

都心での歩行経路選択分析における トリップ距離の異質性の影響

山本 俊行¹・高村 真一²・森川 高行³

¹正会員 名古屋大学教授 エコトピア科学研究所 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町C1-3(651))
E-mail:yamamoto@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社総合計画部 (〒541-0052 大阪市中央区安土町2丁目3番13号大阪国際ビルディング) E-mail:shinichi.takamura@os.pacific.co.jp

³正会員 名古屋大学教授 環境学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町C1-3(651))
E-mail:morikawa@nagoya-u.jp

ネットワークが密な場合、OD間距離によって物理的な経路選択枝数は著しく異なる。このばらつきは経路選択モデルの推定に影響を及ぼしかねない。また、OD間距離が異なるトリップで同一の経路選択基準が用いられるとは限らない。本研究では、ランダムウォーク法により経路選択枝を標本抽出し、標本抽出された選択枝集合を用いて経路選択モデルを推定した場合に、選択枝集合の抽出がモデルの推定精度に及ぼす影響を分析する。また、OD間距離による異分散性を考慮したモデルの有効性を示す。名古屋市都心部での歩行経路選択行動をGPSにより連続測位したデータによる事例分析の結果、選択枝集合の抽出方法がモデルの誤差項の分散に影響を及ぼすこと、および、異分散性を考慮することで等分散性を仮定した場合に比べてモデルの推定精度が高いことが示された。

Key Words : *expanded path size, path size logit, sampling of alternatives, heteroscedasticity, GPS*

1. はじめに

経路選択行動の分析において離散選択モデルを適用して経路選択に関する効用の推定を行う場合、選択枝集合の設定はモデルの推定結果に大きな影響を及ぼす^{例え(ば)1)3)}。特に、ネットワークが密な場合には選択枝集合の列挙は困難となる。さらに、ネットワークが密な場合には、トリップ距離によって物理的な選択枝数が大きく異なるため、それがモデルの推定結果に影響を及ぼす⁴⁾。一方で、トリップ距離が異なるトリップデータに対して同一の経路選択行動を仮定することの妥当性にも疑問が生じる⁵⁾。本研究では、ランダムウォーク法⁶⁾により経路選択枝を標本抽出し、標本抽出された選択枝集合を用いて経路選択モデルを推定した場合に、選択枝集合の抽出がモデルの推定精度に及ぼす影響を分析する。また、OD間距離による異分散性を考慮したモデルの有効性を示す。

2. 分析データ

本研究では、著者らの先行研究⁴⁾で用いたデータによ

る分析を行う。分析データは2008年度に駐車デポジットシステムの社会実験⁷⁾の一環として収集されたものであり、被験者76名の4週間のトリップデータである。各トリップはGPS付き携帯電話により約10秒毎の位置情報が記録されており、トリップ経路の他、トリップの出発・到着時刻、移動目的、移動手段に関する情報も別途収集されている。上記の観測データのうち、図-1に示すように、多くの徒歩トリップが行われている図-1中の黒枠内の地域を分析対象範囲とする。



図-1 全徒歩トリップの分布⁴⁾



図-2 分析対象ネットワーク

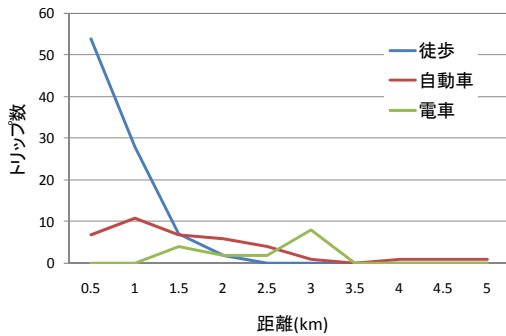


図-3 トリップ距離の分布⁴⁾

分析対象範囲のネットワークを図-2に示す。図より、OD間距離が1km程度の場合でも代替経路が多数となる可能性があることがわかる。OD間距離のサンプル分布を同対象範囲での自動車、電車によるトリップと合わせて示した図-3より、徒歩トリップのOD間距離は自動車や電車に比べて短いものの、1.5~2kmのOD間距離を持つ徒歩トリップも発生していることが分かる。

3. 分析方法

本研究では、著者らの先行研究⁴⁾と同様に、Frejinger et al.⁹⁾が提案したランダムウォーク法により経路選択肢を標本抽出し、標本抽出された選択肢集合を用いてパスサイズロジットモデル⁸⁾により経路選択モデルを推定する。

(1) ランダムウォーク法

ランダムウォーク法では、トリップの起点 s_o から終点 s_d にたどり着くまでの各ノードにおいて、ノードから出発する各リンク $l=(v,w) \in E_v$ (v,w はそれぞれリンク l の出発ノードと到着ノードを表し、 E_v はノード v から出発するリンクの集合を表す) について、最短経路からの相対迂回度を以下の式で算出する。

$$x_i = \frac{SP(v, s_d)}{C(l) + SP(w, s_d)} \quad (1)$$

ただし、 $SP(v_i, v_j)$ はノード v_i, v_j 間の最短経路の一般化費用、 $C(l)$ はリンク l の一般化費用を表す。さらに、この相対迂回度から各リンクの重みを以下の式で算出する。

$$\omega(l|b_1, b_2) = 1 - (1 - x_i^{b_1})^{b_2} \quad (2)$$

ただし、 b_1, b_2 は重みを調整するパラメータを表す。この重みにしたがって、以下の式により各リンクの選択確率を算出し、選択確率に応じて確率的に次に進むノードが決定される。

$$q(l|E_v, b_1, b_2) = \frac{\omega(l|b_1, b_2)}{\sum_{l' \in E_v} \omega(l'|b_1, b_2)} \quad (3)$$

起点から出発し、式(3)にしたがって終点までの経路が一つ生成されるこの過程が1回の代替選択肢の標本抽出となる。

以上の手順で抽出した選択肢集合を用いたパスサイズロジットモデルの推定には、選択肢を標本抽出したことを考慮したパスサイズの計算、および、重み付き推定の適用が必要となる。これらの詳細については Frejinger et al.⁹⁾や著者らの先行研究⁴⁾を参照されたい。

Frejinger et al.⁹⁾は、 $b_2=1$ の時、 b_1 の値が大きいほど最短経路が抽出される確率が高くなり、一定の抽出回数で抽出される選択肢数が少なくなること、反対に、 b_1 の値が小さいほど抽出される選択肢数が多くなるため、モデルの推定精度が高くなることを示した。一方、高村ら⁴⁾は、 b_1 の値が同一でも、トリップ距離が長いほど抽出される選択肢数は多くなるが、最短距離に対して非常に長い経路が抽出されること、それによりモデルの推定精度が低下することを示した。さらに、 b_1 を最短経路距離の関数とすることで推定精度が向上することを示した。

(2) 誤差項の異分散性

モデルの推定精度の低さはいくつかの原因が有り得るが、本稿では、誤差項の分散に着目し、トリップ距離に異質性が存在するトリップデータを用いた分析では、誤差項の異分散性が存在することを示す。さらに、トリップ距離による異分散性を考慮したモデルを構築する。

誤差項に異分散性が存在する場合、等分散性を仮定した通常モデルによるパラメータの推定精度は低下する。すなわち、推定値の分散共分散行列は過大となる。

White⁹⁾は誤差項に異分散性が存在する場合でも一致性を持つ分散共分散行列推定量としてサンドイッチ推定量を提案している。サンドイッチ推定量は、選択肢別抽出による WESML推定量によってパラメータを推定する場合の分散共分散行列の推定にも用いられる。本稿では、分散共分散行列の推定に際し、通常推定量とサンドイッチ推定量を適用し、両者を比較することで異分散性の存在について分析する。分散共分散行列のサンドイッチ推

表-1 等分散を仮定した経路選択モデル

ランダムウォークパラメータ 分散共分散行列推定量	一定値 ($b_1=20$)					トリップ距離依存 ($b_1=10+0.2\times$ 最短経路距離)				
	通常法			サンドイッチ		通常法			サンドイッチ	
	Coef.	s.e.	t-stat.	s.e.	t-stat.	Coef.	s.e.	t-stat.	s.e.	t-stat.
経路長 (100m)	-2.48	0.43	-5.71	0.43	-5.71	-2.62	0.47	-5.62	0.52	-5.00
デパート沿い経路長×50代以上(100m)	1.53	0.40	3.80	0.28	5.48	2.42	0.66	3.68	0.53	4.57
飲食店沿い経路長×休日 (100m)	3.51	2.24	1.57	0.67	5.23	3.26	1.38	2.36	0.70	4.67
無店舗経路長 (100m)	1.45	0.87	1.68	0.68	2.14	2.01	0.84	2.40	0.52	3.89
lnEPS	0.60	0.30	1.98	0.26	2.29	0.65	0.30	2.18	0.26	2.45
初期尤度	-420.1					-355.0				
最終尤度	-72.3					-71.6				

サンプル数:91

定量は以下で与えられる。

$$Var(\hat{\beta}) = [\hat{H}]^{-1} \hat{B} [\hat{H}]^{-1} \quad (4)$$

ただし、 \hat{H} はヘシアン行列、 \hat{B} は尤度関数の一階微分のクロス積を表す。なお、通常の推定量は、前者の逆行列となる。

誤差項が異分散性を持つ原因としては、トリップ距離による影響が考えられる。すなわち、経路選択行動においては、トリップ距離が長くなるにしたがって、経路間の効用差に対する感度が低くなることが考えられる。例えば、2経路間の所要時間差が5分の場合、全体の所要時間が10分であれば経路間の差は大きいと認識されるのに対して、全体の所要時間が1時間であれば5分の差はそれほど大きいとは認識されない可能性がある。三輪ら⁹⁾は、以上のような認識に基づき、誤差項の分散をトリップ距離で構造化したモデルを提案し、プローブカーデータを用いた自動車の経路選択行動の分析により、その有効性を確認している。本研究では、三輪ら⁹⁾の構造化を都心部での歩行者の経路選択行動モデルに適用し、その有効性を検証する。誤差項の分散をトリップ距離で構造化した時のパスサイズロジットモデルのスケールパラメータは以下で与えられる。

$$\mu_n = \mu_0 d_n^\gamma \quad (5)$$

ただし、 d_n はトリップ n の最短経路距離、 μ_0, γ はパラメータである。

4. 分析結果

はじめに、等分散性を仮定した経路選択モデルを表-1に示す。表では、著者らの先行研究⁹⁾で分析したランダムウォークパラメータのうち、 $b_1=20$ に固定したケース、および、トリップ距離に依存したケース ($b_1=10+0.2\times$ 最短経路距離) を示している。両ケースのパラメータ推定値には大きな違いはなく、いずれのケースでもバイアスなくパラメータが推定されていることが分かる。しか

しながら、通常の推定量による標準誤差の推定結果を見ると、飲食店沿い経路長×休日 (100 m) の係数の標準誤差について、ランダムウォークパラメータを固定したケースの方がトリップ距離に依存したケースより大きく推定されており、その結果として当該説明変数のt値が小さく推定されてしまっている。このため、ランダムウォークパラメータを固定したケースでは当該説明変数の有意性がないという誤った結論を導く危険性がある。

一方、サンドイッチ推定量を用いた標準偏差の推定結果を見ると、デパート沿い経路長×50代以上(100 m)の係数の標準誤差についてはランダムウォークパラメータがトリップ距離に依存したケースの方が固定したケースよりも大きく推定されているものの、t値の推定結果からは両ケースともに全ての説明変数が有意性を持つと判断され、両ケースの結果に相違はない。サンドイッチ推定量と通常の推定量による結果を比較すると、両ケースともに標準誤差の推定結果が異なっており、異分散性が存在することが示唆される結果となっている。

次に、誤差項の分散をトリップ距離で構造化したモデルの推定結果を表-2に示す。表より、ランダムウォークパラメータを固定したケースでは、異分散性を表すパラメータの推定値は有意とはならなかった。さらに、その他のパラメータについても異分散性を表すパラメータを導入したことで有意性を失っていることが分かる。一方、ランダムウォークパラメータがトリップ距離に依存したケースでは、異分散性を表すパラメータが有意に推定されており、その他のパラメータも有意性を保っている。また、後者を基準とした場合の前者のパラメータ推定値のずれは30%未満であるのに対して、標準誤差の推定値のずれは30%以上であり100%以上のずれも発生している。これらの結果より、ランダムウォークパラメータをトリップ距離の関数にすることでモデルの推定精度が向上していることが分かる。

最後に、ランダムウォークパラメータがトリップ距離に依存したケースについて、異分散性を考慮したモデルと等分散性を仮定したモデルの推定結果を比べると、ス

表-2 トリップ距離による異分散性を考慮した経路選択モデル (分散共分散行列はサンドイッチ推定量)

ランダムウォークパラメータ	一定値 ($b_1=20$)			トリップ距離依存 ($b_1 = 10 + 0.2 \times \text{最短経路距離}$)		
	Coef.	s.e.	t-stat.	Coef.	s.e.	t-stat.
経路長 (100m)	-6.14	3.83	-1.60	-5.89	1.37	-4.30
デパート沿い経路長×50代以上(100m)	3.83	2.24	1.71	5.36	1.36	3.93
飲食店沿い経路長×休日 (100m)	8.76	5.42	1.62	7.34	1.88	3.91
無店舗経路長 (100m)	3.37	2.35	1.43	4.61	1.78	2.60
lnEPS	1.55	1.20	1.29	1.58	0.66	2.41
異分散パラメータ (γ)	-0.59	0.37	-1.62	-0.56	0.24	-2.37
初期尤度	-420.1			-355.0		
最終尤度	-71.4			-70.3		

サンプル数:91

ケールパラメータの構造化の有無によって説明変数の推定値の大きさは異なるものの、各説明変数の係数の推定値の比は2.2から2.4に集中しており大きな変化はないことが分かる。また、異分散性を表すパラメータの推定値が有意で、両モデル間の最終尤度の差も統計的に有意であることから異分散性を考慮したことでモデルの推定精度が向上したことが示された。

5. おわりに

本研究では、経路選択モデルの推定にあたり、トリップ距離のばらつきがモデルの推定精度を低下させることを明らかにした。誤差項に異分散性が存在する場合、標準誤差の推定値が大きくなるため、経路選択行動の影響要因の検出力が低下する危険がある。これに対して、分散共分散行列の推定値としてWhite⁹⁾のサンドイッチ推定量を用いることで、一貫性を持つ標準誤差の推定値が得られることを示した。さらに、トリップ距離により誤差項の分散を構造化したモデルを導入することにより、モデルの推定精度が向上することを示した。

今回の分析では、サンプル数が少ないためそれほど多くの説明変数をモデルに導入することが出来なかった。今後は、より有用な知見を得るためにサンプル数を拡大することが必要となる。また、歩行環境について、どのような説明変数が実際の経路選択行動に即しており、かつ、政策変数として有用であるかについて検討を深める必要がある。

謝辞：本稿は文部科学省科学研究費補助金(21246080, 21246081, 21360244)および国土交通省道路政策の質の向上に資する技術研究開発費の助成を受けた研究成果の一部である。また、名古屋大学三輪富生准教授には最短経路探索アルゴリズムの提供をはじめ、ネットワーク分析

に関する様々な助言を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Bekhor, S., Ben-Akiva, M.E. and Ramming, M.S.: Evaluation of choice set generation algorithms for route choice models, *Annals of Operational Research*, Vol. 144, pp. 235-247, 2006.
- 2) Bovy, P.H.L. and Fiorenzo-Catalano, S.: Stochastic route choice set generation: behavioral and probabilistic foundations, *Transportmetrica*, Vol. 3, pp. 173-189, 2007.
- 3) Van Nes, R., Hoogendoorn-Lanser, S. and Koppelman, F.S.: Using choice sets for estimation and prediction in route choice, *Transportmetrica*, Vol. 4, pp. 83-96, 2008.
- 4) 高村真一, 山本俊行, 森川高行: PP データを用いた都心での手段・経路選択行動の分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 42, CD-ROM, 2010.
- 5) 三輪富生, 森川高行, 倉内慎也: プローブカーデータを用いた動的な経路選択行動に関する基礎的分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 477-486, 2005.
- 6) Frejinger, E., Bierlaire, M. and Ben-Akiva, M.: Sampling of alternatives for route choice modeling, *Transportation Research Part B*, Vol. 43, pp. 984-994, 2009.
- 7) 中井陽平, 三輪富生, 山本俊行, 森川高行: 駐車デポジットシステム社会実験における被験者の交通行動変化に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 40, CD-ROM, 2009.
- 8) Ben-Akiva, M. and Bierlaire, M. (1999). Discrete choice methods and their applications to short-term travel decisions, In R. Hall (Ed.), *Handbook of Transportation Science*, Kluwer, pp. 5-34, 1999.
- 9) White, H.: Maximum likelihood estimation of misspecified models, *Econometrica*, Vol. 50, pp. 1-16, 1982.

(2011.5.6 受付)

EFFECTS OF HETEROGENEITY IN TRIP DISTANCE ON PEDESTRIAN ROUTE CHOICE ANALYSIS IN A DOWNTOWN AREA

Toshiyuki YAMAMOTO, Sinichi TAKAMURA and Takayuki MORIKAWA

The number of physical alternative routes varies significantly according to trip distance on a dense road network. The variation may affect the estimation of route choice model. Moreover, route choice behavior may change according to the trip distance. In this study, the alternative routes are sampled by random walk method, and the effects of sampling of alternatives on the efficiency of the model estimation. Then, the efficiency of the model explicitly considering heteroscedasticity resulting from trip distance is investigated. An empirical data was obtained on pedestrian route choice behavior in a downtown observed by GPS. The empirical analysis showed that the sampling of alternatives affects the variance of error term in the model, and that the goodness-of-fit statistics becomes better by considering heteroscedasticity than assuming homoscedasticity.