

身体エネルギー消費を考慮した歩行環境評価に関する一考察*

Assessment of Pedestrian Environment Based on Energy Metabolism

塚口博司**、寺西達哉***、里見潤****

By Hiroshi Tsukaguchi**, Tatsuya Teranishi*** and Jun Satomi****

1.はじめに

歩行者空間は種々の方法で評価することができるが、「楽に歩くことができる」という視点からの評価も重要である。わが国が高齢社会に急速に突入しつつある現状を直視すれば、このような歩行者空間評価の重要性は今後益々高まると考えられる。「楽に歩く」ということを評価する場合には、歩行者の意識からアプローチする方法と、歩行者の身体的負担の程度を直接評価する方法であろう。本研究は、後者の方法を採用するものであり、歩行時の身体エネルギー消費量を測定し、これによって歩きやすさを評価しようとするものである。

歩行時の身体エネルギー消費に関しては、従来、エネルギー代謝率 RMR に基づく方法が使用されているが、この算定式は交通場面における実測に基づいたものではなく、交通行動時に含まれる歩行停止、あるいは混雑等による回避行動等の多様な状態の影響を十分に表すことはできない。そこで、本研究では歩行時の身体エネルギー消費量を計測することによって、歩行者支援システム(ここではエスカレータを対象とする)の設置効果を定量化するとともに、気温等の外部環境や混雑状況が歩行時のエネルギー消費にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とする。

2. 代謝量の推定方法¹⁾

生理学の分野では、身体エネルギー負荷の計測ならびにこれに関連した研究が広く行われており、交通行動への応用としても RMR や代謝量 (METS :Metabolic equivalents) について、乗物内

での状況(着席の可否等)、歩行速度、歩行路の勾配などに応じた値が示されている。しかしながら、これらの手法では、歩行者空間が混雑している場合と混雑していない場合のエネルギー消費量の相違や、気温等の外部条件の変化の影響を把握することができない。一方、実際の交通場面において、歩行時の身体エネルギー消費量を直接計測することは、かなり大掛かりな装置が必要となることから、簡単に実施できるものではない。そこで、本研究では、心拍数を測定し、これに基づいて身体エネルギー消費量を推定する方法を採用した。

本研究で用いる代謝量の測定方法は、間接熱量測定法と呼ばれる方法である。これは、呼気ガス分析を行い、酸素消費量と炭酸ガス産生量を求めて、間接的にエネルギー消費量を算出する方法であり、尿中窒素排泄量を加えると3大栄養素の燃焼に由来するエネルギー代謝量が求められる。この呼気ガス分析法を実際場面で行うには、交通場面で大きなダグラスバック(呼気採取用袋 150 リットル程度) 顔面を覆うマスク、ホースを接続したマウスピースが必要となる。このような歩行条件では実験時に被験者の緊張を伴うことから、代謝量の測定誤差も大きくなる傾向がある。また、通常の会話が出来ない、唾の飲み込みも行いにくいなどの被験者の負担が大きい。

そこで本研究では、上記の測定を実験室で行い、交通場面では梶井が提案している計測方法²⁾を採用した。心拍数から代謝量を推定する本方法は、実際の交通場面においては心拍数を測定するのみであり、種々の場面におけるエネルギー代謝量の測定が可能となる。ここで、エネルギー代謝量を心拍数の3次式で回帰しておくこと、身体活動レベルが低い状態から激しく運動する状態までを1つの式で表現できる。また、被験者は、たばこ1個大の心拍測定器をポケットに入れるだけで記録できる、会話にも支障なく身体的な負担が少ない等の特徴がある。

歩行時のエネルギー代謝量を求める手順は以

* キーワーズ：歩行者、身体エネルギー消費、歩行者支援システム

** 正会員 工博 立命館大学理工学部

*** 学生会員 立命館大学大学院

**** スポーツ科学博士 立命館大学理工学部

(525-8577 草津市野路東 1-1-1、

Tel:077-561-2735, Fax:077-561-2667)

下のとおりである。

実験室において、被験者に休息、歩行・走行などの身体的負荷変化を与えながら、肺換気量と吸気呼気の酸素、炭酸ガス濃度を測定し、分析を行う。同時に心拍数などを測定する。

呼気ガスを分析し、以下のようにして身体エネルギー負荷を表す代謝量を算出する。

代謝量[METS]は単位体表面積当りの値であり、次式で示される。

$$1 \text{ [METS]} = 58.2 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

したがって代謝量は次式で求められる。

$$\text{代謝量} = \text{産熱量 [W]} / \text{体表面積 [m}^2\text{]} / 58.2$$

ここで、

$$\text{産熱量} = f_1(\text{呼気 CO}_2\text{ 量、吸気 O}_2\text{ 量、呼気時間、吸気時間})$$

$$\text{体表面積} = f_2(\text{体重、身長})$$

まず上記の関係を説明するために、各変数を次のように定義する。

Y : 代謝量[METS]、X₁ : 産熱量[W]、

X₂ : 体表面積[m²]、X₃ : 呼気 CO₂ 量[l/h]、

X₄ : 吸気 O₂ 量[l/h]、X₅ : 呼気時間[h]、

X₆ : 吸気時間[h]、X₇ : 身長[cm]、

X₈ : 体重[kg]、X₉ : 呼吸商[N.D.]

なお、上記実験によって直接に求められる値は X₃、X₄、X₅、および X₆ である。

人の産熱量は、糖質と脂質における化学的な燃焼熱と酸素摂取量の積によって求められる。ここで、糖質と脂質における燃焼熱は、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \text{糖質と脂質における燃焼熱 [kcal/l]} \\ = 3.815 + 1.232 \times \text{呼吸商} \end{aligned}$$

呼吸商は O₂ 消費量に対する CO₂ 産出量の比であるから、X₉ = (X₃X₅)/(X₄X₆)

と表すことができる。したがって、産熱量は上記の燃焼熱に吸気酸素量を乗じて以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{産熱量 X}_1 \text{ [W]} \\ = (3.815 + 1.232X_9)(X_4X_6) / 1.163 \end{aligned}$$

一方、体表面積は

$$X_2 \text{ [m}^2\text{]} = 0.007246X_7^{0.424} X_8^{0.725}$$

と表せるから、最終的に代謝量は、

$$\begin{aligned} \text{代謝量 Y [METS]} = X_1 / X_2 / 58.2 \\ = (3.815 + 1.232X_9)(X_4X_6) / 1.163 \\ / (0.007246 X_7^{0.424} X_8^{0.725}) / 58.2 \end{aligned}$$

として求められる。

被験者ごとに、心拍数と代謝量の関係を表す回帰式を求める。

心拍数は種々の交通場面で比較的容易に計測できる指標であるから、種々の交通場面ごとに心拍数を測定し、これを で求めた回帰式に代入すれば、その交通場面での代謝量を推定することができる。

3. 実験室における代謝量の測定

実験室において、自転車エルゴメーターと呼気ガス分析装置により各個人のエネルギー代謝量を測定した。実験は 2003 年 12 月に実施した。被験者は 20 歳代前半の男性 4 名であり、プロフィールを表 1 に示す。これらの被験者は後述する交通ターミナルにおける測定の被験者でもある。

表 1 被験者のプロフィール

被験者 No	年齢	性別	実験室における測定日	身長 (cm)	体重 (kg)	安静時心拍数 (beat/min)
1	23	男	2003/12/10	168	54.1	73.8
2	23	男	2003/12/08	179	76.3	85.0
3	22	男	2003/12/08	168	67.2	82.0
4	24	男	2003/12/10	184	67.5	75.8

測定当日は測定開始の 2 時間前までに食事を済ませ、喫煙を控えるように依頼した。測定開始の約 15 分前にエルゴメータ直近の椅子に座り、安静な状態になる時間まで待った。その後、心拍数が上がらないようにゆっくりと自転車エルゴメータに移動し、運動を開始させた。呼気ガスはマウスピースを装着して採集した。作業負荷の与え方は、最初の 1 分間は 10w のウォーミングアップ、以後 6 分ごとに 30w、60w、90w、120w、150w と負荷を増加させ、ペダルが漕げなくなる疲弊の状態(オールアウト)まで測定し、運動が終了してから約 30 分間はエルゴメータに座ったままで、心拍数が 100 以下になるまで休息させた。呼気ガスの採集はこの時点まで続けた。

代謝量は前述の算出方法により、被験者の呼気 CO₂ 量、吸気 O₂ 量、呼気時間、吸気時間、ならびに体重、身長を代入して求めた。図 1 中に、被験者ごとの心拍数と代謝量の関係を 3 次式で表した回帰式を示す。ここでは、負荷時のデータのみを用いた。被験者によって、心拍数と代謝量の関係がやや異なっており、身体的特性による個人差が少なくないことがわかる。しかしながら、各個人においては、両指標間に明確な関係が得られているため、実際の交通場面において心拍数を測定しておけば、その個人に関する代謝量の概略値を求

めることは可能であると考えられる。

4. 交通ターミナルにおける身体エネルギー消費量の測定

(1) 調査の概要

本研究では、JR京都駅ならびにJR大阪駅周辺の梅田地下街において実測調査を実施した。京都駅では階段とエスカレータ利用時のエネルギー消費量を比較するとともに、外気温が身体エネルギー消費に与える影響についても分析した。梅田地下街では混雑した経路と比較的混雑していない経路を対象として、身体エネルギー消費量の差を把握することにした。

調査に当たっては、被験者に胸部三点誘導小型電極と心拍メモリー(VINE社製VHM1-016)を装着させた。

京都駅では、駅ビル大階段(延長約90m)を対象として調査を実施した。調査日の気温および湿度は以下のものである。

表2 調査日の条件

調査日	最高気温	湿度
2003.8.19	35.0	77%
2003.8.21	34.4	67%
2003.12.23	4.7	43%

測定は、エスカレータ上で静止して往復、エスカレータ上を歩行して往復、階段の往復の順で実施した。被験者は先に述べた4名であり、各行動の間には5分と15分の休憩を入れて心拍数を測定した。なお、この休憩時間に関してはスポーツ医学上、他の行動にほとんど影響の与えない時間であるとされている。

梅田地下街では、地下鉄御堂筋線梅田駅から谷町線東梅田駅間に位置する、ほぼ同じルート長(約300m)の経路を対象とした。このうち、混雑している方をルート1、混雑の程度が低いルートをルート2とした。被験者は京都駅調査と同様である。以下に調査時点での歩行者密度ならびに所要時間を示す。

表2 測定時の歩行者密度と所要時間

測定日時	交通密度(人/m ²)	所要時間(sec)
2003.9.26	0.20 ~ 0.24	196 ~ 250
(11-13時)	0.06 ~ 0.16	179 ~ 226
2003.11.5	0.17 ~ 0.26	192 ~ 217
(11-13時)	0.08 ~ 0.17	179 ~ 203

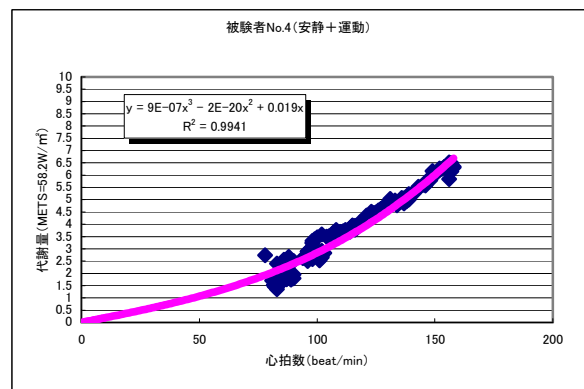
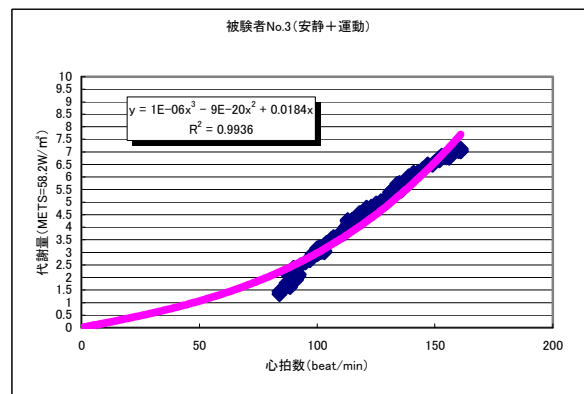
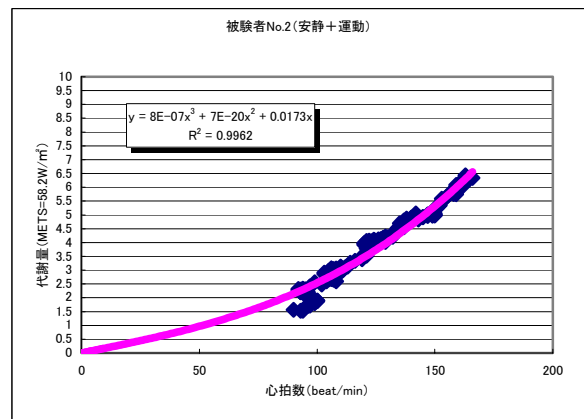
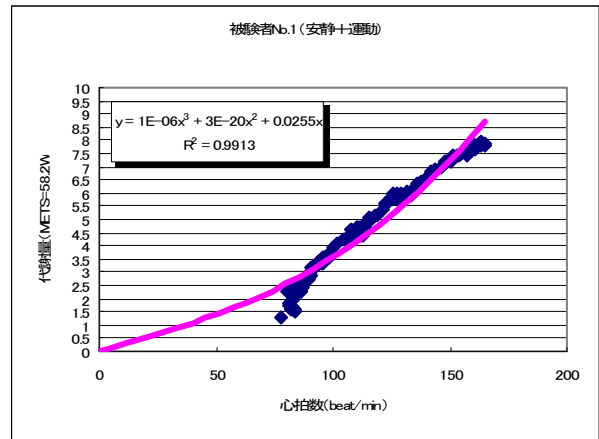


図1 心拍数と代謝量の関係

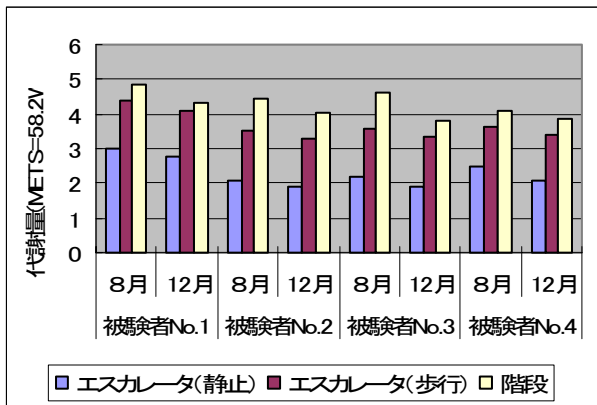


図2 行動別エネルギー消費量

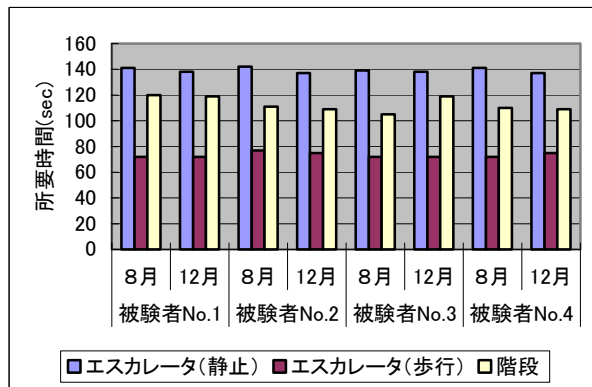
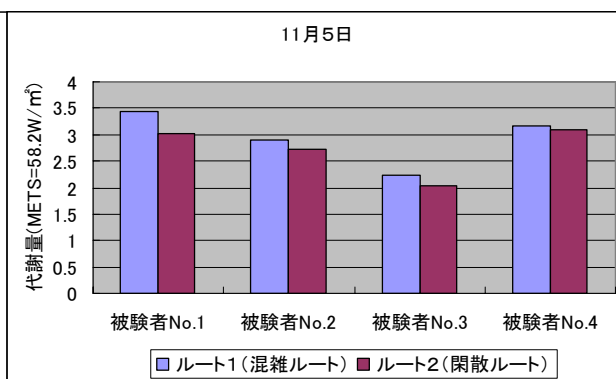
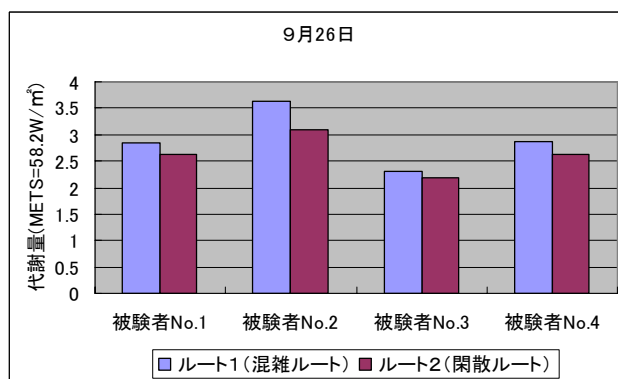


図3 行動別所要時間



	ルート1(人/m ²)	ルート2(人/m ²)
被験者No.1	0.2	0.09
被験者No.2	0.2	0.09
被験者No.3	0.28	0.16
被験者No.4	0.24	0.06

	ルート1(人/m ²)	ルート2(人/m ²)
被験者No.1	0.26	0.11
被験者No.2	0.21	0.17
被験者No.3	0.19	0.08
被験者No.4	0.17	0.11

図4 混雑状況とエネルギー消費の関係

(2) エスカレータの設置効果

上り行動に着目し、エスカレータ上で静止、エスカレータ上を歩行、および階段利用を比較すると、図2に示すように、この順番でエネルギー消費量が小さいことがわかる。次に、それぞれの行動の所要時間に乗じてみると、エスカレータ歩行、エスカレータ静止、階段利用となり、行動全体としてのエネルギー消費量はエスカレータ上を歩行する場合に最も小さくなることがわかる。実際にこのような行動が多く観察されるが、身体エネルギー消費の観点から見て、このような行動が合理的であると思われる。

次に、8月と12月のエネルギー消費量を比較してみる。図2に示すように8月の方が、エスカレータ静止では7~19%、エスカレータ歩行では6~7%、階段利用では6~21%高くなっている。このように、気温や湿度の影響もかなり大きいことがわかる。

(3) 混雑状況の影響

9月調査では、混雑しているルート1におけるエネルギー消費量は混雑が少ないルート2と比べて5~18%多くなっている(図4)。11月においても同様であり、ルート1におけるエネルギー消費量はルート2に比べて2~13%増加している。図4に示すように、混雑状況(歩行者密度)は調査時点において変化しているからばらつきも少なくないが、混雑した空間であれば歩行時に消費される身体エネルギーも大きいことがわかる。

参考文献

- 1) 中山照雄：エネルギー代謝の測定、温熱生理学、理工学社、pp.75-80、1981。
- 2) 梶井宏修：アクティビティメーターの試作と心拍数を基にしたヒトの代謝量、建築環境工学学術研究発表会資料第3号、p.99 - 106、1987。
- 3) 塚口博司、梶井宏修、黒木靖典：歩行時の身体エネルギー消費量からみた歩行者支援システムの評価分析、交通工学、Vol.38 No.3、2003。