

# 身体エネルギー消費量を考慮した歩行行動評価に関する一考察\*

## Assessment of Pedestrian Activity Based on Energy Metabolism

本多竜\*\*、塚口博司\*\*\*、里見潤\*\*\*\*

By Ryu HONDA\*\*, Hiroshi TSUKAGUCHI\*\*\* and Jun SATOMI\*\*\*\*

### 1. はじめに

交通行動における抵抗に関しては、所要時間、交通費用が重要な要因として取り上げられてきた。しかし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、身体的な負担も重要な抵抗要因になると考えられる。すなわち、身体的負荷の小さい交通システムの構築がますます重要となっている。「楽に歩く」ということを評価する場合、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が考えられる。本研究では、後者の方法を採用し、歩行時の身体エネルギー消費量を測定し、これにより歩行行動の評価をおこなうこととした。

交通抵抗を身体エネルギー消費量の側面から定量的に捉えた既往研究としては、エネルギー代謝率 (RMR: Relative Metabolic Rate) を用いて階段昇降時ならびにエスカレーター利用時におけるエネルギー消費量を算出したもの<sup>1)</sup>、1)の研究で求められたエネルギー消費量算定式を改善し動く歩道の利用も含めて歩行時のエネルギー消費量の低減について論じたもの<sup>2)</sup>、METS法を用いて交通手段の選択現象について論じたもの<sup>3)</sup>等がある。

しかしながら、これらの研究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緊張を伴う歩行停止、あるいは混雑等に伴う回避行動等の多様な状態の影響を十分に表すことができない。そこで、筆者らは先に、実験室における呼気量および吸気量の測定に基づいてエネルギー消費量を求めるとともに心拍数を測定し、身体エネルギー消費量と心拍数の関係を明らかにした。続いて交通場面において心拍数を測定し、歩行時における身体エネルギー消費量を推定した<sup>4)5)</sup>。これらの研究によって、混雑状態が歩行時の身体エネルギー消費量に影響を与えることが明らかとなった。

もっとも、歩行者流の特性、例えば歩行者密度と歩行速度の関係等は、歩行目的等によって変化することが想定されるが、上記の研究においてはこのような検討を行っていない。そこで本稿では、通勤通学目的の歩行者が多い歩行者流と自由目的の歩行者が多い歩行者流を比較し、歩行目的によって身体エネルギー消費量がどの程度変化するかを調べることにした。なお、本研究では、後述するように、上記の2種類の歩行者流において心拍数測定の対象とした歩行者は、実際に当該行動を行っている歩行者ではなく、筆者らが依頼した調査員であるため、両歩行者流に属する歩行者の心理的差異を調べることはできない。本稿は、歩行者密度と歩行速度との関係が歩行目的によってやや異なることに注目して、身体エネルギー消費量の特性を分析することを目的とする。

### 2. エネルギー代謝量の推定方法<sup>4)6)7)</sup>

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出量を求めて、間接的にエネルギー消費量を算出する方法である。しかしこの呼気ガス分析法を実際の交通場面で行うことは被験者への負担が大きく、代謝量の測定誤差も大きくなる傾向があるので困難である。

そこで本研究では、上記の測定を実験室で行い、交通場面では心拍数のみを測定する方法を用いた。この方法により、実際の交通場面においては心拍数を測定するだけで、種々の場面におけるエネルギー消費量の測定が可能となる。

歩行時のエネルギー代謝量を求める手順は以下のとおりである。

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。本研究で用いる身体エネルギー消費量の単位は、安静時の体表面積 1 m<sup>2</sup>当たりの仕事量で表わし、これを 1METS と定義す

\*キーワード: 歩行者、身体エネルギー消費量、歩行者交通行動

\*\* 学生会員 立命館大学大学院

\*\*\* フェロー会員 工学博士 立命館大学理工学部

\*\*\*\* スポーツ科学博士 立命館大学理工学部

(525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1、

Tel: 077-561-2735, Fax: 077-561-3418)

る。次式で示される。

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

したがって代謝量は次式で求められる。

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

ここで、

$$\text{産熱量} = f_1 (\text{呼気 } CO_2 \text{ 量、吸気 } O_2 \text{ 量、呼気時間、吸気時間})$$

$$\text{体表面積} = f_2 (\text{体重、身長})$$

上記の各変数を次のように定義する。

Y : 代謝量 [METS] X<sub>1</sub> : 産熱量 [W]

X<sub>2</sub> : 体表面積 [m<sup>2</sup>] X<sub>3</sub> : 呼気 CO<sub>2</sub> 量 [l/h]

X<sub>4</sub> : 吸気 O<sub>2</sub> 量 [l/h] X<sub>5</sub> : 呼気時間 [h]

X<sub>6</sub> : 吸気時間 [h] X<sub>7</sub> : 身長 [cm]

X<sub>8</sub> : 体重 [kg] X<sub>9</sub> : 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

X<sub>3</sub>、X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub>、およびX<sub>6</sub>である。また、事前の測定により得られる値はX<sub>7</sub>、X<sub>8</sub>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消費量の積によって求められ、糖質と脂質における燃焼熱は、以下の式で求められる。

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

呼吸商は O<sub>2</sub> 消費量に対する CO<sub>2</sub> 産出量の比である。

$$\text{よって、} X_9 = (X_3 X_5) / (X_4 X_6)$$

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ようになる。

$$\begin{aligned} \text{産熱量 } X_1 [W] \\ = (3.815 + 1.232 X_9) (X_4 X_6) / 1.163 \end{aligned}$$

一方、体表面積は

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

と表せるから、最終的に代謝量は、

$$\begin{aligned} \text{代謝量 } Y [\text{METS}] = X_1 / X_2 / 58.2 \\ = (3.815 + 1.232 X_9) (X_4 X_6) / 1.163 \\ / (0.007246 X_7^{0.424} X_8^{0.725}) / 58.2 \end{aligned}$$

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。

種々の交通場面で心拍数を測定し、これを で求めた回帰式に代入することで、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

実験室にて自転車エルゴメーターを用いて呼気ガス分析を行い、各個人のエネルギー代謝量を測定した。実験は 2004 年 11 月および 12 月に実施した。被験者は 20 歳代前半の男性 6 名であり、これらの被験者は後述する実際の交通場面における実測の被験者でもある。表 1 に各

表 1 各被験者プロフィール

被験者No	年齢	性別	実験室における測定実施日	身長 (cm)	体重 (kg)	体表面積 (m <sup>2</sup> )	安静時心拍数 (beat/min)
1	22	男	2004/11/17	171	69.0	1.3950	77
2	23	男	2004/11/17	171	71.2	1.4095	67
3	22	男	2004/11/17	181	64.5	1.3467	56
4	24	男	2004/11/17	167	55.9	1.1733	87
5	21	男	2004/12/1	168	66.3	1.3268	70
6	24	男	2004/12/1	168	56.0	1.1778	69

被験者のプロフィールを示す。

ここで、当該実験における被験者について若干述べておきたい。歩行行動を「楽に歩く」という視点から評価する場合、歩行者の中に高齢者等がかなり含まれることを想定している。したがって、本実験の被験者にも 20 歳代の若者だけでなく高齢者が含まれている方が望ましい。しかし、このような負荷実験を、高齢者を対象として行うことは危険を伴うこと、ならびにスポーツ科学の知見によれば、いくつかの歩行行動がある場合、若年層にとって負荷が大きい行動は、高齢層にとっても負荷が大きく、負荷の大小の順番は変わらないことがわかっている。このため、本研究では 20 歳代の若者を被験者に採用した。

測定にあたって開始 30 分前から安静状態になってもらい、測定開始の約 5 分前に実験室において椅子に座して安静にしてもらった。作業負荷の与え方は、初めの 1 分間は 10W のウォーミングアップ、以後 6 分毎に 30W、60W、90W、120W、150W と負荷を上げ、運動が終了してから約 30 分間エルゴメーターに座ったまま 30 分間休んでもらった。呼気ガス採集はこの時点まで続けた。

### 4. 身体エネルギー消費量を心拍数で表わす回帰式

本研究では、心臓が停止した際に身体エネルギー消費量が 0 となるように、また、身体活動レベルが低い状態から激しい運動するといった全ての活動状態に適応するように、関係式を 3 次式で表わした。

図 1 に各被験者の「心拍数 - 身体エネルギー消費量」の関係を表す。なお、回復時には負荷を全く与えなかったため、この間のデータは作業負荷と身体エネルギー消費量との関係を分析する場合には適切ではないと考え、用いていない。心拍数は負荷時に通常見られる範囲内にあるが、被験者によって心拍数と身体エネルギー消費量と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。しかし、各被験者においては、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、その被験者に関する歩行時の身体エネルギー消費量の概略値を求めることは可能であると考えられる。

各被験者の 3 次回帰式を以下に示す。

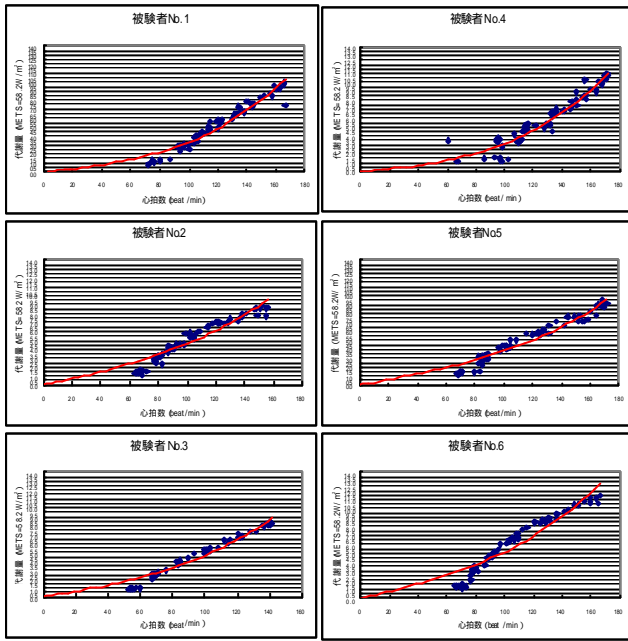


図 1 各被験者の回帰モデル

被験者 No.1:  $y=1.621 \times 10^{-6}x^3 - 4.844 \times 10^{-20}x^2 + 1.687 \times 10^{-2}x$

被験者 No.2:  $y=1.070 \times 10^{-6}x^3 - 5.543 \times 10^{-20}x^2 + 3.503 \times 10^{-2}x$

被験者 No.3:  $y=1.586 \times 10^{-6}x^3 + 1.792 \times 10^{-20}x^2 + 3.062 \times 10^{-2}x$

被験者 No.4:  $y=1.703 \times 10^{-6}x^3 + 1.516 \times 10^{-21}x^2 + 1.366 \times 10^{-2}x$

被験者 No.5:  $y=8.791 \times 10^{-7}x^3 + 1.327 \times 10^{-20}x^2 + 2.920 \times 10^{-2}x$

被験者 No.6:  $y=1.411 \times 10^{-6}x^3 - 1.680 \times 10^{-20}x^2 + 3.718 \times 10^{-2}x$

## 5. 大阪都心部における歩行時の身体エネルギー消費量の測定

### (1) 調査の概要

本研究では、通勤通学時における実測調査を大阪駅前地区において実施し、自由目的行動時の歩行者流を対象とした調査は、心斎橋筋と梅田地下街で実施した。前者に関しては、阪急梅田駅～JR 大阪駅間であり、11月30日(火)、12月3日(金)の通勤ラッシュが集中する7:30～9:30に実施した。後者に関しては11月28日(日)の13:30～17:00に行った。被験者には数回の歩行を依頼したが、各行動の間には10分程度の休憩を入れた。この休憩時間はスポーツ医学上、他の行動に影響の与えない時間であるとされている。

本研究では、交通密度によって歩行者の混雑状況を表した。ここでは交通量、歩行速度および有効幅員を実測し、これより交通密度を算出した。被験者には、各区間の歩行流に沿って歩いてもらい、追い越しはしないような速度で歩いてもらった。

### (2) 歩行目的別にみた歩行者密度と平均速度

表2に対象区間、測定時の歩行者密度、歩行者交通量、および空間平均速度を示す。なお、区間1～3が通勤通学

表 2 対象区間と測定時の歩行者密度、歩行者交通量および空間平均速度

区間番号	対象区間	歩行者密度 (人/m <sup>2</sup> )	歩行者交通量 (人/min)	空間平均速度 (m/sec)
区間1	北口歩道橋部	0.71	340	1.45
区間2	北コンコース	0.11	61	1.40
区間3	大和證券前	0.03	7	1.44
区間4	心斎橋筋商店街	0.84	287	0.95
区間5	クリスタ長堀	0.25	143	1.29
区間6	ディアモール大阪	0.08	42	1.09

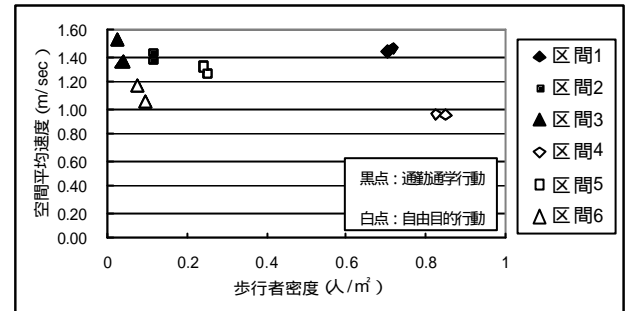


図 2 測定時の歩行者密度と空間平均速度

行動時、区間4～6が自由目的行動時の測定対象区間である。調査区間の勾配は小さくほぼ平坦な区間を選定した。

表2に示すように、通勤通学時の歩行者流を対象とした区間1～3の場合、区間1はやや歩行者密度が高く、既往研究の知見に基づいて判断すると、歩行者はやや拘束された歩行状態となっているものと考えられる。一方、区間2および区間3では、歩行者密度が低く、ほぼ自由歩行に近い状態であると考えられる。自由目的行動時の歩行者流を対象とした区間4～6に関しては、区間4はやや拘束された歩行状態、区間5および区間6は自由歩行に近い状態であると考えられる。

図2は、測定時の歩行者密度と空間平均速度との関係を表している。自由行動時の歩行者流に関しては、交通密度の増加に伴い、平均速度が低下しており、通常の歩行者流の特徴が認められる。一方、通勤通学時の歩行者流に関しては、本研究で実施した実測の場合、0.7(人/m<sup>2</sup>)程度以下の密度においてはこのような傾向が見られず、歩行速度は低下していなかった。これは、通勤通学時には時間の制約が厳しいため、歩行者密度が多少増加しても歩行者は希望速度をできるだけ維持しようとしているからであると思われる。

### (3) 行動別に見た身体的負荷の検討

被験者6名の身体エネルギー消費量を図3に示す。身体エネルギー消費量を比較するにあたって、被験者間の比較を行うのではなく、ある被験者の区間ごとの比較を行うようにした。これは、先に述べたように、各被験者による測定値の差が少ないためである。

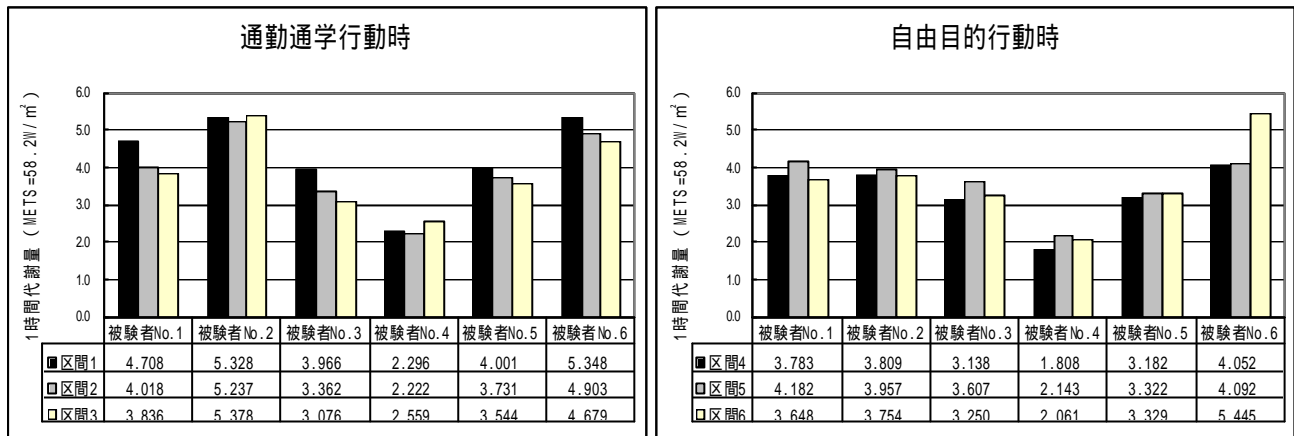


図3 行動別にみた各区間の身体エネルギー消費量の比較

本研究においては、通勤通学時ならびに自由行動時の歩行者流を対象としているが、これらの行動を実際に行っている歩行者を被験者に採用していないため、時間制約の多寡に伴う心理的影響を捉えることはできない。歩行目的の差異によって生じる現象面の特徴は、図2に表わされている。そこで、図2に基づいて以下の考察を進めることにしたい。

まず、区間1に注目したい。区間1におけるエネルギー消費量は、すべての被験者にとって最大、あるいは最大値とほぼ同水準となっている。歩行時の身体エネルギー消費に影響を与える要因として、歩行速度、ならびに速度を維持するための回避行動が考えられる。例として、区間2と比較すると、身体エネルギー消費量が2~18%高くなっているという結果がえられた。区間1は密度が相対的に高く、一方、歩行速度がほぼ自由歩行速度となっているため、同区間における身体エネルギー消費量が大きくなっているものと考えられる。

次に、区間4を見てみたい。区間4では相対的に密度が高く、一定限の回避行動が必要となると思われるが、速度がかなり低下している。このため、区間4におけるエネルギー消費量は区間1と比べて、24~40%小さくなっている。一方、区間4を密度が低く歩行速度が大きい区間2、3、5、および6におけるエネルギー消費量と比較した場合、区間4の値は区間2、3よりは小さく、区間5、6とはほぼ同程度の値となっている。これは、区間4と上記の特徴を有する区間を比較する場合には、歩行速度、ならびに回避行動が身体エネルギー消費に与える寄与の大小について検討しなければならないことを示している。本論では、これについて分析するには至っていない。

## 6. おわりに

一般に、歩行行動を行う際の歩行速度の変化によって、身体エネルギー消費量は増減するものと考えられている。さらに、実際の交通場面では、歩行速度以外に、人との

接触、障害物等を回避する行動によってもエネルギー消費量は変化すると考えられる。本研究では、これらの事項を検証するために、歩行行動の際に生じる歩行状態の違いが、エネルギー消費量にどのような影響を与えているかを検討した。

先に述べたように、歩行時には時間制約等による心理的影響が生じていると考えられ、これを無視することはできない。今後、心理的負荷についても考慮し、歩行行動の際に伴う身体的負荷および心理的負荷が歩行経路の選択に及ぼす影響、歩行者の行動と意識との関係等を検討していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) (財)運輸経済研究センター：スムーズに乗継げる公共交通 - 交通機関の乗継ぎ施設・方式の改善に関する調査 - , 1979
- 2) 大島義行：鉄道新線における交通結節点に関する研究, 日本鉄道施設協会誌, Vol.32, No.1, pp66-69, 1994.
- 3) 佐藤寛之・青山吉隆・中川大・松中亮治・白柳博章：都市公共交通ターミナルにおける乗換抵抗の要因と便益計測に関する研究, 土木計画学研究・講演集, 2001.
- 4) 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, pp48-58, 2003.
- 5) 塚口博司, 寺西達哉, 里見潤：身体エネルギー消費量を考慮した歩行環境評価に関する一考察, 土木計画学研究・論文集, Vol.22 (投稿中)
- 6) 中山照雄：エネルギー代謝量の測定, 温熱生理学, 理工学社, pp.75-80, 1981.
- 7) 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, pp99-106, 1987.