 10^{-3} \text{ s/step} \cdot \text{kg}$ であり相対誤差は100%ある. その一致は満足すべきものではないが, 理論そのものが荒削りであること, 計算の近似が荒いことを考慮すれば現段階では満足すべきであろう.

図5の例外的な場合については他の状況を考え

なければならず、現段階では考察の対象から除外した。

V. まとめ

階段での歩行についての理論的解析とそれを確認するための予備的な実験を行なった。歩行に要する仕事は理論的に体重心の上下に伴う位置エネルギーの変化と体重心の周りの回転エネルギーを考慮した。後者は昇りと降りの仕事の差になる。その理由は昇りでは脚部の筋がエネルギーを与えなければならないが、降りでは位置エネルギーの減少から自動的に供給されると考えられるからである。階段歩行は歩幅と歩数が階段によって決定され歩行時間だけが独立変数であるという平地歩行とは異なる特性を有する。また解析では荷物を持つことを考慮し重量負荷の影響も考慮に入れた。

実験との比較には脚部の発生するパワーを適当な値に推定する必要があるが、これは無負荷時での歩行時間から推定した。210Wから250Wという妥当な値が推定され、それをを用いると歩行時間については相対誤差5%以内で理論値と一致した。負荷依存性については理論値との相対誤差が5%以内や100%以上の場合もあり、その一致は満足できない。

以上のように理論的には未だ満足できる状況では無いが、階段歩行についての系統的な理論が見られないことから、本研究はその端緒を拓くものではないかと自負している。今後の問題として理論を更に精密にして実験と定量的な考察ができるようにすること、および被験者数を増やし、今回の実験結果に普遍性あることを確認することが必要であろう。

本研究は本学研究倫理委員会の承認を2003年7月10日に受けている。受付番号は15-15である。この研究を行なうに当たって物理学教室のゼミ生を中心とする学生諸君に被験者として協力頂いた。この場を借りて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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, No. 32: pp49-56, 2003.
- 2) 森本安夫, 伊藤譲: 坂道昇降における歩行のパラメータとその負荷依存性. 明治鍼灸医学, No. 34: pp29-38, 2004.
- 3) 中村隆一, 斎藤宏: 歩行: 基礎運動学. 医歯薬出版. 東京, pp285-312, 1980.
- 4) 窪田俊夫, 土屋和夫: 歩行分析概説: 臨床歩行分析. 医歯薬出版. 東京, pp1-24, 1989.
- 5) 石田明充, 広川俊二等: 歩行: 身体運動のバイオメカニクス. コロナ社. 東京, pp102-125, 2002.
- 6) 中村隆一, 斎藤宏: 歩行: 臨床運動学. 医歯薬出版. 東京, pp207-256, 1992.
- 7) 島村宗夫, 中村隆一: 歩行分析: 運動解析. 医歯薬出版. 東京, pp267-275, 1980.
- 8) 波多野義郎: ヒトは1日何歩歩くか: ウォーキングと歩数の科学, 波多野義郎編. 不味堂出版. 東京, pp1-10, 1999.
- 9) 東京都立大学体育学研究室: 急歩: 日本人の体力標準値. 不味堂出版. 東京, pp254-256, 1989.
- 10) 大塚貴子, 波多野義郎: 歩行歩数とライフスタイルの関係: ウォーキングと歩数の科学, 波多野義郎編. 不味堂出版. 東京, pp69-74, 1999.
- 11) 磨井祥夫: 効率の良い歩き方. 体育の科学, 53: 24-30, 2003.
- 12) 大道等, 見波静: 病的歩行動作の重心運動. 臨床スポーツ医学, 15: 403-411, 2002.
- 13) 金俊東, 久野譜也, 相馬りか等: 加齢による下肢筋量の低下が歩行能力に及ぼす影響. 体力科学, 49: 589-596, 2000.
- 14) 田井中幸司, 青木純一郎: 高齢女性の歩行速度の低下と体力. 体力科学, 51: 245-252, 2002.
- 15) 坂本静男: 長距離ウォーキングの功罪. 生体医工学, 29: 47-49, 2001.
- 16) 中川喜直, 服部正明, 浅沼義英: ストックウォーキングの生理学的研究. 臨床スポーツ医学, 19: 689-694, 2002.
- 17) 吉澤正尹, 西島吉典: 歩行様式の変齢変化. 臨床スポーツ医学, 15: 953-967, 1998.
- 18) 長谷川公隆: 歩行時の運動制御の解析. 総合リハ, 27: 1027-1036, 1997.
- 19) 東京都立大学体育学研究室: 踏台昇降運動: 日本人の体力標準値. 不味堂出版. 東京, pp226-229, 1989.
- 20) 金子公宥: パワー: パワーアップの科学. 朝倉書店. pp22-33, 1988.

Theoretical analysis of walking on a staircase and comparison with preliminary experiment

†MORIMOTO Yasuo

Department of Physics, Meiji University of Oriental Medicine

Abstract

[Purpose]

The walking on a staircase is important action in daily life or clinical medicine in rehabilitation, however we could not find any theoretical or experimental literatures concerning such actions. So we try to construct in this article a theoretical model of walking on a staircase, and compare with the experimental results.

[Theory]

The necessary work for walking on a staircase consists of the change of potential energy associated with the movement of the center of mass of body (including the load) and of the rotational energy around the foot. When one climb up the staircase, he must supply both energies through foot. In descending down the staircase the potential energy is released. This energy must be consumed in the foot in the form of viscous dissipation, because if not, the speed of walking should increase. Such a case corresponds to falling down of ball. But in this case speed is constant. The rotational energy in the descent case arises spontaneously associated with the release of potential energy, by which the energy dissipation in the muscle of the foot decreases. This fact is probably the cause of difference of the energy dissipation between climbing up and descending down the staircase. We can estimate the walking time from these energy considerations.

[Method and Results]

The utilized staircase has 53 steps with height of 0.2m and width of 0.2m. The walking time is measured by stopwatch. The load dependence is also measured considering the case of carrying baggage. The weight of the load is ranged from 1kg to 25kg with the interval of about 1kg. The volunteers are all male and 9. One is 58 years old, and the other 8 are ranged from 22 to 23 years old.

[Discussions and Conclusions]

To estimate the walking velocity we must assume the power generated in the muscle of the foot as the adjustable parameter. We set it from 250W to 210W corresponding to the properties of volunteers. Utilizing this value the walking time is estimated in the relative error within 5% between experimental and theoretical values, however the relative error of coefficient of load dependence happens to exceeds 100%. This results show the theory is at an elementary stage, and the presence of many conditions to be considered.

Received on Novembey 22, 2004 ; Accepted on December 27, 2004

† To whom correspondence should be addressed.

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