

6週間の交通行動データを用いた活動パターンの変動に関するマルチレベル分析*

Multilevel Analysis of Variations of Activity Patterns Using a Six-Week Travel Diary Data *

力石真**・藤原章正***・張峻屹****・K.W. Axhausen*****

By Makoto CHIKARAISHI **・Akimasa FUJIWARA ***・Junyi ZHANG ****・K.W. Axhausen*****

1. はじめに

交通量・交通行動などの交通に関連する諸現象が様々な変化・変動を持つことは、これまでに繰り返し指摘されている¹⁾。中でも交通計画において重要な変動要因は、行動主体の属性の違いに起因する変動、時間的な変動、空間的な変動の3つであると考えられる。伝統的な四段階推定法では主に空間的な変動に、非集計分析では主に行動主体の属性の違いに起因する変動に焦点が当てられてきた。加えて1980年代以降、活動/交通行動の時間的な変動に関する分析が精力的に行われている。例えばPas²⁾は、モデルの適合度指標として頻繁に利用される決定係数(R^2)を、個人間変動による寄与率と個人内変動による寄与率に分解することで、断面データに基づく(個人間の差異に基づく)発生段階における需要予測の脆弱さを指摘している。他に時間的な変動の理解を試みた研究として、Bhatら³⁾⁴⁾⁵⁾、Kitamuraら⁶⁾、Susilo and Kitamura⁷⁾などがあり、いずれの分析においても個人間の差異に基づくモデル同定の脆弱さが確認される結果となっている。これらの分析は、頻繁に行われる断面データに基づく交通計画の在り方に警鐘を鳴らし、時間的な変動の理解とそれへの対応の必要性を示唆している。

以上のように、これまで行動主体の属性の違いに起因する変動、時間的な変動、空間的な変動のいずれかに着目し、各変動要因が交通行動に与える影響を把握しようと試みた研究は頻繁にみられる。また、いずれの変動要因も交通行動に無視することのできない影響を与えていることは既往研究から明らかである。しかしながら、交通行動の全変動のうち、どの程度が上述した3つの変動要因によって説明され、どのような比率でこれら3つの変動要因が影響しているのかといった、より大域的な視

点から交通行動の変動構造を示した既往研究はほとんどみあたらない。このような大域的な視点から変動構造を明らかにしておくことは、分析のフレームワークを選択する上で極めて重要な基礎情報となる。例えば、時間的な変動、行動主体の属性の違いに起因する変動が有意に観測されない分析対象に対しては、複雑なモデルを構築しなくとも、空間的に集計されたデータによる分析で対応できる可能性がある。

このような背景から、本研究では、マルチレベル分析を通して、個人の活動パターンにおける変動要因を1) 意思決定者属性による変動(個人・世帯)、2) 時間的な変動(日付・曜日)、3) 空間的な変動(居住地・出発地・到着地・都市)の3つに分解し定量的に把握することを目的とする。分析に当たっては、1999年にドイツのカールスルーエ・ハレで行われた6週間の交通行動データを用いる。なお本稿では、紙面の都合上、出発時刻選択を対象とした分析結果のみを紹介する。他の側面(ある一日に当該活動を行うかどうかなど)からみた変動要因の分析については、発表時に紹介する。

2. マルチレベル分析

上述した3つの変動要因は、対象とする分析単位(ここでは出発時刻)の上位レベルに存在するサブグループによる影響であるといえる。例えば、通勤時における出発時刻選択は、世帯、勤め先をはじめとするサブグループの影響を受けるという見方ができる。マルチレベル分析⁸⁾は、このような階層的に異なった水準にある要因の影響を明示的に扱う解析手法であり、教育分野や医療分野で頻繁に利用されている(例えば教育分野では、テストの成績を分析単位とし、学校をサブグループに想定するケースがある。また医療分野では、患者の生存率を分析単位にし、入院先の病院をサブグループに想定するケースがある)。階層的なデータ構造は、土木計画・交通分野においても頻繁にみられる。例えば、ゾーンを分析単位とする集計的な分析は、その内部に個々人の活動/交通行動を含んでおり、これらはゾーンレベルをマクロ水準、個人の活動/交通行動をミクロ水準とする階層的な関係にあると考えることができる。マルチレベル分析の特徴は、各水準にランダム変数を導入することによ

*キーワード: 変動, マルチレベル分析, 6週間の交通行動データ

**学生会員, 修(工), 広島大学大学院国際協力研究科
(東広島市鏡山1丁目5番1号, Tel&Fax: 082-424-5971,
E-mail: chikaraishi@hiroshima-u.ac.jp)

***正会員, 博(工), 広島大学大学院国際協力研究科
(東広島市鏡山1丁目5番1号, Tel&Fax: 082-424-6921,
E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp)

****正会員, 博(工), 広島大学大学院国際協力研究科
(東広島市鏡山1丁目5番1号, Tel&Fax: 082-424-6919,
E-mail: zjy@hiroshima-u.ac.jp)

*****非会員, Ph.D, スイス連邦工科大学チューリッヒ校(ETHZ)交通システム研究所

て、マクロ水準とミクロ水準の影響を同時に分析できる点にある。さらに、マクロ水準として交差分類(cross-classifications)された複数の層を想定することができる。なお、ランダム効果を考慮したパネルデータ分析は、意思決定者属性をマクロ水準としたマルチレベル分析として見なすことができる。

本研究では、出発時刻選択をミクロ水準とする階層関係を図1のように設定する。具体的には、まず1) 意思決定者属性、2) 時間要素、3) 空間要素、の3つの変動要因を交差分類(cross-classifications)的なサブグループとして設定する。加えて、意思決定者属性に関して、個人属性と、それを内を含む世帯属性が階層構造にあるとし、時間的要素に関して、日付と、それを内を含む曜日が階層構造にあるとする。このような交差分類的、階層的な関係を以下の式で表現する。

$$y_{ihdws}^j = \mu^j + (u_{ih}^j + u_h^j) + (u_{dw}^j + u_w^j) + (u_s^j) + \varepsilon_{ihdws}^j \quad (1)$$

ここで、 y_{ihdws}^j は、世帯*h*に属する個人*i*が、曜日*w*に属する日付*d*の*i*番目のトリップにおいて、活動*j*を目的とし空間*s*を移動する出発時刻を表す。また、 μ^j は活動*j*の出発時刻に対する定数項であり、右辺第2項以降は、以下で定義されるランダム変数である。

$$u_{ih}^j \sim N(0, \sigma_{ihj}^2), u_h^j \sim N(0, \sigma_{hj}^2), u_{dw}^j \sim N(0, \sigma_{dwj}^2), \quad (2)$$

$$u_w^j \sim N(0, \sigma_{wj}^2), u_s^j \sim N(0, \sigma_{sj}^2), \varepsilon_{ihdws}^j \sim N(0, \sigma_{0j}^2)$$

また、式(2)の各ランダム変数が相関しないと仮定すると、 y_{ihdws}^j の分散・共分散は以下のように表すことができる。

$$\text{Var}(y_{ihdws}^j) = \sigma_{ihj}^2 + \sigma_{hj}^2 + \sigma_{dwj}^2 + \sigma_{wj}^2 + \sigma_{sj}^2 + \sigma_{0j}^2 \quad (3)$$

$$\text{Cov}(y_{ihdws}^j, y_{i'h't'w's'}^j) = \delta_i \delta_h \sigma_{ihj}^2 + \delta_h \sigma_{hj}^2 \quad (4)$$

$$+ \delta_d \delta_w \sigma_{dwj}^2 + \delta_w \sigma_{wj}^2 + \delta_s \sigma_{sj}^2$$

ここで、 $\delta_X = X = X'$ のとき1、 $X \neq X'$ のとき0をとるダミー変数である($X = i, h, d, w, s$)。

なお、出発時刻選択問題をモデル化するに当たっては、生存時間モデルを用いることが望ましいと考えられるが、分散の解釈の容易さから線形モデルを採用している。また、モデルに説明変数を加えることや、加えた説明変数にランダム係数を想定することが可能な点もマルチレベル分析の特徴であるが、時刻選択における変動の

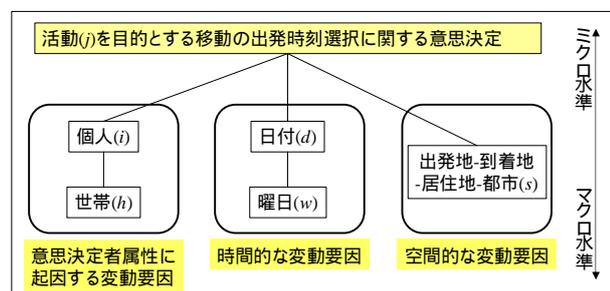


図1. 本研究で想定する階層関係

構造を理解することを目的としているため、式(1)で示すような定数項とランダム変数のみを用いた定式化を行っている。観測可能な要因によってどの程度の変動が説明できるかに関しては今後の課題としたい。

モデルを同定するための尤度関数は、データ毎に式(5)で定義される。式中の多重積分を近似的に計算するために適応型求積法(Adaptive Quadrature Methods)を用いて尤度を最大化する。

$$L_j(\mu^j, \sigma^j / y^j) = \int_{\mathbf{u}} p_j(y^j / \mu^j, \mathbf{u}^j) f_j(\mathbf{u}^j / \sigma^j) d\mathbf{u} \quad (5)$$

ここで、 $f_j(\mathbf{u}^j / \sigma^j)$ は、平均0、分散 $\sigma_{ihj}^2, \sigma_{hj}^2, \sigma_{dwj}^2, \sigma_{wj}^2, \sigma_{sj}^2$ に従う5次元正規分布である。また、 $p_j(y^j / \mu^j, \mathbf{u}^j)$ は平均 μ^j 、分散 σ_{0j}^2 に従う正規分布であり、通常の回帰モデルの尤度関数である。なお、各活動目的に対する出発時刻選択に相関関係が存在するものと考えられるが、ここでは独立であると仮定し、活動毎にモデルを同定する。

3. データセット

本研究では、1999年ドイツのカールスルーエ・ハレで行われた6週間(42日間)の交通行動データを用いる。表1に活動目的別トリップ数(=サンプル数)、サブグループ数を示す。なお、「その他」の活動はサンプル数が少ないことから分析の対象としない。日付のサブグループが119日間あるのは、プレ調査が1999年5月31日~7月25日、本調査が1999年9月13日~11月14日の計119日間を対象に行われたためである。データの詳細はAxhausenら⁹⁾を参考にされたい。

4. 分析結果

推定結果を表2に示す。 χ^2 検定の結果から、ランダム変数を考慮することにより統計的に有意な改善が見られる。ランダム変数の推定結果は別途表3に示している。なお、各ランダム変数が有意に影響しているかどうかは、該当するランダム変数を除いた最終尤度と、含んだ最終尤度に対して χ^2 検定を行うことで評価している¹⁰⁾。

表1. 活動目的別トリップ数、サブグループ数

トリップ目的	トリップ数 (サンプル数)	サブグループ数				
		意思決定者属性		時間要素		空間要素
		個人	世帯	日付	曜日	出発地-到着地 -居住地-都市*
送迎	1,749	244	127	109	7	78
私用	3,998	348	159	113	7	88
業務	1,440	143	99	95	7	74
学校	2,576	114	65	99	7	47
仕事	4,761	193	120	112	7	69
日常買物	4,653	343	162	116	7	85
非日常買物	1,846	332	158	105	7	78
レジャー	8,720	360	161	119	7	97
その他	242	76	61	67	7	39
帰宅	22,261	361	162	119	7	45
全体	52,246	361	162	119	7	115

* 出発地, 到着地, 居住地, 都市の組み合わせによってサブグループを作成(出発地, 到着地, 居住地は(CBD, 都心部, 郊外, その他)の4つ, 都市はカールスルーエとハレの2つに分類)

表3から、個人属性、空間要素に起因する変動要因は、全ての活動目的に対する出発時刻選択に有意に影響することがわかる。また、業務、学校、仕事といった必須活動を除く全ての活動に対して、世帯属性に起因する変動要因がその出発時刻選択に大きな影響を持つことがわかる。特に、非日常買物、レジャーにおいては、世帯属性の分散値が個人属性の2倍以上の値を示している。このことから、これらの活動の出発時刻を対象とした分析を行う場合においては、世帯単位の影響を考慮した解析が必要なものと考えられる。また、時間要素に起因する変動に関しても、日常買物、非日常買物、レジャーといった、時刻選択に対して自由裁量可能な活動に大きな分散値がみられた。一方で、業務、学校、仕事などといった

必須活動に対しては、世帯属性、時間要素（日付、曜日）共に出発時刻選択に影響を与えない可能性が高い。

表4に各変動要因の全変動に対する分散比を示す。意思決定者属性による影響は、全ての活動目的に対して10%を超えており、3つの変動要因の中では、総じて最も大きい変動要因であることがわかる。一方で、空間要素に起因する変動は、業務、学校、仕事において大きいものの、その他の活動に対しては全変動（全分散）の2.1~5.7%を説明するに留まっている。このことは、ゾーンをはじめとする空間的な集計を行い、分析の基本単位をゾーンレベルに設定した時点で、すなわち、意思決定者属性、時間要素に起因する変動を平均化した時点で、出発時刻選択の全変動に対する2.1~5.7%のみを説明する

表2. 推定結果（ランダム変数除く）

活動目的	μ^j		LL(0)	LL(C)	LL(β)	χ^2 検定 -2[LL(C)-LL(β)]	サンプル数
	パラメータ	t値					
送迎	888.10	53.74	-14,399	-12,281	-12,154	254.00 **	1,749
私用	791.70	48.57	-32,428	-26,981	-26,713	536.08 **	3,998
業務	722.91	44.14	-11,569	-9,714	-9,583	261.07 **	1,440
学校	610.00	26.99	-19,750	-16,401	-15,963	876.58 **	2,576
仕事	612.80	34.21	-36,926	-31,943	-30,845	2196.70 **	4,761
日常買物	781.50	28.95	-37,668	-31,113	-30,265	1695.48 **	4,653
非日常買物	800.51	38.33	-15,019	-12,177	-11,952	450.84 **	1,846
レジャー	901.85	41.44	-71,995	-59,783	-58,763	2040.58 **	8,720
帰宅	918.52	63.08	-184,180	-154,528	-153,465	2125.40 **	22,261

** 1%有意

表3. 推定結果（ランダム変数）

活動目的	意思決定者属性		時間要素				空間要素		残差	全分散		
	個人		世帯		日付		曜日				出発地-到着地 -居住地-都市	
	$\sigma^2_{ih/j}$	(χ^2)	$\sigma^2_{h/j}$	(χ^2)	$\sigma^2_{dw/j}$	(χ^2)	$\sigma^2_{w/j}$	(χ^2)				$\sigma^2_{s/j}$
送迎	8324.7	(28.2) **	6943.4	(7.96) **	374.5	(0.51)	56.9	(0.09)	3491.5	(19.5) **	55092.7	74283.5
私用	4575.3	(81.2) **	4034.1	(20.5) **	182.2	(2.11)	1143.5	(37.4) **	1533.2	(25.7) **	32994.6	44463.0
業務	7510.4	(36.4) **	0.0	(0)	26.9	(0.01)	216.8	(2.24)	5416.8	(102) **	30823.0	43993.8
学校	6182.3	(65.8) **	4391.7	(2.27)	0.0	(0)	78.0	(5.83) *	12766.0	(269) **	12109.0	35527.0
仕事	16293.0	(561) **	1372.8	(0.45)	0.0	(0)	44.6	(2.04)	9798.2	(426) **	21647.0	49155.6
日常買物	4531.9	(145) **	7014.9	(42.1) **	0.0	(0)	4356.9	(160) **	1015.6	(28.1) **	22798.0	39717.3
非日常買物	883.1	(3.38) +	6804.8	(49.5) **	717.3	(13.2) **	2232.3	(49.2) **	1019.2	(18.1) **	20343.9	32000.7
レジャー	3226.1	(141) **	6727.2	(54) **	253.0	(9.02) **	2432.9	(115) **	3057.3	(192) **	38408.0	54104.5
帰宅	3789.4	(459) **	3276.0	(27.7) **	0.0	(0)	735.3	(104) **	1377.7	(143) **	54944.0	64122.4

χ^2 は該当するランダム変数を除いた場合の最終対数尤度LL(β)と含んだ場合の最終対数尤度LL(β)に対する検定 ** 1%有意, *5%有意, +10%有意

表4. 各変動要因の分散比率

活動目的	意思決定者属性			時間要素			空間要素		残差	全分散
	個人	世帯	グループ内合計	日付	曜日	グループ内合計	出発地-到着地 -居住地-都市			
	$\sigma^2_{ih/j}$	$\sigma^2_{h/j}$	$\sigma^2_{ih/j} + \sigma^2_{h/j}$	$\sigma^2_{dw/j}$	$\sigma^2_{w/j}$	$\sigma^2_{dw/j} + \sigma^2_{w/j}$		$\sigma^2_{s/j}$		
送迎	(11.2%)	(9.3%)	20.6%	(0.5%)	(0.1%)	0.6%	4.7%	74.2%	100.0%	
私用	(10.3%)	(9.1%)	19.4%	(0.4%)	(2.6%)	3.0%	3.4%	74.2%	100.0%	
業務	(17.1%)	(0.0%)	17.1%	(0.1%)	(0.5%)	0.6%	12.3%	70.1%	100.0%	
学校	(17.4%)	(12.4%)	29.8%	(0.0%)	(0.2%)	0.2%	35.9%	34.1%	100.0%	
仕事	(33.1%)	(2.8%)	35.9%	(0.0%)	(0.1%)	0.1%	19.9%	44.0%	100.0%	
日常買物	(11.4%)	(17.7%)	29.1%	(0.0%)	(11.0%)	11.0%	2.6%	57.4%	100.0%	
非日常買物	(2.8%)	(21.3%)	24.0%	(2.2%)	(7.0%)	9.2%	3.2%	63.6%	100.0%	
レジャー	(6.0%)	(12.4%)	18.4%	(0.5%)	(4.5%)	5.0%	5.7%	71.0%	100.0%	
帰宅	(5.9%)	(5.1%)	11.0%	(0.0%)	(1.1%)	1.1%	2.1%	85.7%	100.0%	

分析フレームを採用することを意味する。また、断面データに基づく買物活動の分析（出発時刻選択）は、9.2~11.0%の時間要素に起因する変動を無視することになり、分析結果に系統誤差が残る可能性がある。

以上、意思決定者属性、時間要素、空間要素に起因する変動に関する考察を行った。しかしながら、ここで無視できないのは、ほとんどすべての活動において最も大きな変動比率を示すのは残差 σ_{0ij}^2 である点である。残差は、時間要素、空間要素に起因する変動を除いた個人内変動として定義できる。すなわち、サブグループ間（時間要素、空間要素、意思決定者属性）の相互作用、過去の行動履歴による影響、他者との関わりから生まれる行動など、各個人の意思決定文脈に依存した変動がそれに該当する。もちろん、これらの変動要因を全て捉えることは不可能ではあるものの、残差 σ_{0ij}^2 が全変動に対して大きな割合を占めることから、個人内変動の理解を進める必要性は高いといえる。

5. おわりに

本研究では、マルチレベル分析を用いて、出発時刻選択における変動構造を示した。具体的には、出発時刻選択における全変動を、意思決定者属性に起因する変動（個人・世帯）、時間要素に起因する変動（日付・曜日）、空間要素に起因する変動（出発地・到着地・居住地・都市）に分散を分解し、その分散値を定量的に示した。分析結果から得られた知見を以下にまとめる。

- i. 意思決定者属性に起因する出発時刻選択の変動は、活動種類を問わず大きい。
- ii. 時間要素に起因する出発時刻選択の変動は、買物活動、レジャーにおいて大きい。
- iii. 空間要素に起因する出発時刻選択の変動は、必須活動（業務・学校・仕事）において大きい。
- iv. 残差（時間要素、空間要素に起因する変動を除いた個人内変動）は、学校、仕事を除く全ての活動目的に対して50%以上の変動比率を占める。

以上の知見は、交通行動の捉え方をよりミクロな視点へと移してきた交通行動分析の発展経緯と合致するものである。すなわち、主に通勤・通学目的の移動からくるピーク時の渋滞緩和を、空間的な集計を伴って分析する手法(iii)から、意思決定者属性の違いに起因する変動を捉える非集計分析へ(i)，さらには、買物やレジャー活動の重要性が高まるとともに、時間的な変動、個人内変動をより正確に捉えようとする動学的な視点(ii, iv)が重要となってきた経緯と一致している。

今後、残差 σ_{0ij}^2 が全変動に対して大きな割合を占めることから、よりミクロな視点から交通行動を理解する必

要性は高いものと考えられる。また、よりミクロな視点から現象を記述する場合に問題となる、マクロレベルにおける分析との整合性を考えるにあたって、複数の階層を同時に扱うマルチレベル分析が一つの有用な手段として期待される。

参考文献

- 1) 北村隆一: 変動についての試行的考察, 土木計画学研究・講演集, No. 26, 2002 (CD-ROM).
- 2) Pas, E. I.: Intrapersonal variability and model goodness-of-fit, *Transportation Research Part A*, Vol. 21, pp. 431-438, 1987.
- 3) Bhat, C. R., Sivakumar, A., Axhausen, K. W.: An analysis of the impact of information and communication technologies on non-maintenance shopping activities, *Transportation Research Part B*, Vol. 37, pp. 857-881, 2003.
- 4) Bhat, C. R., Frusti, T., Zhao, H., Schonfelder, S., Axhausen, K. W.: Intershopping duration: an analysis using multiweek data, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, pp. 39-60, 2004.
- 5) Bhat, C. R., Srinivasan, S., Axhausen, K. W.: An analysis of multiple interepisode durations using a unifying multivariate hazard model, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, pp. 797-823, 2005.
- 6) Kitamura, R., Yamamoto, T., Susilo, Y. O., Axhausen, K. W.: How routine is a routine? An analysis of the day-to-day variability in prism vertex location, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, pp. 259-279, 2006.
- 7) Susilo, Y. O., Kitamura, R.: Analysis of Day-to-Day Variability in an Individual's Action Space: Exploration of 6-Week Mobidrive Travel Diary Data, *Transportation Research Record*, 1902, pp. 124-133, 2005.
- 8) Goldstein, H.: *Multilevel statistical models*, 2nd Edition, London: Arnold, 1995.
- 9) Axhausen, K. W., Zimmermann, A., Schonfelder, S., Rindsfuser, G., Haupt, T.: Observing the rhythms of daily life: A six-week travel diary, *Transportation*, 29, pp. 95-124, 2002.
- 10) Baayen, R. H., Davidson, D. J., Bates D. M.: Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items, *Journal of Memory and Language*, special issue on Emerging Data Analysis Techniques, 2008 (Forthcoming; URL: <http://www.ualberta.ca/~baayen/publications/baayenDavidsonBates.pdf>).
- 11) Bhat, C. R.: A multi-level cross-classified model for discrete response variables, *Transportation Research Part B*, Vol. 34, pp. 567-582, 2000.
- 12) Goulias, K. G.: Multilevel analysis of daily time use and time allocation to activity types accounting for complex covariance structures using correlated random effects, *Transportation*, 29, pp. 31-48, 2002.