

世帯の自動車走行量の人口密度弾力性*

Population Density Elasticity of Household's Annual Vehicle Mileage*

谷下雅義**・坂本将吾***・川野正史***

By Masayoshi TANISHITA**, Shogo SAKAMOTO*** and Masashi KAWANO***

1. はじめに

人口密度が高いほど一人あるいは世帯あたりの自動車走行量が少ないことは、Newman and Kenworthy (1989)¹⁾以降盛んに研究されてきた。筆者も単に人口密度との回帰を行うのではなく、所得や燃料価格など関連する変数も取り入れて都市単位での自動車走行量やガソリン消費量に関する人口密度の弾力性を推計してきた (Tanishita (2006)²⁾)。その結果として、人口密度を1%高めれば走行量やガソリン消費量が0.3~0.5%減るといった知見が得られるが、これまでの研究は以下の2つの課題を有していた。

1つは集計データを用いた分析の場合で、いわゆる集計バイアスが発生するということである (Tenn (2006)³⁾)。この課題に対しては、個票データを用いることで回避可能であり、近年では個票データによる分析が主流となっている (Bento et al. (2005)⁴⁾)。

もう一つは、人口密度の高いところに住む人はそもそも運転が好きでないという選好を持っているだけであり、人口密度は主要な変数ではない、いわゆる Self selection バイアスの可能性である (たとえば、Golob and Brownstone (2005)⁵⁾ や Mokhtarian and Cao (2008)⁶⁾)。この場合、人口密度の影響を過大に推計してしまう可能性がある (Kitamura et al. (1997)⁷⁾)。

実際、個票データを用いた分析では、人口密度は統計的に有意なパラメータ値が得られるものの、本研究でも後述するように、決定係数が0.1を下回るという結果がしばしばである。しかしながら、一般には各世帯の選好に関するデータは別途慎重に設計されたアンケートをとるなどしない限り入手困難である^{注1)}。

*キーワード：自動車利用、人口密度、潜在クラス回帰

**正員、博(工)、中央大学理工学部土木工学科
(東京都文京区春日一丁目13番地27号,
TEL03-3817-1810, FAX03-3817-1803)

***学生員、中央大学大学院理工学研究科
(東京都文京区春日一丁目13番地27号,
TEL03-3817-1817, FAX03-3817-1803)

そこで本研究は、世帯の選好の多様性を表現する手法として潜在クラス回帰モデルを用いることにより、観測された結果から、複数のクラスに世帯を分類し、かつそれらのクラスの選好が表現されたパラメータの検討を通じて人口密度が自動車走行量に及ぼす影響を定量的に分析することを目的とする。もし一部のクラスにおいて人口密度が統計的に有意でないということが示されれば、そうしたクラスに属する世帯の人口密度を高めても自動車走行量は削減しない。またそうした世帯の特徴がわかれば、立地を誘導し、コンパクトシティの形成を目指す施策の検討にも有用な知見を提供できる。

2. Self Selectionに関する先行研究

Mokhtarian と Cao は環境 (built environment)、態度 (attitude) と交通行動にかかわる self selection を扱った28の先行研究のレビューを行っている。そしてこの問題への対処法として、表1に示す方法があることを明らかにしている。

自動車の走行量を扱った研究として、まず Bagley and Mokhtarian (B&M) (2002)⁸⁾ は統計的制御により、アンケート調査をもとに得られた自動車や公共交通が好

表1 Self selection バイアスへの対処法

方法	備考
直接質問	質問に伴うさまざまなバイアスの発生
統計的制御	態度に関する変数を加えて環境(人口密度)の影響を推定
操作変数法	操作変数を用いて環境を表し、態度に関する変数は誤差項として扱い、操作変数と相関がないものとして影響を推定
サンプル選択モデル	環境の選択を説明する式を構築し、残差相関を考慮して環境のグループごとに影響を推定
ジョイントモデル	・非集計モデル ・構造方程式モデリング
時系列分析	態度に関する変数を制御可能

Mokhtarian and Cao(2008)⁸⁾をもとに作成

きたどうかといった態度変数やどのような週末を過ごしているかから分類したライフスタイル変数を加えて分析を行い、これらが交通行動を規定する主たる要因であり、居住地（環境）の影響はあるが小さいことを示した。

Handy et. al. (2005)⁹⁾はクロスセクションデータではB&Mと同じであるが、時系列データを用いた場合は逆に環境の影響の方が大きいことを示した。Golob and Brownstone (2005)⁵⁾は構造方程式モデリングにより、平方mile当り1,000住宅数が減少すると、年間自動車走行量が1,200mile増加することを明らかにしている。

Schwanen and Mokhtarian (2005)¹⁰⁾は、居住地と態度（都心が好きか郊外が好きか）のミスマッチと交通行動に着目した研究であるが、self selectionの影響を除去した上で環境は自動車走行量に影響を及ぼすことを明らかにしている。

わが国においては、自動車走行量を対象とはしていないものの、藤井・染谷(2007)¹¹⁾は、転居前の交通行動が居住地選択と転居後の交通行動の双方に影響を与えているという仮説を検証している。また中道・谷口(2008)¹²⁾は、転居者のみを分析対象とすることで選好の要因を制御し、中心都市に転居した世帯は自動車利用日数が減少しているという結果を得ている。

いずれもself selectionの影響がある、あるいはその影響の存在を前提に分析を行っており、環境のみならず選好・態度も自動車走行量に影響を及ぼしているといえよう。すなわち、選好の違いを考慮しないモデリングは環境の影響を過大に推定してしまう可能性がある。

本研究は、潜在クラス回帰モデルを用いて選好の多様性を表現することで、環境が交通行動に与える影響を分析するものである。

3. 方法

潜在クラス回帰モデルは、マーケティングの分野を中心に研究がすすめられているが、交通や立地行動の分野でも研究が行われている¹³⁻¹⁶⁾。具体的には、クラス数をKとするとき

$$h(y|x, \varphi) = \sum_{k=1}^K \pi_k f(y|x, \theta_k) \quad (1)$$

$$\pi_k \geq 0, \quad \sum_{k=1}^K \pi_k = 1$$

ここで y は x を説明変数とする被説明変数であり、 $f(y|x, \theta_k)$ はその確率密度関数（パラメータ θ_k ）を

表す。 π_k はクラスkに属する（事前）確率であり、 $h(y|x, \varphi)$ は $x, \varphi = (\pi_1, \dots, \pi_k, \theta_1, \dots, \theta_k)$ を所与としたときの y の条件付き確率密度関数を表す。

(x, y) が観測されたとき、クラスjに属する事後確率は

$$P(j|x, y, \varphi) = \frac{\pi_j f(y|x, \theta_j)}{\sum_{k=1}^K \pi_k f(y|x, \theta_k)} \quad (2)$$

となる。クラスが選好を表すグループに相当し、各クラス(k)の選好が各クラスのパラメータ θ_k として反映されていると考えることができる。

パラメータは対数尤度

$$\log L = \sum_{n=1}^N \log \left(\sum_{k=1}^K \pi_k f(y_n | x_n, \theta_k) \right) \quad (3)$$

を最大とするよう、EMアルゴリズム(Dempster et. al. 1977¹⁷⁾)を用いて推定される。モデルの適合度はベイジアン情報量規準(BIC)あるいは赤池情報量規準(AIC)により評価される。なおBICは過小に、AICは過大にクラス数を分割する傾向にあることが指摘されている¹⁸⁾。

本研究は世帯別の自動車走行量を被説明変数、世帯属性と人口密度を説明変数とする回帰モデルを用いて、①クラスをわける意味はあるか？また②複数のクラスにおいて人口密度はどの程度有意な変数か？を検討する。

4. データ

スイスの個票データ(Mikrozensus2000)を用いる。世帯の所得(8階級)¹⁹⁾、住所(コミューン(2000年時点で2,896存在する))、世帯人員数、言語(ドイツ語/その他)、住宅タイプ(戸建/その他)、所有する別荘の数、自動車保有台数、保有する自動車のエンジンサイズ、年間自動車走行量(km)²⁰⁾などが記載されている。ここに居住地の環境を表す変数として、最小の行政単位であるコミューンの人口密度(人/ha)をスイス統計局から入手し、追加した。

スイスの世帯自動車保有率はきわめて高く、Mikrozensusデータでは約8割である。今回は年間自動車走行量が50km以上である12,855世帯を対象とした。約半数が単身者であり、ドイツ語を話す世帯が約6割、集合住宅居住世帯の比率が約65%、別荘数の平均は0.13にすぎず、8割以上の人は所有していない。

単純に人口密度と世帯の年間自動車走行量の関係を示したものが図1である。人口密度が高いほど自動車走行量が短くなる傾向は読み取れるが、ばらつきがきわめて大きい。他の変数の影響も考慮する必要があるし、こ

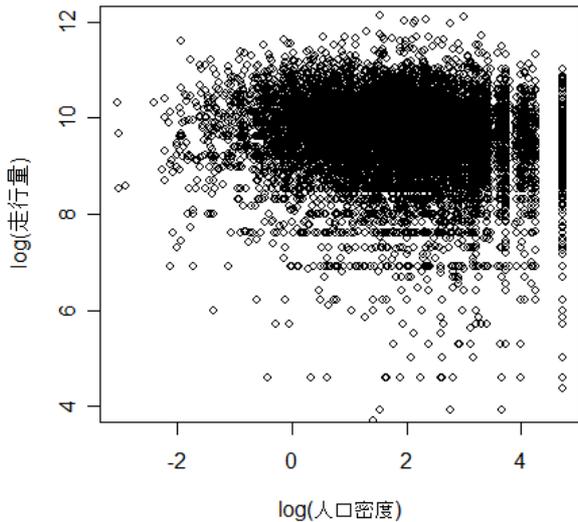


図1 人口密度（対数：横軸）と自動車走行量（対数：縦軸）の関係（サンプル数：12,855）

ここに数本の直線を引く，すなわち潜在クラスに分割することも可能かもしれないことがわかる。

5. 結果

(1) クラス数 (K)

クラスをわけない (K=1) よりもクラスをわけた方が BIC/AIC は小さく，BIC に基づく最適クラス数は 2，AIC では 5 という結果が得られた (表 2)．なお説明は省略するが，単身世帯と非単身世帯をわけて推定しても同じ結果であった．しかし K=5 においては，切片は異なるが他のパラメータは似た値を示すクラスが 2 つ作成され，過度にクラス分けされていると判断し，K=1, 2, 4 における結果について検討することにした．

(2) 各クラスの特徴

推計結果を表 3 に示す．まずクラスをわけない

表 2 クラス数別 BIC および AIC

K	1	2	3	4	5	6
BIC	29843	28081	28108	28165	28225	28237
AIC	29784	27955	27914	27905	27898	27910

K=1 においては，すべてのパラメータは統計的に有意に推定されるが決定係数は 0.1 であった．

次に BIC が最大となる K=2 においては，93% の世帯がクラス 1 に分割されるが，クラス 1，2 ともに人口密度のパラメータは統計的に有意にマイナスである．すなわち，人口密度は選好にかかわらず走行量に影響を及ぼす変数であるといえる．またクラス 1 は人口密度，所得ともにパラメータ（弾性値でもある）が，クラス 2 よりも小さく，これらの変化に相対的に影響をうけにくい世帯であることを示す．

K=4 については，主として所得弾力性の大きさによってクラスが形成された．約 6 割の世帯は K=2 のクラス 1 の世帯とほぼ同じ値である．クラス 2 やクラス 3 は，所得弾力性が高い世帯であり，人口密度の弾力性もクラス 1 と比較して相対的に高い．興味深い点は約 7% の世帯は，人口密度の影響はうけない（加えて，所得や世帯人員数の影響もうけない）という結果となった．こうした世帯は K=5 としたときも抽出されるが，K=3 としたときは抽出されない．このクラスの世帯は，人口密度が高くなったとしても自動車走行量は変化しないといえる．

それぞれのクラスの特徴をもう少し詳細にみるために，図 2，3 に K=2 および K=4 のときのクラスごとの説明変数そして保有台数や保有する車種について検討を行った（これらを説明変数に加えなかった理由は，残差がこれらの変数と相関することが予想され，適切なパラメータが得られない

表 3 パラメータ推定結果（被説明変数：log(自動車走行量)）

クラス数	1		2				4							
			1		2		1		2		3		4	
事後確率			93%		7%		59%		24%		11%		7%	
	パラメータ	t値	パラメータ	z値	パラメータ	z値	パラメータ	z値	パラメータ	z値	パラメータ	z値	パラメータ	z値
定数項	6.35	51.42	6.74	56.90	5.01	7.15	7.86	30.10	3.27	1.74	1.23	1.33	8.13	3.04
log(人口密度)	-0.10	-18.39	-0.09	-18.71	-0.12	-4.29	-0.09	-10.49	-0.15	-2.71	-0.13	-4.79	-0.07	-0.78
log(世帯人員数)	0.17	11.77	0.13	9.67	0.35	4.53	0.14	5.51	0.42	4.15	0.03	0.53	0.15	0.57
log(所得)	0.36	25.00	0.33	24.34	0.40	4.92	0.21	6.79	0.62	3.09	0.97	9.31	0.02	0.05
非ドイツ語ダミー	0.094	6.45	0.12	9.00	-0.06	-0.78	0.14	4.99	-0.07	-0.66	0.05	0.65	-0.07	-0.26
集合住宅ダミー	0.043	2.63	0.01	0.54	0.19	2.19	-0.01	-0.31	0.25	2.09	0.07	0.83	0.09	0.30
log(別荘数+1)	0.18	6.15	0.12	4.45	0.45	2.85	0.12	2.54	0.70	1.98	-0.07	-0.45	-0.07	-0.15

注：有意水準 5% で係数=0 という仮説が棄却されない変数を斜体で示した。

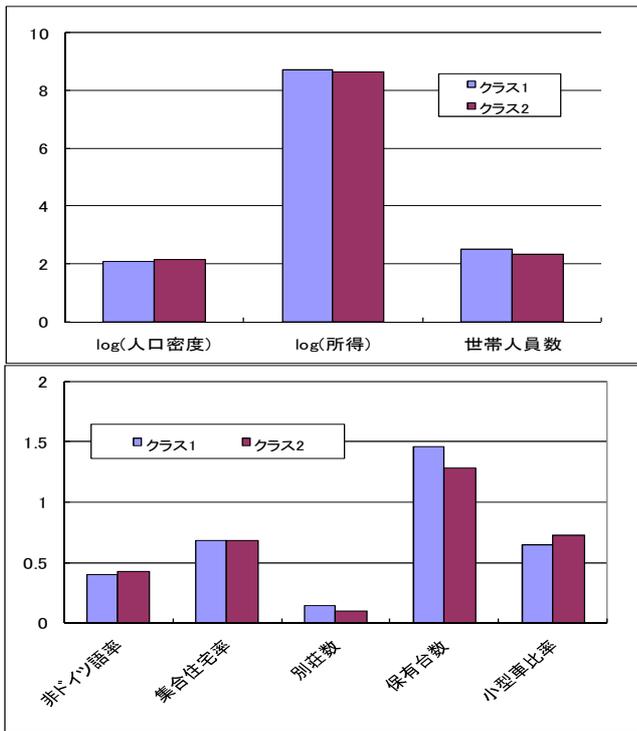


図2 K=2のときのクラス別平均値

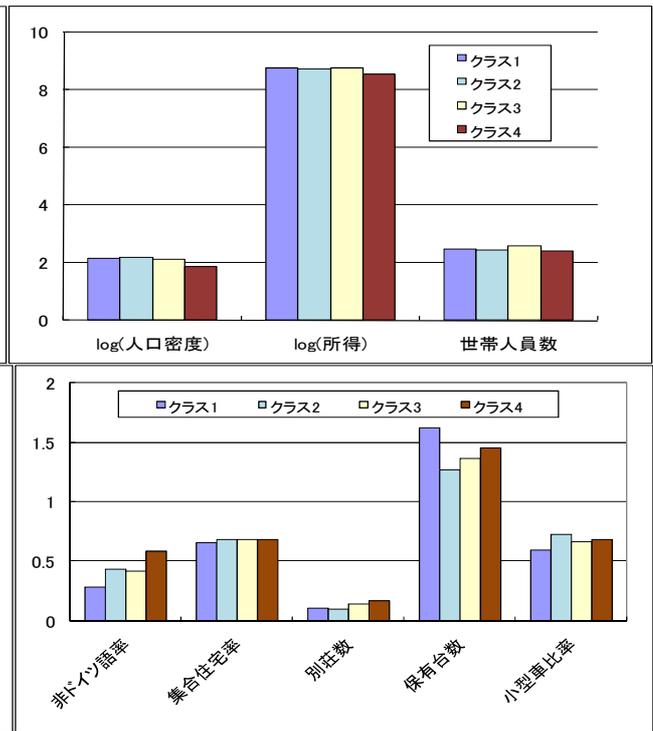


図3 K=4のときのクラス別平均値

と判断したためである)。K=2において、人口密度弾力性の大きい世帯（クラス2）は、相対的に保有台数が少なく、小型車を保有する比率が高い。これはK=4でも同じである。一方、K=4において所得や人口密度の影響を受けない世帯（クラス4）は、非ドイツ語圏で人口密度の低い地域に居住し、別荘数の多い世帯と推測された^{注4)}。

6. おわりに

以上、本研究は同じ嗜好をもつクラスへの分割と、それぞれのクラスの特徴の推定を同時に行う潜在クラス回帰モデルを用いて、スイスの世帯における自動車走行量に関する人口密度の影響を分析した。その結果、BICを最小とするクラス数は2であり、このときクラスによらず人口密度の影響はあり、その弾力性は-0.09, -0.13であった。加重平均した弾力性は-0.09であり、クラスを分割しない場合より約1割小さい値となった。BICは落ちるがクラス数を4としたとき、加重平均した弾力値はクラス分割しない場合とほぼ同じであったが、約7%の世帯は所得や人口密度の影響を受けない世帯として抽出された。そうした世帯は非ドイツ語圏で人口密度の低い地域に居住し、別荘数の多いことが推測された。

人口密度弾力性は都市レベルの集計データを用いた場合(0.3-0.5)より小さい値が得られたが、ゼロではなく、立地誘導によるコンパクト化の意義はあるといえる。また今回の分析結果より、人口

密度弾力性の大きい世帯は、相対的に保有台数が少なく、小型車を保有する確率が高い可能性が示されたが、そうした世帯が人口密度の低い地域に居住しているケースも少なくない。今後、こうした知見を踏まえて費用対効果の高い立地誘導策について検討したい。

潜在クラス回帰モデルでは、推定されたクラスごとのパラメータに嗜好・態度が反映されていると仮定して結果の解釈を行うものであること、そして各クラスに帰属する確率は求まるものの、真の嗜好・態度が得られるわけではないことに留意が必要である。また本研究では主要都市までの距離など空間属性やコミュニティ単位で得られる緑の党への投票率といった情報を活用していない。さらに保有台数や保有する車種を被説明変数として加えることで、より正確に嗜好の多様性を把握したい。最後に、いうまでもないが人口密度は本来内生変数であって、今回のように外生変数として扱うのは短期的には問題がないと考えるが、長期的な観点からは適切ではない。人口密度の定義とあわせ、住宅、自動車保有、交通行動を同時に扱った個票データを用いた分析¹⁹⁾を行って、これらの複雑な関係および世帯の特性を考慮した住宅(地)供給行動についての理解を深めたいと考えている。

謝辞

本研究は、Reto Tanner氏 (University of Bern) との共同研究の成果の一部である。またスイスの統計データの収集においては、スイス統計局の協力を得た。また

本稿の作成にあたり、第38回土木計画学研究発表会(和歌山大学)で報告した際、会場からたくさんの有益なコメントをいただいた。記して謝意を表します。

注

- 1) こうした主要な変数を除いて統計分析を行うといわゆる過小定式化バイアス(omitted variables bias)が生じる(清水(2008)²⁰)。
- 2) 所得は8階級の中央値を用いて変数として扱った。
- 3) 年間走行量50km未満の自動車については保有動機が車を使用するためではないと考え、分析対象からはずした。また自動車走行量については、10,000kmや20,000kmといった数値での回答が少なからず存在する(図1からも読み取れる)。そのため一部の回答者は正確な走行量ではなく、おおよその値を回答していると推測される。今回はそれらの値について補正を行わずに分析を行っている。どういう世帯がおおよその値を回答するかについてのモデリングを行った上でデータを補正して分析するなど工夫が可能であるが、この点については今後の課題としたい。
- 4) 今回は分析の対象外であるが、所得弾力性は先行研究よりも小さめの値を得ている。この主たる原因は、データのところで記述したように、スイスは所得水準また自動車保有率がきわめて高いため、所得の変化の影響を受けにくいためであると考えている(Dargey and Gately(1997))。

参考文献

- 1) Newman W.G. and J.R. Kenworthy : Gasoline Consumption and Cities, *Journal of the American Planning Association*, 55, 24-35, 1989.
- 2) Masayoshi Tanishita : Transport Energy Intensity and Mobility Trends in The World from 1980 to 1995, *Journal of Global Environmental Engineering*, 11, 59-73, 2006.
- 3) Tenn, Steven : Avoiding aggregation bias in demand estimation: A multivariate promotional disaggregation approach, *Quantitative Marketing and Economics*, 4, 383-405, 2006.
- 4) Bento, Antonio, Maureen Cropper, Mushfiq Mobarak, and Katja Vinha :The Impact of Urban Spatial Structure on Travel Demand in the United States. *Review of Economics and Statistics* 87(3), 2005.
- 5) Thomas F. Golob and David Brownstone : The Impact of Residential Density on Vehicle Usage and Energy Consumption, Working paper, 2005.
<http://orion.oac.uci.edu/~dbrownst/JUESprawl.pdf>
(Access: 13JUL2008)
- 6) Patricia L. Mokhtarian and Xinyu Cao : Examining the Impacts of Residential Self-selection on Travel Behavior: A Focus on Methodologies, *Transportation Research Pt. B.*, 43(3), 204-228, 2008.
- 7) Kitamura, R, Mokhtarian P, Laidet L. : A Micro-Analysis of Land-use and Travel in Five Neighborhoods in the San Francisco Bay Area, *Transportation*, 24, 125-158, 1997.
- 8) Bagley and Mokhtarian : The Impact of Residential Neighborhood Type on Travel Behavior: A Structural Equations Modeling Approach, *Annals of Regional Science*, 36, 279-297, 2002.
- 9) Handy, S., X. Cao, and P.L. Mokhtarian : Correlation or Causality Between the Built Environment and Travel Behavior? Evidence from Northern California, *Transportation Research Pt. D*, 10, 427-444, 2005..
- 10) Tim Schwanen, Patricia L. Mokhtarian : What If You Live in the Wrong Neighborhood? The Impact of Residential Neighborhood Type Dissonance on Distance Traveled, *Transportation Research Pt. D*, 10(2), 127-151, 2005.
- 11) 藤井聡, 染谷祐輔 : 交通行動と居住地選択行動の相互依存関係に関する行動的分析, 土木計画学研究・論文集, 24(3), 481-488, 2007.
- 12) 中道久美子, 谷口守・松中亮治 : 転居を通じた都市コンパクト化による自動車依存低減策の実効性分析, 一大都市圏における転居前後の交通行動変化分析を通じて, 都市計画論文集, 43, CD-ROM, 2008.
- 13) Kurauchi, S., Morikawa, T. : An Exploratory Analysis with Discrete Choice Model with Latent Classes Considering Heterogeneity of Decision Making Rules, *Travel Behaviour Research - The Leading Edge*, ed. David Hensher, Pergamon, 409-423, 2001.
- 14) Greene, W.H., and Hensher, D.A., : A Latent Class Model for Discrete Choice Analysis: Contrasts with Mixed Logit, *Transportation Research Pt. B*, 37, 681-698, 2003.
- 15) Masashi Kuwano, Junyi Zhang and Akimasa Fujiwara : Representing Household Vehicle Holding Duration with Heterogeneous Distributions Based on Latent Class Approach, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 2007.
<http://www.cvg.ynu.ac.jp/G4/okamura/100401.pdf>
(Access: 13JUL2008)
- 16) Walker, L.J. and Jieping Li : Latent Lifestyle Preferences and Household Location Decisions, *Journal of Geographical Systems*, 9(1), 77-101, 2007.
- 17) Dempster A, Laird N, Rubin D. : Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM-Algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society*, B, 39, 1-38, 1977.
- 18) Andrews, Rick L., and Imran S. Currim : A Comparison of Segment Retention Criteria for Finite Mixture Logit Models,

Journal of Marketing Research, 40, 235-243, 2003.

19) Bhat, R. Chandra, Sudeshana Sen and Naveen Eluru : The Impact of Demographics, Built Environment Attributes, Vehicle Characteristics, and Gasoline Prices on Household Vehicle Holding and Use, *Transportation Research Part B*, 43(1), 1-18, 2009.

20) 清水千弘 : ヘドニック住宅価格関数の推定上の課題 -過少定式化バイアスへの対応-, 資産評価政策学, 10(2), 56-61, 2008.

21) Dargey J and D. Gately; Income's Effect on Car and Vehicle ownership, Worldwide: 1960-2015, *Transportation Research* 33A(7/8), 101-138, 1997

世帯の自動車走行量の人口密度弾力性*

谷下雅義**・坂本将吾***・川野正史***

本研究は、自己選択バイアスを考慮して、同じ選好をもつクラスへの分割と、それぞれのクラスの特徴の推定を同時に行う潜在クラス回帰モデルを用いて、スイスの世帯の自動車走行量に関する人口密度の影響を分析した。その結果、BICを最小とするクラス数は2であり、人口密度弾力性は-0.09, -0.13であった。BICは落ちるがクラス数を4としたとき、約7%の世帯は所得や人口密度の影響をうけない世帯として抽出された。そうした世帯は非ドイツ語圏で人口密度の低い地域に居住し、別荘数の多いことが推測された。人口密度弾力性は都市レベルの集計データを用いた場合より小さな値が得られたが、ゼロではなく、立地誘導によるコンパクト化の意義はあるといえる。

Population Density Elasticity of Household's Annual Vehicle Mileage *

By Masayoshi TANISHITA**, Shogo SAKAMOTO*** and Masashi KAWANO***

Self selection bias is one of the important issues in the impact analysis of built environment on travel behavior. In this paper, population density elasticity of household's annual vehicle mileage is estimated using micro data in Switzerland and latent class regression model. As a result, 2 classes model is selected from Bayesian Information Criterion, and the elasticity is -0.09-0.13, which is lower than that using regional aggregate data analysis. In case of 4 classes, about 7% households were not affected by income and population density. They are no-German speaking and live in rural area with many cottages.
