

公共交通機関利用時の身体エネルギー消費に関する主観的・客観的評価

塩見 康博¹・嶋本 寛²・宇野 伸宏³・太田 修平⁴・安 健⁵

¹正会員 京都大学助教 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: shiomi@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学講師 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: shimamoto@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学准教授 経営管理大学院 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都市建設局 水と緑環境部河川整備課
E-mail: otqbb848@city.kyoto.jp

⁵非会員 Beijing Transportation Research Center, China
E-mail: anjian@bjtrc.org.cn

本研究では、移動にかかる身体的負荷という従来の公共交通計画において十分に考慮されていない部分に着目して、身体的疲労度の客観的指標と主観的指標の関係性を分析する。分析にあたり、徒歩、バス、地下鉄の3種類の移動手段に対して、荷物および着席の有無を組み合わせた移動実験を行い、移動中の心拍数と被験者の年齢、身長等の情報からエネルギー消費量を算出し、疲労度に関する客観的指標とする。さらに、それぞれの移動ごとの主観的な疲労度を被験者に尋ね、これをFMME(Free Modulus Magnitude Estimation)に基準化した指標を主観的疲労度とする。両者の指標を比較した結果、バスおよび地下鉄移動は平坦および階段下りの徒歩移動と比べると疲労度がきわめて大きく評価されており、またバス移動は地下鉄移動に比べると疲労度がきわめて大きく評価されていることが明らかとなった。

Key Words : *Travel Fatigue, Energy Expenditure, Free Modulus Magnitude Estimation, Rank-logit model*

1. はじめに

環境問題への関心の高まりを受けて、より公共交通の果たすべき役割が大きくなり、より使いやすい公共交通の実現に向けた検討が全国で行われている。これまでの都市圏における公共交通のサービスレベルに関する検討は、ネットワークの連結性の評価¹⁾、駅からの移動距離²⁾、定時性³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾、運行間隔⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾や待ち時間⁴⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾に関する研究など効率性向上を目指したものが多く、エネルギー消費が交通機関選択の潜在的要因であるという知見も得られている¹⁶⁾。特にわが国では超高齢化社会を迎えており、今後は移動にかかる身体的負荷など従来あまり考慮されていなかった視点からの検討も必要であるといえる。

一方で、運転中の姿勢や長時間の乗車が、運転手の腰痛などの職業上のストレスの一因となることを実証的に示した研究もいくつか存在する。これらの研究では運転手を主対象としているが、乗客にとっても同様のストレスの一因となると考え、An et al.¹⁷⁾は、荷物や座席着席の

有無の条件を設定して、徒歩およびバス、地下鉄乗車時のエネルギー消費量を計測し、移動者の疲労度に関して主観的評価と客観的指標(エネルギー消費)の関係性を統計的に比較している。本研究では、An et al.が行った移動実験に加え追加実験を行い、収集したデータを用いて疲労度に関する主観的評価と客観的指標の関係性を分析するとともに、移動ケースごとの主観的な疲労度を決定する要因についてモデル分析を行う。

本論文の構成は以下の通りである。まず、1. において研究の背景と目的を述べた。2. においてはAn et al.が行った移動実験ならびに本研究で追加的に行った移動実験の概要について説明する。3. においてエネルギー消費と疲労度の主観的ならびに客観的な評価に関する関係性を分析する。最後に、4. において本研究で得られた成果を整理し、今後の課題をとりまとめる。

2. 疲労度測定のための移動実験

2010年7月1日から7月19日と、10月20日から11

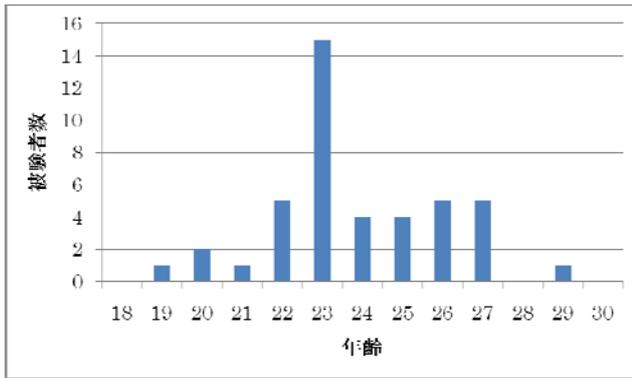


図1 被験者の年齢の内訳

表1 設定した移動ケース

ケースNo.	移動交通手段	姿勢	荷物の有無	所要時間
【1-1】	徒歩(平坦)	/	無し	15分
【1-2】			有り	
【1-3】	徒歩(階段上り)	/	無し	10分
【1-4】			有り	
【1-5】	徒歩(階段下り)	/	無し	10分
【1-6】			有り	
【2-1】	バス	座位	無し	40分~45分
【2-2】		立位	有り	
【2-3】		立位	有り	
【3-1】	地下鉄	座位	無し	30分
【3-2】		立位	有り	
【3-3】		立位	有り	

月3日に、1日あたり2名または3名の合計43名の被験者を対象に実験を行った。なお、2010年7月に30名を対象に行った実験のデータは、An et al.¹⁷⁾により分析が行われている。被験者の性別の内訳は男性31名、女性12名である。年齢の内訳は図-1に示す通りであり、10代、20代の比較的若い年齢層の被験者から構成されているといえる。

このような被験者に対して、表-1に示すような移動交通手段、姿勢(座位/立位)、荷物の有無を組み合わせることで12の移動ケースを設定し、実験を行った。表中の「荷物の有無」で、「有り」の場合は約3.8kgのおもりを手荷物として運びながら移動してもらった。直後の移動ケースに影響を及ぼさないよう、それぞれの移動ケースを行った後に休憩をとるようにした。また、実験終了後に、各移動ケースにおいてどの程度疲労を感じたかを、全く疲労を感じない場合を0、もっとも疲労を感じたケースの疲労度を100として回答してもらった。1名あたりの実験所要時間は休憩時間、アンケート回答時間も含めて7時間程度であった。なお、順序効果を排除するため、被験者により各ケースの実施順序は極力異なるよう配慮した。

実験中、被験者の手首にPOLAR社のPOLAR RS400sd心拍計を装着し、1秒ごとの心拍値とあらかじめ入力した被験者の性別、年齢、身長、体重から算出される身体エネルギー総消費量が算出される。さらに、10月20日

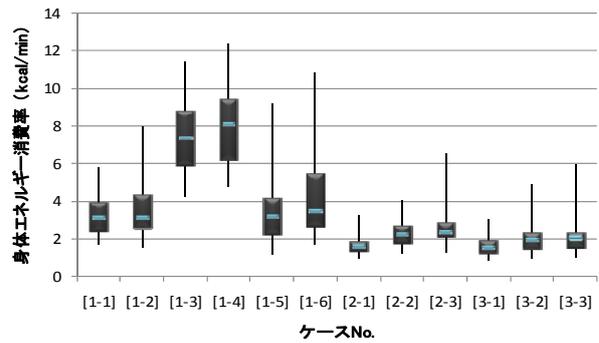


図2 各ケースごとのエネルギー消費量の分布

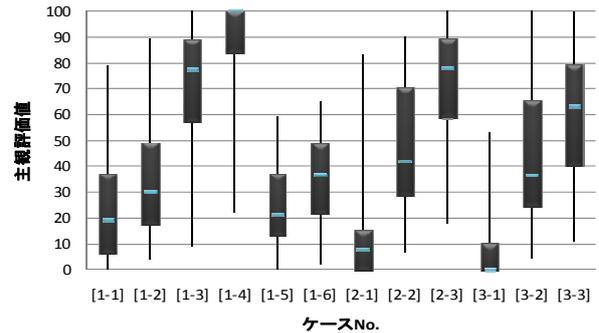


図3 各ケースごとの疲労度の主観評価値の分布

から11月3日までの実験においては、バス、地下鉄における移動ケースでiPod Touch(第4世代)を被験者の腰の部分に装着し、加速度計測アプリケーション「accelgraph」を起動させ、身体の3軸方向にかかる加速度を計測した。これらの計測結果を、疲労度を説明するための客観的な指標として用いた。

3. 身体エネルギー消費と疲労度に関する関係性分析

(1) 集計分析による関係性分析

前述したように、被験者には実験終了後に最も疲労を感じた移動ケースを100として、各ケースの疲労度を回答してもらっているが、主観的な評価であるため被験者によって評価基準が異なることが考えられる。そこで、心理学の分野で異なった判断基準を持った被験者の回答値を同一の尺度上で扱うため各被験者の回答値を標準化する手法として、Stevens S.S.¹⁸⁾が提唱したFMME(Free Modulus Magnitude Estimation)を用いて、評価値を基準化する。FMMEにおいて被験者*n*のケース*j*における主観評価値 P_{jn} は以下のように表せる。

$$P_{jn} = \frac{X_{jn} - \min\{X_{im} \mid i=1,2,\dots,12\}}{100 - \min\{X_{im} \mid i=1,2,\dots,12\}} \quad (1)$$

ただし、 X_{in} はケース*i*における被験者*n*の回答値である。

図-2および図-3にそれぞれ各ケースごとのエネルギー消

費量の分布、主観評価値 P_{jn} の分布を示す。客観的な評価値であるエネルギー消費量の分布に着目すると、階段を上る移動であるケース【13】および【14】で平均値および25パーセンタイル値、75パーセンタイル値が他のケースよりも明らかに大きいといえる。また、バスおよび地下鉄移動におけるエネルギー消費量の平均、25パーセンタイル値および75パーセンタイル値はほぼ同一であり、平坦および階段下りの徒歩移動におけるそれらよりも小さいことがわかる。また、地下鉄およびバス移動の姿勢と荷物の有無に着目すると、着席の場合は立って移動する場合よりもエネルギー消費量の分布は下に位置しているものの、立って移動する場合の荷物の有無によるエネルギー消費量の分布に大きな違いはない。一方、主観的評価値 P_{jn} の分布に着目すると、分布の広がりやエネルギー消費量のそれと比べて大きいといえる。また、バスおよび地下鉄移動における評価値の分布は、平坦および階段下りの徒歩移動におけるそれよりも上に、すわわち、より大きな疲労度を感じる側に位置している。さらに、エネルギー消費量の分布では差が見られなかったバス移動および地下鉄移動の評価値の分布はバス移動のほうが上に位置しており、特に立って荷物を持った移動においてその差は顕著に出ているといえる。

以上から、各移動ケースにおいて客観的指標であるエネルギー消費量の分布と主観的評価値の分布が異なっており、特に荷物を持った移動とバス移動の主観的疲労度は他と比べてきわめて大きく評価されていることがわかった。

(2) ランクロジットモデルを用いた主観的疲労度の要因分析

ここでは疲労度に関する評価値 P_{jn} を順位付けデータとして扱い、ランクロジットモデル¹⁹⁾を用いて主観的な疲労度と各要因の関係性について分析を行う。

ランクロジットモデルにおいて、被験者 n のケース j に対する効用 V_{jn} の確定項が選択肢間で独立であると仮定すれば、被験者 n が $J(=12)$ ケースの疲労度に対して選

好順序がつけられる確率は以下のように与えられる。

$$P_n(1,2,\dots,J) = \frac{\exp(V_{jn})}{\sum_{i=1}^{J-1} \exp(V_{in})} \quad (2)$$

ただし、 V_{jn} は推定すべきパラメータ β を用いて以下のように表される。

$$V_{jn} = \sum_{i=1}^m \beta_{ijn} x_{ijn} \quad (3)$$

したがって、1つの順序づけデータを $J-1$ 個の選択データに分解して、それぞれを独立な選択データのように取り扱うことにより、通常の多項ロジットモデルを用いて尤度関数を計算することができる。

表-2に推定結果を示す。 x_1 から x_6 はダミー変数で、 x_1 は着席の場合は1、立席の場合は0をとり、 x_2 から x_6 は表-2の各項目に該当すれば1、該当しなければ0をとる。修正済み ρ^2 値が0.287であり、まずまずの適合度のモデルであるといえる。姿勢ダミーが有意な正値をとっており、バス、地下鉄での移動の場合は着席のほうが立席よりも主観的な疲労度は小さいといえる。また、荷物ダミー、階段上りダミーが有意な負値をとっており、荷物を持つ移動や階段を上る必要のある移動のときに、主観的な疲労度は大きくなるといえる。また、有意ではないものの階段下りダミーは正値をとっており、階段を下る移動は他の移動に比べて主観的な疲労度は小さいといえる。バス乗車ダミー、地下鉄乗車ダミーはともに有意な負値をとっており、徒歩による移動と比べてバス、地下鉄による移動の主観的な疲労度は大きく、またパラメータの値をみるとバスでの移動のほうが主観的な疲労度はより大きいといえる。これらの知見は、前節で示した集計分析の結果と一致している。一方、移動中の心拍数や合成加速度といった身体的負荷に関する指標はすべて統計的に有意ではなく、これらの指標は主観的な疲労度に影響を及ぼさないといえる。

4. おわりに

本研究では、移動にかかる身体的負荷という従来の公共交通計画において十分に考慮されていない部分に着目して、身体的疲労度の客観的指標と主観的指標の関係性を分析した。分析にあたり、徒歩、バス、地下鉄の3種類の移動手段に対して、荷物および着席の有無を組み合わせた移動実験を行い、移動中の心拍数と被験者の年齢、身長等の情報からエネルギー消費量を算出し、エネルギー消費量が大きくなるほど疲労度も多くなるとの前提の下で、疲労度に関する客観的指標とした。さらに、それぞれの移動ごとの主観的な疲労度を被験者に尋ね、これをFMME(Free Modulus Magnitude Estimation)に基準化した指

表-2 移動ケース選択モデルの推定結果

説明変数	パラメータ	T値	有意
x1 (姿勢ダミー)	4.733	6.671	**
x2 (荷物ダミー)	-0.897	-3.977	**
x3 (階段上りダミー)	-3.535	-2.476	*
x4 (階段下りダミー)	0.273	0.631	
x5 (バス乗車ダミー)	-3.377	-2.263	*
x6 (地下鉄乗車ダミー)	-2.855	-2.941	**
x7 (最小心拍数-安静時心拍数)	-0.009	-0.218	
x8 (平均心拍数-安静時心拍数)	0.014	0.378	
x9 (最大心拍数-安静時心拍数)	-0.006	-0.217	
x10 心拍数標準偏差	0.033	0.262	
x11 合成加速度標準偏差	13.752	0.421	
ρ^2		0.329	
修正済み ρ^2		0.287	
最終対数尤度		-174.350	
サンプル数		156	

**1%有意, *5%有意

標を主観的疲労度とした。両者の指標を集計的に比較した結果、バスおよび地下鉄移動は平坦および階段下りの徒歩移動と比べると疲労度が他と比べてきわめて大きく評価されており、またバス移動は地下鉄移動に比べると疲労度が過大に評価されていることが明らかとなった。さらに、主観的な疲労度の順位付け要因をランクロジットモデルにより分析した結果、移動条件に関しては集計分析と同様の知見が得られ、また移動中の心拍数や合成加速度といった身体的負荷に関する指標は主観的な疲労度に影響を及ぼさないことが確認された。すなわち、移動の際に利用者が感じる疲労度は、エネルギー消費や加速度など身体に対して物理的に加わる負荷に加えて、他の要因も強く影響していると考えられる。公共交通のサービス水準の向上のためには、今後、より詳細に疲労度に影響を及ぼす要因を把握する必要があるといえる。また、本研究で収集したデータの被験者は20歳代を中心としており、サンプルの偏りがあることは否めない。今後はより広い年代のサンプルを収集し、ここで得られた知見が成り立つか確認する必要があるといえる。さらに、別途アンケート調査を実施するなどして、エネルギー消費をはじめとする身体的負荷を考慮しつつ、利用者の交通機関選択の関係について分析することを課題としてあげる。

参考文献

1. Yuval Hadas, Avishai (Avi) Ceder. Public Transit Network Connectivity: Spatial-Based Performance Indicators. In *The 89th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Washington, D.C. 2009.
2. Sean O'Sullivan, John Morrall. Walking distances to and from light-rail transit stations, *Transportation Research Record*, 1996, 1538, pp. 131–138.
3. Tumquist M.A and Bowman, L.A. The Effects of Network Structure on Reliability of Transit Service. *Transportation Research Part B*, 1980, Vol.14, pp. 79–86.
4. Bates, J., Polak J., Jones P., Cook A. The Valuation of Reliability for Personal Travel. *Transportation Research Part E*, 2001, Vol. 37, pp. 191–229.
5. Bowman L.A., Tumquist M.A. Service Frequency, Schedule Reliability and Passenger Wait Times at Transit Stops. *Transportation Research Part A*, 1981, Vol. 15, No. 6, pp. 465–471.
6. Tumquist, M.A. Strategies for Improving Bus Transit Service Reliability. *Transportation Research Record*. 1982 Issue 818, pp. 7–13.
7. Kittelson P. B., Quade K., Hunter-Zaworski K. M. *Transit Capacity and Quality of Service Manual, 2nd Edition*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy Press, 2003.
8. Thomas J. Kimpel, James G. Strathman, Kenneth J. Dueker. *Time Point-Level Analysis of Passenger Demand and Transit Service Reliability*. Center for Urban Studies, College of Urban and Public Affairs, Portland State University, Portland, Oregon. 2002.
9. Daniel Csikos, Graham Currie. The Impact of Transit Reliability on Wait Time – Insights from AFC Data. In *86th TRB Annual Meeting CD-ROM*. 2007.
10. Niels van Oort, Rob van Nes. Service Regularity Analysis for Urban Transit Network Design. In *83rd TRB Annual Meeting CD-ROM*, 2003, pp. 1–24.
11. Hounsell N.B., McLeod F.N., Gardner K., Head J.R., Cook, D.. Headway-Based Bus Priority in London Using AVL: First Results. In *Proceedings of 10th International Conference on Road Transport Information and Control*, London, 2000, pp. 218–222.
12. Ben-Akiva M., S.R. Lerman. *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press, 1985.
13. Furth, P. G., Hemily, B. J., Muller, T. H. J., & Strathman, J. G. *Using Archived AVL-APC Data to Improve Transit Performance and Management*. TCRP Report 113, Transportation Research Board, 2006.
14. Thomas B. Reed. Reduction in the Burden of Waiting for Public Transit Due to Real-Time Schedule Information: A Conjoint Analysis Study. *IEEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, 1995 Proceedings, pp. 83–89.
15. Richard H. Pratt. *Traveler Response to Transportation System Changes, Interim Handbook*. TCRP Web Document 12, Transportation Research Board, 1999.
16. Robert Kölbl, Drink Helbing. Energy laws in human travel behavior. *New Journal of Physics*, 2003, Vol.5, pp. 48.1–48.12.
17. An J, Uno N., Yang X., Liu H., and Shiomi Y. Measurement of Travel Fatigue: Objective Monitoring and Subjective Estimation. *Transportation Research Record*, 2011, in press
18. Stevens S.S. : *Introduction to its Perceptual, Neural and Social Prospects*, Wiley, 1975
19. 北村隆一, 森川高行編著, 交通行動の分析とモデ

TRAVEL FATIGUE IN PUBLIC TRANSPORTATION: SUBJECTIVE AND OBJECTIVE EVALUATIONS

Yasuhiro Shiomi, Hiroshi SHIMAMOTO, Nobuhiro UNO, Syuhei OHTA,
and Jian AN

Most of the public transportation planning has not paid attention to travel fatigue enough. Therefore, this paper analyses the relationship between objective and subjective estimation of travel fatigue. For the objective part, an experiment was designed to measure travelers' energy expenditure rates using a heart rate monitor while walking on level ground, going up and down stairs, and while riding on a bus and subway. For the subjective part, free modulus magnitude estimation (FMME) was used to investigate travelers' subjective perceptions of fatigue while traveling. As a result of comparison of both of estimation, it was revealed that travel fatigue during riding on a bus and a subway is estimated large compared with during walking on level ground and going down stairs. It was also revealed that travel fatigue during riding on bus is estimated large compared with riding on subway.