

# 高密度都市圏での交通エネルギー消費削減に向けた 土地利用政策の有効性

北村隆一<sup>1</sup>・山本俊行<sup>2</sup>・神尾 亮<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph. D. 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 工修 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻

<sup>3</sup>学生員 京都大学大学院 工学研究科土木システム工学専攻

本研究では世帯の交通エネルギー消費量、通勤交通機関、自動車保有台数、通勤距離を内生変数とする構造方程式モデルを1990年京阪神パーソン・トリップ調査結果を用いて推定し、世帯の交通エネルギー消費性向に考察を加えると同時に、このモデルを土地利用政策のエネルギー消費削減効果の分析に適用している。モデルの推定結果は、より高密度で職住近接型の土地利用を推進することにより世帯の交通エネルギー消費を削減することが可能であることを示唆している。しかしながら、既に高密度・混在型の土地利用が展開し自動車利用率が比較的低い京阪神都市圏で世帯交通エネルギー消費の大幅な削減を図るとすれば、都市圏外延部に居住し長距離通勤を行う世帯を対象とする土地利用政策が必要となることを本研究の結果は示唆している。

*Key Words: transportation energy consumption, land use policy, scenario analysis, simultaneous equations model system*

## 1. はじめに

迫りつつある化石資源の枯渇、地球温暖化の進行という状況の下、持続可能な交通体系の構築の重要性はとみに増している。この目的に向けて、よりエネルギー効率の高い交通手段への転換に加え、交通需要そのものを抑制する土地利用形態・都市構造の構築が提案されてきた<sup>1)</sup>。例えば、高密、混合型の施設配置により、徒歩・自転車により目的地へ移動することが可能な生活圏を創出し、乗用車に代表されるエネルギー集約型交通手段の利用抑制の可能性が検討されている。Urban village や pedestrian pocket などの概念がこれに対応する<sup>2)</sup>。また都市部の密度を増加させる (densification, infill), あるいは都市圏の空間的拡張を制限することにより (urban growth boundary), トリップ長の短縮、公共輸送機関の効率性の向上、そして一人乗り乗用車利用の抑制を図ることも提案されてきた。

しかしこれらの土地利用政策の多くは、低密で広域化した自動車依存型の都市圏を多く抱える米国で提案されたものである。日本の都市圏、特に三大都市圏では、高密・混合型の土地利用が展開し、鉄道網は高い水準で整備され、自動車の機関分担率は36%に留まる<sup>3)</sup>。果たしてこれら日本の大都市圏で土地利用政策により更なるエネルギー効率向上を図る余地はあるのだろうか。実際、林ら<sup>4)</sup>による都市間比較では、人口密度が1ヘクタール

当たり50から100人を超えるとエネルギー消費には変化が無いことが示されている。藤田・盛岡<sup>5)</sup>もエネルギー施策としての「都市構造の改善や都市の空間的配置の見直し」には慎重な立場を採っている。

この視点から本研究では京阪神都市圏での土地利用政策の有効性を評価することを目的に、1990年のパーソン・トリップ調査結果を基に世帯の交通エネルギー消費モデルを構築し、これを政策評価に適用している。このモデルは一日当たりの世帯エネルギー消費量、世帯主の通勤交通手段、自動車保有台数、及び通勤距離を内生変数として含み、これらを世帯属性、居住地・勤務地特性により説明するものである。世帯によるトリップ生成、あるいは個々のトリップの空間的分布、手段分担を考慮したものではない。本論文の目的は土地利用政策の有効性を簡便な解析により近似的に把握し、より詳細な研究の有用性・方向性を定めるとともに、得られた知見を今後の討議・研究の一助として供することにある。中小都市圏での土地利用政策の有効性についての検討は別の機会に行いたい。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では1990年京阪神パーソン・トリップ・データを用い世帯の交通エネルギー消費量を概観する。構造方程式モデルの推定結果が第3章に、その政策分析への適用が第4章に各々示されている。第5章に結論を示す。

表-1 交通機関別エネルギー消費係数

交通機関	消費係数*
鉄道	101
バス	179
自動車	602
原動機付二輪	158

\*単位: kcal/人・km

表-2a 世帯人員数のサンプル内での分布

世帯人員数	1	2	3	4	5	≥6	計
パーセント	23.8	26.2	18.3	20.8	7.6	2.3	100.0

表-2b 自動車保有台数のサンプル内での分布

保有台数	0	1	≥2	計
パーセント	34.4	46.2	19.4	100.0

表-2c 世帯通勤交通手段<sup>1</sup>のサンプル内での分布

通勤手段	勤労者無	自動車	その他	混合	計
グロス値 <sup>2</sup>	16.9	19.3	53.3	10.5	100.0
ネット値 <sup>3</sup>	-	23.2	64.1	12.7	100.0

<sup>1</sup>世帯が生成した全通勤トリップの交通手段を指す。

<sup>2</sup>グロス値は全世界帯に対する割合（パーセント）を示し、ネット値は全通勤世帯に対する割合（パーセント）を表わす。

表-3 通勤交通機関別世帯平均交通エネルギー消費量

	世帯タイプ			
	通勤者無	自動車 通勤	非自動車 通勤	混合手段 通勤
世帯当り	19	198	77	217
一人当り	12.4	76.5	28.7	60.2
トリップ当り	7.9	32.8	12.5	24.6

単位: 100 kcal

<sup>1</sup>自動車通勤世帯は全ての通勤トリップに自動車を利用している世帯、非自動車通勤世帯は通勤に自動車を利用していない世帯、そして自動車とそれ以外の手段を通勤に共用している世帯を混合手段通勤世帯と分類している。

## 2. 京阪神都市圏での世帯の交通エネルギー消費

本研究ではパーソン・トリップ・データを基に世帯の交通エネルギー消費量を推定している<sup>1)</sup>。各トリップのエネルギー消費量は表-1に示す機関別消費係数を用いて推定している。鉄道以外の係数値は川端ら<sup>2)</sup>により示される考えに基づくものであるが、鉄道の原単位の推計値は文献によりかなりの幅が見られる<sup>3)</sup>ため、運輸政策局の推計による全国平均値<sup>4)</sup>を用いている。京阪神都市圏においては原単位が全国平均より低いと考えられるため、本研究での自動車から鉄道への転換に伴うエネルギー消費削減量は幾分過小評価となるものと考えられる。原動機付二輪車の係数は本研究で推定したものである<sup>5)</sup>。徒歩、自転車などの動力を用いない交通手段によるトリップの場合エネルギー消費量は0としている。複数の交通機関が用いられた場合は代表交通機関の消費係数を用いた。本論文の解析では市区町村を地理的集計単位とし

表-4 居住地域自動車分担率別世帯平均交通エネルギー消費量

	居住地域自動車 分担率 <sup>1</sup>		
	低	中	高
平均交通エネルギー消費量 (単位: 100 kcal)			
世帯当り	79.3	123.0	181.5
一人当り	31.5	43.2	57.3
トリップ当り	14.6	20.2	28.1
人・km 当り	1.96	2.25	3.02
世帯当たり平均トリップ数	5.71	6.42	7.06
平均トリップ長 (km)	7.43	8.97	9.32
サンプル世帯数	65,973	59,699	13,140

<sup>1</sup>市区町村単位で発生トリップの機関分担率を集計、自動車が40%を超えるものを“高”、25%から40%を“中”、25%未満を“低”としている。

表-5 世帯平均交通エネルギー消費量

	自動車保有台数 <sup>1</sup>		
	0	1	≥2
平均交通エネルギー消費量 (単位: 100 kcal)			
世帯当り	37	117	205
一人当り	17.5	44.9	61.0
トリップ当り	8.9	19.4	27.1
人・km 当り	1.18	2.31	3.14
平均トリップ長 (km)	7.48	8.41	8.63
サンプル世帯数	47,928	64,217	27,041

<sup>1</sup>自動車保有台数が不明の世帯を除く。

て用いている。トリップ距離としては、パーソン・トリップ・データのトリップ・レコード中の、「ゾーン間距離」を用いた。

本節の解析は1990年の京阪神パーソン・トリップ調査に含まれる139,551世帯を対象としている<sup>1)</sup>。データに含まれる総個人数は380,955、総トリップ数は858,386である。これら世帯の世帯人員数、自動車保有台数、および通勤交通手段の分布を表-2に示す。サンプル世帯の2/3弱が少なくとも一台、約20%が複数の自動車を保有している。通勤に自動車を使用した世帯は30%弱に留まっている。

表-3に通勤交通手段別の平均エネルギー消費量を示す。サンプル世帯を通勤交通手段に基づき表に示す4種類に分類の上、5才以上の世帯構成員による、通勤を含むすべてのトリップの推定エネルギー消費量の総計を求め、グループ毎に平均した結果が示されている。通勤に自動車を利用している世帯は利用していない世帯に比べ一人当りで2.67倍、トリップ当りでは2.62倍の交通エネルギーを消費していることが分かる。

交通エネルギー消費量を居住地域での自動車分担率別に表-4に示す。自動車利用度の高い地域は都市圏外延部に位置するのが一般で、人員の多い世帯が居住する傾向にあることもあり、世帯当りの平均交通エネルギー消費量は低分担率地域の2.29倍である。一人当りで見

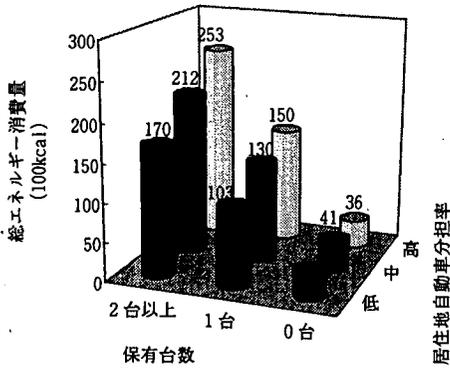


図-1a 自動車保有台数別居住地自動車分担率別総エネルギー消費量 (1世帯当たり)

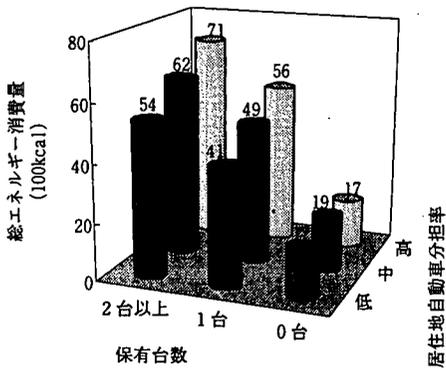


図-1b 自動車保有台数別居住地自動車分担率別総エネルギー消費量 (1人当たり)

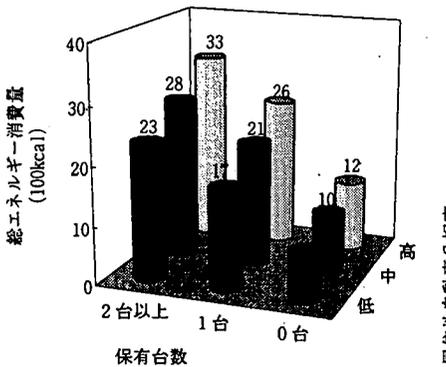


図-1c 自動車保有台数別居住地自動車分担率別総エネルギー消費量 (1トリップ当たり)

も高分担率地域の居住者の消費量は低分担率地域の1.82倍、またトリップ当りの消費量は1.92倍である。

表-5 に示す自動車保有台数別の平均エネルギー消費量は、自動車と世帯の交通エネルギー消費の関係を最も端的に表すものである。自動車を二台以上保有する世帯の消費量は一台も保有しない世帯の消費量の約5.5倍、一人当たりの消費量が約3.5倍、トリップ当りで約3倍で

ある。また一台保有する世帯の消費量は一台も保有しない世帯の約3.2倍、一人当たりで約2.6倍、トリップ当りで約2.2倍となっている。自動車保有と利用が世帯のエネルギー消費を押し上げる傾向にあることは明らかである。

自動車保有台数が与えられたとして、世帯のエネルギー消費量は居住ゾーンの特性と共に変化する。図-1は居住ゾーンの自動車分担率と世帯の自動車保有台数別に一日の平均エネルギー消費量を示している。世帯の総消費量、一人当たり消費量、およびトリップ当たり消費量のすべてが、世帯の保有自動車台数と居住ゾーンの自動車分担率の各々と正の相関を持つことが示されている。自動車保有台数と居住ゾーン特性の双方が世帯の交通エネルギー消費に独自の効果を与えることは明らかである。

世帯の交通エネルギー消費が自動車保有・利用と強い相関があることを以上の集計結果は示している。これは自動車保有・利用を抑制し、高密度で公共交通機関の整備された地域での居住を推進することにより、交通エネルギー消費の大幅な削減が可能であることを示唆するものである。次節以降の解析はより包括的な解析手法を用い世帯の交通エネルギー消費削減の可能性を定量的に把握することを目的としている。

### 3. 世帯の交通エネルギー消費の構造方程式モデル

世帯の交通エネルギー消費量は、前節の集計分析で扱われた要因に加え多数の要因の影響を受けていることは容易に想像される。本節では構造方程式モデルを用いた多変量解析を通じ、世帯の交通エネルギー消費の予測モデルの構築を試みる。モデル推定に当たっては計算時間を実際の範囲に収める目的で、前節のデータより10%の世帯を無作為に抽出、合計12,193世帯から成るサンプルを用いた。これらのうち9,937世帯のデータが通勤トリップを含んでいる。

モデルの内生変数(値がモデルの中で決定される、あるいは“説明”される、変数)は

- 一日当たりの世帯交通エネルギー消費量 (kcal),
- 通勤交通手段,
- 自動車保有台数, 及び
- 通勤距離 (km)

である。交通エネルギー消費に大きく影響すると考えられる通勤距離と自動車保有台数は共に内生変数として扱われ、モデルは外生変数として世帯属性と居住地・勤務地特性を用いてこれら内生変数を予測するという形を採っている。モデル構築に当たり考慮した変数の一覧を表-6に示す。居住地・勤務地の特性は前節と同様市区町村単位で集計しており、土地利用形態については共通の

表-6 モデル開発に用いられた変数

変数	定義	変数	定義
<b>内生変数</b>		民営事業所密度	(事業所数)/(ゾーン面積)
通勤距離	居住-勤務ゾーン間平均距離 (km)	小売店密度	(小売店数)/(ゾーン面積)
自動車保有台数	世帯が常時利用可能な自動車台数	スーパー密度	(スーパー軒数)/(ゾーン面積)
世帯主 通勤交通手段	1= 自動車が利用された場合, 0= それ以外	飲食店密度	(飲食店数)/(ゾーン面積)
世帯交通エネルギー消費量	パーソン・トリップ消費エネルギー総和 (kcal)†	金融機関密度	(金融機関数)/(ゾーン面積)
		居住地アクセシビリティ	付記参照
<b>世帯属性</b>		<b>勤務ゾーン属性</b>	
世帯人員数	5歳以上の世帯構成人員総数	従業員密度	(総従業員数)/(ゾーン面積)
勤労者数	世帯内就業者総数	DID人口比	(DID居住人口)/(ゾーン人口)
学生数	高校以上の学生数	昼夜人口比	(昼間人口)/(夜間人口)
子供数	5歳以上, 中学生以下の世帯構成員数	一次産業人口割合	(第一次産業従業者数)/(ゾーン総従業者数)
世帯主 年齢	年齢の常用対数値	二次産業人口割合	(第二次産業従業者数)/(ゾーン総従業者数)
世帯主 性別	1= 男性; 0= 女性	民営事業所密度	(事業所数)/(ゾーン面積)
世帯主 免許保有	1= 免許保有者; 0= 非保有者	小売店密度	(小売店数)/(ゾーン面積)
世帯主 一次産業従事	1= 一次産業従事; 0= それ以外	スーパー密度	(スーパー軒数)/(ゾーン面積)
世帯主 二次産業従事	1= 二次産業従事; 0= それ以外	飲食店密度	(飲食店数)/(ゾーン面積)
<b>居住ゾーン属性</b>		金融機関密度	(金融機関数)/(ゾーン面積)
人口密度	(ゾーン居住人口)/(ゾーン面積, km <sup>2</sup> )	勤務地アクセシビリティ	付記参照
DID人口比	(DID居住人口)/(ゾーン人口)	<b>ネットワーク属性</b>	
昼夜人口比	(昼間人口)/(夜間人口)	公共交通所要時間	居住-勤務ゾーン間公共交通平均所要時間 (分)
一次産業人口割合	(第一次産業従業者数)/(ゾーン総従業者数)	自動車所要時間	居住-勤務ゾーン間自動車平均所要時間 (分)
二次産業人口割合	(第二次産業従業者数)/(ゾーン総従業者数)	(自動車)-(公共)	所要時間差 (自動車-公共交通機関)

†徒歩・自転車トリップを除く

付記: アクセシビリティ指標は以下の様に定義した.

$$A_i = \sum_{j=1}^n Y_j / t_{ij}$$

ここに

- $Y_j$  = ゾーンjの集中交通量 (拡大後)
- $t_{ij}$  = OD交通ijの所要時間 (自動車, 公共交通機関, 自転車, 徒歩の平均値)
- $n$  = ゾーン数 (= 174)
- $r$  = 定数 (= 2)

指標を導入し, 統計的な有意性に基づいて変数選択を行う事とした.

構造方程式モデルは 4 本の方程式からなり, 以下の様に定式化される.

$$Y_i = B Y_i + \Gamma X_i + E_i \quad (1)$$

ここに

- $Y_i$  = 内生変数のベクトル,
- $X_i$  = 外生 (説明) 変数のベクトル,
- $E_i$  = 誤差項のベクトル,
- $B, \Gamma$  = 係数のマトリックス.

本モデルの推定に際しては, 変数に離散変数を含む事から, それらの離散変数に対応する連続な潜在変数を仮定し, ADF-WLS (Asymptotically distribution-free weighted least squares) 推定量<sup>11)</sup>を用いてモデルを推定した. 全ての変数が標準化された形でパラメータが推定さ

れているため, 係数の大小を比較する事により, 各説明変数の変数値の変化に対する感度を比較する事が可能である.

構造方程式モデルの全体的な適合度を表わす指標としては, 適合度指標 (GFI: Goodness of Fit Index) や修正適合度指標 (AGFI: Adjusted Goodness of Fit Index) が用いられる. 前者は構成したモデルがサンプルの共分散行列 (あるいは相関行列) を説明する割合を示した指標であり, 回帰分析における決定係数と同様のものである. ただし, GFI は係数のマトリックス,  $B, \Gamma$  内で 0 と固定しているパラメータについて因果関係の存在を仮定し, 推定パラメータに含めるほど 1 に近づくため, 見かけの適合度は常に改善されてしまう. それに対して AGFI は, 自由度を用いて GFI を修正した指標であり, より実際的な指標であると言える.

一方, 構造方程式モデルにおける $\chi^2$ 検定では, 帰無

表-7a LISREL モデル推定結果：通勤世帯（直接効果）

変数	通勤距離		自動車保有台数		通勤交通手段		エネルギー消費	
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値
通勤距離					0.545	36.7	0.153	21.9
自動車保有台数					2.142	114.3	0.387	51.1
世帯主 通勤交通手段							0.068	15.8
世帯人員数							0.100	20.8
勤労者数			0.039	21.9				
学生数	0.052	19.2	0.058	16.7	-0.058	-7.44		
世帯主 年齢	-0.185	-43.9						
世帯主 性別					-0.340	-44.6		
世帯主 免許保有			0.454	135.7				
世帯主 一次産業従事	0.067	14.1	0.296	55.2	-0.297	-25.1		
世帯主 二次産業従事	0.141	36.3	0.113	21.9	0.094	8.0		
居住ゾーン 人口密度	-0.035	-5.9	-0.309	-50.9	0.818	54.5		
居住ゾーン DID 人口比	-0.354	-34.6	0.129	27.8				
居住ゾーン 一次産業人口割合	0.020	2.8						
居住ゾーン アクセシビリティ	-0.628	-112.4			0.446	36.9		
勤務ゾーン 従業員密度	-0.071	-7.9	0.051	7.0	-0.235	-15.6	-0.052	-8.0
勤務ゾーン DID 人口比	0.443	40.5			-0.219	-20.7		
勤務ゾーン 一次産業人口割合	0.056	7.5						
勤務ゾーン 二次産業人口割合	0.021	4.1						
勤務ゾーン スーパー密度	0.211	34.0						
勤務ゾーン アクセシビリティ	0.873	107.1	-0.273	-39.0				
自動車所要時間 (自動車)-(公共)					0.277	40.5		
					-0.050	-9.1		

N=9,937;  $\chi^2 = 30,113$  (df=98); Goodness of Fit Index (GFI) = 1.00; Adjusted GFI = 1.00

表-7b LISREL モデル推定結果：通勤世帯（総効果）

変数	通勤距離		自動車保有台数		通勤交通手段		エネルギー消費	
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値
通勤距離					0.545	36.7	0.190	30.8
自動車保有台数					2.142	114.3	0.533	55.9
世帯主 通勤交通手段							0.068	15.8
世帯人員数							0.100	20.8
勤労者数			0.039	21.9	0.083	22.5	0.021	21.4
学生数	0.052	19.2	0.058	16.7	0.094	46.5	0.037	23.8
世帯主 年齢	-0.185	-43.9			-0.101	-33.8	-0.035	-26.4
世帯主 性別					-0.340	-44.6	-0.023	-13.9
世帯主 免許保有			0.454	135.7	0.972	222.6	0.242	59.0
世帯主 一次産業従事	0.067	14.1	0.296	55.2	0.373	42.1	0.150	45.8
世帯主 二次産業従事	0.141	36.3	0.113	21.9	0.413	59.8	0.093	34.0
居住ゾーン 人口密度	-0.035	-5.9	-0.309	-50.9	0.138	21.7	-0.115	-32.6
居住ゾーン DID 人口比	-0.354	-34.6	0.129	27.8	0.083	12.8	0.002	0.5
居住ゾーン 一次産業人口割合	0.020	2.8			0.011	2.82	0.004	2.82
居住ゾーン アクセシビリティ	-0.628	-112.4			0.104	16.5	-0.089	-18.6
勤務ゾーン 従業員密度	-0.071	-7.9	0.051	7.0	-0.164	-27.9	-0.054	-7.27
勤務ゾーン DID 人口比	0.443	40.5			0.022	3.3	0.070	19.4
勤務ゾーン 一次産業人口割合	0.056	7.5			0.030	7.3	0.011	7.3
勤務ゾーン 二次産業人口割合	0.021	4.1			0.011	4.1	0.004	4.1
勤務ゾーン スーパー密度	0.211	34.0			0.115	29.1	0.040	23.9
勤務ゾーン アクセシビリティ	0.873	107.1	-0.273	-39.0	-0.109	-15.8	0.020	3.1
自動車所要時間 (自動車)-(公共)					0.277	40.5	0.019	13.7
					-0.050	-9.1	-0.003	-7.8

仮説が「構成されたモデルが正しい」であり、対立仮説が「構成されたモデルは正しくない」という設定となっているため、モデルが積極的に支持される事がないとい

う欠点を持つ。また、 $\chi^2$ 検定による検定は、サンプル数に大きな影響を受け、サンプル数が多いほど棄却される可能性が高くなるという性質を持っている。

勤労世帯についてのモデルの推定結果が表-7a に示されている。まず通勤距離に着目する。アクセシビリティ指標が大きな効果を持ち、通勤距離は居住ゾーンのアクセシビリティ指標と負の相関を、勤務ゾーンの指標と正の相関を持つことが推定係数により示されている。都市化の指標である DID 人口比のパラメータの推定値は、勤務ゾーンの都市化に伴い、また居住ゾーンの都市化に反して、通勤距離が増加する傾向にあることを示している。世帯主が高齢の場合通勤距離が短く、世帯主が第二次産業に従事している場合通勤距離が長い傾向にあることも示されている。

世帯の自動車保有台数の説明変数としては、世帯主の免許保有、居住地人口密度、世帯主の一次産業従事、勤務地アクセシビリティが主要なものである。多くの先行研究が土地利用密度と自動車保有台数の関係において示唆しているように、保有台数は、居住地人口密度および勤務地アクセシビリティと負の相関を持つ。世帯主が運転免許を保有する場合、また第一次産業に従事する場合、保有台数が多くなるが示されている。ここでの推定結果は、ほかの条件が等しいとすれば、世帯主が第三次産業に従事する世帯の保有台数が最も少ない傾向にあることを示している。これらに加え、就業者数、学生数の多い世帯の保有台数が多い傾向にあることも示されている。

世帯主の通勤交通手段は、外生変数に加え、通勤距離と自動車保有台数の二つの内生変数の関数として定式化されている。このため各説明変数の効果を表-7b に示す総効果 (total effects) の推定値に基づいて概観することとする<sup>1)</sup>。通勤交通手段選択の主要説明変数は世帯主の免許保有と自動車保有台数で、期待されるとおり自動車利用と正の相関を持っている。これらに続き、世帯主が第二次産業に従事している場合、また世帯内学生数が多い場合に自動車を利用する傾向にあることが示されている。自動車保有と同様、世帯主が第三次産業に従事する場合自動車利用の傾向は最も低い。また女性や高齢の世帯主は自動車を利用しない傾向にあることが結果から分かる。ここに見られる結果は文献に見られるこれまでの結果と整合するものである<sup>1)</sup>。

通勤での自動車利用は勤務ゾーンの従業員密度とアクセシビリティと負の相関を持ち、高密度地域に就業する場合に自動車を利用しない傾向にあることを示している。逆に居住ゾーンの DID 人口比とアクセシビリティとは正の相関を持つ。これは、通勤距離のモデルで示されたように高密度地域に居住する場合通勤距離が短い傾向にあり、自動車が相対的に優位になるためかと考えられる。しかしながら、通勤距離は全体として自動車利用と正の相関を持ち、通勤距離が長いほど自動車利用の傾向が高いことが示されている。自動車と公共交通機

関の所要時間差は負の符号を持ち、所要時間の短い通勤交通機関選択が選択される傾向にあることを示している。自動車所要時間は極めて有意な正の推定値を持つ結果となっている。これは、この変数が居住地と勤務地間の連結性の代理指標として機能を果たしているためかと考えられる。全体として、勤務地から遠く居住する場合に自動車保有と通勤目的の利用が共に増加する傾向にあることが示されている。

世帯の交通エネルギー消費量への直接効果に着目すると、自動車保有台数、通勤距離、世帯人員数が主要因であることが分かる。通勤での自動車利用はエネルギー消費量と正の相関を持つものの、その統計的有為性は自動車保有台数に比べて小さい。これは、自動車保有台数が通勤交通手段を良く説明している事と、自動車保有世帯が通勤以外にも自動車を利用するためであると考えられる。

総効果に着目すると自動車保有台数、世帯主の免許保有、通勤距離、第一次産業従事、第二次産業従事、居住地人口密度等が大きな正の効果を持っている。居住地の人口密度とアクセシビリティは負の効果を持っており、高密度で都市化した地域に住む世帯ほどエネルギー消費量が少ないことを実証している。同様に勤務地の人口密度は負の効果を持つが、アクセシビリティと DID 人口比、スーパー密度については正の係数が得られている。これらは勤務地のアクセシビリティが高く、高度に都市化、商業化されている場合には、勤務地近辺でのトリップが誘発されやすいためであると考えられる。しかしながら、これらの変数の影響は比較的小さい。

以上の構造方程式モデルは、世帯属性に加え居住地属性と勤務地属性を与件として、世帯の通勤距離、自動車保有台数、通勤交通手段及び交通エネルギー消費量を予測するものである。今回の推定では豊富なサンプル数と説明変数の説明力の高さによって、GFI, AGFI のいずれの指標も 1.00 とモデルがサンプルに完全に適合しているとの結果となっており、いくつかのパラメータの  $t$  値も非常に大きな値となった。 $\chi^2$  値は非常に大きくなっているが、これはサンプル数が大きい事によるものと考えられる。これらの結果から、モデルの推定結果は統計的に有為であると同時に全体として整合性が高く、理論的に期待される結果が得られていると言える。なお非勤労世帯のモデルの推定結果を附表-1 に示す。

#### 4. 土地利用政策の有効性の分析

本節では前節に示した構造方程式モデルを用いたシミュレーションにより土地利用政策がエネルギー消費削減にどれほど有効なのかを検討する。同様のシミュレーション解析が森本ら<sup>7)</sup> によりなされているが、本研究の

表-8 土地利用政策の交通エネルギー削減効果

対象	通勤世帯		非通勤世帯		全世帯	
	世帯数	平均 <sup>†</sup> 変化率	平均 変化率	平均 変化率	平均 変化率	
政策1	856	118.7 -7.3%	19.14 -2.5%	100.2 -7.1%		
政策2 (20%)	254	126.6 -1.0%	19.63 -0.0%	106.8 -1.0%		
政策2 (50%)	637	124.8 -2.5%	19.63 -0.0%	105.3 -2.4%		
政策2 (100%)	1295	121.4 -5.1%	19.63 -0.0%	102.6 -4.9%		
政策3	258	126.7 -1.0%	19.59 -0.2%	106.9 -1.0%		
政策4	155	126.9 -0.9%	19.57 -0.3%	107.0 -0.8%		
政策5	413	125.5 -1.9%	19.54 -0.5%	105.9 -1.9%		

通勤世帯数 = 9,937, 非通勤世帯数 = 2,256, 総世帯数 = 12,193  
<sup>†</sup>単位: 100 kcal

表-9 政策対象となった世帯の平均交通エネルギー消費

政策	世帯数	政策前 <sup>†</sup> 政策後 <sup>†</sup>		削減量	削減率
		政策前 <sup>†</sup>	政策後 <sup>†</sup>		
政策1	856	16,645	9,469	7,176	43.1%
政策2 (100%)	1295	18,740	13,452	5,288	28.2%
政策3	258	10,838	6,022	4,816	44.4%
政策4	155	14,464	8,267	6,197	42.8%

<sup>†</sup>構造方程式モデルによる推定値, 単位: 100 kcal

シミュレーションは構造方程式モデルに基づいてエネルギー消費と相関のある個人・世帯属性や地域属性を組み込んだものとなっている。更に自動車保有、通勤機関選択を内生化し、世帯の移転に伴う諸変化をより現実的に捉えた上でエネルギー消費の変化を推定するものである。

この研究では以下の政策が検討されている。

- 政策1. 職住近接—都市圏ベース
- 政策2. 職住近接—通勤距離ベース
- 政策3. 都市部居住—単身世帯
- 政策4. 都市部居住—男女対世帯
- 政策5. 都市部居住—単身世帯+男女対世帯

政策1は大阪、京都、神戸の各都市圏に世帯主が勤務する世帯のそれぞれの都市圏内への移住を図るものである。ここで各都市圏は大阪、京都、神戸の都心部より公共交通機関による所要時間が60分以内のゾーンより成るものとしている。大阪、京都、神戸のいずれかの市に勤務し、該当都市圏内に居住しない世帯は、勤務市内の各区に、区の人口に比例する割合で移住するものとする。都市圏内でこれら三市以外の市町村に勤務し該当都市圏内に居住しない世帯は、勤務市町村に居住するものとする。既に同一都市圏内で居住・勤務している世帯は移住の対象としていない<sup>6)</sup>。

政策2は通勤距離が20 km以上の世帯の勤務地を居住市区町村に移すというものである。該当世帯の20%、50%および100%の3レベルで勤務地の移転を想定している。政策3では大阪、京都、神戸の三市に勤務する単身者の勤務市内への移住を図るものである。移住先は政策1における様に人口に比例する形で各市内の区に無作為に割り振られるものとする。政策4は同様の政策で、男女対世帯を対象としたものである。また政策5は政策

3と4を同時に遂行するものである。

これらの仮想的政策の下、パーソン・トリップ・データで移住対象となるサンプル世帯の居住地あるいは勤務地を政策に従って変更、各々の世帯の通勤距離をゾーン間距離として決定した後、モデルの残る3式を用い自動車保有台数、通勤交通手段、交通エネルギー消費量を構造方程式モデルを用いたシミュレーションにより求めている。計算に際して居住地人口密度と勤務地従業員密度は移転を反映する形で修正している。DID人口比、一次・二次産業人口割合、スーパー密度、アクセシビリティ、自動車・公共交通所要時間については変化ないものとした。なおここでの解析はモデル推定に用いた12,193サンプル世帯を用い、拡大係数は適用していない。結果を表-8に示す。

政策対象となるサンプル世帯数は政策2の1,295世帯(全サンプル世帯の10.6%)が最大で、政策4の155世帯(1.27%)が最小である。交通エネルギー消費量の削減総量は政策1の7.1%から政策4の0.8%までの幅をもっている。全体として見れば、全世帯に占める政策対象世帯の割合にほぼ等しい率の消費量削減が可能とすることが出来よう。しかしながら以下に見るように、政策によりエネルギー削減効果にかなりのばらつきがある。なお政策対象とならない非通勤世帯でエネルギー消費量削減が政策により見られるのは通勤世帯の移転に伴う居住地人口密度の変化によるものである。

表-8より政策1が政策2～5に比べより削減効果の大きいものであることは明らかであろう。政策1を対象となる856世帯(サンプル世帯の7.0%)に適用した場合7.1%の削減が達成されるが、政策5を対象となる413世帯(3.4%)に適用した場合の削減率は1.9%に過ぎず、政策2を1,295世帯(10.6%)に適用した場合も4.9%に留まっている。この理由としていくつかの点が考えられる。まず政策1は政策3～5に比べて対象となる世帯数が多いという点を挙げることが出来る。第二に政策3～5が対象とする世帯は小規模世帯であり、エネルギー消費絶対量が少ないという点を挙げることが出来る。第三に政策2は勤務地の移転を図るものであり、政策1とは異なり消費エネルギーの削減が見込まれる都心部への居住地移転効果が得られないという点を挙げることが出来る。なお政策対象世帯の属性を附表-2に示す。

表-9はモデルを用いて推定した「政策前」と「政策後」の世帯エネルギー消費量を政策毎に示したものである<sup>7)</sup>。政策1と2が対象とする世帯は政策前の平均消費量が、政策3と4が対象とする世帯の1.15倍から1.73倍となっている。エネルギー消費性向の高い世帯を対象とする政策がより効率の良いものであることは明らかである。

この結果は交通エネルギー消費削減に向けて土地利用形態・都市構造の変更を目指す政策のはらむジレンマを示している。職住近接・都心居住等の政策に対応しやすい世帯は、単身世帯や若い男女対世帯等と考えられるが、これら世帯は政策1や政策2が対象とする世帯に比べて交通エネルギーの平均消費量が低く、対象となる世帯数が少ないため、削減率は大きいものの政策実施に伴う総エネルギー消費削減量は小さく、政策の効果は限られたものと考えられる。

逆に長距離通勤世帯を対象とする政策は人員数が多くエネルギー消費性向の高い世帯を対象とした効率の高いものであるが、対象世帯が郊外志向の家族中心と考えられ<sup>9)</sup>都市部への移住に抵抗が大きいと考えられる。従ってこのような政策を成功裏に実施するためには、住宅の整備のみならず質の高い学校や公園等の生活基盤の整備が望まれる。いかにしてこれらの世帯が好むような、しかもエネルギー効率の高い環境を整備していくかが課題である。

今後第三次産業の比重が更に高まり情報化も進展すると期待され、労働力マーケットにより近接し、また地価の安い郊外の立地条件は相対的に高まるであろうという意味において、政策2は現実性のあるものである。この政策は、政策1と同様にエネルギー消費性向の高い世帯を対象とするものの、削減率が低いため政策1に比べて効果の大きいものではないことが表9から分かる。この政策の交通エネルギー削減効率が比較的低いという結果は、職場が郊外に進出した分散型の都市構造は省エネルギーに繋がるもののその効果は限られたものであろうことを示唆している。また、ここでの解析は対象とするサンプル世帯のみを考慮し、各々の職場への他の通勤者の属する世帯のエネルギー消費は一切検討していない。また物流の変化に伴うエネルギー消費の変化も分析されておらず、果たして分散型の都市が省エネルギーに貢献するかどうかについては更なる検討が必要である<sup>10)</sup>。

## 5. 結論

本研究では世帯の交通エネルギー消費量、通勤交通機関、自動車保有台数、通勤距離を内生変数とする構造方程式モデルを1990年京阪神パーソン・トリップ調査結果を用いて推定、世帯の交通エネルギー消費性向に考察を加えると同時に、通勤距離を外生変数として取り扱い、このモデルを土地利用政策のエネルギー消費削減効果の分析に適用した。構造方程式モデルを適用することにより、交通エネルギー消費に影響を及ぼす各種要因を考慮し、自動車保有等の変化をも視野に入れた分析を行っており、本研究の解析は従来の同種の解析に比べより緻密なものとなっている。

しかしながら、個々のトリップを明示的にモデル化していないという点で本研究の手法は簡便法と位置づけられよう。更に、世帯の交通エネルギー消費にのみ着目し、居住地・勤務地の移転に伴う流通交通等のエネルギー消費の変化は考慮されていない、世帯や商業施設等が土地利用政策にどう対応するかを行動学的分析するものではない、自動車保有や土地利用の長期的性向を捉えたものではなく、土地利用政策の長期的効果を考慮していない、等の点で本研究の解析は限界を持つものである。これら限界を踏まえつつ、本研究の結果とそれが提示する将来の研究の方向性を以下に要約する。

モデルの推定結果から、エネルギー消費に影響を及ぼす主要因は世帯の自動車保有台数(+), 通勤距離(+), 世帯人員数(+), 等であることが分かった<sup>10)</sup>。ただし、自動車保有台数については保有する事に直接の原因があるのではなく、保有自動車の利用が影響を与えているのであり、保有と利用の現状の関係を変えていく事が課題となる。また通勤距離に影響を与える要因として勤務ゾーン・アクセシビリティ(+), 居住ゾーン・アクセシビリティ(-), 勤務ゾーン DID 人口比(+), 居住ゾーン DID 人口比(-)が、自動車保有台数に影響を与える要因として世帯主の免許保有(+), 居住ゾーン人口密度(-), 世帯主第一次産業従事(+), 勤務ゾーン・アクセシビリティ(-)等があることが示された。推定結果はより高密度で職住近接型の土地利用を推進することにより世帯の交通エネルギー消費を削減することが可能であることを示唆している。

この構造方程式モデルを用いた政策分析の結果、単身世帯、男女対世帯を対象とした都心居住は、これら世帯の平均消費量が相対的に小さいため余り効果の無いものであることが示された。職住近接政策はエネルギー消費性向の高い世帯を対象とした場合より有効であるが、これら世帯は外延部に居住する家族世帯が中心で、これら世帯の都市圏中心部での居住の推進に当たっては困難な課題が存在することが予想される。また長距離通勤世帯の勤務地を居住地近辺に移転する政策の効果も勤務地近辺への居住地移転と比較して相対的に限られたものであることが示された。

既に高密度・混在型の土地利用が展開し自動車利用率が比較的低い京阪神都市圏で世帯交通エネルギー消費の大幅な削減を図るとすれば、都市圏外延部に居住し長距離通勤を行う世帯を対象とする土地利用政策が必要となることを本研究の結果は示唆している。このような政策の現実性を評価するためには、家族世帯が必要とする住宅を始めとする諸生活基盤施設の都市中心部での整備の可能性に加え、政策の対象となる世帯が政策にどう対応するかを行動学的に検討することが将来の研究において必要であろう。勤務地の移転に関しては、物流交通も

附表一a LISREL モデル推定結果：非通勤世帯（直接効果）

変数	自動車保有台数		エネルギー消費	
	推定値	t値	推定値	t値
自動車保有台数			0.180	13.7
世帯人員数	0.347	10.0		
子供数	0.196	7.8		
学生数	-0.436	-17.6	0.145	15.5
世帯主 年齢	-0.331	-16.2		
世帯主 性別	-0.386	-18.9		
世帯主 免許保有	0.795	75.9		
居住ゾーン人口密度	-0.059	-4.8	-0.068	-7.70
居住ゾーンアクセル <sup>1)</sup> リテー	-0.069	-6.4		

N=2256;  $\chi^2 = 481.5394$  (df=24);

Goodness of Fit Index (GFI) = 1.00; Adjusted GFI = 1.00

附表一b LISREL モデル推定結果：非通勤世帯（総効果）

変数	自動車保有台数		エネルギー消費	
	推定値	t値	推定値	t値
自動車保有台数			0.180	13.7
世帯人員数	0.347	10.0	0.063	8.1
子供数	0.196	7.8	0.035	6.7
学生数	-0.436	-17.6	0.066	6.0
世帯主 年齢	-0.331	-16.2	-0.060	-11.4
世帯主 性別	-0.386	-18.9	-0.069	-11.5
世帯主 免許保有	0.795	75.9	0.143	13.8
居住ゾーン人口密度	-0.059	-4.8	-0.079	-8.8
居住ゾーンアクセル <sup>1)</sup> リテー	-0.069	-6.4	-0.012	-5.9

附表二 政策対象世帯の諸属性<sup>†</sup>

	政策1	政策2	政策3	政策4	政策5	全体
対象世帯数	856	1295	258	155	413	12193
世帯人員数	3.27	3.22	1.00	2.00	1.38	2.72
通勤距離(km)	25.3	30.9	17.3	19.4	18.1	9.6
自動車保有台数	1.07	0.99	0.60	0.92	0.72	0.90
DID人口比 (%)	69.4	77.7	92.5	88.0	90.8	85.4
昼夜人口比 (%)	84.2	88.9	90.8	87.0	89.4	101.0
1次産業人口割合 (%)	2.9	2.5	1.3	1.2	1.2	1.8
2次産業人口割合 (%)	33.7	33.3	33.9	35.2	34.4	34.0
民営事業所密度 (軒/km <sup>2</sup> )	488	824	1295	1185	1254	1102
小売店密度 (軒/km <sup>2</sup> )	13.9	22.2	31.6	29.7	30.9	26.7
スーパー密度 (軒/km <sup>2</sup> )	0.0129	0.0187	0.0219	0.0215	0.0217	0.0181
飲食店密度 (軒/km <sup>2</sup> )	4.41	7.95	12.69	11.49	12.24	10.63
金融機関密度 (軒/km <sup>2</sup> )	0.0240	0.0382	0.0518	0.0488	0.0507	0.0451

<sup>†</sup>政策対象となる世帯の平均値を示す。

含め勤務地の地理的分布の変化が交通エネルギー消費に及ぼす影響を推定する必要がある。またこれまでの研究では土地利用の変更、あるいは世帯や政府・産業組織の転移そのものに伴うエネルギー消費は考慮されてこなかったが、これらエネルギー量を推定し解析に組み入れることが望まれよう。

注

- [1] パーソン・トリップ・データを交通エネルギー消費と推定に適用した例としては森本<sup>7)</sup>、関・石田<sup>8)</sup>などがある。
- [2] カタログ等で自動車と二輪車の燃費を調べた結果、二輪車の平均が乗用車の平均の3.81倍であったことから、自動車の消費係数を3.81で除して、それを二輪車の消費係数として用いた。平均乗車人数の相違については考慮していない。
- [3] 解析の際に土地利用等のデータが入手されていなかった滋賀県と京都府の一部市町村に居住または勤務する世帯を除く。
- [4] ある外生変数の値が変化するとき、それがある内生変数に直接与える効果が直接効果 (direct effect) である。一般に内生変数は外生変数のみならず他の内生変数の関数でもある。外生変数の変化が、他の内生変数に与える効果を通じて、当該の内生変数に与える効果は間接効果 (indirect effect) と呼ばれる。両者を重ねあわせたものが総効果である。総効果の各パラメータは、直接効果の各パラメータ推定値の積和によって算出する事が可能である。一方、t値の算出に

際しては、 $\delta$ 法 (delta method)<sup>12)</sup>を用いる事により算出する事が可能となっている<sup>13)</sup>。

- [5] 通勤距離を内生変数としているので自動車所要時間は外生変数とは考え難いものであるが、このモデルのシミュレーション予測への適用に際して有用となるため説明変数として導入している。程度の差はあるが (自動車) - (公共) に示される旅行時間差についても同様である。なお後述のようにシミュレーションでは通勤距離を外生変数として扱っている。
- [6] 同一市町村が複数の都市圏に含まれるため、特定の世帯について、ある都市圏から見ると移住対象世帯であるが、別の都市圏から見るとそうでない場合が生じる。例として宇治市に居住し枚方市に勤務する世帯を考える。枚方市は大阪、京都両都市圏に含まれるが、宇治市は京都都市圏のみ含まれる。このため大阪都市圏から見るとこの世帯は移住の対象となるが、京都都市圏から見れば移住の対象とならない。このような場合には移住を行わないものとする。
- [7] 政策5は政策3と政策4を重ね合わせたものなので、この表には示されていない。
- [8] 政策2の対象となる通勤距離20km以上の長距離通勤世帯 (13,317世帯) の平均世帯人員数が3.25人なのに対し、その他の世帯 (108,615世帯) の平均人員数は2.62人である。
- [9] 森本<sup>7)</sup>の東京都市圏での解析結果では勤務地の分散は必ずしも削減に繋がらないことが示されている。
- [10] 正の影響を与える要因を“(+)”で、負の影響を与える要因を“(-)”で示す。

## 参考文献

- 1) 松岡謙, 森田恒幸, 有村俊秀: 都市構造及び都市配置と地球温暖化, 環境研究, No. 86, pp. 51-65, 1992.
- 2) 高見淳史, 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 自動車利用削減のための土地利用/交通施策に関する議論の整理, 土木計画学研究・講演集, No. 20(2), pp. 153-56, 1997.
- 3) 太田勝敏(編著): 新しい交通まちづくりの思想—コミュニティからのアプローチ, 鹿島出版会, 東京, 1998.
- 4) 運輸政策局: 運輸経済統計要覧, 大蔵省印刷局, 1993
- 5) 林良嗣, 富田安夫, 土井健司, スバラット・リチカ, 加藤博和: 都市交通によるエネルギー消費およびその環境負荷への影響に関する比較, 土木計画学研究・講演集, No. 15(1), pp. 939-44, 1992.
- 6) 藤田壮, 盛岡通: 環境負荷を軽減する都市エネルギー施策とその社会的受容性の評価基準についての考察, 土木計画学研究・講演集, No. 17, pp. 487-90, 1995.
- 7) 森本章倫, 小美野智紀, 品川純一, 森田哲夫: 東京都市圏における PT データを用いた輸送エネルギー推計と都市構造に関する実証的研究, 土木計画学研究・論文集, No. 13, pp. 361-68, 1996.
- 8) 関恵子, 石田東生: 東京都市圏における交通部門のエネルギー消費と個人特性・地域特性との関連性, 土木計画学研究・講演集, No. 19(1), pp. 537-40, 1996.
- 9) 川端彰, 明神証, 天野雅人: 都市交通によるエネルギー消費の推計, 土木計画学研究・講演集, No. 16(1), pp. 1041-47, 1993.
- 10) 運輸政策局: 運輸関係エネルギー要覧, 大蔵省印刷局, 1993.
- 11) Jöreskog, K. and Sörbom, D.: *LISREL 8: User's Reference Guide*, Scientific Software International Inc., 1996.
- 12) Sobel, M.: Asymptotic confidence intervals for indirect effects in structural equation models. In S. Leinhardt (ed.): *Sociological Methodology 1982*, San Francisco: Jossey Bass, 1982.
- 13) Bollen, K. A.: *Structural equations with latent variables*, New York, Wiley, 1989.

(1998.9.28 受付)

## THE EFFECTIVENESS OF LAND-USE POLICIES IN HIGH-DENSITY METROPOLITAN AREAS: AN ENERGY CONSERVATION PERSPECTIVE

Ryuichi KITAMURA, Toshiyuki YAMAMOTO and Ryo KAMIO

A structural equations models system, whose endogenous variables are household transportation energy consumption, work trip travel mode, vehicle holdings, and commute distance, is developed using the results of 1990 Kei-Han-Shin (Kyoto, Osaka and Kobe) household travel survey. The energy consumption characteristics of the household are explored using the model system, and the effectiveness of alternative land-use policies in reducing transportation energy consumption is evaluated by applying the model system while treating the commute distance as an exogenous variable. The estimation results indicate that it is possible to reduce household energy consumption by promoting high density land use development and encouraging job-residence proximity. In the Kei-Han-Shin metropolitan area where high-density and mixed land use already prevails and auto use is relatively low, however, an attempt to reduce household transportation energy consumption appreciably would require policies that target households of higher propensity toward energy consumption which tend to reside in the outskirts of the metropolitan area and commute long distances.